

Regionalno pojavljanje porjavitve, povezane z vodo, v ozelenjujočem se svetu

Analiza trendov vegetacije in razpoložljivosti vode razkriva nov, nastajajoči dejavnik stresa za kopenske ekosisteme.



Orth et al., Max Planck Institute for Biogeochemistry

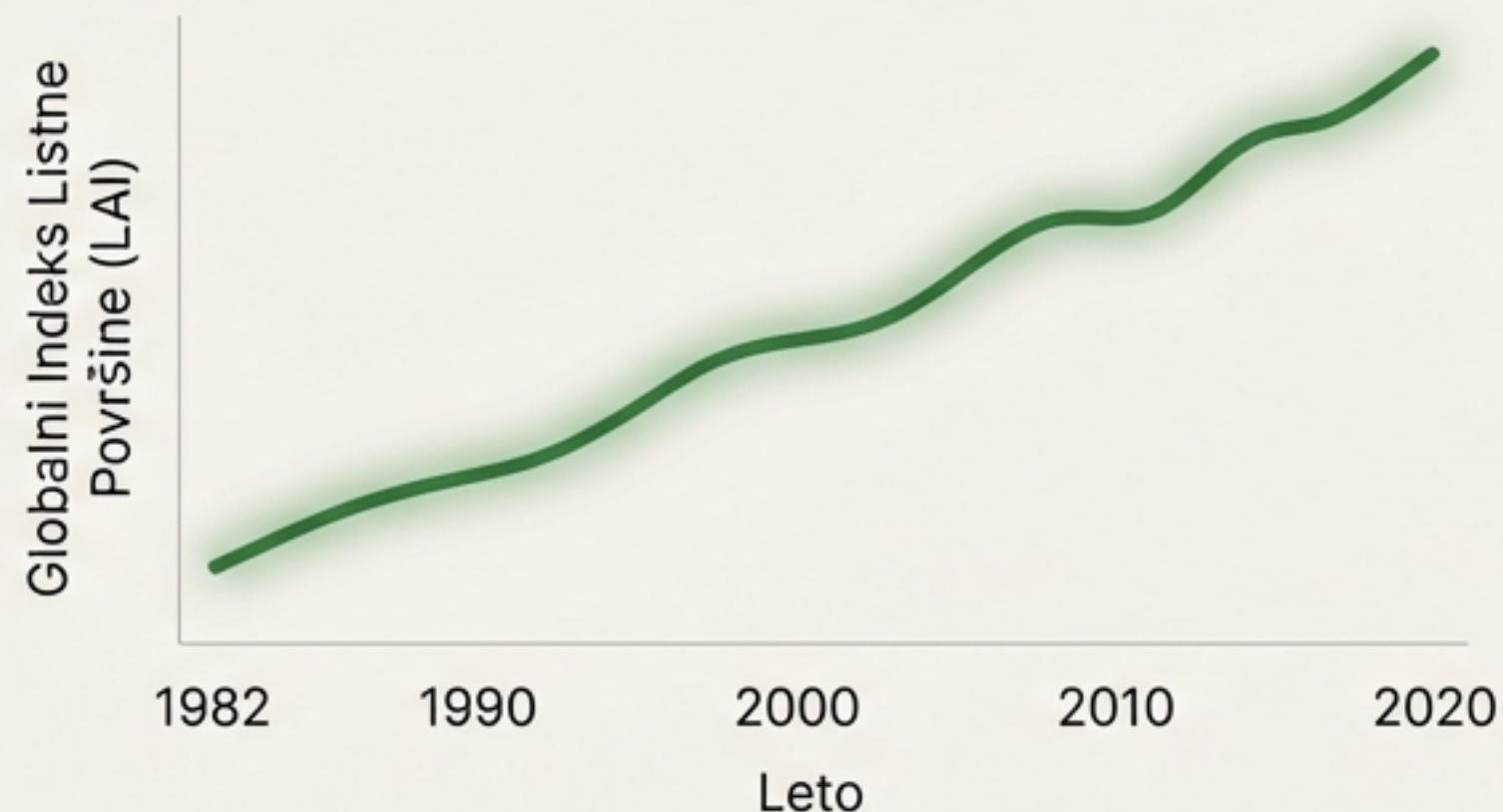
Zemlja ozelenjuje, kar poganjajo povišan CO₂ in podnebne spremembe

Od osemdesetih let prejšnjega stoletja satelitski podatki kažejo na splošno ozelenjevanje kopnega.

Glavni dejavniki tega pojava so:

- **Gnojenje s CO₂:** Povišane koncentracije atmosferskega CO₂ spodbujajo fotosintezo.
- **Podnebne spremembe:** Višje temperature v zmernih in arktičnih območjih podaljšujejo rastno dobo.
- **Spremembe v rabi zemljišč:** Namakanje, gnojenje in pogozdovanje (npr. na Kitajskem in v Indiji).

Ta trend prispeva k povečanemu ponoru ogljika in krepi ekosistemske storitve.



CO₂



Temperatura

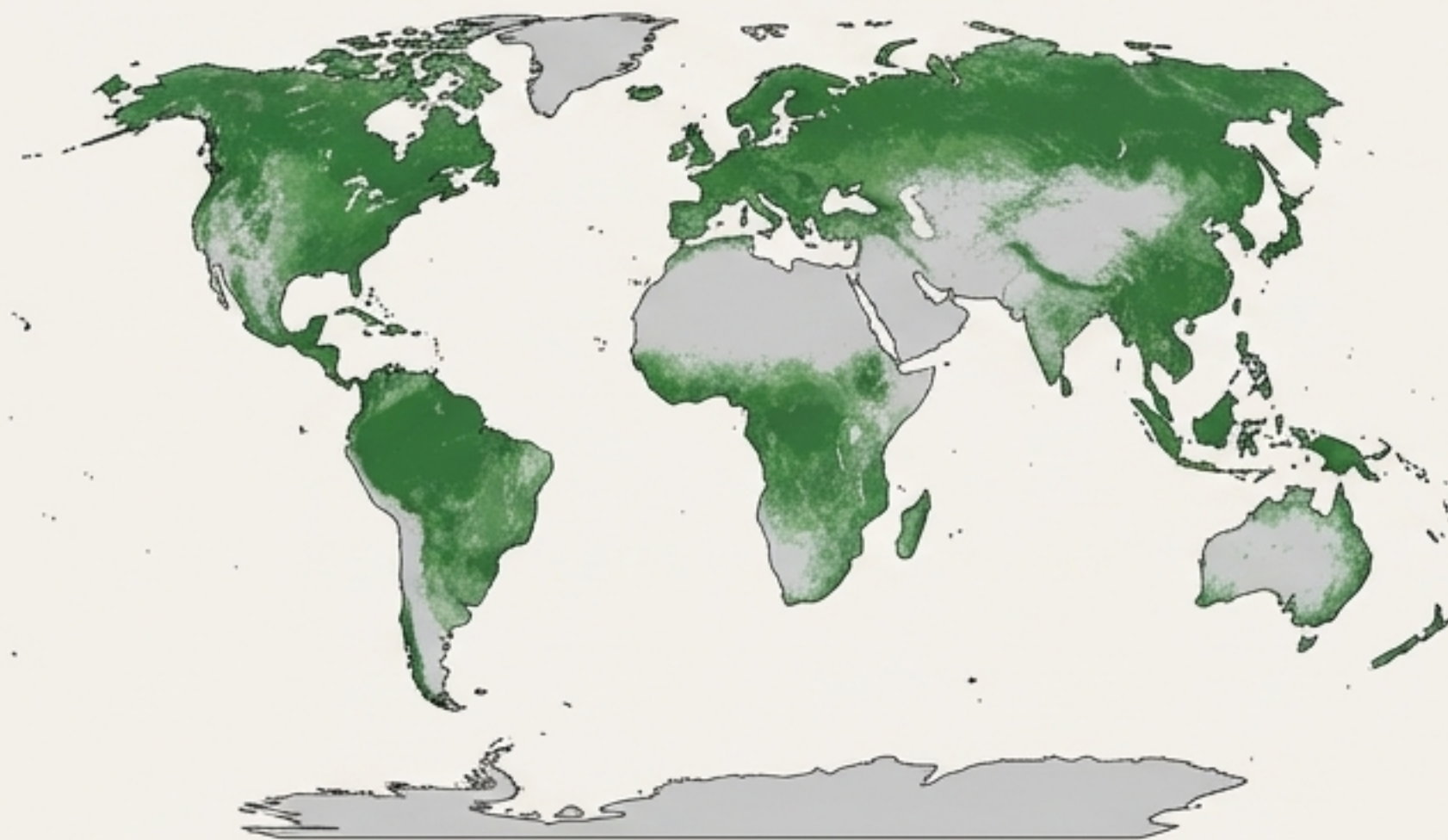


Raba zemljišč

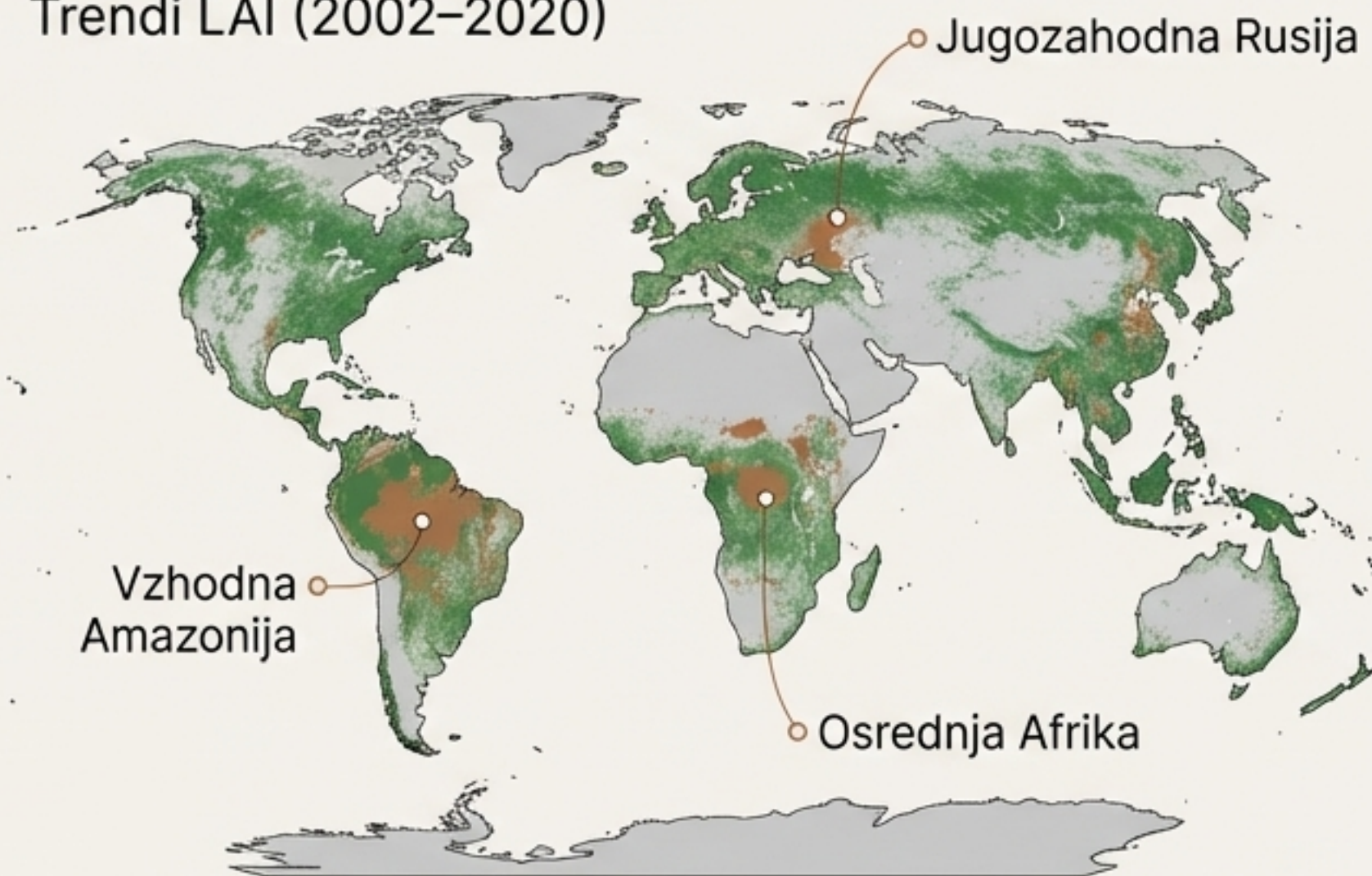
Vendar se trend ozelenjevanja upočasnjuje, v ključnih regijah pa se pojavlja "porjavitev"

Podrobnejši pregled podatkov razkrije, da ozelenjevanje ni več tako izrazito kot v preteklosti. V drugem opazovanem obdobju (2002–2020) se v nekaterih tropskih in evrazijskih regijah pojavljajo območja zmanjšane zelenosti.

Trendi LAI (1982–2001)



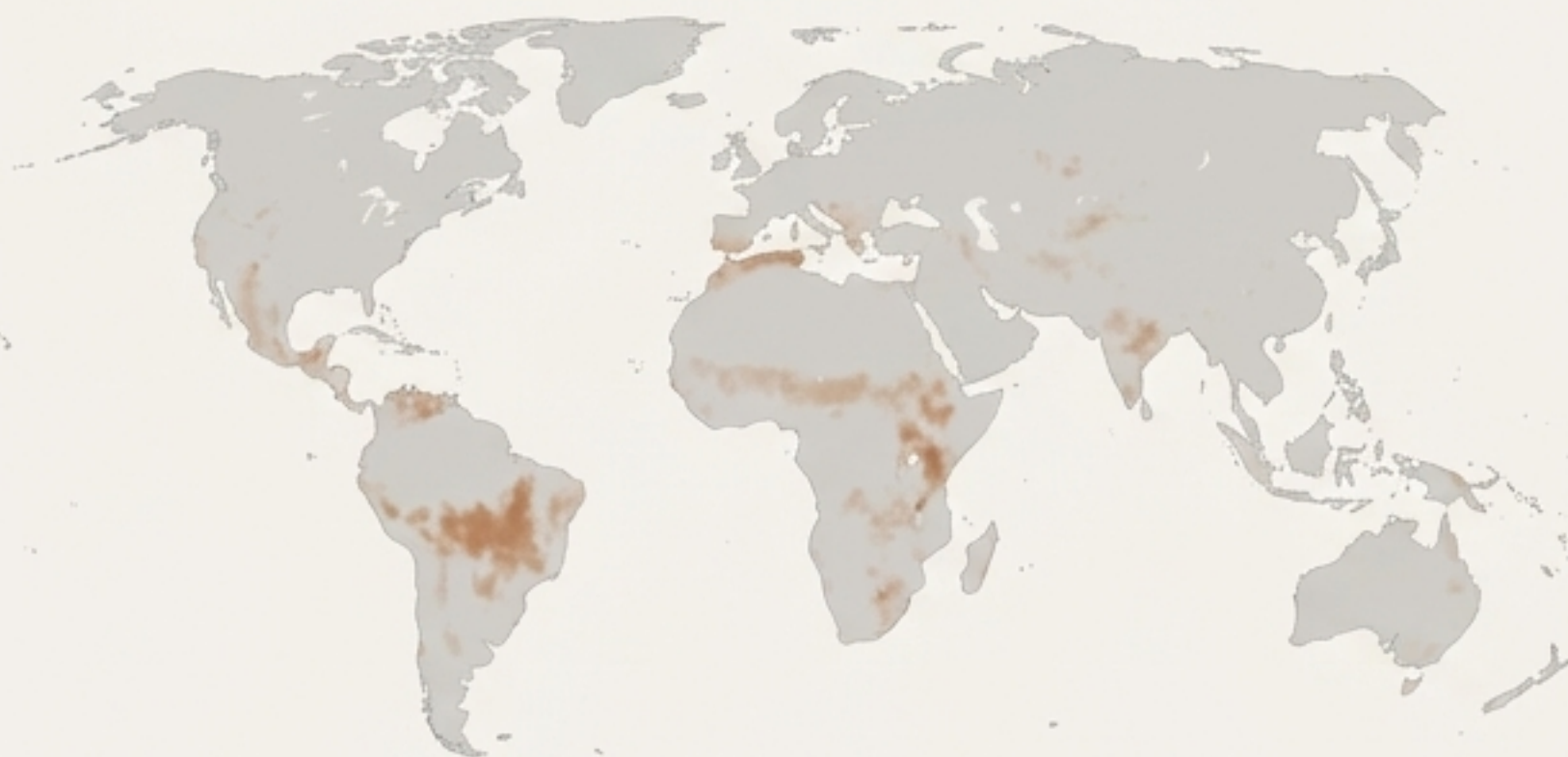
Trendi LAI (2002–2020)



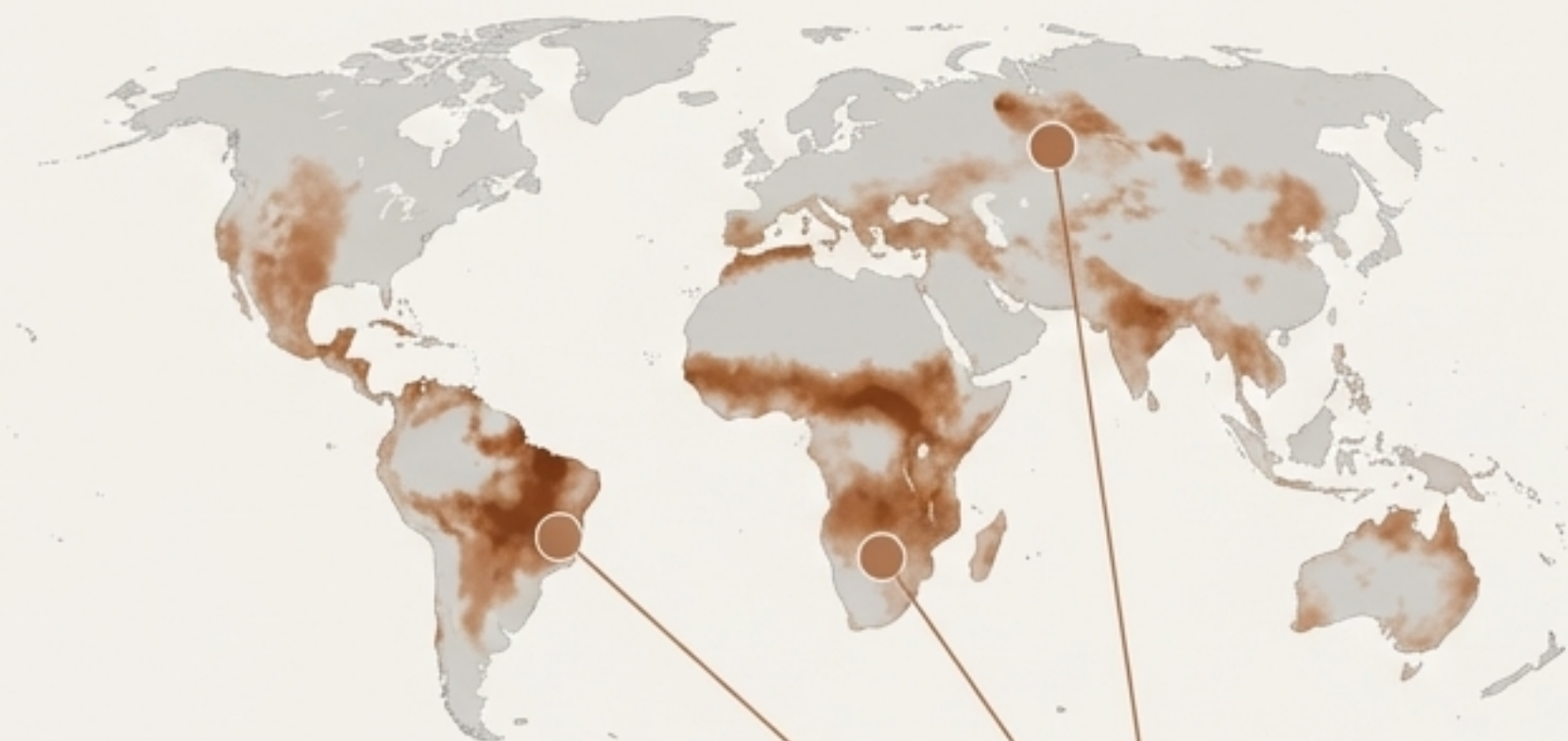
Vzporedno s porjavitvijo se v istih regijah pojavljajo trendi izsuševanja

Analiza štirih neodvisnih spremenljivk, povezanih z vodo (vlaga v tleh, padavine, VPD, indeks sušnosti), kaže na vse večje pomanjkanje vode v nekaterih delih sveta.

Ujemanje trendov izsuševanja (1982–2001)



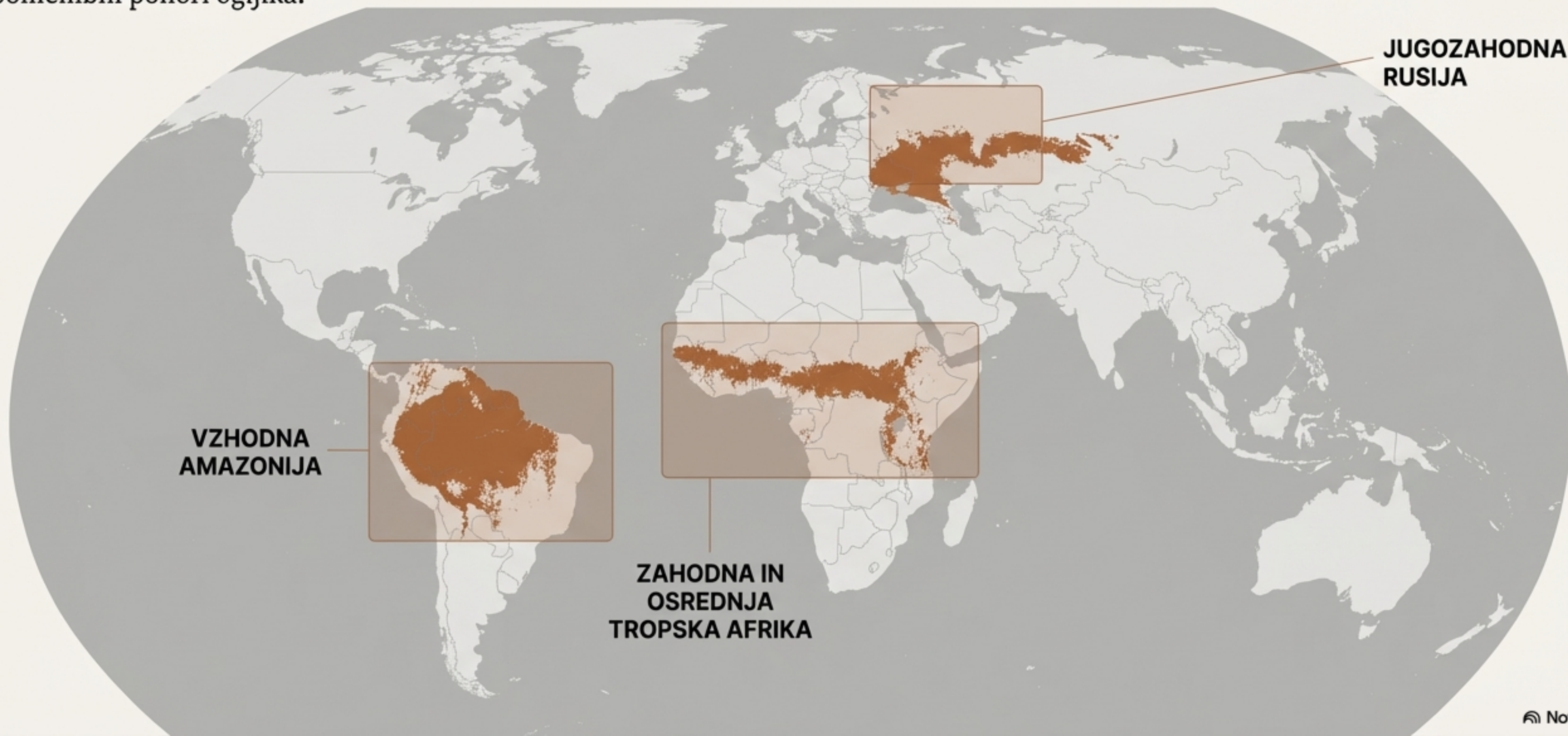
Ujemanje trendov izsuševanja (2002–2020)



Površina kopnega z znatnim trendom izsuševanja se je povečala s ~7 % v prvem obdobju na ~9 % v drugem.

Območja porjavitve se v obdobju 2002–2020 močno ujemajo z območji izsuševanja

Ko združimo podatke o trendih vegetacije in vode, opazimo jasno prostorsko sovpadanje. Regije, ki so v zadnjih dveh desetletjih doživele največjo porjavitev, so tudi tiste, kjer se je zmanjšala razpoložljivost vode. To velja zlasti za regije, ki so zgodovinsko pomembni ponori ogljika.



V obdobju 2002–2020 se v več kot 20 % območij s pomembno porjavitvijo kaže tudi znatno izsuševanje

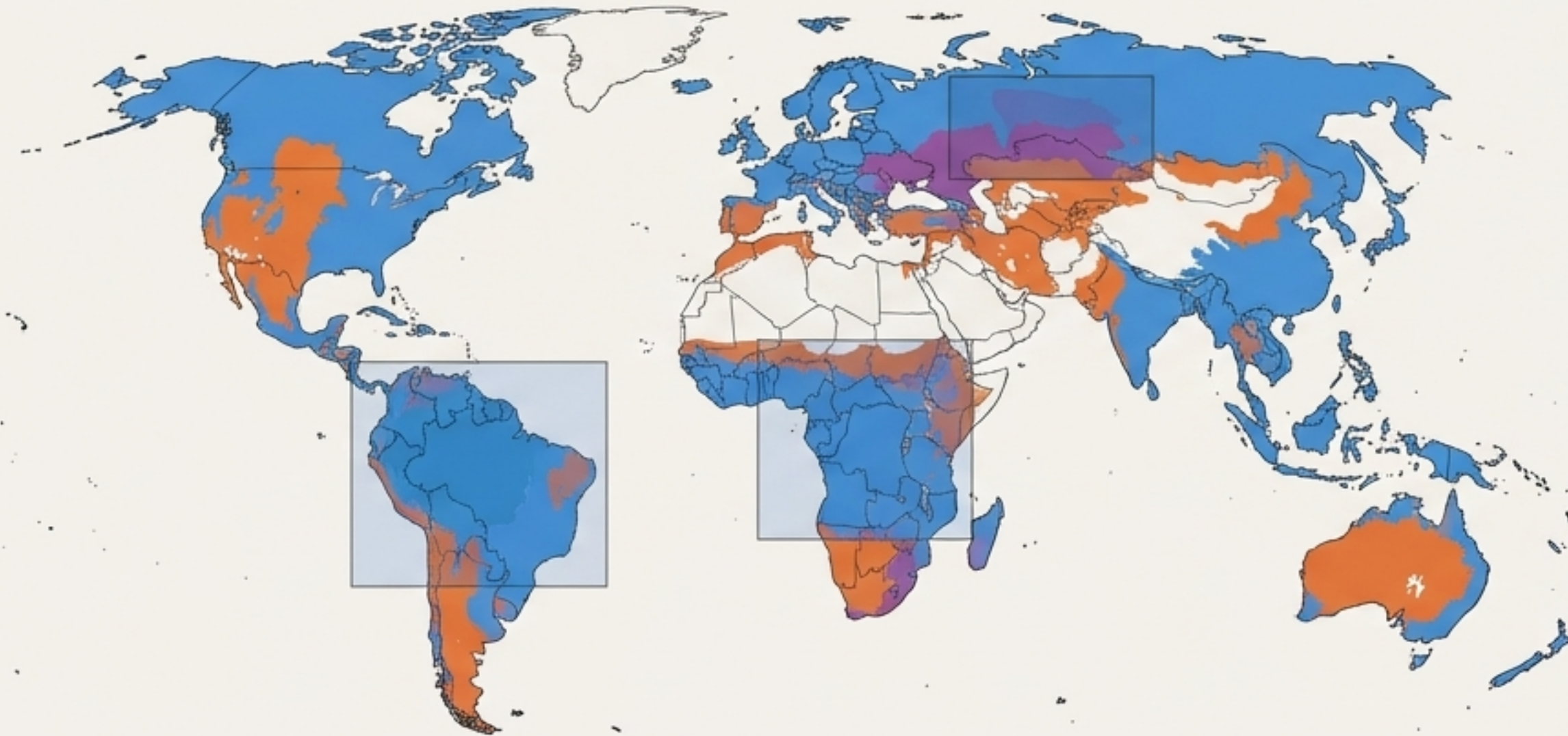
Analiza kaže, da je v opazovanih območjih porjavitev pomanjkanje vode pomemben dejavnik. Ta ocena je verjetno konzervativna, saj ne upošteva območij, kjer je izsuševanje morda upočasnilo ozelenjevanje, ne da bi povzročilo dejansko porjavitev.

Opazovanja (2002–2020): Delež območij porjavitve, ki sovpadajo z izsuševanjem

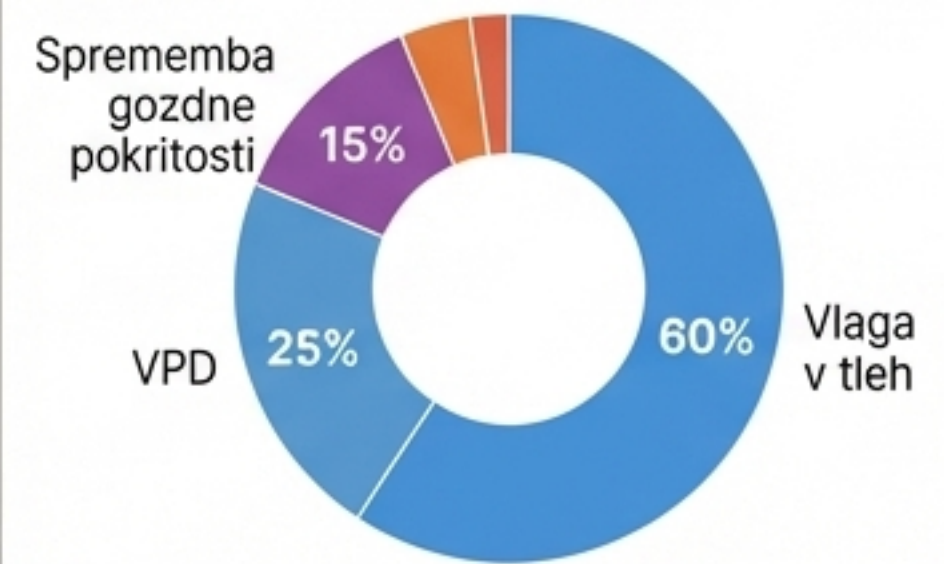


Regresijska analiza potrjuje, da so spremenljivke, povezane z vodo, ključni dejavniki dinamike LAI v žariščnih regijah

Za oceno vpliva različnih dejavnikov smo izvedli večkratno linearno regresijo. Analiza je vključevala uravnotežen nabor spremenljivk, povezanih z vodo (vlaga v tleh, padavine, VPD), energijo (temperatura, sevanje) in spremembami v rabi zemljišč.



Prevladujoči dejavniki v žariščnih regijah



V žariščnih regijah porjavitve sta **pomanjkanje vode (vlaga v tleh)** in **atmosfersko povpraševanje (VPD)** prevladujoča dejavnika sprememb vegetacije.

-  Spremenljivke, povezane z vodo
-  Spremenljivke, povezane z vodo
-  Spremenljivke, povezane z energijo
-  Sprememba rabe zemljišč

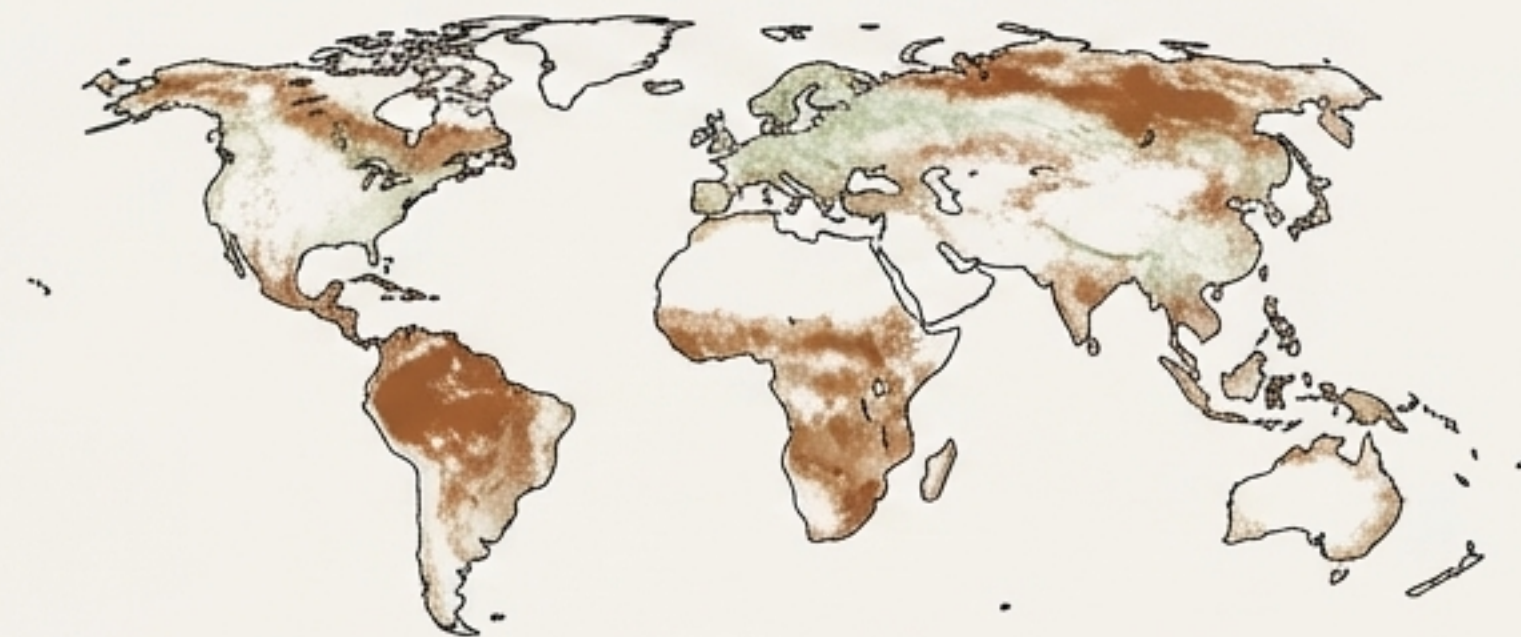
Modeli Zemljinega sistema se trudijo natančno ponoviti opazovano regionalno porjavitev

Primerjava med satelitskimi opazovanji in rezultati sedmih modelov Zemljinega sistema (CMIP6) kaže na pomembne razlike. Medtem ko se v opazovanjih obseg porjavitve v drugem obdobju poveča, se v povprečju modelov rahlo zmanjša.

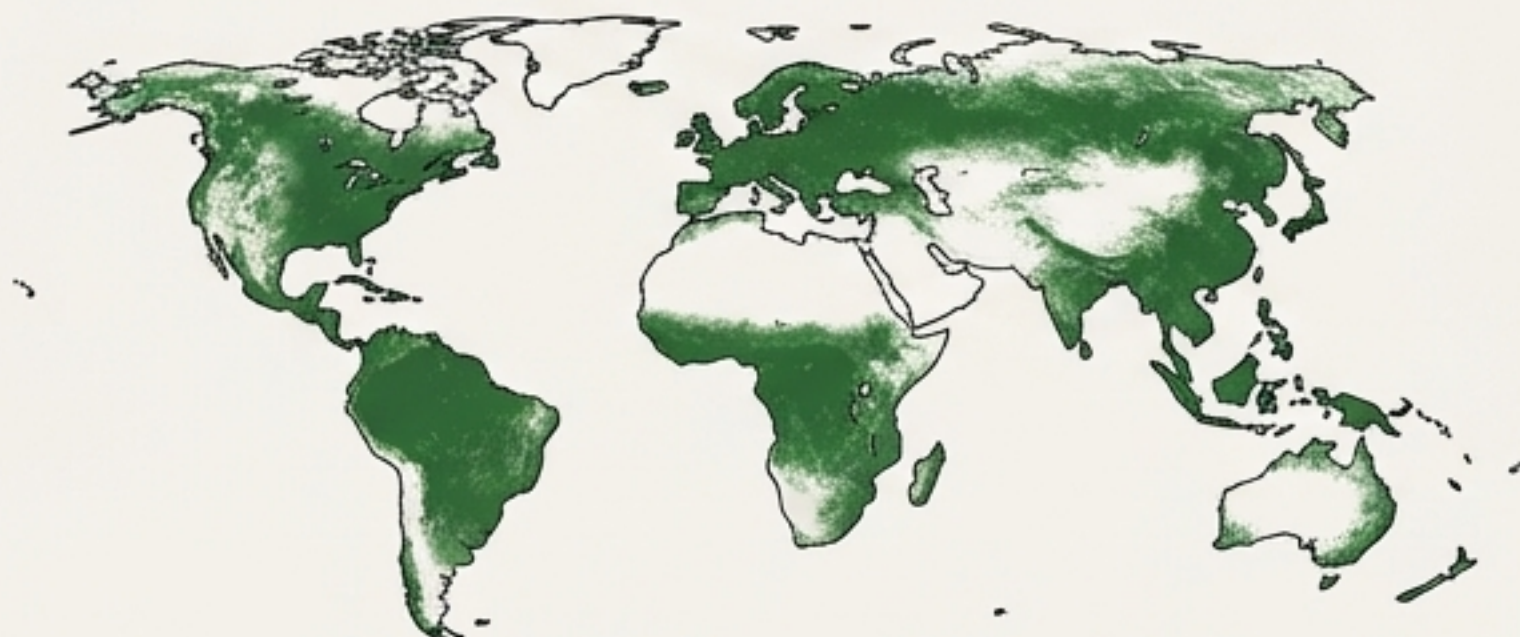
Opazovanja: 1982–2001



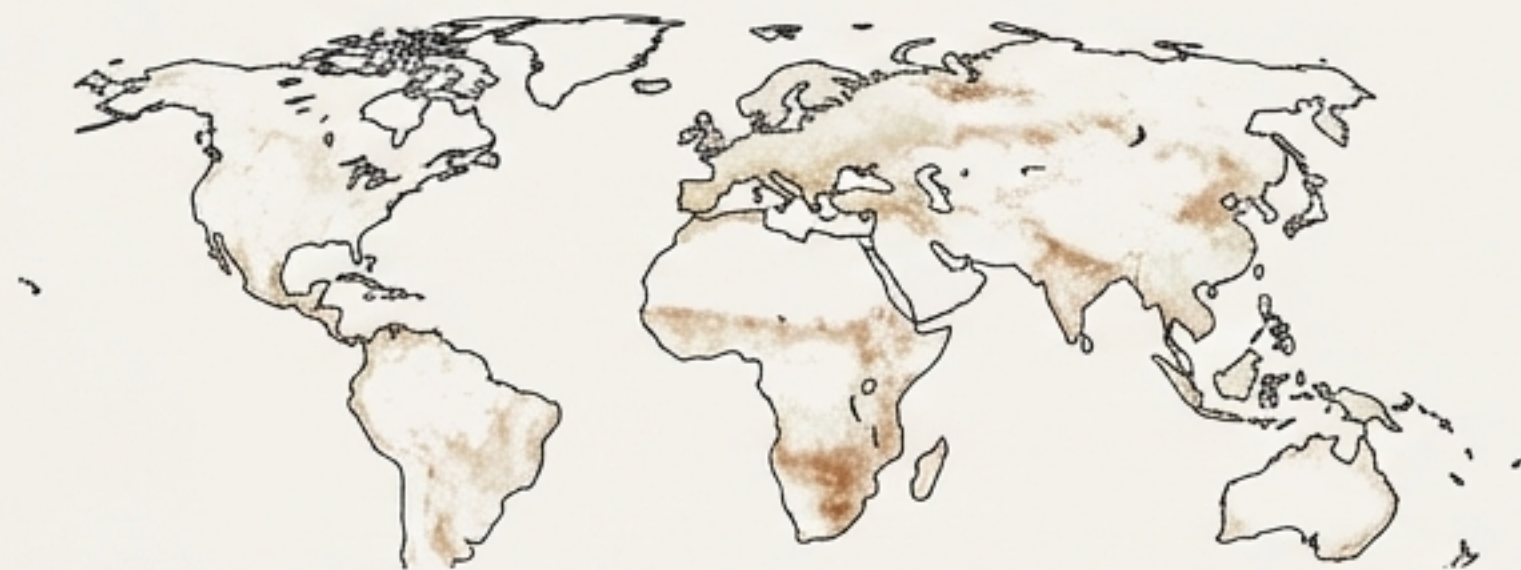
Opazovanja: 2002–2020



Povprečje modelov: 1982–2001



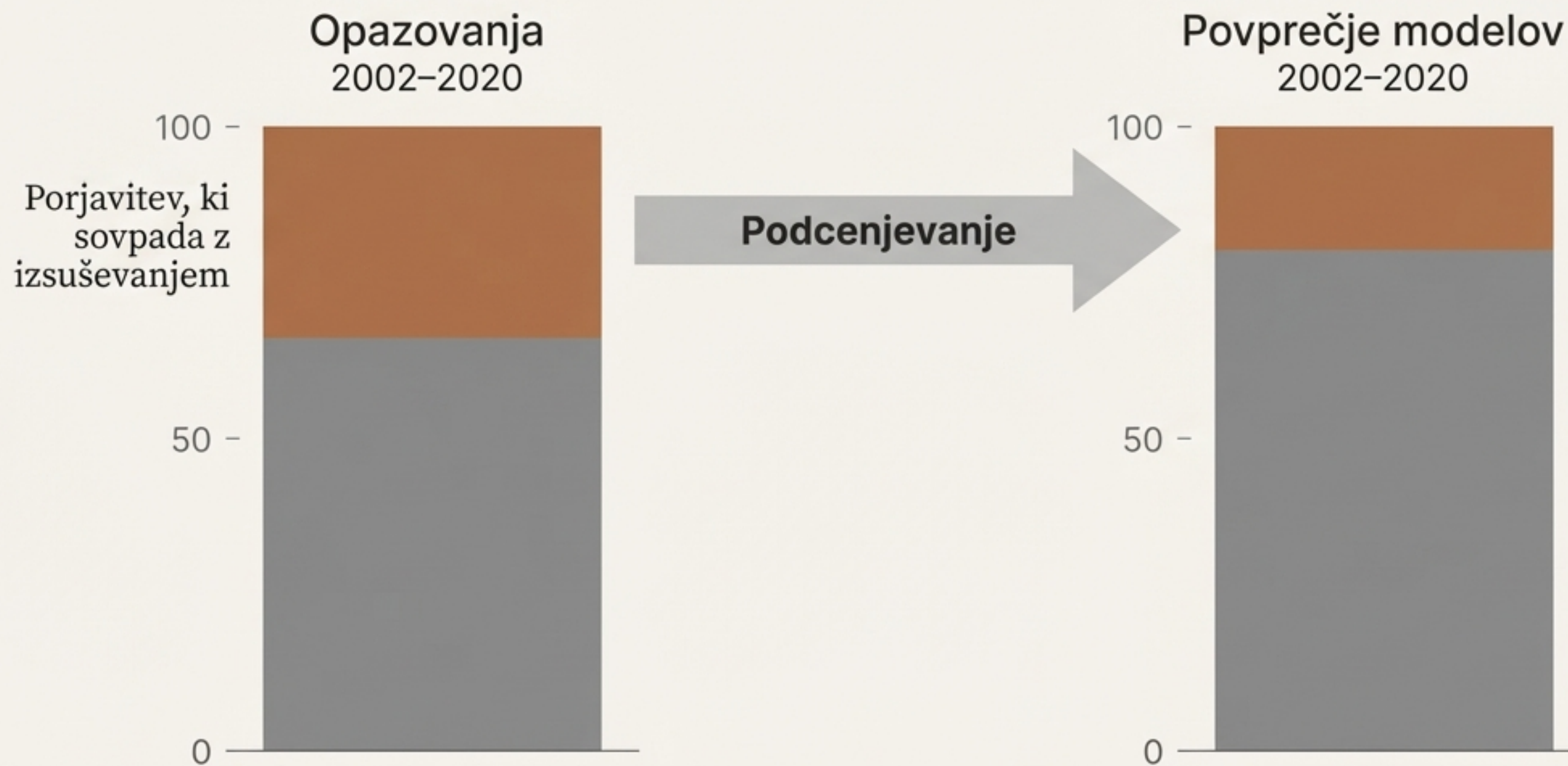
Povprečje modelov: 2002–2020



Obstaja velika variabilnost med posameznimi modeli, kar kaže na negotovost pri simulaciji odzivov vegetacije.

Modeli podcenjujejo obseg porjavitve, ki jo povzroča pomanjkanje vode

Primerjava območij, kjer porjavitev sovpada z izsuševanjem, kaže, da modeli v povprečju simulirajo **manjšo vlogo pomanjkanja vode** kot gonilne sile porjavitve v primerjavi z opazovanji.



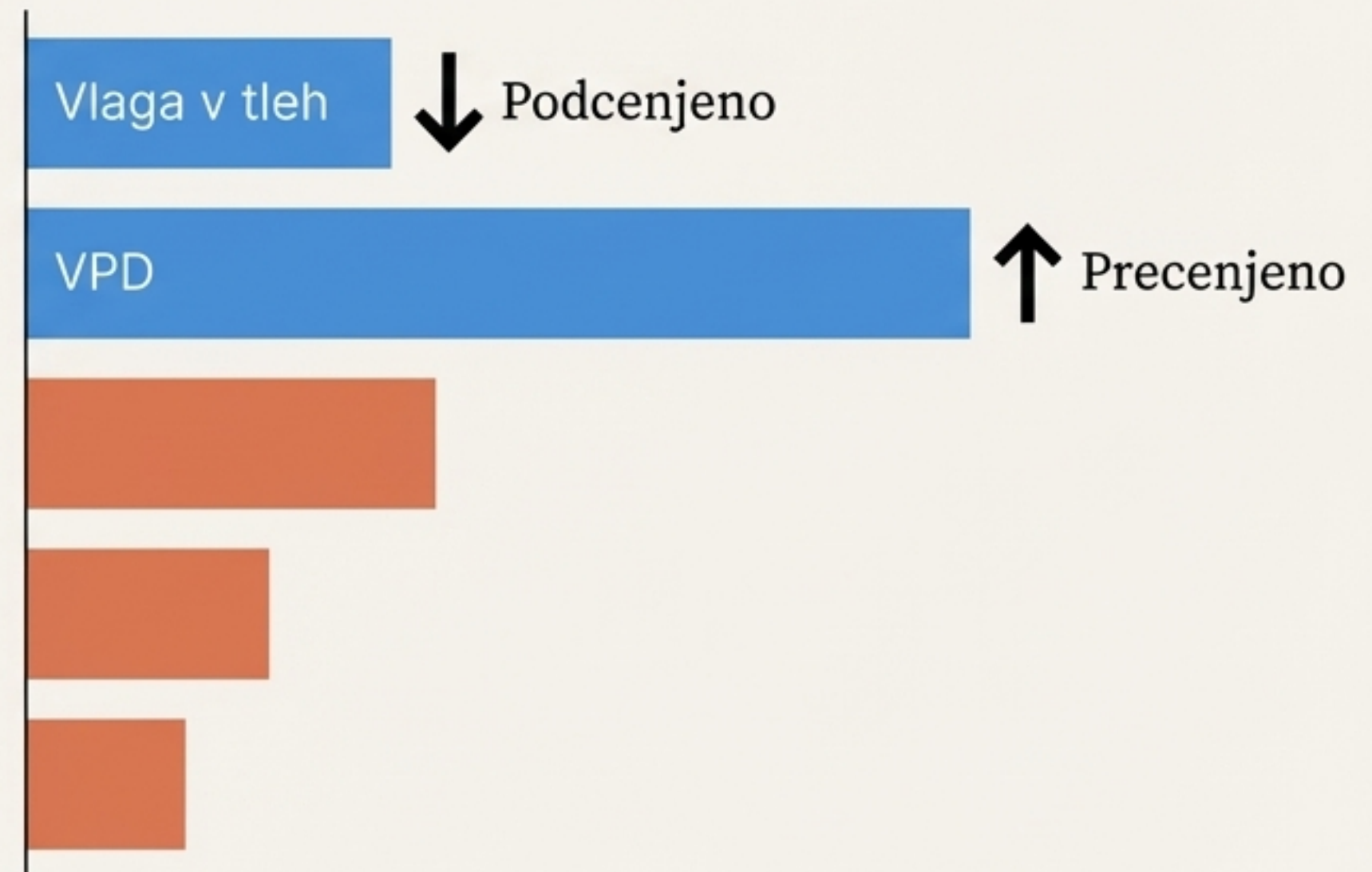
Modeli precenjujejo vpliv atmosferskega povpraševanja po vodi (VPD) in podcenjujejo vlogo vlage v tleh

Regresijska analiza, uporabljena na rezultatih modelov, razkrije, da modeli pripisujejo večji pomen atmosferskemu povpraševanju po vodi (VPD) in manjši pomen neposredni razpoložljivosti vode v tleh. To je verjetno posledica načina, kako modeli simulirajo stomatalno prevodnost, ki pogosto neposredno ne upošteva vlage v tleh.

Glavni dejavniki v opazovanjih (globalno)



Glavni dejavniki v modelih (povprečje)



Ključna spoznanja: Pojav porjavitve, povezane z vodo, postavlja nove omejitve za kopenski ponor ogljika

1



Paradoks ozelenjevanja

Globalno ozelenjevanje se upočasnjuje, v tropskih regijah, ki so ključni ponori ogljika, pa se pojavlja porjavitev.

2



Vodni dejavnik

Ta porjavitev se močno ujema z regionalnimi trendi izsuševanja, vključno z zmanjšano vlago v tleh in povečanim atmosferskim povpraševanjem po vodi (VPD). Regresijska analiza potrjuje, da je voda ključni dejavnik.

3



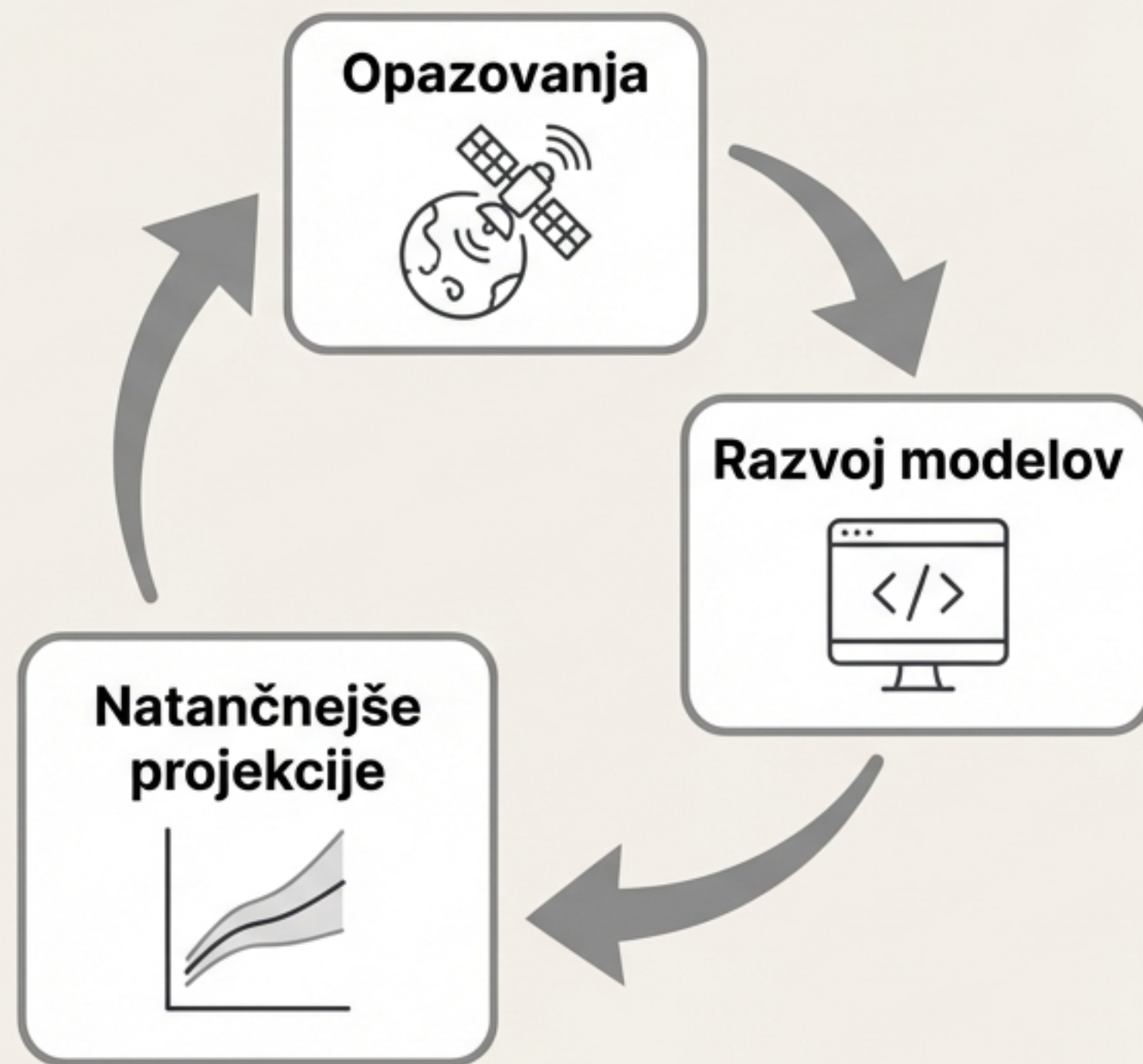
Vrzeli v modelih

Modeli Zemljinega sistema trenutno ne uspejo v celoti zajeti tega nastajajočega pojava, saj pogosto podcenjujejo vpliv vlage v tleh, kar vpliva na zanesljivost prihodnjih podnebnih projekcij.

Za natančnejše podnebne napovedi je potrebno izboljšano spremljanje in modeliranje odzivov vegetacije na vodo

Naše ugotovitve predstavljajo novo omejitev za razvoj modelov in poudarjajo potrebo po:

- **Izboljšanjem spremljanju:** Neprekinjeno opazovanje trendov razpoložljivosti vode z uporabo različnih podatkovnih virov.
- **Boljših modelih:** Vključitev podrobnejših predstavitev rastlinske hidravlike in formul za vodni stres za izboljšanje simulacij odziva stomatalne prevodnosti.
- **Celostni analizi:** Eksplicitno upoštevanje več spremenljivk, povezanih z vodo (tako ponudbe kot povpraševanja), pri prihodnjih analizah ozelenjevanja in delovanja ekosistemov.



Pregled podatkov in metodologije



Podatkovni viri (1982–2020)

Vegetacija (LAI)

SNU (glavni vir), MODIS (za validacijo v obdobju 2002–2020).

Hidrometeorologija

ERA5 (temperatura, sevanje), GLEAM (vlaga v tleh), MSWEP & CPC (padavine).

Modeli

7 modelov Zemljinega sistema iz arhiva CMIP6 (npr. CMCC-ESM2, MPI-ESM1-2-HR itd.).



Raba zemljišč

ESA CCI.



Metodologija analize

Časovno obdobje

Razdeljeno na dve polovici: 1982–2001 in 2002–2020.

Analiza trendov

Mann-Kendall test ($p < 0.1$) za določanje statistično **značilnih** trendov LAI in vodnih spremenljivk.

Analiza dejavnikov

Večkratna **linearna regresija** z izbiro modela na podlagi Akaikejevega informacijskega kriterija (AIC) za določitev relativne pomembnosti dejavnikov (metrika 'lmg'). Upoštevani so bili modeli z $R^2 > 0.36$.

Na podlagi raziskave: Regional Emergence of Water-Related Browning in a Greening World

Polna citacija

Orth, R., Denissen, J. M. C., Kroll, J., et al. (2025).
Regional Emergence of Water-Related Browning in a
Greening World. *Global Change Biology*.

Glavne sodelujoče institucije

Max Planck Institute for Biogeochemistry, University
of Freiburg, European Centre for Medium-Range
Weather Forecasts, Ghent University in druge.

Kontakt za korespondenco

Rene Orth (rene.orth@ecoclim.uni-freiburg.de)



Izvirni članek in podatki