

AZ ÉVSZAKOS CSAPADÉKÖSSZEG VÁLTOZÁSA NYERS ÉS HIBAKORRIGÁLT REGIONÁLIS KLÍMAMODELL ADATOK ALAPJÁN MAGYARORSZÁGON

Simon Csilla , Torma Csaba Zsolt , Kis Anna 

ELTE Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet,
Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A
e-mail: csilluss58@student.elte.hu, csaba.zsolt.torma@ttk.elte.hu, kiaqagt@staff.elte.hu

Bevezetés

Napjaink egyik fő kihívását jelenti a klímaváltozás, amelynek kapcsán számolnunk kell az éghajlati szélsőségek gyakoriságának és intenzitásának akár együttes növekedésével is. Gondoljunk például a rövid idő alatt lehulló, nagy mennyiségű csapadékra, vagy a sorra megdőlő maximum-hőmérsékleti rekordokra. Ezek a szélsőséges időjárási jelenségek a jövőben várhatóan egyre gyakrabban fognak bekövetkezni (IPCC, 2021), és jelentős károkat okozhatnak a gazdaság különböző szektoraiiban, az infrastruktúrában és az ökoszisztémában egyaránt. Fontos megemlíteni az éghajlati rendszer által az emberi szervezetre gyakorolt terhelést is, amellyel elsősorban a nyári hőhullámok idején kell számolnunk.

A technika fejlődésének köszönhetően a globális és a regionális klímamodellek kulcsfontosságú eszközeivé váltak az éghajlatkutatásnak, és a klímaváltozással kapcsolatos információk szolgáltatásának (IPCC, 2013). Segítségükkel nem csak a múlt és a jelen éghajlata, hanem a jövőben várható változások is kiszámíthatók. A globális éghajlati modellek (GCM) durvább (100–500 km-es) horizontális felbontással rendelkeznek, mint a regionális társaik, emiatt a globális modelledményekben a szélsőségek elnagyoltan, esetleg hibásan jelennek meg. Ezzel szemben a regionális klímamodellek (RCM) egy kiválasztott területre korlátozódnak, ahol finomabb felbontással (10–50 km) rendelkeznek; ezáltal képesek leírni olyan, kisebb skálájú folyamatokat is, amelyeket a GCM-ek durvább felbontása nem tesz lehetővé (Farda et al., 2010). Az RCM-ek ténylegesen pozitív hozzáadott értéket biztosítanak, mivel jobban reprezentálják a szélsőséges eseményeket, leginkább a komplex topográfiával rendelkező part menti és hegyvidéki területeken (Torma et al., 2015; Fantini et al., 2018; Ciarlo et al., 2021), illetve az extrém csapadékesemények, valamint a helyi szélrendszerek esetén (Evin et al., 2021).

Fontos azonban figyelembe venni, hogy a projekciók különböző eredetű bizonytalansággal terheltek (Giorgi et al., 2009; Evin et al., 2021), amely fő forrásai közé tartozik az éghajlat belső változékonysága, a különböző kibocsátási scenáriók feltételezése, a modell dinamikája, valamint az alkalmazott parametrizáció pontatlanságai (Giorgi, 2005). A fellépő bizonytalanságok miatt a modellszimulációk hibával terheltek, eltérést mutatnak a mérésekhez, megfigyelésekhez képest – ezáltal a nyers modellszimulációk használata irreális eredményekhez vezethet. A bizonytalanság csökkentése a modellek együttes kiértékelésével, illetve hibakorrekciós eljárás alkalmazásával érhető el. A hibakorrekció során a modellezett meteorológiai változókat a múltbeli időszak mérési adatainak felhasználásával módosítják, így a valósághoz közelebb álló adatsorokkal dolgozhatunk. Ez különösen fontos, ha a modell outputok-at különböző hatásvizsgálatokhoz használják fel (pl. mezőgazdasági: Laux et al., 2021, hidrológiai: Addor & Seibert, 2014). Korábbi kutatások is alátámasztották, hogy a regionális klímamodell-szimulációk minőségének javításához hibakorrekciós eljárás alkalmazására van szükség (Halmstad et al., 2012; Fang et al., 2015; Ngai et al., 2016). A sikeres hibakorrekció elengedhetetlen feltétele továbbá egy jó minőségű, méréseken alapuló referencia adatbázis használata. Fontos azonban megjegyezni, hogy a legjobbnak vélt

módszereknek is vannak korlátai, hiszen minden esetben feltételezéssel élünk, amelyek közül a legjelentősebb, hogy a jövőbeli időszakokra vonatkozó hiba jellege megegyezik a múltban detektált hibával (Teutschbein & Seibert, 2012). Emellett nagy körültekintést igényel a használatuk, mert könnyen elveszhet az egyes meteorológiai változók közötti konzisztencia (Dobor et al., 2012). Kutatásunk részeként bemutatjuk az évszakos csapadékösszeg validációját Magyarországra az 1976–2005 közötti időszakra vonatkozóan, valamint a csapadékösszeg területi átlagában valószínűsített változást két jövőbeli időszakra nyers és hibakorrigált RCM szimulációk alapján.

Felhasznált adatok

Az elmúlt évtizedekben több olyan nemzetközi projekt valósult meg, amelynek keretében hozzáférhető regionális klímamodell-adatbázis került létrehozásra, ilyen például a CORDEX (Coordinated Regional Downscaling Experiment; Giorgi et al., 2009), amelynek Európát lefedő alprogramja az EURO-CORDEX (Jacob et al., 2014). Munkánkhoz ennek a programnak a keretében elérhető modelleredmények közül kiválasztott öt regionális klímamodell (*1. táblázat*) nyers és hibakorrigált napi csapadékösszeg adatsorait használjuk fel az 1976–2009 időszakra, melyek $0,11^\circ$ (nagyjából 12,5 km-es) horizontális felbontás mellett állnak rendelkezésre. Kutatásunkhoz az optimistább, RCP4.5 és a pesszimista, RCP8.5 kibocsátási scenárió (Moss et al., 2010) feltételezése mellett készült RCM szimulációkat vizsgáljuk. A letöltött adatsorok esetében a hibakorrekciót az eloszlás alapú skálázás módszerével (Yang et al., 2010) végezték a MESAN (Mesoscale Analysis) reanalízis adatbázis (Häggmark et al., 2000) felhasználásával. Kutatásunkhoz a homogenizált, interpolált HuClim méréseken alapuló rácsponti adatbázist használjuk referenciaként, amely az 1971–2020¹ időszakot fedi le, és $0,1^\circ$ -os horizontális felbontással rendelkezik. Az adatsorok közös, $0,11^\circ$ -os horizontális rácshálózatra képzése bilineáris átrácsolással a CDO (Climate Data Operators; <https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo/>) szoftver segítségével valósult meg.

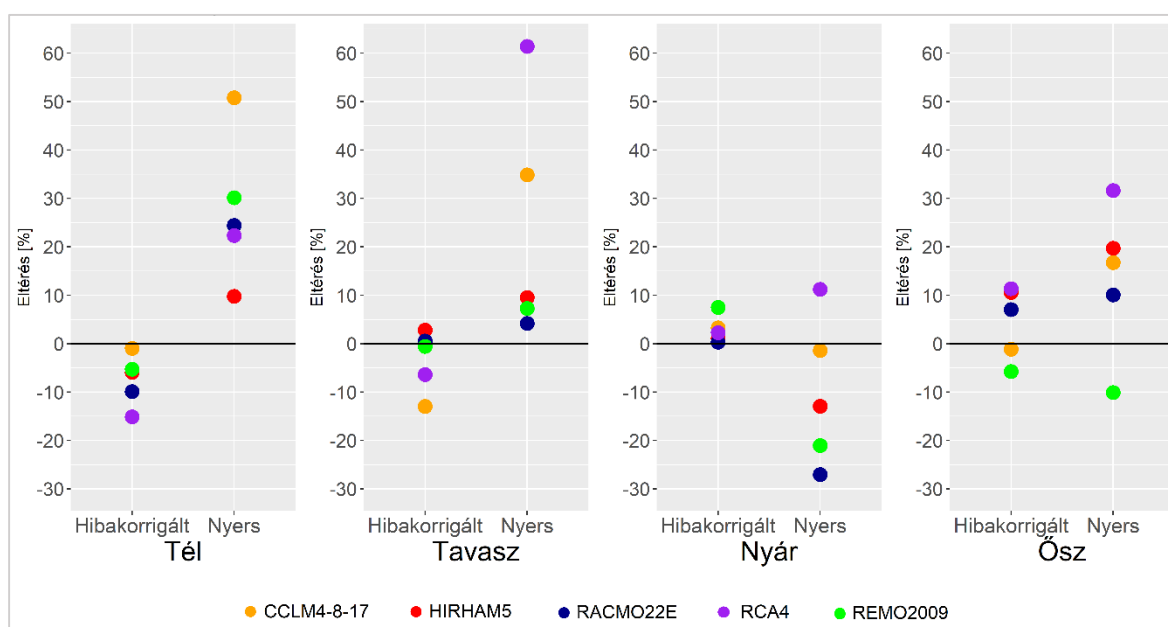
1. táblázat: A kutatáshoz felhasznált regionális klímamodellek és az azokat meghajtó globális éghajlati modellek.

Regionális klímamodell	Meghajtó globális éghajlati modell
CCLM4-8-17	MPI-M-MPI-ESM-LR
HIRHAM5	ICHEC-EC-EARTH
RACMO22E	MOHC-HadGEM2-ES
RCA4	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5
REMO2009	MPI-M-MPI-ESM-LR

¹ Letöltés ideje: 2021. szeptember

Eredmények

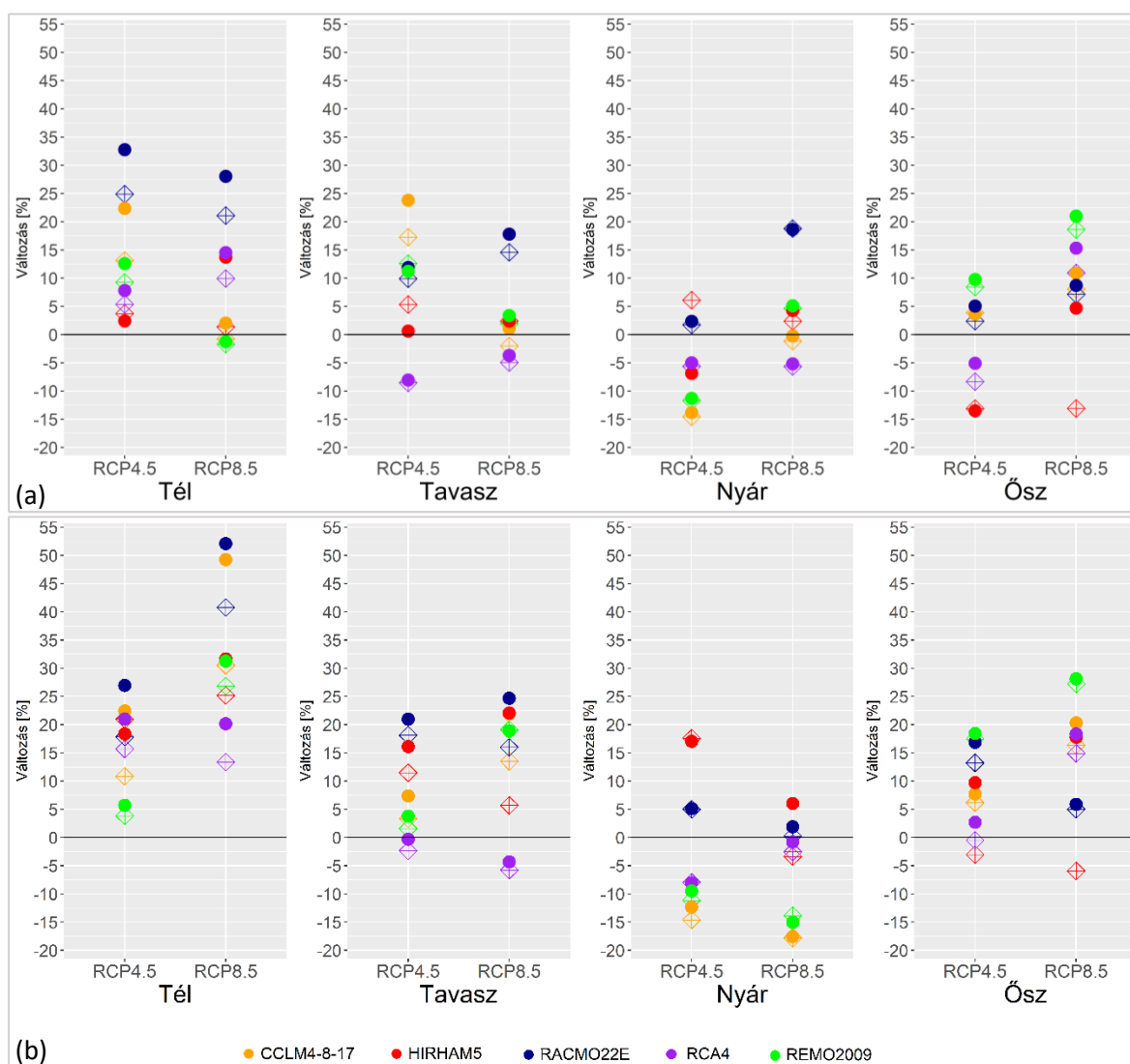
Elsőként a kutatáshoz kiválasztott regionális klímamodellek validációját végeztük el Magyarországra, az 1976–2005 közötti időszakra vonatkozóan. A klímamodellek által szimulált átlagos évszakos csapadékösszeg abszolút hibájának területi eloszlására vonatkozó eredmények egy része már bemutatásra került egy korábbi tanulmányunkban (Simon et al., 2022). Az 1. ábrán az évszakos csapadékösszeg területi átlagának a mérési adatoktól vett százalékos eltérését jelenítettük meg az egyes RCM-ekre vonatkozóan. A nyers szimulációk esetén a modellek közötti szórás minden évszakban nagyobbak adódott, míg a hibakorrigált eredmények jobban közelítették a referencia értékeket, és a legpontosabbnak nyáron bizonyultak. A nyers RCM-ek többsége a nyári csapadékot alulbecsli, míg a többi évszakban a csapadék 5–30%-os felülbecslése figyelhető meg. A hibakorrigált adatok esetén télen és tavasszal átlagosan 3–7%-os alulbecslés jellemző, ezzel szemben nyáron és ősszel a klímamodellek átlagosan 2–4%-kal több csapadékot szimulálnak a referencia adatokhoz képest. A modellek közül a REMO2009 és a RACMO22E bizonyultak a legpontosabbnak a hibakorrigált esetben, a leggyengébb teljesítmény pedig az RCA4 esetén adódott.



1. ábra: Az évszakos csapadékösszeg területi átlagának százalékos eltérése a HuClim méréseken alapuló adatbázishoz viszonyítva az egyes RCM-ek esetében az 1976–2005 közötti időszakra vonatkozóan.

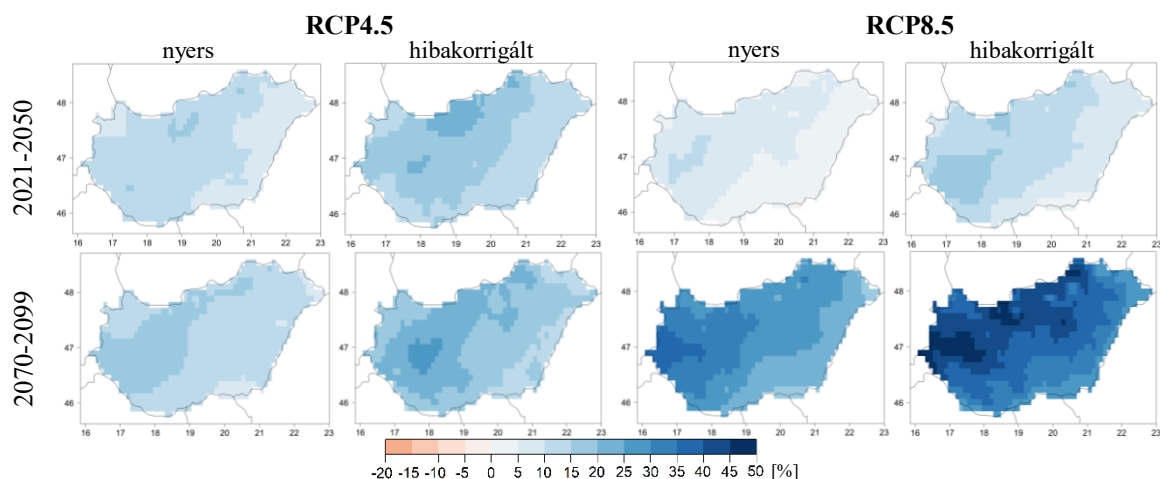
Következő lépésként megvizsgáltuk az évszakos csapadékösszeg területi átlagában valószínűsített változást az egyes RCM-ek esetén két jövőbeli időszakra (közeljövő: 2021–2050, távoli jövő: 2070–2099) az optimistább RCP4.5, illetve a pesszimista RCP8.5 scenáriók feltételezése esetén (2. ábra). A legnagyobb (11–37%-os) növekedést mindkét scenárió és mindkét időszak esetén a téli évszakra valószínűsítik a modellek, melynek mértéke nagyobb a távoli jövőben és a pesszimista forgatókönyv szerint. Míg a modellek átlagosan a közelebbi jövőben a nyári és őszi csapadékösszeg kis mértékű (1–6%-os) csökkenését valószínűsíti az RCP4.5 feltételezése mellett, addig az RCP8.5 megvalósulása esetén nyáron 3–5%-os, ősszel 6–12%-os növekedés várható. A 2070–2099 közötti időszakot tekintve mindkét scenárió egyetért az átlagos nyári csapadékösszeg csökkenésében. A tavaszra vonatkozóan a modellek szerint átlagosan 2–8%-kal (6–17%-kal) növekedhet a csapadékösszeg a 2021–2050 (2070–2099) közötti időszakban. Általánosságban elmondható, hogy a nyers és a

hibakorrigált modellszimuláció-párokat összevetve a hibakorrigált eredmények valószínűsítik a nagyobb mértékű változást az átlagos évszakos csapadékösszegekben.

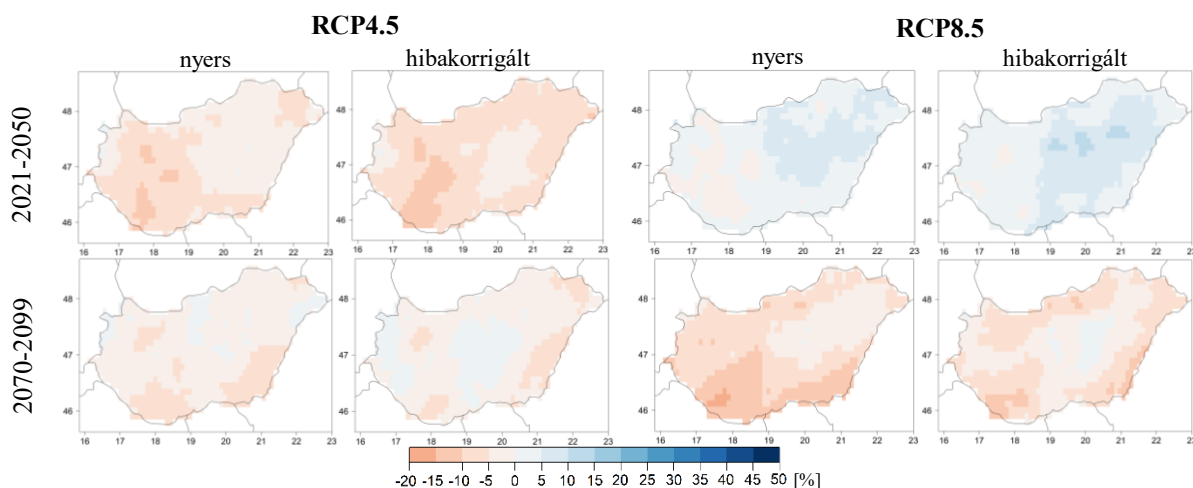


2. ábra: Az évszakos csapadékösszeg területi átlagában valószínűsített változás százalékban kifejezve a nyers (rombusz) és a hibakorrigált (kör) RCM-ek szerint (a) a 2021–2050, illetve (b) a 2070–2099 közötti időszakokra, az RCP4.5 és az RCP8.5 scenárió feltételezése mellett (referencia időszak: 1976–2005).

A vizsgált jövőbeli időszakokra valószínűsített változás területi eloszlását tekintve (3–4. ábra) a téli csapadékösszegekben a legkisebb növekedés a Tiszántúlon, a legnagyobb pedig a nyugati, északnyugati, valamint az északi hegyvidéki területeken mutatkozik meg. Nyáron az RCP8.5 scenárió feltételezése mellett futtatott szimulációk hibakorrigált eredményei alapján a 21. század közepén az Alföldön és Északkelet-Magyarországon várható az átlagos csapadékösszeg növekedése, míg az optimistább RCP4.5 scenárió esetén ezeken a területeken is csökkenés következhet be. Érdekes megfigyelni, hogy az RCP8.5 forgatókönyv alapján az évszázad során a várható nyári csapadékösszeg változása irányt vált: az évszázad első felében a modellek jellemzően az évszakos csapadékösszeg növekedésével, míg az évszázad végére ugyanezen csökkenésével számolnak az ország túlnyomó részén.



3. ábra: A téli csapadékösszeg változásának területi eloszlása a nyers és a hibakorrigált RCM-ek szerint a 2021–2050, illetve a 2070–2099 közötti időszakokra, az RCP4.5 és az RCP8.5 scenáriók feltételezése mellett (referencia időszak: 1976–2005).



4. ábra: A nyári csapadékösszeg változásának területi eloszlása a nyers és a hibakorrigált RCM-ek szerint a 2021–2050, illetve a 2070–2099 közötti időszakokra, az RCP4.5 és az RCP8.5 scenáriók feltételezése mellett (referencia időszak: 1976–2005).

Összefoglalás, további tervek

Ebben a kutatásban az évszakos csapadékösszeg változását vizsgáltuk öt regionális klímamodell nyers, valamint hibakorrigált adatai alapján Magyarországon két jövőbeli időszakra (2021–2050; 2070–2099), két éghajlati scenárió (RCP4.5; RCP8.5) feltételezése mellett. A modellek validációjához referenciaként a HuClim adatbázist használtuk fel. Mindkét scenárió egyetért abban, hogy a 21. század végére a nyári csapadékösszeg területi átlaga csökkenni fog, ezzel szemben a többi évszak esetén növekedést valószínűsítenek a modellek – ami a legnagyobb mértékben télen következhet be. A továbbiakban a csapadék térbeli és időbeli eloszlását részletesebben is tervezzük megvizsgálni, az extrém csapadékösszeghez köthető indexek számítására fókuszálva.

Köszönetnyilvánítás

A felhasznált regionális klímamodell-szimulációkat a CORDEX program keretében állították elő, melyek letölthetők például a <https://esgf-data.dkrz.de/> oldalról. Köszönettel tartozunk az Országos Meteorológiai Szolgálatnak a szabadon hozzáférhető HuClim adatbázisért (odp.met.hu).


Hivatkozások

- Adzor, N., Seibert, J., 2014: Bias correction for hydrological impact studies – beyond the daily perspective. *Hydrological Processes*, 28: 4823–4828. <https://doi.org/10.1002/hyp.10238>
- Ciarlo, J. M., Coppola, E., Fantini, A., Giorgi, F., Gao, X.J., Tong, Y., Glazer, R. H., Torres Alvarez, J. A., Sines, T., Pichelli, E., Raffaele, F., Das, S., Bukovsky, M., Ashfaq, M., Im, E.-S., Nguyen-Xuan, T., Teichmann, C., Remedio, A., Remke, T., Bülow, K., Weber, T., Buntmeyer, L., Sieck, K., Rechid, D., Jacob, D., 2021: A new spatially distributed added value index for regional climate models: the EURO-CORDEX and the CORDEX-CORE highest resolution ensembles. *Climate Dynamics*, 57: 1403–1424. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05400-5>
- Dobor, L., Barcza, Z., Havasi, Á., 2012: Regionális klímamodell eredmények hibakorrekciója. *Környezettudományi Doktori Iskolák Konferenciája*, 9 p.
- Evin, G., Somot, S., Hingray, B., 2021: Balanced estimate and uncertainty assessment of European climate change using the large EURO-CORDEX regional climate model ensemble. *Earth System Dynamics, Discussion[preprint]*. <https://doi.org/10.5194/esd-2021-8>
- Fang, G. H., Yang, J., Chen, Y. N., Zammit, C., 2015: Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19: 2547–2559. <https://doi.org/10.5194/hess-19-2547-2015>
- Fantini, A., Raffaele, F., Torma, Cs., Bacer, S., Coppola, E., Giorgi, F., Ahrens, B., Dubois, C., Sanchez, E., Verdecchia, M., 2018: Assessment of multiple daily precipitation statistics in ERA-Interim driven Med-CORDEX and EURO-CORDEX experiments against high resolution observations. *Climate Dynamics*, 51: 877–900. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3453-4>
- Farda, A., Déqué, M., Somot, S., Horányi, A., Spiridonov, V., Tóth, H., 2010: Model ALADIN as regional climate model for Central and Eastern Europe. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 54(2): 313–332. <https://doi.org/10.1007/s11200-010-0017-7>
- Giorgi, F., 2005: Climate change prediction. *Climatic Change*, 73: 239–265. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-6857-4>
- Giorgi, F., Jones, C., Asrar, G., 2009: Addressing climate information needs at the regional level: The CORDEX framework. *WMO Bulletin*, 58, 175–183.
- Hägemark, L., Ivarsson, K.-I., Gollvik, S., Olofsson, P.-O., 2000: Mesan, an operational mesoscale analysis system. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 52(1): 2–20. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v52i1.12250>
- Halmstad, A., Najafi, M. R., Moradkhani, H., 2012: Analysis of precipitation extremes with the assessment of regional climate models over the Willamette River Basin, USA. *Hydrological Processes*, 27(18): 2579–2590. <https://doi.org/10.1002/hyp.9376>

- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 254 p. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., van Meijgaard, Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana J-F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., Yiou, P., 2014: EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14: 563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
- Laux, P., Rötter, R. P., webber, H., Dieng, D., Rahimi, J., Wei, J., Faye, B., Srivastava, A. K., Bliefernicht, J., Adeyeri, O., Arnault, J., Kunstmann, H., 2021: To bias correct or not to bias correct? An agricultural impact modelers' perspective on regional climate model data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 304–305: 108406. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108406>
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.E., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P., Wilbanks, T.J., 2010: The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463: 747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Ngai, S. T., Tangang, F., Juneng, L., 2016: Bias correction of global and regional simulated daily precipitation and surface mean temperature over Southeast Asia using quantile mapping method. *Global and Planetary Change*, 149: 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.12.009>
- Simon, Cs., Torma, Cs., Kis, A., 2022: Éghajlati szélsőségek vizsgálata regionális klímamodellek nyers és hibakorrigált adatai alapján a Kárpát-medence térségére. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, 34: 65–70. <https://doi.org/10.31852/EMF.34.2022.065.070>
- Teutschbein, C., Seibert, J., 2012: Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, 456–457: 12–29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052>
- Torma, Cs., Giorgi, F., Coppola, E., 2015: Added value of regional climate modeling over areas characterized by complex terrain – Precipitation over the Alps. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120: 3957–3972. <https://doi.org/10.1002/2014JD022781>
- Yang, W., Andréasson, J., Graham, L. P., Olsson, J., Rosberg, J., Wetterhall, F., 2010: Distribution based scaling to improve usability of RCM regional climate model projections for hydrological climate change impacts studies. *Hydrology Research*, 41(3-4): 211–229. <https://doi.org/10.2166/nh.2010.004>

ORCID

Simon Cs.  <https://orcid.org/0000-0001-7406-0784>

Torma Cs. Zs.  <https://orcid.org/0000-0002-4240-0788>

Kis A.  <https://orcid.org/0000-0002-3227-1230>