

Odprava pristranskosti v regionalnih podnebnih modelih

Anže Medved^{*}, Gregor Vertačnik^{*}

Povzetek

Za analizo ocene podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja smo uporabili rezultate regionalnih podnebnih modelov. Zaradi različnih vzrokov vsebujejo rezultati teh modelov statistične napake. Pred nadaljnjo uporabo je smotno te napake odpraviti oziroma omiliti. Za odpravo teh napak smo pri padavinah uporabili metodo preslikave kvantilov (angl. *quantile mapping*). Ostale spremenljivke smo popravili z metodo preslikave kvantilov odklonov (angl. *quantile delta mapping*, QDM). Upoštevali smo logično ali statistično povezanost nekaterih spremenljivk. Pri popravljanju vrednosti temperature zraka smo definirali štiri padavinske razrede, znotraj katerih so se popravki razlikovali.

Ključne besede: podnebni scenarij, odprava pristranskosti, preslikave kvantilov, preslikave kvantilov odklonov, padavine, temperatura zraka, referenčna evapotranspiracija, padavinski razred, odklon

Keywords: climate change scenario, bias-correction, quantile mapping, quantile delta mapping, precipitation, air temperature, reference evapotranspiration, precipitation class, deviation

Uvod

Pri analizi vpliva podnebnih sprememb znotraj projekta *Ocena podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja*, smo analizirali modelske podatke regionalnih podnebnih modelov. Podatke smo pridobili iz podatkovne baze projekta EURO-CORDEX (angl. *Coordinated Downscaling Experiment – European Domain*) (Benestad in sod., 2018), znotraj katerega sodelujejo vodilne ustanove na področju regionalnih podnebnih raziskav v Evropi. V projektu so in še bodo simulirali podnebje na množici dinamičnih in tudi empirično-statističnih regionalnih podnebnih modelov, katerih vhodni podatki so izračuni globalnih podnebnih modelov (angl. *Global Climate Model* oz. *General Circulation Model*, GCM) projekta *Primerjava sklopljenih modelov, 5. stopnja* (angl. *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*, CMIP5) do leta 2100. Ti modeli so uporabni za preučevanje podnebnih sprememb na svetovni ravni. Opisujejo različne sestavine podnebnega sistema, njihove medsebojne nelinearne vplive in povratne vezi med njimi. Vodoravna prostorska ločljivost modelov je trenutno od 100 do 500 km, kar ni dovolj za oceno podnebne spremenljivosti na lokalni ravni.

Za opis lokalnih posledic podnebnih sprememb je potreben preračun rezultatov GCM na lokalno raven (angl. *downscaling*). Eden od načinov je preračun z uporabo regionalnih podnebnih modelov (RCM, angl. *Regional Climate Models*). Ti uporabljajo rezultate simulacij GCM kot vhodne podatke oziroma robne pogoje. Njihova vodoravna prostorska ločljivost je navadno 10–50 km. RCM nekatere pomembne procese upoštevajo neposredno (**npr. parametrizacijske sheme, prilagojene večji ločljivosti, kroženje zraka v gorah, medsebojno vplivanje kopnega in morja**), zato bolje simulirajo značilnosti regionalnega in lokalnega podnebja. Podatki regionalnih modelov v projektu EURO-CORDEX so v

^{*} Agencija RS za okolje, Vojkova cesta 1b, Ljubljana

pravilni mreži v dveh ločljivostih; podrobnejša ima razmik med računskimi točkami $0,11^\circ$ (na geografski širini Slovenije približno 12,5 km) in splošna razmik med računskimi točkami $0,44^\circ$ (na geografski širini Slovenije približno 50 km). Uporabili smo podatke v finejši resoluciji.

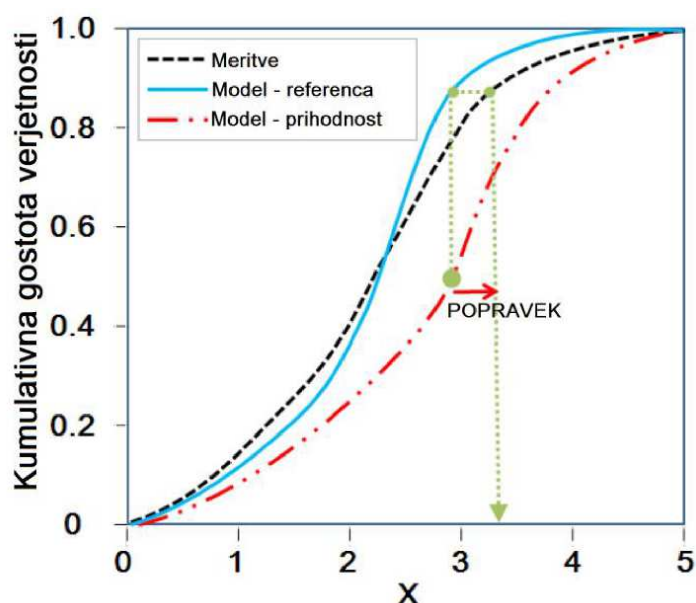
Za pripravo podnebnih scenarijev v Sloveniji smo analizirali naslednje spremenljivke: povprečna temperatura zraka (*tas*), dnevna najvišja in najnižja temperatura zraka (*tasmax* in *tasmin*), višina padavine (*pr*) in referenčna evapotranspiracija (*evspsblpot*), ki je izračunana iz polj temperature, specifične vlažnosti, hitrosti vetra in gostote moči kratkovalovnega sevanja. Omenjene spremenljivke vsebujejo sistematične napake, ki so posledica omejene modelske ločljivosti, poenostavljenih enačb za nekatere fizikalne procese, numeričnih shem, nepopolnega razumevanje vseh podnebnih procesov itn. V splošnem je potrebno sistematične napake modelskih rezultatov popraviti. Pri tem si največkrat pomagamo s preteklimi meritvami in ustreznimi modelskimi simulacijami. Na ARSO smo kot pretekle meritve uporabili dnevne podatke prizemnih meritev, interpolirane na modelsko mrežo. Za to primerjavo obeh vrst podatkov in odpravo statističnih napak modelskih rezultatov obstaja več različnih metod. Na ARSO smo uporabili prirejeno metodo preslikav kvantilov (angl. *quantile mapping*) (Themeßl in sod., 2011; Wilcke in sod., 2013; Switanek in sod., 2016; Cannon, 2016; Cannon in sod., 2015). Izračunali smo statistične napake za primerjalno obdobju 1981–2010 in na podlagi teh rezultatov pripravili podnebne scenarije do leta 2100.

Postopek

Odpravljanja pristranskosti modelskih podatkov smo se lotili za vsako spremenljivko posebej. Na začetku smo vse spremenljivke popravili z isto metodo, po pregledu člankov (Switanek in sod., 2016; Cannon, 2016; Cannon in sod., 2015) pa smo se odločili, da bomo nekatere spremenljivke popravili z drugimi metodami. Najprej smo izvedli metodo odpravljanja pristranskosti (angl. *bias correction*, BC) pri padavinskih podatkih z metodo preslikave kvantilov (angl. *quantile mapping*). To smo naredili s programom R, z uporabo knjižnice *qmap* (Gudmundsson, 2016). Na podlagi članka avtorja paketa (Gudmundsson in sod., 2012), v katerem je primerjava različnih metod, smo se odločili za uporabo metode neparametrične preslikave kvantilov z uporabo empiričnih kvantilov (angl. *non-parametric quantile mapping using empirical quantiles*) z linearno ekstrapolacijo. Popravljanje se je vršilo za vsako modelsko celico neodvisno od drugih. Splošni postopek je naslednji. Primerjamo porazdelitvi modelskih podatkov in meritev v primerjalnem obdobju ter ocenjujemo razlike po kvantilih te porazdelitve (

Slika 1). Ocenjene razlike uporabimo kot popravke modelskih podatkov za prihodnost pri izbranem kvantilu. Popravke smo izračunali za vsak dan v letu z uporabo drsečega časovnega okna (angl. *moving window*) (Wilcke in sod., 2013). Pri padavinah smo se odločili za 61-dnevno časovno okno in 100 razredov kvantilov.

Razliko med popravljenimi in prvotnimi padavinskimi podatki za modelsko celico, v kateri je Ljubljana, prikazuje Tabela 1. Podatki so predstavljeni po decilih. Vidimo lahko, da nam pri manjših vrednostih metoda zmanjša količino padavin, pri višjih vrednostih pa poveča.

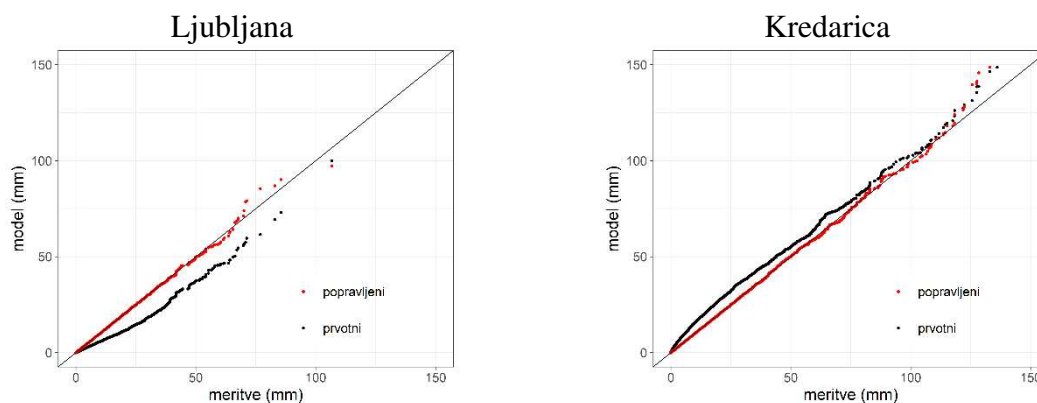


Slika 1 - Postopek odpravljanja pristranskosti. Pri izbrani vrednosti X (na grafu označeno z zeleno točko) pogledamo, kolikšen je popravek modela v primerjalnem obdobju glede na meritve (sledijo zelenim pikicam). To vrednost popravka nato pripišemo model.

Tabela 1 - Razlika popravkov med prvotnimi in popravljenimi modelskimi vrednostmi za modelsko celico modela EC-EARTH\HIRHAM5, v kateri je Ljubljana

Decil	Prvotni (mm)	Popravljeni (mm)	Velikost popravka (%)
1	0,21	0,18	-14,7
2	0,40	0,33	-17,2
3	0,71	0,63	-11,7
4	1,21	1,27	5,1
5	1,97	2,18	10,6
6	3,12	3,89	24,8
7	4,95	6,76	36,5
8	7,91	11,77	48,7
9	13,37	21,33	59,6
10	121,55	158,93	30,7

Končni rezultat prikazuje Slika 2



Slika 2 - Primerjava med prvotnimi (črna) in popravljenimi (rdeča) modelskimi podatki za dnevno povprečno temperaturo za modelski celici modela EC-EARTH\HIRHAM5, v katerih sta Ljubljana in Kredarica. Primer prikazuje nabor vseh dnevnih vrednosti v primerjalnem obdobju. Popravljeni modelski podatki (rdeče točke) se bolj prilegajo podatkom meritev kot prvotni modelski podatki (črne točke).

Vse ostale spremenljivke smo popravljali z metodo preslikave kvantilov odklonov (angl. *quantile delta mapping*, v nadaljevanju QDM) (Switanek in sod., 2016; Cannon, 2016; Cannon in sod., 2015). Upoštevali smo odvisnost obravnavane spremenljivke (npr. dnevne povprečne temperature) od višine padavin. Ohraniti smo namreč želeli modelske trende za obravnavano spremenljivko ter povezavo med višino padavin in spremenljivko, ki sledi iz meteoroloških meritev. Za obravnavano spremenljivko smo za štiri razrede padavin popravljali odmike te spremenljivke od povprečnega letnega hoda v primerjalnem obdobju z metodo preslikave kvantilov. Pri tem smo uporabljali knjižnico *MBC* (funkcijo *QDM*) statističnega in programskega paketa R (Cannon, 2018). Popravljanje se je vršilo za vsak padavinski razred in za vsako modelsko celico neodvisno od drugih ter po 30-letnih obdobjih (2011–2040, 2041–2070 in 2071–2100). Takšna obdobja smo izbrali zaradi tega, ker smo vse popravke računali glede na referenčno obdobje 1981–2010 in smo tako imeli vedno enak nabor podatkov. Po popravkih odklonov smo s prištjetjem povprečnega letnega hoda dobili absolutne vrednosti obravnavane spremenljivke.

Padavinske razrede smo določili na podlagi meritev. Ker se padavinski procesi in s tem napake v modelskih izračunih skozi leto spreminjajo, smo padavinske razrede določili na mesečnih vrednostih merjenih podatkov. Določili smo štiri razrede glede na dnevno višino padavin. V najnižji razred sodijo podatki, kjer je dnevna višina padavin manjša od 0,01 mm. V ta razred sodi največ podatkov. Ostale tri razrede smo ločili po tercilih, da so bili razredi karseda enako veliki. Isto število podatkov v razredih pri meritvah in modelu smo zagotovili tako, da smo modelske podatke razvrstili po velikosti in jih nato razvrstili v štiri razrede z istim številom podatkov kot pri meritvah. Pogostost pojavljanja vseh štirih razredov pri modelskih podatkih je bila tako enaka kot pri izmerjenih podatkih.

Ker se posamezne spremenljivke skozi leto po absolutni vrednosti močno spreminjajo, smo pred odpravljanjem pristranskosti za vsak razred posebej ločili povprečni sezonski potek spremenljivke in odstopanje od tega poteka. Povprečni sezonski potek smo izračunali z glajenjem podatkov s funkcijo lokalno uteženega glajenja (LOESS, angl. *locally weighted scatterplot smoothing*). Za okno glajenja smo vzeli 61 dni in pri tem pazili na gladek prehod na robovih leta (december, januar). Zglajeni časovni potek označimo s \tilde{T} (razred, dan).

Pri popravljenih podatkih smo želeli ohraniti skladnost med vrednostmi različnih spremenljivk, zato smo za posamezne spremenljivke (razen za padavine) opisano splošno metodo odpravljanja pristranskosti modelskih podatkov nekoliko priredili.

Dnevna povprečna temperatura

Dnevna povprečna temperatura ima velik letni hod, zato smo v tem primeru popravljali odmike dnevne povprečne temperature od povprečnega letnega hoda, ki smo ga določili za vsak padavinski razred posebej (primera prikazuje Slika 3).

Odmike izračunamo kot razliko obeh vrednosti:

$$\Delta T_{pov}[\text{razred}, \text{dan}] = T_{pov}[\text{razred}, \text{dan}] - \tilde{T}_{pov}[\text{razred}, \text{dan}]$$

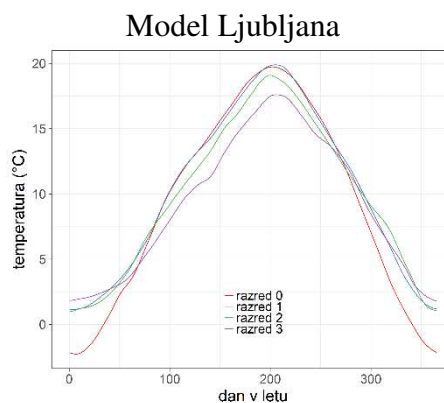
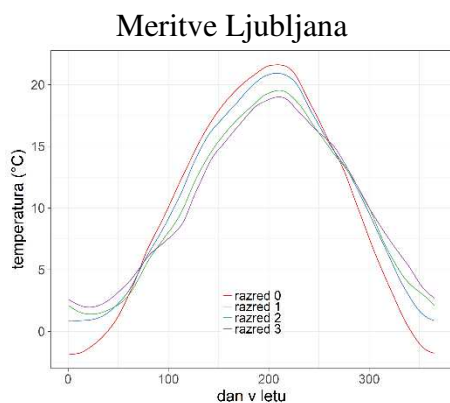
kjer smo z ΔT_{pov} označili odmik dnevne vrednosti povprečne temperature (T_{pov}) od zglajenega časovnega poteka (\tilde{T}_{pov}).

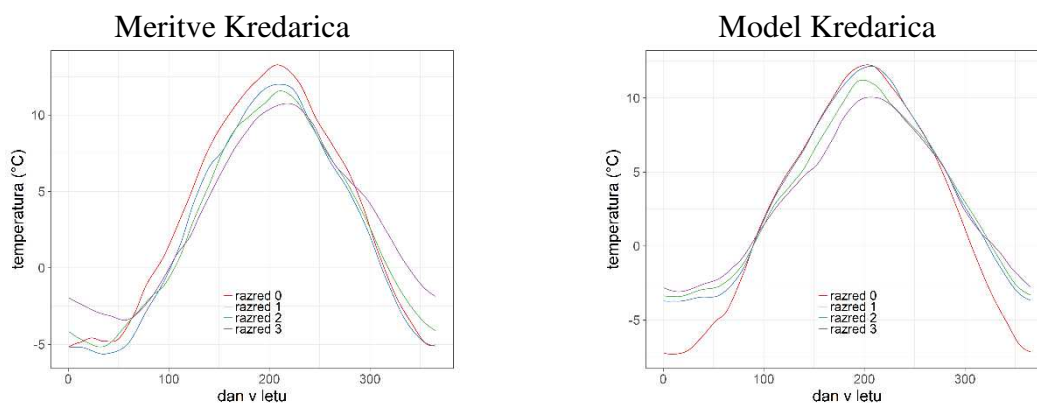
Odmiki so po velikosti skoraj neodvisni od letnega časa, zato so primernejši za izračun popravkov. Odmike smo izračunali glede na padavinski razred in dan v letu. Ves postopek smo izvedli ločeno za meritve in modele, ter za posamezna tridesetletna obdobja.

Da ohranimo zvezno prehajanje odmikov med zaporedni dnevi, ki jih želimo popraviti z metodo QDM, smo uporabili 31-dnevno centrirano drseče okno (Wilcke in sod., 2013). S tem smo zaradi večjega nabora vrednosti povečali zanesljivost izračuna popravkov v primerjavi z metodo, ki pri popravljanju upošteva zgolj podatke točno določenega dne v letu.

Popravke odmikov smo izračunali s pomočjo funkcije *QDM* v programskem okolju R. S funkcijo uskladimo statistični porazdelitvi odmikov (meritev in modela) v primerjalnem obdobju. Popravke iz primerjalnega obdobja nato uporabimo za popravek porazdelitve odmikov modela v projekcijskem obdobju. Za izračun potrebuje funkcija podatke meritev in modela v kalibracijskem obdobju (t_{kal}) in modela v projekcijskem obdobju (t_{proj}):

$$\Delta T'_{pov}(t, \text{model})[\text{razred}, \text{dan}] = QDM \left(\begin{array}{l} \Delta T_{pov}(t_{kal}, \text{meritve})[\text{razred}, \text{dan}], \\ \Delta T_{pov}(t_{kal}, \text{model})[\text{razred}, \text{dan}], \\ \Delta T_{pov}(t_{proj}, \text{model})[\text{razred}, \text{dan}] \end{array} \right)$$





Slika 3 - Zglajeni letni hod za dnevno povprečno temperaturo (\tilde{T}_{pov}) v modelskih celicah modela EC-EARTH HIRHAM5, v katerih sta Ljubljana in Kredarica. Najnižji razred predstavlja skupino dni brez padavin, ostali trije razredi pa so terciili padavinskih dogodkov, pri čemer razred 3 predstavlja najvišji padavinski razred.

Rezultat te funkcije so popravljene vrednosti odmikov za model v primerjalnem obdobju $\Delta T'(t_{kal}, model)[razred, dan]$ in v projekcijskem obdobju $\Delta T'(t_{proj}, model)[razred, dan]$. Na koncu je potrebno te popravljene odmike prišteti nazaj k zglajenemu časovnemu poteku za meritve, da dobimo popravljeno vrednost za absolutno vrednost povprečne temperature T' za projekcijska obdobja pa še razliko zglajenih modelskih časovnih potekov med projekcijskim in primerjalnim obdobjem

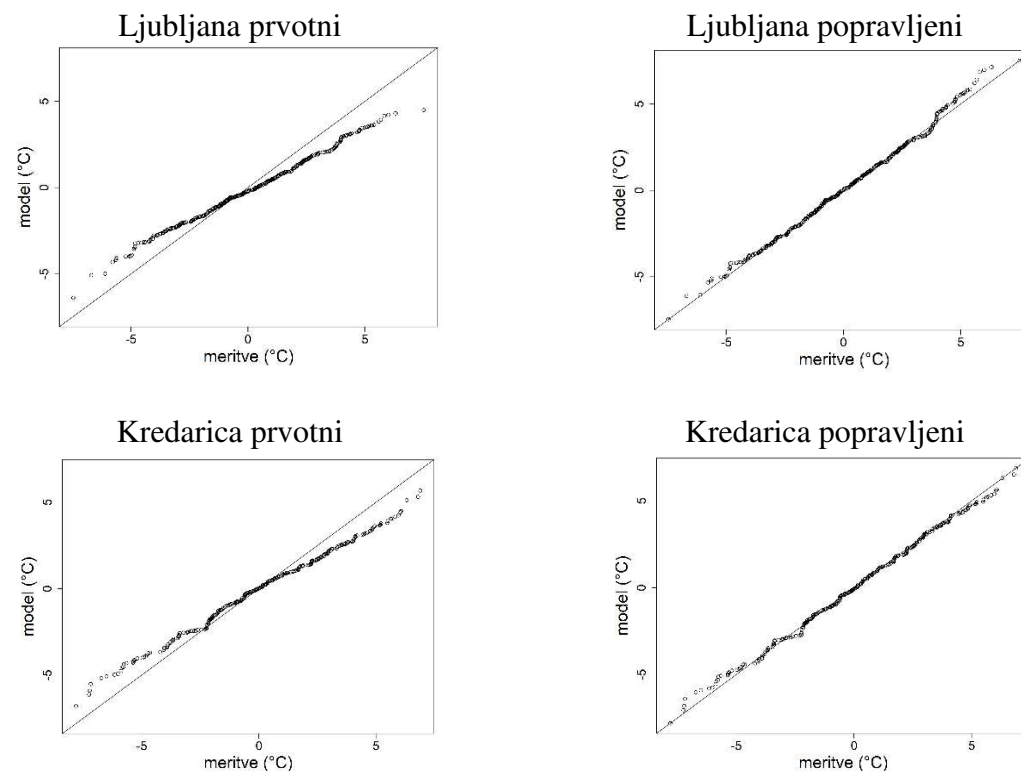
Primerjavo med popravljenimi in originalnimi vrednostmi odmikov prikazuje primer na Slika 4. Prikazane so vrednosti za najnižji padavinski razred in 31-dnevno časovno okno, centrirano na izbrani majski dan. Vidimo lahko, da prvotno izračunani odmiki odstopajo od odmikov pri meritvah, medtem ko popravljene odmiki lepo sovpadajo z meritvami.

V primerjalnem obdobju popravljeno vrednost dnevne povprečne temperature (T'_{pov}) izračunamo kot:

$$T'_{pov}(t_{kal}, model)[razred, dan] = \Delta T'(t_{kal}, model)[razred, dan] + \tilde{T}_{pov}(t_{kal}, meritve)[razred, dan]$$

Za projekcijsko obdobje je postopek podoben, prištejemo le še razliko v povprečnem letnem poteku za posamezni padavinski razred v projekcijskem in primerjalnem obdobju:

$$T'_{pov}(t_{proj}, model)[razred, dan] = \Delta T'_{pov}(t_{proj}, model)[razred, dan] + \tilde{T}_{pov}(t_{kal}, meritve)[razred, dan] + \{ \tilde{T}_{pov}(t_{proj}, model)[razred, dan] - \tilde{T}_{pov}(t_{kal}, model)[razred, dan] \}$$

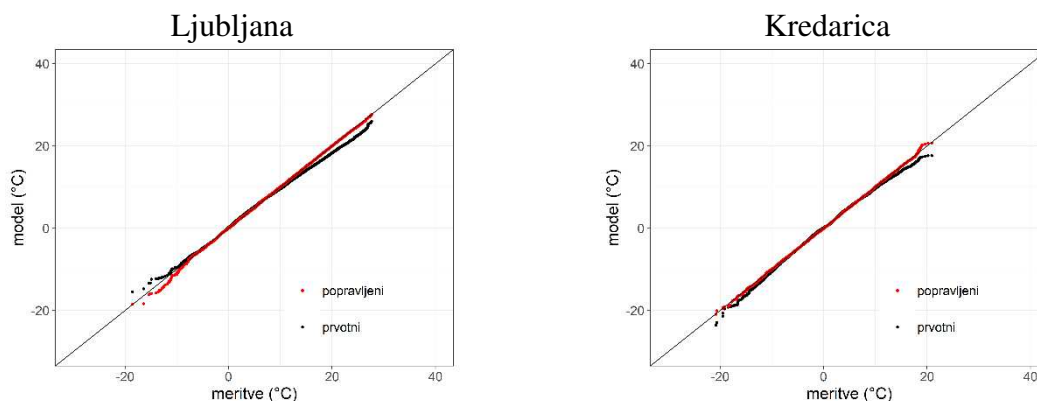


Slika 4 - Primerjava med prvotnimi (levo) in popravljenimi (desno) odmiki od časovnega poteka za najnižji padavinski razred in 31-dnevno časovno okno pri dnevni povprečni temperaturi, za modelski celici modela EC-EARTH\HIRHAM5, v katerih sta Ljubljana (zgoraj) in Kredarica (spodaj).

S tem postopkom zagotovimo, da se v časovni vrsti popravljenih podatkov ohranja trend, ki je prisoten v prvotnih modelskih podatkih. Poglejmo si postopek na konkretnem primeru. Izberemo modelske vrednosti dne 16. 7. 1999. Podatki sodijo v najvišji padavinski razred. Prvotna modelska vrednost temperature znaša $T_{pov}(model) = 17,1\text{ °C}$. Vrednost zglajenega letnega hoda za ta dan v letu in padavinski razred znaša $\tilde{T}_{pov}(model) = 14,7\text{ °C}$. Izračunamo odklik $\Delta T_{pov} = 2,4\text{ °C}$. Vrednost popravka, ki ga dobimo iz funkcije QDM znaša $\Delta T'_{pov} = 3,8\text{ °C}$. Ta popravek nato prištejemo zglajenemu letnemu hodu meritev za najvišji padavinski razred in dan v letu $\tilde{T}_{pov}(meritve) = 15,3\text{ °C}$ in dobimo končni rezultat

$$T'_{pov}(model) = 3,8\text{ °C} + 15,3\text{ °C} = 19,1\text{ °C}$$

Vidimo lahko, da popravek za temperaturo znaša 2 °C . Končni rezultat postopka za povprečno temperaturo v obdobju 1981–2010 prikazuje Slika 5.



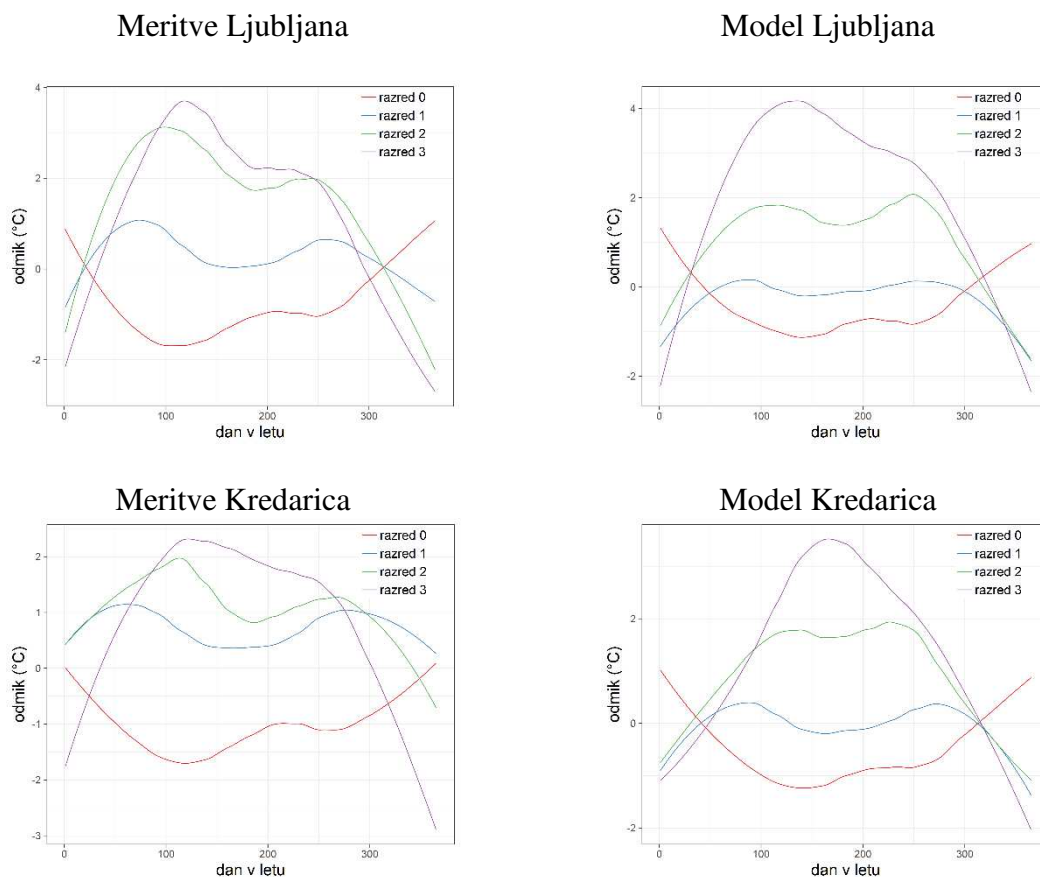
Slika 5 - Primerjava med prvotnimi (črna) in popravljenimi (rdeča) modelskimi podatki za dnevno povprečno temperaturo za modelski celici modela EC-EARTH\HIRHAM5, v katerih sta Ljubljana in Kredarica. Primer prikazuje nabor vseh dnevnih vrednosti v primerjalnem obdobju. Popravljeni modelski podatki (rdeče točke) se bolje prilegajo podatkom meritev kot prvotni modelski podatki (črne točke).

Prvotni modelski podatki na obeh skrajnostih precej odstopajo od meritev, pri popravljenih vrednostih pa je ujemanje mnoge boljše.

Dnevna najvišja in najnižja temperatura

Dnevne najvišje in najnižje temperaturo nismo popravljali povsem neodvisno, ampak smo ju vezali na vrednost povprečne temperature. Če tega ne bi napravili, bi bila lahko kakšen dan najnižja temperatura višja od povprečne ali najvišje in analogno za najvišjo temperaturo. Zato smo izvedli popravke na odklonih dnevne najvišje in najnižje temperature od dnevne povprečne temperature. Prirejeno metodo preslikave kvantilov glede na štiri padavinske razrede smo uporabili za te odklone, na koncu pa smo odmike preračunali v absolutne vrednosti s prištevanjem dnevne povprečne temperature.

Postopek za izračun popravkov pri dnevni najvišji in najnižji temperaturi je enak, zato je opisan samo primer za najvišjo temperaturo. Glede na povprečno temperaturo zraka smo v tem primeru naredili še en dodaten računski korak. Od dnevne najvišje temperature zraka (T_{maks}) smo odšteli povprečno temperaturno posameznega dne T_{pov} . Razliko označimo z $T_{maks-pov}$. Nadaljnji postopek je enak kot pri povprečni temperaturi zraka, le da računamo z odkloni od povprečne temperature. Izračunamo vrednosti povprečnega letnega poteka po padavinskih razredih za te razlike $\tilde{T}_{maks-pov}$ (Slika 6) in jih odštejemo od dnevne vrednosti odklona. Ponovno dobimo odmike $\Delta T_{maks-pov}$ (Slika 7), ki jih popravimo z metodo QDM. Postopek izračuna končnih vrednosti se ponovno loči na primerjalno in projekcijsko obdobje.



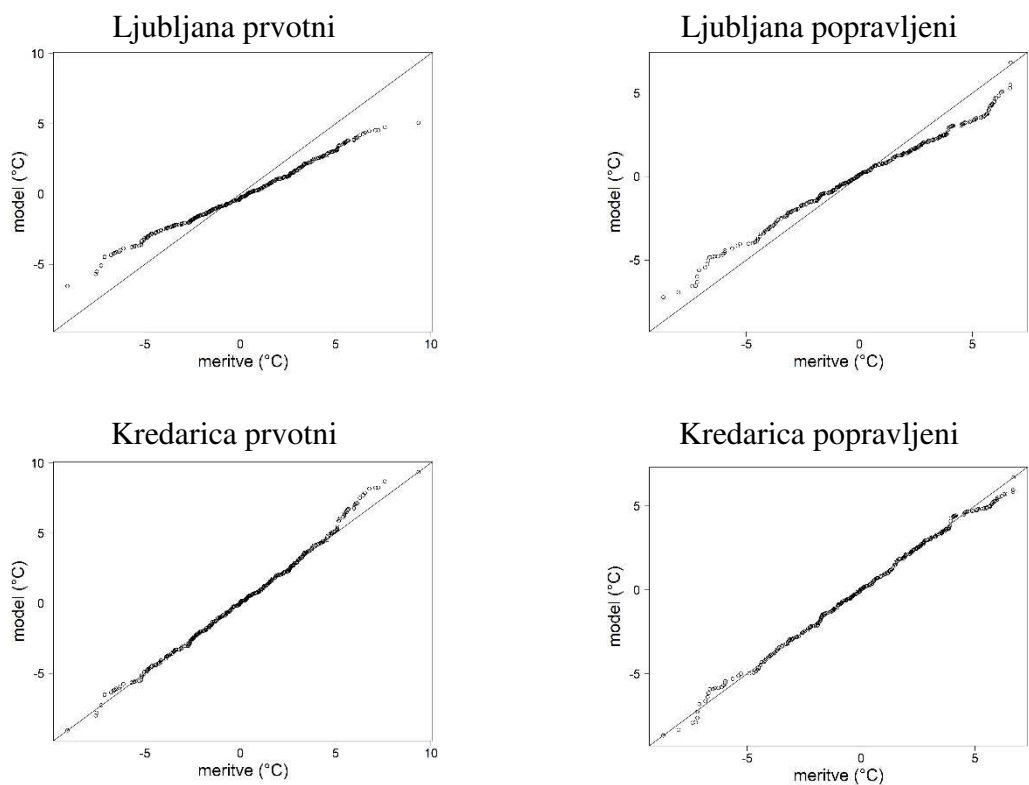
Slika 6 - Zglajeni letni poteki odnikov najvišje temperature od povprečne temperature v modelskih celicah interpoliranih meritev (levo) in modelskih simulacij modela EC-EARTH\HIRHAM5 (desno), v katerih sta Ljubljana (zgoraj) in Kredarica (spodaj). Najnižji razred predstavlja primere brez padavin, ostali trije razredi pa so ločeni po višini padavin (tercili), pri čemer razred 3 predstavlja najvišji padavinski razred.

Ker smo na začetku naredili razliko najvišje (T_{maks}) in povprečne temperature (T_{pov}), je sedaj popravljenemu odmiku ($\Delta T'_{maks-pov}$) potrebno prišteti vrednost povprečne temperature. Prištejemo popravljeno vrednost za povprečno temperaturo T'_{pov} , da se nam ohranja trend. Končni izračun predstavlja enačba:

$$\begin{aligned}
 & T'_{maks}(t_{kal}, model)[razred, dan] \\
 & = \Delta T'_{maks-pov}(t_{kal}, model)[razred, dan] + \tilde{T}_{maks-pov}(t_{kal}, meritve)[razred, dan] \\
 & + T'_{pov}(t_{kal}, model)[dan]
 \end{aligned}$$

Tudi v tem primeru je postopek enak, kot je bil opisan za dnevno povprečno temperaturo v projekcijskem obdobju in dnevno najvišjo temperaturo v primerjalnem obdobju. Potrebno je paziti, da prištejemo popravljeno vrednost za povprečno temperaturo (T'_{pov}) in razliko med letnima hodoma v projekcijskem in primerjalnem obdobju. Končni izračun predstavlja enačba:

$$T'_{maks}(t_{proj}, model)[razred, dan] = \Delta T'_{maks-pov}(t_{proj}, model)[razred, dan] + \tilde{T}_{maks-pov}(t_{kal}, meritve)[razred, dan] + T'_{pov}(t_{proj}, model)[dan] + \{ \tilde{T}_{maks-pov}(t_{proj}, model)[razred, dan] - + \tilde{T}_{maks-pov}(t_{kal}, model)[razred, dan] \}$$



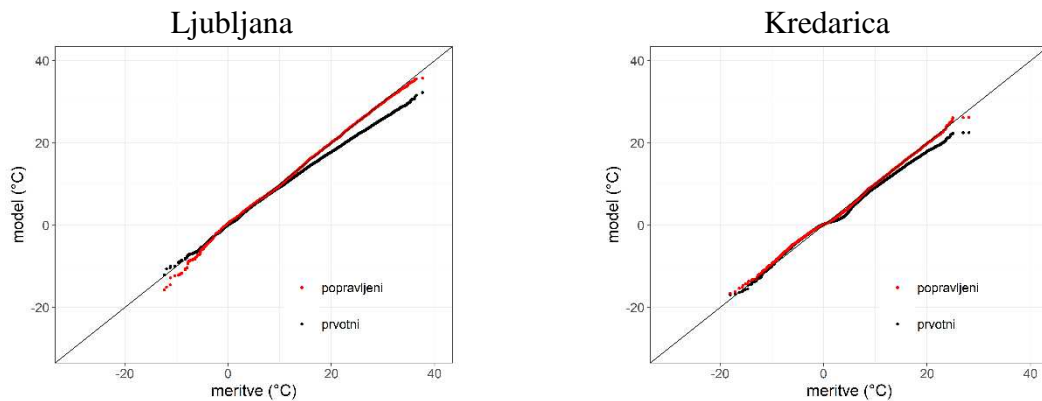
Slika 7 - Primerjava med prvotnimi (levo) in popravljenimi (desno) odmiki od letnega hoda za najnižji padavinski razred in 31-dnevno časovno okno pri dnevni najvišji temperaturi zraka za modelski celici modela EC-EARTH\HIRHAM5, v katerih sta Ljubljana (zgoraj) in Kredarica (spodaj). Največje odstopanje je vidno pri Kredarici, kjer prvotni modelski podatki zelo odstopajo od meritev.

Lahko se zgodi, da so vrednosti popravkov odmikov tako velike, da so popravljene vrednosti najvišje temperature manjše od povprečne temperature in obratno pri najnižji temperaturi. V teh primerih te popravke zanemarimo in imajo končni popravki obliko:

$$T'_{maks} = T'_{pov} \pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Positivni predznak se nanaša na najvišje dnevne temperature, negativni pa na najnižje. S tem se izognemo ne fizikalnim vrednostim. Takšnih primerov je bilo v obdobju 1981-2100 okoli deset za obe spremenljivki skupaj.

Končni popravki so za izbrani primer prikazani na Slika 8.



Slika 8 - Primerjava med prvotnimi (črna) in popravljenimi (rdeča) modelskimi podatki za dnevno najvišjo temperaturo za modelski celici modela EC-EARTH HIRHAM5, v katerih sta Ljubljana (levo) in Kredarica (desno). Primer prikazuje nabor vseh dnevnih vrednosti v primerjalnem obdobju. Popravljeni modelski podatki (rdeče točke) se bolje prilagajajo na podatke meritev kot prvotni modelski podatki (črne točke).

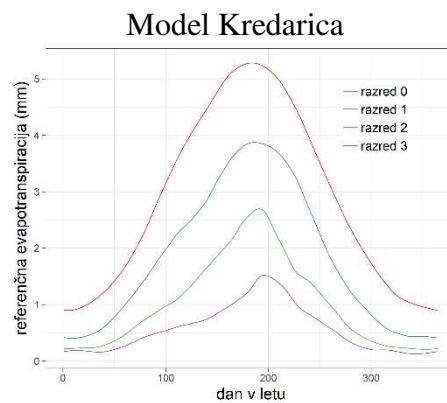
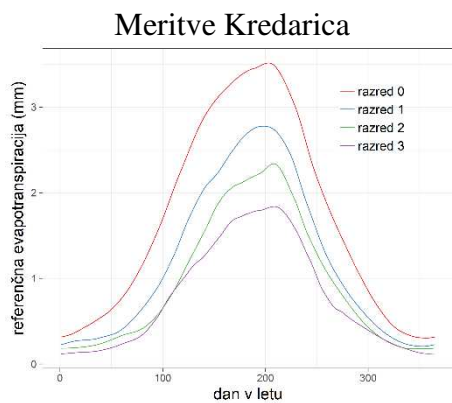
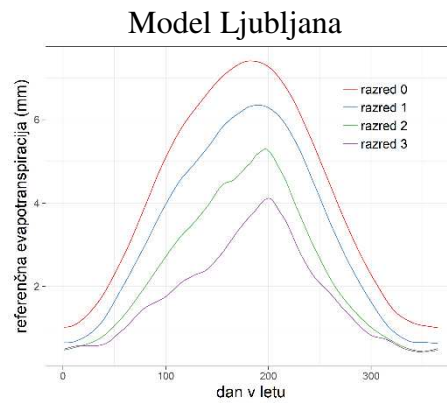
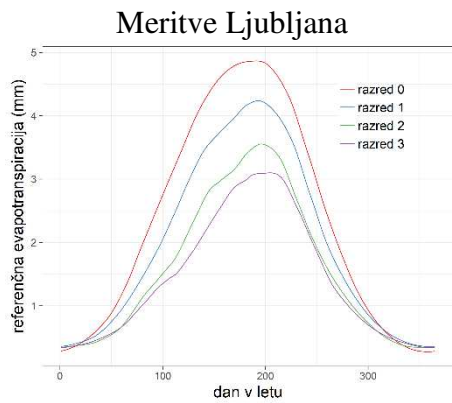
Referenčna evapotranspiracija

Tudi vrednosti referenčne evapotranspiracije (ET_0) smo popravljali s prirejeno metodo preslikave kvantilov. Popravljanje te spremenljivke se od ostalih razlikuje v tem, da ne popravljamo odnikov ET_0 od povprečnega letnega hoda, ampak absolutne vrednosti. Z odniki ne računamo, ker je porazdelitev vrednosti evapotranspiracije izrazito nesimetrična in so številne vrednosti blizu fizikalne spodnje meje (0 mm). Tudi tukaj popravljamo vrednosti za vsak padavinski razred posebej. Primer zglajenega letnega hoda (\tilde{ET}_0) prikazuje Slika 9 in posamezne popravke Slika 10.

Popravki za referenčno evapotranspiracijo (ET'_0) imajo obliko:

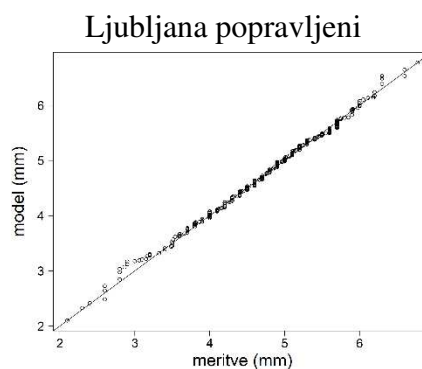
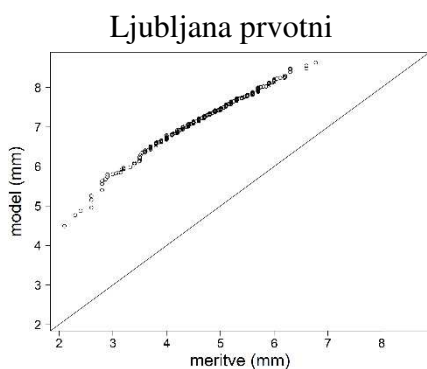
$$ET'_0(t, model)[razred, dan] = QDM \begin{pmatrix} ET_0(t_{kal}, meritve)[razred, dan], \\ ET_0(t_{kal}, model)[razred, dan], \\ ET_0(t_{proj}, model)[razred, dan] \end{pmatrix}$$

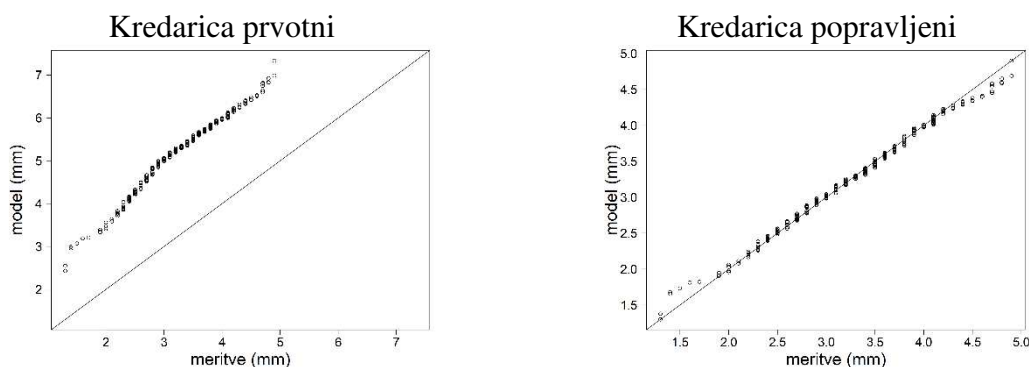
Kjer $ET_0(t_{kal}, meritve)$ predstavlja vrednosti referenčne evapotranspiracije v primerjalnem obdobju za meritve, $ET_0(t_{kal}, model)$ vrednosti modela v primerjalnem obdobju in $ET_0(t_{proj}, model)$ vrednosti modela v projekcijskem obdobju.



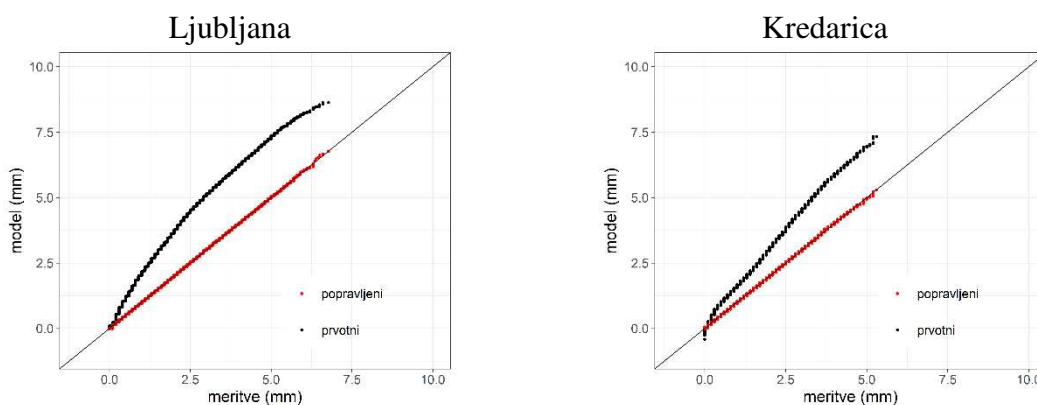
Slika 9 - Zglajeni letni hod za referenčno evapotranspiracijo ($\tilde{E}T_0$) v modelskih celicah modela EC-EARTH\HIRHAM5, v kateri sta Ljubljana (zgoraj) in Kredarica (spodaj). Najnižji razred predstavlja primere brez padavin, ostali trije razredi pa so ločeni po višini padavin (tercili), pri čemer razred 3 predstavlja najvišji padavinski razred.

Ponovno se popravki ločijo za primerjalno (t_{kal}) in projekcijsko (t_{proj}) obdobje. Končni popravki so za izbrani primer prikazani na Slika 11.





Slika 10 - Primerjava med prvotnimi (levo) in popravljenimi (desno) vrednostmi referenčne evapotranspiracije za najnižji padavinski razred in 31-dnevno časovno okno za modelski celici modela EC-EARTH\HIRHAM5, v katerih sta Ljubljana (zgoraj) in Kredarica (spodaj).



Slika 11 - Primerjava med prvotnimi (črna) in popravljenimi (rdeča) modelskimi podatki za referenčno evapotranspiracijo za modelski celici modela EC-EARTH\HIRHAM5, v katerih sta Ljubljana (levo) in Kredarica (desno). Primer prikazuje nabor vseh dnevni vrednosti v primerjalnem obdobju. Popravljeni modelski podatki (rdeče točke) se bolje prilagajajo na podatke meritev kot prvotni modelski podatki (črne točke).

Lahko se zgodi, da z omenjenim postopkom popravljanja referenčne evapotranspiracije dobimo negativne vrednosti, kar je fizikalno nemogoče. V takšnih primerih vse negativne vrednosti postavimo na nič.

Zaključek

Za odpravljanje pristranskosti modelskih rezultatov regionalnih podnebnih modelov obstaja več metod z različnimi prednostmi in slabostmi. Pri metodi preslikave kvantilov, ki smo jo uporabili na višini padavin, se malce spremeni časovni trend v ekstremnih padavinah. Prednosti te metode pa sta hitrost in nezahtevnost. Druga uporabljena metoda, preslikava kvantilov odklonov, ohrani dolgoletni časovni trend, vendar je računsko zelo zahtevna in dolgotrajna. Pri odpravljanju statističnih napak je smotno upoštevati povezanost spremenljivk, npr. temperaturnih ali temperature zraka in višine padavin, kar še

dodatno zaplete proces odpravljanja napak. Kljub vsemu pa se lahko končni rezultat v kakšnem statističnem pogledu še vedno pomembno razlikuje od stvarnosti. Zaradi hitrega razvoja podnebnih modelov, računskih metod za odpravljanje pristranskosti in vse bolj zmogljivih računalnikov lahko že čez nekaj let pričakujemo podnebne scenarije z večjo ločljivostjo. To bo nedvomno dobrodošlo za mnoge končne uporabnike. Pri oceni prihodnjih podnebnih sprememb se tako utegne negotovost zaradi nepopolnih podnebnih modelov precej zmanjšati, po drugi strani pa povečati pomembnost izbire scenarija izpustov toplogrednih plinov.

Literatura

- Benestad, R., Haensler, A., Hennemuth, B., Illy, T., Jacob, D., Keup-Thiel, E., . . . Zsebeház, G. (2018). Guidance for EURO-CORDEX climate projections data use (EURO-CORDEX Guidelines Version 1.0 - 2017.08). EURO-CORDEX: <https://www.euro-cordex.net/imperia/md/content/csc/cordex/euro-cordex-guidelines-version1.0-2017.08.pdf> (Pridobljeno 10.09.2018)
- Themeßl, M. J., Gobiet, A., Heinrich, G. (2011). Empirical-statistic downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal. *Climate Change* 112, 2, 449-468. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-011-0224-4> (Pridobljeno 08.01.2019)
- Wilcke, R., Mendlik, T., Gobiet, A. (2013). Multi-variable error correction of regional climate models. Springer. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-013-0845-x> (Pridobljeno 05.01.2019)
- Switanek, M., Troch, P., Castro, C., Leuprecht A., Chang H., Mukherjee R., Demaria, E. (2017). Scaled distribution mapping: a bias correction method that preserves raw climate model projected changes. *Hydrology and Earth System Sciences* 21, 2649-2666. <https://doi.org/10.5194/hess-21-2649-2017> (Pridobljeno 22.10.2018)
- Cannon, A. (2016). Multivariate Bias Correction of climate Model Output: Matching Marginal Distributions and Intersample Dependence Structure. *Journal of Climate*, October 2016. <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JCLI-D-15-0679.1> (Pridobljeno 10.01.2019)
- Cannon, A., Sobie, S., Murdock, T. (2015). Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? *Journal of Climate*, September 2015. <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JCLI-D-14-00754.1> (Pridobljeno 05.01.2019)
- Gudmundsson, L. (2016). Package `qmap`. <https://cran.r-project.org/package=qmap> (Pridobljeno 11.01.2019)
- Gudmundsson, L., Bremnes, J., Haugen, J., & Engen-Skaugen, T. (2012). Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations - a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences* (8), 3383–3390.
- Cannon, A. J. (2018). Package 'MBC'. <https://cran.r-project.org/packages=MBC> (Pridobljeno 11.01.2019)