

EMPIRIČNI MODEL ZA KOREKCIJO VPLIVA LUNE PRI ANALIZI MERITEV SVETLOBNE ONESNAŽENOSTI

MELANI POTRČ¹, DAMJAN DOVNIK², KLEMEN
TRŠINAR³, MITJA SLAVINEC⁴ IN EVA KLEMENČIČ^{5,6}

Sprejeto

25. 11. 2025

Recenzirano

18. 2. 2026

Izdano

31. 7. 2026

**Znanstvena veda:
Naravoslovje****Ključne besede:**

svetlobna
onesnaženost,
SQM,
Lunina
svetloba,
empirični
model,
korekcija.

¹ Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Maribor, Slovenija, e-naslov:

melani.potrc1@um.si

² Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Maribor, Slovenija, e-naslov:

damjan.dovnik@student.um.si

³ Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Maribor, Slovenija, e-naslov:

klemen.trsinar@student.um.si

⁴ Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Maribor, Slovenija in Pomursko akademsko znanstvena unija, Murska Sobota, Slovenija, e-naslov: mitja.slavinec@um.si

⁵ Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Maribor, Slovenija in Univerza v Mariboru, Fakulteta za energetiko, Krško, Slovenija in Pomursko akademsko znanstvena unija, Murska Sobota, Slovenija, e-naslov: eva.klemencic@um.si

DOPISNA AVTORICA

eva.klemencic@um.si

V prispevku predstavimo enomesečne meritve svetlosti neba z merilnikom Sky Quality Meter na ruralni lokaciji. Meritve so potekale v enournih serijah s petminutnimi intervali, pri čemer so bili zabeleženi tudi vremenski pogoji ter položaj in osvetljenost Lune. Analiza meritev kaže izrazit vpliv osvetljenosti in položaja Lune ter oblačnosti na svetlost nočnega neba. Na podlagi ugotovitev oblikujemo empirični model, ki upošteva osvetljenost diska, višino nad obzorjem, zračno maso in atmosfersko ekstinkcijo. Model dobro opiše izmerjene podatke in omogoča pretvorbo meritev v ekvivalentne temne noči brez Lune. Korekcija zmanjša razpršenost med nočmi ter omogoča zanesljivejše ocenjevanje umetnega prispevka k svetlobnemu onesnaženju.



EMPIRICAL MODEL FOR CORRECTING THE INFLUENCE OF THE MOON IN THE ANALYSIS OF LIGHT POLLUTION MEASUREMENTS

MELANI POTRČ¹, DAMJAN DOVNIK², KLEMEN TRŠINAR³, MITJA SLAVINEC⁴ AND EVA KLEMENČIČ^{5,6}

¹ University of Maribor, Faculty of Natural Sciences and Mathematics, Maribor, Slovenia, e-mail: melani.potrc1@um.si.

² University of Maribor, Faculty of Natural Sciences and Mathematics, Maribor, Slovenia, e-mail: damjan.dovnik@student.um.si.

³ University of Maribor, Faculty of Natural Sciences and Mathematics, Maribor, Slovenia, e-mail: klemen.trsinar@student.um.si.

⁴ University of Maribor, Faculty of Natural Sciences and Mathematics, Maribor, Slovenia & Pomurje Academic Scientific Union, Murska Sobota, Slovenia, e-mail: mitja.slavinec@um.si.

⁵ University of Maribor, Faculty of Natural Sciences and Mathematics, Maribor, Slovenia & University of Maribor, Faculty of Energy Technology, Krško, Slovenia & Pomurje Academic Scientific Union, Murska Sobota, Slovenia, e-mail: eva.klemencic@um.si.

CORRESPONDING AUTHOR
eva.klemencic@um.si

In this study, we present one-month measurements of sky brightness using a Sky Quality Meter in a rural location. The measurements were taken in one-hour series at five-minute intervals, with weather conditions, Moon position, and Moon brightness also recorded. Analysis of the measurements shows a marked influence of the Moon's illumination and position, as well as cloud cover. Based on the findings, we develop an empirical model that considers the illumination of the disk, the height above the horizon, the air mass, and atmospheric extinction. The model accurately describes the measured data and allows the measurements to be converted into equivalent dark nights without the Moon. The correction reduces the variation between nights and allows for a more reliable assessment of the artificial contribution to light pollution.

Accepted
25. 11. 2025

Revised
18. 2. 2026

Published
31. 7. 2026

Science:
Natural Science

Keywords:
light pollution,
SQM,
Moonlight,
Empirical
model,
correction.

1 Uvod

Svetlobno onesnaženje, opredeljeno kot čezmerna ali neustrezno usmerjena umetna osvetlitev, zaradi številnih negativnih vplivov na ekosisteme in človeka, dobiva vse več pozornosti (Puschig et al., 2022). Nočna umetna razsvetljava moti vedenjske in fiziološke vzorce številnih vrst, vpliva na človeški cirkadiani ritem ter poslabšuje razmere za astronomska opazovanja (Aubé et al., 2013; Bará & Falchi, 2023; Falchi et al., 2011; Jamal et al., 2022). Naravni cikel svetlobe in teme je ključen za normalno delovanje bioloških sistemov, vse od molekul do celotnega ekosistema. Posebno pomemben je za organizme, katerih življenje in življenjski procesi so tesno povezani z dnevno-nočnimi vzorci. Uvajanje umetne svetlobe v zadnjih 100 letih ta naravni ritem izrazito moti. V tem kontekstu se je uveljavil angleški izraz »Artificial light at night« (ALAN), ki označuje umetno podaljševanje svetlobnega cikla v temni del dneva z umetnimi svetili (Falcón et al., 2020; Sanders et al., 2022). Med antropogene dejavnike, ki spreminjajo nočno krajino, uvrščamo ulična svetila, razsvetljavo ob avtocestah in drugih prometnicah, žaromete vozil, svetlobne elemente cestnih označb (semaforje ...), osvetljenost stadionov in cerkva ter svetlobo, ki se skozi okna širi v okolico (Owens & Lewis, 2018). Ti viri so bili uvedeni predvsem zaradi zagotavljanja osebne in prometne varnosti ter povečanja produktivnosti, hkrati pa omogočajo izvajanje večernih aktivnosti, kot so branje, gledanje televizije in druženje (Gara, 2023). Vendar pa ima umetna svetloba ob pomanjkljivi regulaciji številne negativne učinke, ki se odražajo tako na ljudeh kot tudi pri rastlinah in živalih. Vpliv ALAN se kaže v motnjah prostorske (fototaksija, fototropizem) in časovne (cirkadiani ritem) orientacije. Posledice vključujejo motnje v dnevno-nočnem ritmu in kakovosti spanja, vpliv na psihično stanje, spremembe v vedenjskih vzorcih živali, upad biodiverzitete ter učinke na rast in razvoj organizmov. Dolgotrajna izpostavljenost umetni svetlobi ponoči lahko poruši naravno ravnovesje ekosistemov in ogrozi njihovo dolgoročno stabilnost (Falcón et al., 2020). Zato sta zanesljivo merjenje in primerljivo poročanje o svetlosti nočnega neba ključna za razumevanje prostorsko-časovne dinamike pojava in za evalvacijo učinkovitosti ukrepov pri razsvetljavi.

Metodološko se spremljanje svetlobnega onesnaženja naslanja na satelitsko daljinsko zaznavanje in meritve na tleh. Satelitski sistemi, kot sta DMSP/OLS in VIIRS, omogočajo obsežne ocene nočnih emisij v vidnem in infrardečem delu spektra ter s tem razkrivajo prostorske in časovne trende umetne razsvetljave na regionalnih in

globalnih skalah (Levin et al., 2020; Sánchez De Miguel et al., 2017). Kljub temu so tovrstne ocene omejene s prostorsko ločljivostjo in vplivi atmosfere. Napredki v visoko-ločljivostnih senzorjih in algoritmih strojnega učenja te omejitve deloma blažijo, ne odpravijo pa potrebe po lokalnih validacijah (Hänel et al., 2018; C. Kyba et al., 2021). Meritve na tleh zagotavljajo podatke visoke lokalne ločljivosti in dopolnjujejo satelitske vpoglede (Aubé, 2015). Med najpogostejše uporabljenimi pristopi sta merilnik kakovosti neba (Sky Quality Meter, SQM), ki meri svetlost v enoti $\text{mag}/\text{arcsec}^2$, ter slikanje celotnega neba (Sky Quality Meter, 2021). Slikanje celotnega neba ponuja celostno prostorsko sliko svetlosti in olajša identifikacijo virov, vendar zahteva specializirano opremo in zahtevnejšo obdelavo (Posch et al., 2018; Small & Elvidge, 2013). Po drugi strani pa je SQM zaradi dostopnosti, preproste uporabe in možnosti dolgoročnega vzorčenja široko uveljavljen. Zavedati pa se je treba, da je SQM točkovna metoda, občutljiva na lokalne motnje in vremenske razmere (Hänel et al., 2018; Jechow et al., 2018; Puschnig et al., 2022; Sánchez De Miguel et al., 2017; Žiberna, 2016). Prav zato je pomemben izziv pri interpretaciji talnih meritev, zlasti pri SQM, ločevanje naravnega in antropogenega prispevka k svetlosti neba. Naravna lunina svetloba, odvisna od faze, višine nad obzorjem in atmosferske ekstinkcije, lahko bistveno spremeni izmerjene vrednosti in s tem prikrije dejanski umetni prispevek.

V tem prispevku predstavljamo izvedbo meritve s SQM-L in na podlagi rezultatov razvit empirični korekcijski model luninega prispevka. Najprej na kratko opišemo merilni sistem in zajem podatkov ter podamo opisno analizo odvisnosti svetlosti neba od Lune in oblačnosti. Sledi razvoj in validacija empiričnega modela, kjer pokažemo, v kolikšni meri korekcija izboljša oceno umetnega prispevka in zanesljivost analize trendov.

2 Metodologija

2.1 Merilni sistem

Meritve osvetljenosti smo izvajali s prenosnim merilnikom Sky Quality Meter L (SQM-L), proizvajalca Unihedron (Sky Quality Meter, 2021), ki je specifično zasnovan za kvantitativno določanje svetlosti nočnega neba (slika 1a). Naprava meri povprečno svetlost v zenitu oziroma smeri, v katero je usmerjena, v enoti magnitude na kvadratno ločno sekundo ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$), ki velja za standardno enoto v

astronomiji in okoljskih študijah svetlobnega onesnaženja. Magnituda je številčna mera svetlosti nebesnega telesa:

$$m = -2,5 \log \left(\frac{L}{L_0} \right), \quad (1)$$

kjer sta L izmerjeni svetlobni tok nebesnega telesa, L_0 pa referenčni tok. Lestvica je logaritemska, zato razlika 5 magnitud pomeni 100-kratno razliko v svetlobnem toku, pri čemer manjša magnituda pomeni svetlejši objekt.

Merilnik zajema ozek kotni snop (20° polnega kotnega vidnega polja), kar omogoča natančno merjenje svetlosti v specifični smeri in zmanjšuje vpliv lokalnih virov svetlobe izven merilnega območja. Natančnost meritve je $\pm 0,1$ mag/arcsec². Rezultati se izpišejo na digitalnem zaslonu že na samem terenu. Višje vrednosti pomenijo temnejše nebo, nižje pa svetlejše (močnejše onesnaženo). Pred izvedbo meritev je bil merilnik stabiliziran pri zunanji temperaturi, približno 5 minut. Meritve so bile izvedene v času astronomske noči, brez prisotnosti neposrednih lokalnih virov svetlobe v bližini merilnega mesta. Merilnik je bil postavljen na višini 2,0 m od tal in usmerjen v zenit (slika 1b).



Slika 1: (a) Merilni instrument SQM-L (*Sky Quality Meter*, 2021) in (b) postavitev merilnika.

Meritve so bile izvedene v naselju Biš v občini Trnovska vas. Gre za ruralno, podeželsko okolje v severovzhodni Sloveniji z nizko gostoto prebivalstva in številnimi kmetijskimi površinami, kjer je še zmeraj minimalen vpliv urbanega svetlobnega onesnaženja na nočno nebo. Za izvedbo meritev smo izbrali odprt

travnik, ki je oddaljen od neposrednih virov umetne svetlobe, kot so ulične svetilke, hiše in prometne poti (slika 2a in 2b). V neposredni bližini ni bilo nobenih visokih stavb ali rastlin, ki bi lahko vplivale na lokalno razpršitev svetlobe. Koordinate izbrane lokacije so $46,52752^{\circ}$ N, $15,88402^{\circ}$ E, nadmorska višina pa znaša 232,0 m.



Slika 2. Lokacija izvedbe meritve svetlosti nočnega neba s SQM-L (a) podnevi in (b) ponoči.

2.2 Zajem podatkov

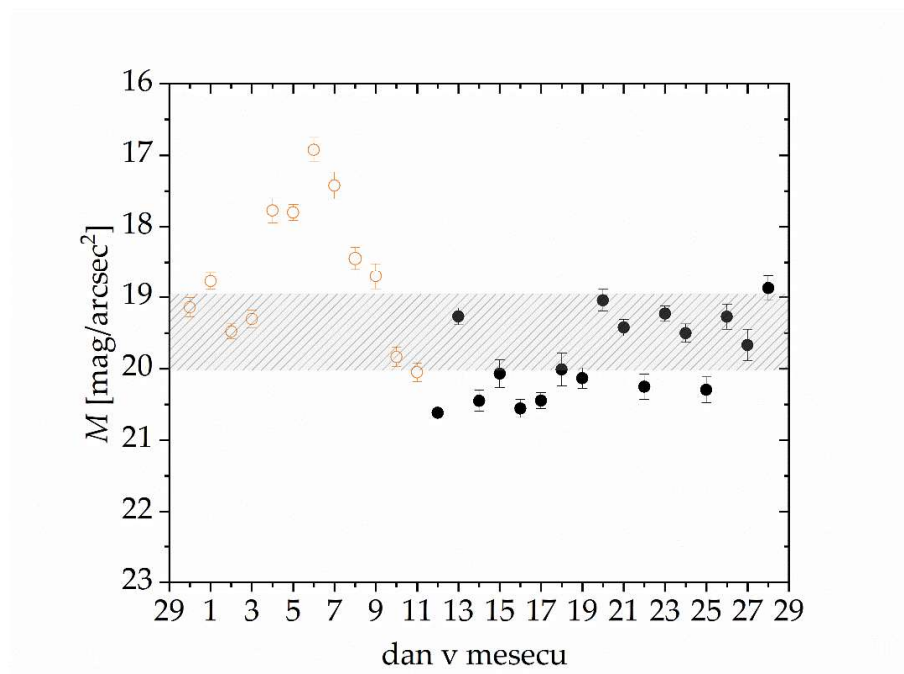
Meritve so potekale od 30. septembra do 28. oktobra 2025 v času astronomske noči, od 20.30 do 21.30 ure. Zaradi spreminjanja položaja Lune in Luninih men, Luna ob tem času ni bila vidna vse dni. V takšnem primeru smo meritve izvedli dvakrat, in sicer v časovnem intervalu od 20.30 do 21.30 ter še enkrat ob času, ko je bila Luna prisotna na nebu. Meritve so potekale v petminutnih intervalih. Za vsako meritev so bili opravljeni 3 zaporedni odčitki, nato pa je bila izračunana povprečna vrednost. Med izvedbo meritev smo poleg svetlosti neba, ki jo neposredno izmeri SQM-L v enoti $\text{mag}/\text{arcsec}^2$, beležili tudi okoljske pogoje – temperaturo, oblačnost, lunine mene in vidnost lune. Stopnjo oblačnosti smo določili vizualno glede na prisotnost oblakov v smeri zenita in jo razdelili v tri razrede 0 = jasno nebo, 1 = delno oblačno, 2 = oblačno. Podatki meritev za tri dni (11. 10. 2025 – 13. 10. 2025) so podani v tabeli 1.

Tabela 1: Prikaz podatkov meritev za tri dni. Poleg izmerkov s SQM-L smo beležili tudi višino nad obzorjem, azimut in osvetljenost Lune ter temperaturo, vlažnost in prisotnost oblakov.

Ura	Podatki meritev s SQM-L [mag/arcsec ²]		
	11. 10. 2025	12. 10. 2025	13. 10. 2025
20.30	20,18	20,59	19,26
20.35	20,17	20,53	19,33
20.40	20,12	20,57	19,27
20.45	20,13	20,63	19,31
20.50	20,12	20,63	19,17
20.55	20,15	20,61	19,23
21.00	20,11	20,60	19,17
21.05	20,03	20,64	19,23
21.10	20,03	20,60	19,31
21.15	19,96	20,64	19,37
21.20	19,95	20,68	19,29
21.25	19,90	20,68	19,32
21.30	19,82	20,64	19,25
Višina Lune [°]	5,98	-1,67	-10,54
Azimut Lune [°]	55,17	44,71	34,61
Osvetljenost Lune [%]	71,4	60,6	49,5
Temperatura [°C]	10,3	8,2	11,3
Vlažnost [%]	92	95	90
Oblačnost	Delno oblačno (1)	Jasno (0)	Oblačno (2)

3 Analiza meritev

Na sliki 3 je prikazana povprečna svetlost nočnega neba po dnevih v obdobju od 30. 9. 2025 do 28. 10. 2025. Za vsak koledarski dan je izračunano dnevno povprečje iz serij meritev (vzorčenje na 5 minut). Oranžni krožci predstavljajo dni, ko je bila Luna nad obzorjem v času meritev, črni krožci pa dni, ko Luna ni bila vidna (vzhod izven časovnega okna meritev oziroma v jutranjih urah). Sivo obarvano območje prikazuje povprečno vrednost izmerjenih vrednosti z napako.

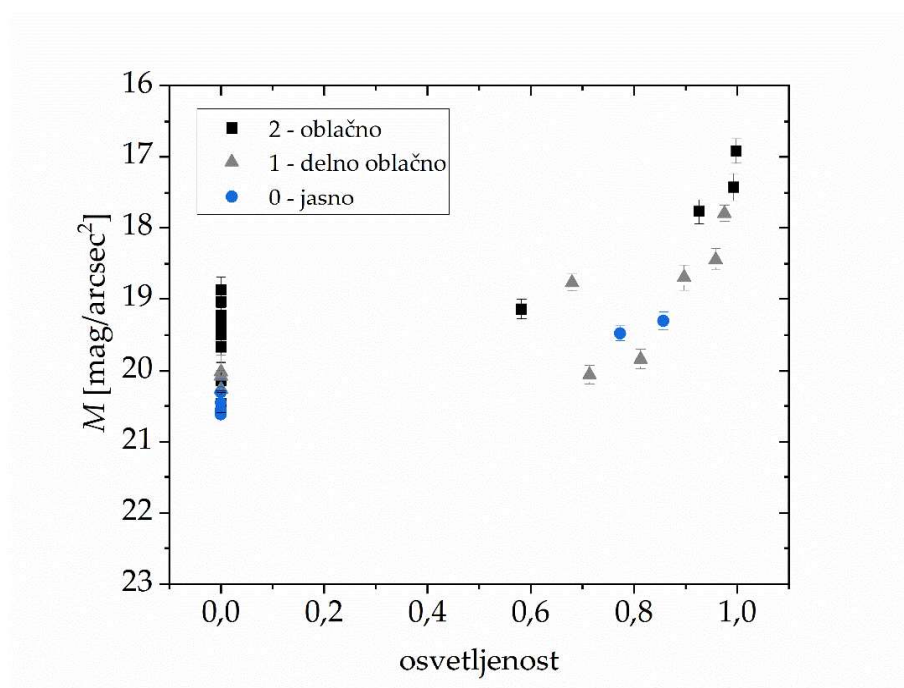


Slika 3: Povprečna izmerjena svetlost po dnevih od 29. 9. 2025 do 28. 10. 2025. Oranžni krožci prikazujejo dneve z Luno nad obzorjem v času meritev, črni krožci pa dneve brez vidne Lune.

Povprečna izmerjena svetlost v dneh z vidno Luno znaša $(18,7 \pm 0,4)$ mag/arcsec², med tem ko v dneh brez vidne Lune znaša $(19,9 \pm 0,3)$ mag/arcsec². Razlika 1,2 mag/arcsec² ustreza približno trikrat večji svetlosti neba, ko je Luna prisotna. Ta rezultat potrjuje izrazit vpliv Lunine prisotnosti na izmerjeno svetlost neba in motivira vključitev Luninega vpliva v nadaljnje modeliranje. Hkrati opažena razpršenost znotraj obeh skupin kaže na dodatne dejavnike (npr. oblačnost, atmosferska ekstinkcija, lokalni viri), ki jih bomo v nadaljevanju obravnavali pri razvoju empiričnega modela.

Za vsak merilni dan smo zabeležili tudi Lunino meno in povprečni delež osvetljenega Luninega diska. Rezultati potrjujejo, da se svetlost nočnega neba v povprečju povečuje z osvetljenostjo Lune (slika 4), pri čemer smo za dni, ko je bila Luna v času meritev pod obzorjem (črni krožci), označili osvetljenost 0. Hkrati podatki razkrijejo, da delež osvetljenosti ne vpliva premo sorazmerno na svetlost neba. Osvetljenost izraža le relativni delež osvetljene navidezne površine Lune, ne pa fotometričnega toka, ki na vrhu atmosfere prispe na opazovalca. Skupno to pomeni, da “osvetljenost

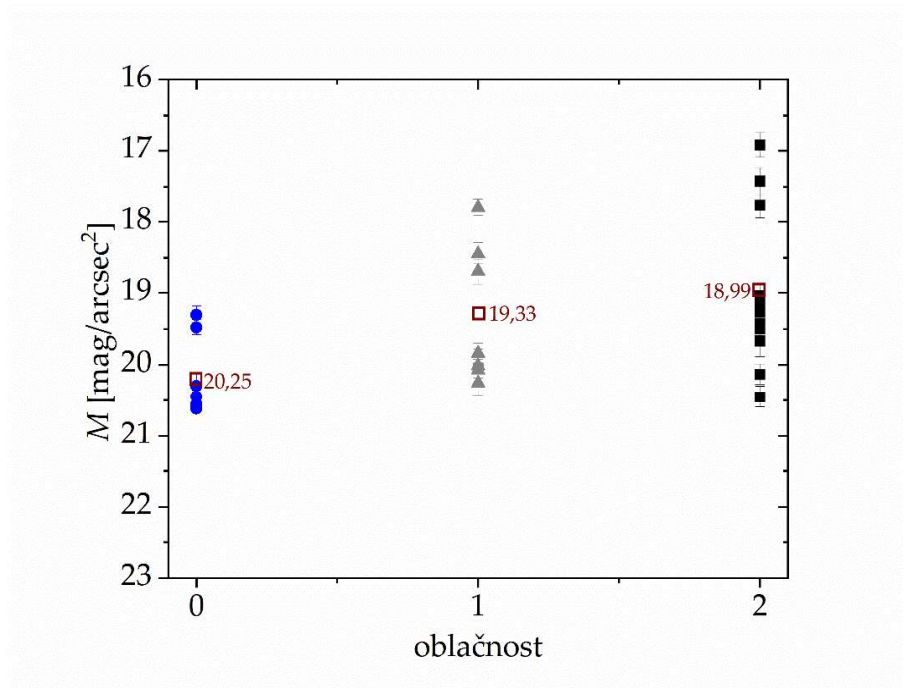
Lune” sama po sebi ni zadostna napovedna spremenljivka. Za pravilno napoved svetlosti neba je treba eksplicitno upoštevati fazno funkcijo, višino Lune, atmosfersko ekstinkcijo in oblačnost, kar je tudi izhodišče za empirični model v naslednjem poglavju. Na izmerjeno svetlost v veliki meri vplivajo tudi oblaki, ki povečajo razsev in odboj svetlobe (tako naravne kot umetne) ter s tem praviloma povišajo svetlost neba. Pri meritvah smo beležili stopnjo oblačnosti: 0 = jasno, 1 = delno oblačno, 2 = oblačno.



Slika 4: Povprečna izmerjena svetlost v odvisnosti od osvetljenosti Lune ob jasnem nebu (modri krožci), delno do pretežno oblačnih razmerah (sivi trikotniki) in v oblačnem vremenu (črni kvadrati).

Rezultati kažejo, da je povprečna svetlost najnižja ob jasnem vremenu, in sicer $20,3 \text{ mag/arcsec}^2$. V razmerah delno do pretežno oblačno znaša povprečje $19,3 \text{ mag/arcsec}^2$, v oblačnih pogojih pa $19,0 \text{ mag/arcsec}^2$. Opazno je, da lahko oblačne razmere svetlost neba povišajo tudi v odsotnosti Lune (Luna pod obzorjem ali osvetljenost 0 %), saj oblaki učinkovito povrnejo umetno svetlobo nazaj proti zenitu. Razpon vrednosti znotraj posamezne stopnje oblačnosti ostaja relativno velik (slika 5), ker kategorizacija na (0–2) ne upošteva hkratne odvisnosti od lunine mene/osvetljenosti in višine Lune. V tem prispevku oblačnosti še ne vključimo v

empirični model, obravnavamo jih opisno in jih načrtujemo podrobneje vključiti v prihodnjih nadgradnjah modela.



Slika 5: Povprečna svetlost nočnega neba po stopnjah oblačnosti (0 = jasno; 1 = delno–pretežno oblačno; 2 = oblačno). Ob rdečem kvadratu so prikazane povprečne vrednosti: 20,3 mag/arcsec²; 19,3 mag/arcsec²; 19,0 mag/arcsec².

4 Razvoj empiričnega modela

Pri analizi vpliva Lune nas zanima zenitna svetlost neba, izražena v mag/arcsec². Ker se seštevanje svetlobnih prispevkov naravno izvaja v linearnih enotah (svetlobni tok oziroma svetlost), najprej meritve pretvorimo iz logaritemske magnitude v linearno lestvico, nato zgradimo empirični model Luninega prispevka in ga na koncu ponovno izrazimo v magnitudah. Za posamezno meritev magnitudo m_i iz enačbe (1) definiramo pripadajočo linearno svetlost L_i , ki je sorazmerna svetlosti:

$$L_i = L_0 10^{-\frac{m_i}{2,5}}. \quad (2)$$

V empiričnem modelu tako delamo z relativnimi lineariziranimi vrednostmi L , ki so sorazmerne dejanski svetlosti neba. Skupno linearno svetlost neba zapišemo kot

vsoto stalnega prispevka temnega neba brez Lune in spremenljivega Luninega prispevka:

$$L_{\text{tot}} = B_0 + L_L, \quad (3)$$

kjer B_0 predstavlja povprečno svetlost temne noči brez Lunine svetlobe, L_L pa prispevek Lune.

4.1 Dejavniki vpliva

Na zenitno svetlost neba vpliva položaj Lune. V empiričnem modelu upoštevamo višino Lune nad obzorjem h . Iz preliminarne meritev, izvedenih v eni noči, v kateri smo merili svetlost nočnega neba pri Luninem vzhodu in zahodu, smo potrdili, da se osvetljenost z višino Lune spreminja sinusno (Tršinar, 2025). Upoštevati pa moramo tudi, da pri različnih višinah Lune svetloba prepotuje različno pot. Iz višine izračunamo zenitni kot $z = 90^\circ - h$ in zračno maso X , ki opisuje efektivno optično pot skozi atmosfero v smeri Lune. Zračno maso določimo s standardno aproksimacijo (Kasten & Young, 1989):

$$X(z) = \frac{1}{\cos z + 0,50572 (96,07995^\circ - z)^{-1,6364}}. \quad (4)$$

Pri prehodu skozi atmosfero se Lunina svetloba duši zaradi sipanja in absorpcije, kar opišemo z ekstinkcijskim koeficientom k (Krisciunas & Schaefer, 1991). V magnitudni lestvici se linearni tok Lune duši približno kot $10^{-0,4 kX}$, kjer je X zračna masa iz enačbe (4).

Ključni parameter je tudi osvetljenost Lune oziroma delež osvetljene Lunine ploskve, v nadaljevanju označen z ϕ . V modelu uporabljamo relativno osvetljenost $\phi \in [0,1]$, kjer je $\phi = 0$ za mlaj in $\phi = 1$ za ščip (polna Luna). Opazovanja kažejo, da Lunina svetloba ne narašča popolnoma linearno z ϕ , zato modeliramo potenčno odvisnost ϕ^b .

Oblačnost pomembno vpliva na izmerjeno svetlost neba, saj oblaki razpršijo in odbijejo tako naravno kot umetno svetlobo (Duriscoe et al., 2018; C. C. M. Kyba et al., 2011). V tem prispevku oblačnosti še ne vključimo eksplicitno v empirični model, obravnavamo jo le opisno v analizi podatkov in jo načrtujemo podrobneje

obravnavati v prihodnje. V statistični validaciji se vpliv oblačnosti odraža kot povečana razpršenost med modelnimi napovedmi in meritvami.

4.2 Določanje parametrov modela

Lunino komponento linearne svetlosti modeliramo kot funkcijo višine h , relativne osvetljenosti ϕ in ekstinkcije:

$$L_L = a \phi^b \sin h \cdot 10^{-0,4 kX} \quad (5)$$

in vstavimo v enačbo (3), da dobimo celoten empirični model:

$$L_{\text{tot}} = B_0 + a \phi^b \sin h \cdot 10^{-0,4 kX}, \quad (6)$$

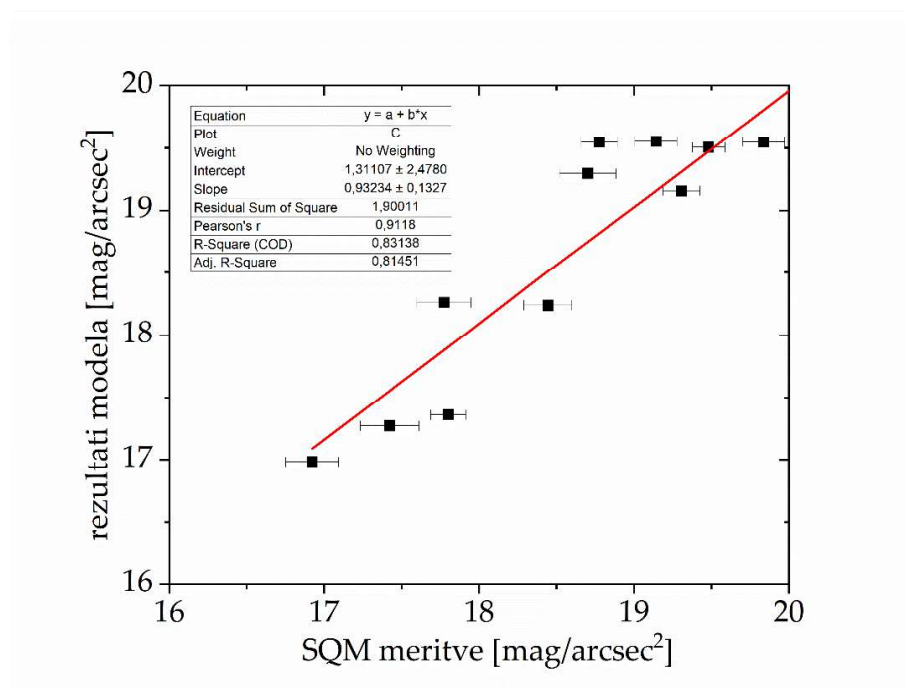
s štirimi prostimi parametri a, b, k in B_0 . Parameter a je normirni faktor Luninega prispevka in določa absolutno velikost Lunine komponentne v linearnih enotah, parameter b opisuje odvisnost prispevka od osvetljenosti Luninega diska, parameter k pa je ekstinkcijski koeficient in opiše absorpcijo Lunine svetlobe v atmosferi pri večjih zenitnih kotih. Parameter B_0 je stalni prispevek temnega neba in opisuje svetlost zenitnega neba v odsotnosti Luninega prispevka. Vključuje naravno svetlobo in približno stalno komponento umetne osvetlitve okolja.

Parametre a, b, k in B_0 določimo z nelinearnim prileganjem po metodi najmanjših kvadratov. V prvem koraku izvedemo prileganje brez stalnega člena B_0 (model samo za Lunino komponento), kar omogoča izolacijo Luninega prispevka za korekcijo vpliva Lune. Kot odvisno spremenljivko uporabimo linearizirano izmerjeno svetlost neba (enačba (2)), kot neodvisne spremenljivke pa relativno osvetljenost Lune, višino Lune nad obzorjem in zračno maso (enačba (4)). V drugem koraku dodamo še parameter B_0 in dobimo končno obliko modela, ki jo uporabimo za napoved svetlosti neba. V prileganje vključimo 29 meritev ($N = 29$) brez uteževanja posameznih točk. Dobljene ocenjene vrednosti parametrov so $a = 6,9 \cdot 10^{-7}$, $b = 19,0$, $k = 0,55$ in $B_0 = 1,5 \cdot 10^{-8}$. Zmanjšani hi-kvadrat znaša $1,6 \cdot 10^{-16}$, kar kaže na dobro ujemanje med modelom in podatki.

5 Rezultati in diskusija

5.1 Validacija empiričnega modela

Empirični model Luninega prispevka najprej validiramo s primerjavo modelnih napovedi z meritvami za noči, ko je bila Luna nad obzorjem. Izračunali smo Pearsonov korelacijski koeficient r , ki meri linearno povezanost med meritvami in modelom, ter koeficient determinacije R^2 , ki podaja delež variance v meritvah, pojasnjene z modelom (slika 6). Za noči z Luno nad obzorjem dobimo $r = 0,91$ in $R^2 = 0,82$, kar kaže na dobro linearno ujemanje med modelom in meritvami.



Slika 6: Primerjava rezultatov modela z meritvami SQM-L (v dneh z Luno na obzorju v času meritev) kaže na dobro ujemanje modela.

Poleg korelacije smo izračunali tudi korensko srednjo kvadratno napako (RMSE), povprečno absolutno napako (MAE) in povprečni odmik (bias) med meritvami in modelom. RMSE znaša približno $0,4 \text{ mag/arcsec}^2$, MAE pa $0,3 \text{ mag/arcsec}^2$. Povprečni odmik (bias) je $-0,1 \text{ mag/arcsec}^2$, kar pomeni, da model v povprečju ne kaže izrazitega sistematičnega odstopanja. Preostali raztros med

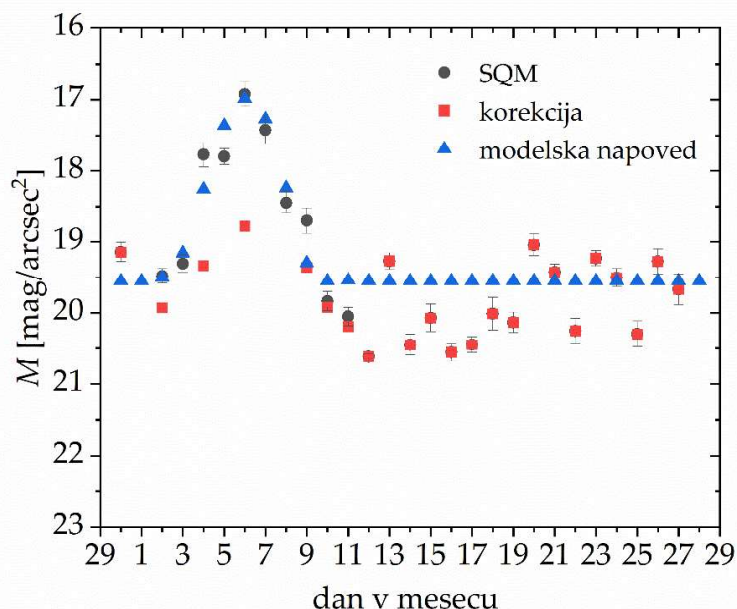
meritvami in modelom je posledica neupoštevanih dejavnikov, kot so oblačnost, aerosoli, lokalni viri svetlobe in drugi dejavniki, ki še niso zajeti v model.

Preverili smo tudi, ali je modelni parameter B_0 , ki predstavlja svetlost temne noči brez Luninega prispevka, skladen z meritvami za noči, ko je bila Luna pod obzorjem. Za vse noči brez Luninega prispevka iz meritev dobimo povprečno svetlost $(19,9 \pm 0,3) \text{ mag/arcsec}^2$, medtem ko modelni parameter znaša $B_0 = 19,6 \text{ mag/arcsec}^2$.

5.2 Učinek korekcije

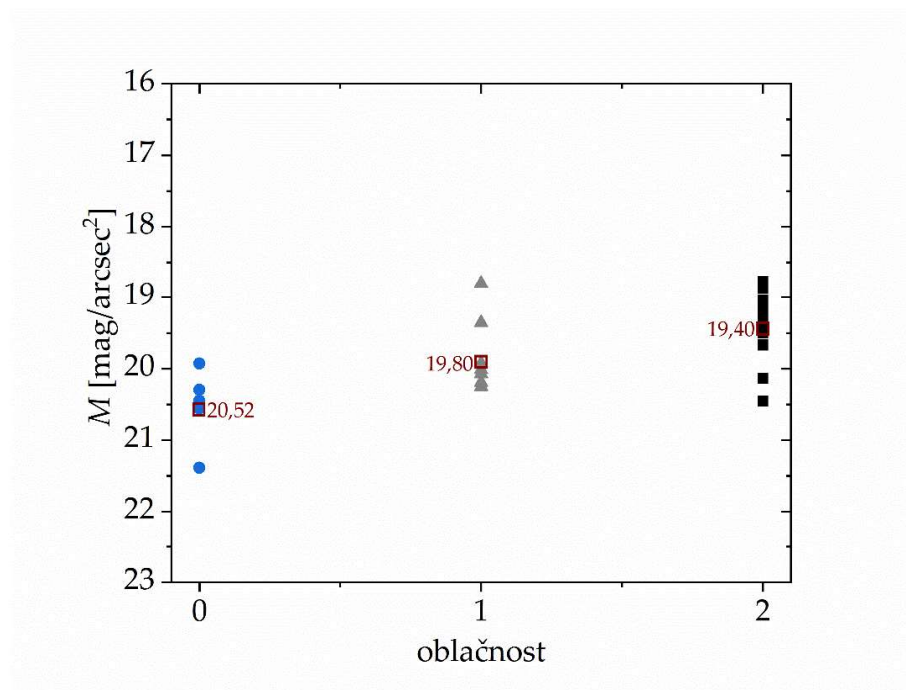
Glavni namen empiričnega modela je, da iz meritev odstrani prispevek Lune in tako omogoči primerljivost med nočmi z različnimi Luninimi menami in položaji. Za posamezno meritev izračunamo modelni Lunini prispevek in ga v linearni lestvici odštejemo od skupne izmerjene svetlosti. Tako dobimo »ekvivalentno temno noč«, tj. svetlost neba, kakršna bi bila v odsotnosti Lunine svetlobe, pri enakih ostalih pogojih.

Na sliki 7 so prikazane izmerjene vrednosti svetlosti po dnevih (črni krožci), modelne napovedi (modri trikotniki) ter vrednosti po korekciji Luninega vpliva (rdeči kvadrati). V dneh, ko je bila Luna nad obzorjem, se izmerjene vrednosti močno razlikujejo glede na osvetljenost in višino Lune, modelne vrednosti pa tej variabilnosti dobro sledijo. Po korekciji Luninega prispevka so rezultati svetlosti neba manj razpršeni in se približajo vrednostim, izmerjenim v nočeh brez vidne Lune. Pred korekcijo je največja izmerjena vrednost $21,4 \text{ mag/arcsec}^2$, najmanjša $16,9 \text{ mag/arcsec}^2$, povprečna vrednost vseh meritev pa $19,4 \text{ mag/arcsec}^2$. Po korekciji največja vrednost ostaja enaka, saj je izmerjena v noči brez vidne Lune, najmanjša vrednost je $18,8 \text{ mag/arcsec}^2$, povprečna vrednost meritev z upoštevanom korekcijo pa $19,7 \text{ mag/arcsec}^2$. Povprečna vrednost po korekciji se približa povprečni vrednosti meritev v dneh brez vidne Lune ($19,9 \text{ mag/arcsec}^2$). To kaže, da korekcija učinkovito odstrani sistematičen vpliv Lune in zmanjša razpršenost med nočmi, kar omogoča bolj zanesljivo ocenjevanje dolgoročnih trendov.



Slika 7: Primerjava izmerjene svetlosti nočnega neba (črni krožci) z modelsko napovedjo (modri trikotniki) kaže na dobro ujemanje v dneh z Luno na obzorju. Po korekciji Luninega vpliva (rdeči kvadrati), vidimo, da se razpršenost vrednosti zmanjša in približa vrednostim, izmerjenih ob dneh, ko Luna ni bila na obzorju v času meritev.

Razpršenost v korigiranih rezultatih pa ostaja tudi zaradi vpliva oblakov, ki ga v tej študiji nismo upoštevali. Slika 8 prikazuje, da korigirane vrednosti še zmeraj sledijo trendu vpliva oblakov (slika 5). Ob oblačnih nočeh je nebo svetlejšje, saj oblaki kljub korekciji vpliva Lune odbijajo in sipajo tudi druge svetlobne vire. To potrjuje, da je za popolnejšo razlago variance v podatkih v prihodnje smiselno eksplicitno vključiti oblačnost v model.



Slika 8: Povprečna svetlost nočnega neba po stopnjah oblačnosti (0 = jasno; 1 = delno-pretežno oblačno; 2 = oblačno) z upoštevanjem korekcije vpliva Lune.

6 Zaključek

V prispevku smo predstavili empirični model za korekcijo vpliva Lune na meritve svetlosti nočnega neba s pomočjo merilnika SQM-L na ruralni lokaciji z minimalnim vplivom urbanih svetlobnih virov. Analiza meritev je potrdila izrazit vpliv Lunine osvetljenosti, višine nad obzorjem in vremenskih razmer na izmerjeno svetlost neba, kar brez korekcije bistveno otežuje ločevanje naravnega in umetnega prispevka k svetlobni onesnaženosti. Študija je za zdaj omejena na eno ruralno lokacijo in približno enomesečno opazovalno obdobje, vendar rezultati kažejo, da je pristop prenosljiv tudi na daljša časovna obdobja in druga okolja.

Razviti empirični model opisuje Lunino komponento svetlosti kot funkcijo relativne osvetljenosti Luninega diska, višine Lune nad obzorjem, zračne mase in atmosferske ekstinkcije ter vključuje parameter B_0 , ki predstavlja tipično svetlost temne noči brez Luninega prispevka. Validacija na podatkih z Luno nad obzorjem je pokazala dobro ujemanje med modelom in meritvami brez izrazitega sistematičnega odmika.

Povprečna izmerjena svetlost temnih noči brez Lune je primerljiva z modelnim parametrom B_0 , kar dodatno potrjuje smiselnost izbrane funkcijske oblike modela. Korekcija Luninega prispevka pomembno zmanjša razpršenost med nočmi in približa rezultate meritev v nočeh z Luno vrednostim, izmerjenim v nočeh brez vidne Lune. S tem se meritve iz dni z različnimi Luninimi menami in položaji pretvorijo v skupno referenčno lestvico »temne noči«, kar omogoča zanesljivejše spremljanje dolgoročnih trendov svetlobne onesnaženosti ter primerjavo med različnimi obdobji opazovanj. Razvit pristop lahko služi kot praktično orodje za korekcijo meritev v obstoječih monitoringih ter kot osnova za primerjavo različnih lokacij in dolgoročnih trendov svetlobne onesnaženosti.

V tej študiji oblačnosti in drugih atmosferskih dejavnikov še nismo vključili eksplicitno v model, temveč se njihov vpliv odraža v preostalem raztrosu med modelom in meritvami. V prihodnje načrtujemo nadgradnjo modela z vključitvijo parametrov oblačnosti in podrobnejšo obravnavo atmosferske ekstinkcije, razširitev analize na daljša časovna obdobja ter preizkus delovanja modela tudi v bolj svetlobno onesnaženih okoljih. Takšne nadgradnje bodo dodatno izboljšale zanesljivost ocenjevanja umetnega prispevka k svetlobni onesnaženosti in uporabo metode pri spremljanju stanja nočnega okolja.

Priznanja

Rezultati raziskave so nastali v okviru projekta Adrisky - Spodbujanje zmanjševanja svetlobnega onesnaževanja za ohranjanje biotske raznovrstnosti in nočnih habitatov v jadransko-jonski regiji, ki ga sofinancira program Interreg IPA Adrion.

Opombe – prispevki avtorjev

M. P.: Izvedba meritev; Urejanje podatkov; Vizualizacija, Pisanje – izvirni osnutek; Pisanje – pregled in urejanje.

D. D.: Analiza meritev; Razvoj in validacija modela; Pisanje – izvirni osnutek; Pisanje – pregled in urejanje.

K.T.: Izvedba meritev; Vizualizacija, Pisanje – izvirni osnutek; Pisanje – pregled in urejanje.

M.S.: Metodologija; Pisanje – pregled in urejanje.

E.K.: Metodologija; Analiza meritev; Razvoj in validacija modela; Pisanje – izvirni osnutek; Pisanje – pregled in urejanje.

Literatura

- Aubé, M. (2015). Physical behaviour of anthropogenic light propagation into the nocturnal environment. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370(1667), 20140117. <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0117>
- Aubé, M., Roby, J., & Kocifaj, M. (2013). Evaluating Potential Spectral Impacts of Various Artificial Lights on Melatonin Suppression, Photosynthesis, and Star Visibility. *PLoS ONE*, 8(7), e67798. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067798>
- Bará, S., & Falchi, F. (2023). Artificial light at night: A global disruptor of the night-time environment. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 378(1892), 20220352. <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0352>
- Duriscoe, D. M., Anderson, S. J., Luginbuhl, C. B., & Baugh, K. E. (2018). A simplified model of all-sky artificial sky glow derived from VIIRS Day/Night band data. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 214, 133–145. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.04.028>
- Falchi, F., Cinzano, P., Elvidge, C. D., Keith, D. M., & Haim, A. (2011). Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility. *Journal of Environmental Management*, 92(10), 2714–2722. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.029>
- Falcón, J., Torriglia, A., Attia, D., Viénot, F., Gronfier, C., Behar-Cohen, F., Martinsons, C., & Hicks, D. (2020). Exposure to Artificial Light at Night and the Consequences for Flora, Fauna, and Ecosystems. *Frontiers in Neuroscience*, 14, 602796. <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.602796>
- Gara, J. (2023). *The Pros and Cons of Artificial Lighting: Understanding the Advantages and Disadvantages*. 1stsourcelighting. <https://1stsourcelighting.com/advantages-and-disadvantages-of-artificial-lighting/>
- Hänel, A., Posch, T., Ribas, S. J., Aubé, M., Duriscoe, D., Jechow, A., Kollath, Z., Lolkema, D. E., Moore, C., Schmidt, N., Spoelstra, H., Wuchterl, G., & Kyba, C. C. M. (2018). Measuring night sky brightness: Methods and challenges. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 205, 278–290. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.09.008>
- Jamal, M. S., Falak, S., & Khan, Z. A. (2022). An Analysis on How Artificial Light at Night May Impact the Sustainable Development Goals 2030 and Human Health. *Chronobiology in Medicine*, 4(1), 8–20. <https://doi.org/10.33069/cim.2021.0030>
- Jechow, A., Ribas, S. J., Domingo, R. C., Hölker, F., Kolláth, Z., & Kyba, C. C. M. (2018). Tracking the dynamics of skyglow with differential photometry using a digital camera with fisheye lens. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 209, 212–223. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.01.032>
- Kasten, F., & Young, A. T. (1989). Revised optical air mass tables and approximation formula. *Applied Optics*, 28(22), 4735. <https://doi.org/10.1364/AO.28.004735>
- Krisciunas, K., & Schaefer, B. E. (1991). A model of the brightness of moonlight. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 103, 1033. <https://doi.org/10.1086/132921>
- Kyba, C. C. M., Ruhtz, T., Fischer, J., & Hölker, F. (2011). Cloud Coverage Acts as an Amplifier for Ecological Light Pollution in Urban Ecosystems. *PLoS ONE*, 6(3), e17307. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0017307>
- Kyba, C., Ruby, A., Kuechly, H., Kinzey, B., Miller, N., Sanders, J., Barentine, J., Kleinodt, R., & Espey, B. (2021). Direct measurement of the contribution of street lighting to satellite observations of nighttime light emissions from urban areas. *Lighting Research & Technology*, 53(3), 189–211. <https://doi.org/10.1177/1477153520958463>

- Levin, N., Kyba, C. C. M., Zhang, Q., Sánchez De Miguel, A., Román, M. O., Li, X., Portnov, B. A., Molthan, A. L., Jechow, A., Miller, S. D., Wang, Z., Shrestha, R. M., & Elvidge, C. D. (2020). Remote sensing of night lights: A review and an outlook for the future. *Remote Sensing of Environment*, 237, 111443. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111443>
- Owens, A. C. S., & Lewis, S. M. (2018). The impact of artificial light at night on nocturnal insects: A review and synthesis. *Ecology and Evolution*, 8(22), 11337–11358. <https://doi.org/10.1002/ece3.4557>
- Posch, T., Binder, F., & Puschnig, J. (2018). Systematic measurements of the night sky brightness at 26 locations in Eastern Austria. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 211, 144–165. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.03.010>
- Puschnig, J., Wallner, S., Schwöpe, A., & Näslund, M. (2022). Long-term trends of light pollution assessed from SQM measurements and an empirical atmospheric model. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 518(3), 4449–4465. <https://doi.org/10.1093/mnras/stac3003>
- Sánchez De Miguel, A., Aubé, M., Zamorano, J., Kocifaj, M., Roby, J., & Tapia, C. (2017). Sky Quality Meter measurements in a colour-changing world. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 467(3), 2966–2979. <https://doi.org/10.1093/mnras/stx145>
- Sanders, D., Baker, D. J., Cruse, D., Bell, F., Van Veen, F. J. F., & Gaston, K. J. (2022). Spectrum of artificial light at night drives impact of a diurnal species in insect food web. *Science of The Total Environment*, 831, 154893. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154893>
- Sky Quality Meter*. (2021). Unihedron. <https://www.unihedron.com/projects/darksky/>
- Small, C., & Elvidge, C. D. (2013). Night on Earth: Mapping decadal changes of anthropogenic night light in Asia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 22, 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.02.009>
- Trsinar, K., Potrc, M., Dovnik, D., Slavinec, M., Klemencic, E. (2025, April 17-18). Light pollution and its impact on biodiversity [Conference presentation]. Sustainable Innovation & Technology: Bringing Science and Society Closer Together, Maribor, Slovenia.
- Žiberna, I. (2016). Svetlobna onesnaženost na območju Maribora. *Revija Za Geografijo*, 119–130.