







NÖVÉNYFENOLÓGIAI VIZSGÁLATOK MAGYARORSZÁGON A KÜLÖNBÖZŐ METEOROLÓGIAI ADATBÁZISOK SEGÍTSÉGÉVEL

Dávid Réka Ágnes ⁽¹⁾ , Barcza Zoltán ^(1,2) , Kern Anikó ⁽³⁾ , Kristóf Erzsébet ^(1,2) ,
Hollós Roland ^(1,2) , Kis Anna ^(1,2) 

⁽¹⁾ ELTE Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A

⁽²⁾ ELTE TTK Kiválósági Tudásközpont, 2462 Martonvásár, Brunszvik u. 2.

⁽³⁾ ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A
e-mail: davidreka@caesar.elte.hu; zoltan.barcza@ttk.elte.hu; anikoc@nimbus.elte.hu;
ekristof86@caesar.elte.hu; hollorol@rolandhollos.xyz; kisanna@nimbus.elte.hu

Bevezetés

A növényfenológia a szárazföldi vegetáció periodikusan ismétlődő fejlődési fázisaival foglalkozó interdiszciplináris tudományterület. Fenológiai fázis alatt értjük például a rügyfakadást, a tavaszi levélbontást, a virágzást, a gyümölcsözést, az őszi levélhullást vagy a téli nyugalmi időszakot. Ezek a fejlődési fázisok genetikailag meghatározottak, de külső (környezeti) tényezők is nagymértékben irányítják őket (Basler, 2016). A környezeti tényezők alatt számos meteorológiai állapotot értünk, így az időjárás alakulásának ismerete kulcsfontosságú (Forkel et al., 2015; Peaucelle et al., 2019). A tavaszi kizöldülés (angol szakkifejezéssel “Start Of Season”, rövidítve SOS) és az őszi levélhullás időpontja meghatározza a fotoszintézisre alkalmas időszak hosszát, amely során szén-dioxid (CO₂) felvétel történik a légkörből. Ezen felül az SOS biogeokémiai és biogeofizikai visszacsatolásokon keresztül szoros kölcsönhatásban van az éghajlattal. A fenológiai ciklus megfigyelt változása az éghajlatváltozás egyértelmű indikátora (Menzel et al., 2006; Richardson et al., 2013; Piao et al., 2019). Jelen tanulmány rövid összefoglalót nyújt a doktori képzés első éve során folytatott kutatásról.

Fenológiai modellek

A felszíni és távérzékelésen alapuló megfigyelések, valamint a matematikai modellek képezik a fenológiai minták megismerésének és megértésének alapját (Schwartz, 1999). A fenológiai kutatások célja, hogy a vegetáció életciklusának változásait az éghajlatváltozás kontextusában megismerjük. Megfelelő modellek megalkotásával lehetővé válik, hogy azonosítsuk azon környezeti változókat, amik alapvetően befolyásolják az SOS-t térben explicit módon. A matematikai modellek előre meghatározott rácson számolnak, emiatt ugyanezen a rácson kell rendelkezésre álljanak a bemenő meteorológiai adatok is. A kutatás során három fenológiai modellt választottunk ki az aktív vegetációs időszak kezdetének vizsgálatára.

A legegyszerűbb és talán leggyakrabban használt megközelítés a hőösszeget (az angol szakirodalomban „Growing Degree Days”, GDD) alapuló WM (Warming Model). Ha egy előre meghatározott bázishőmérsékletet meghalad a napi középhőmérséklet, akkor kell azt az átlaghőmérsékletet a hőösszeg számításba belevenni. Amikor a hőösszeg elér egy előre meghatározott küszöbértéket, a modell szerint akkor történik meg a tavaszi kizöldülés. Ezt a sémát használja az IBIS (Integrated Biosphere Simulator) és a CLM-DGVM (Community Land Model–Dynamic Global Vegetation Model; Jeong et al., 2012).

A második modell szintén hőösszeget alapul, ám ez figyelembe veszi az alacsony hőmérsékletnek való kitettséget is, tehát a növényzet hidegigényét. Erre a modellre jelen tanulmányban CWM-ként (Chilling-Warming Modellként) hivatkozunk. Itt szintén a napi átlaghőmérséklet a bemenő adat, ám a WM modellel szemben nem csak január 1-től, hanem a megelőző év novemberétől számítandó. Olyan globális klímamodellek használják ezt a meg-

közelítést, mint az ORCHIDEE (ORganizing Carbon and Hydrology in Dynamic EcosystEms) valamint a SEIB-DGVM (Spatially Explicit Individual Based-Dynamic Global Vegetation Model; Jeong et al., 2012).

A harmadik modell egy bioklimatikus indexen alapul, amelyhez minimum hőmérséklet, párányomás deficit (Vapor Pressure Deficit, VPD) és fotoperiódus (más néven a napi megvilágítás) szükséges bemenő adatként. Ez a modell a Growing Season Index Modell, vagyis GSIM-ként lesz rövidítve. Ez a modell az aktív vegetációs időszak kezdetének és végének a meghatározására is alkalmas (Jolly et al., 2005).

A WM és a CWM részletesebb leírása megtalálható Botta et al. (2000) és Jeong et al. (2012) munkákban, a GSIM pedig a Jolly et al. (2005) munkában van részletezve, a használt modellek együttműködésének leírása, valamint a részletes statisztikai vizsgálat a Dávid et al. (2020) munkában található.

Meteorológiai és megfigyelési adatok

Ahogy fentebb már említettük, a fenológiai modellek egy földrajzi rácson dolgoznak, a meghajtó adatbázisok pedig ugyanezen a rácson kell, hogy rendelkezésre álljanak, ami általában interpolációval oldható meg. Azonban felmerül a kérdés, hogy milyen meghajtó adatbázist válasszunk. Az eddigi kutatás során három adatbázissal foglalkoztunk.

Az első az ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) ötödik generációs globális reanalízis produktuma (ERA5), amely kutatásunk megkezdésekor 1979-től elérhető öt napos késéssel napjainkig $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ -os térbeli felbontással (Copernicus Climate Change Service, 2017).

A második adatbázis a CarpatClim, amely a Kárpát-medence területére tartalmaz $1/10^\circ \times 1/10^\circ$ -os rácson adatokat 1961 és 2010 között. Magyarországra ez az adatbázis tekinthető a három felhasznált adatbázis közül a legjobbnak, ugyanis sűrű megfigyelési hálózat adatait használták fel (109 állomás adatai csapadéokra és 34 állomás a hőmérsékletre; Szalai et al., 2013).

Az ELTE meteorológiai tanszékén kifejlesztett és karbantartott FORESEE adatbázis a harmadik, amely 1951 és 2100 között érhető el $1/6^\circ \times 1/6^\circ$ -os felbontáson Közép-Európára. Mindig az aktuális év elejéig tartalmaz historikus adatokat, onnantól kezdve pedig klímaprojekciókat. A FORESEE kevesebb állomási adatot használ fel, mint a CarpatClim (16 állomás csapadéokra és 17 állomás hőmérsékletre; Dobor et al., 2015; Kern et al., 2019). A FORESEE csapadék, maximum- és minimum hőmérséklet adatokat tartalmaz, ezekből a GSIM-hez szükséges VPD értékeket az MTClim nevű szoftverrel becsültük (Thornton et al., 2000).

A meteorológiai adatokon túl szükségesek még megfigyelési adatok. Ez lehet közvetlen mérés, mint amilyenek például az egyed-szintű, *in-situ* megfigyelések (pl. a japán *sakura* – azaz cseresznyefa virágzás – ünnep, vagy Európában a középkortól kezdve szőlészettel kapcsolatos feljegyzések). A műholdas távérzékelés útján történő növényi aktivitás meghatározása olyan lehetőséget kínál a globális fenológiai megfigyelésekhez, amely más forrásokból nem lehetséges (Cleland et al., 2007).

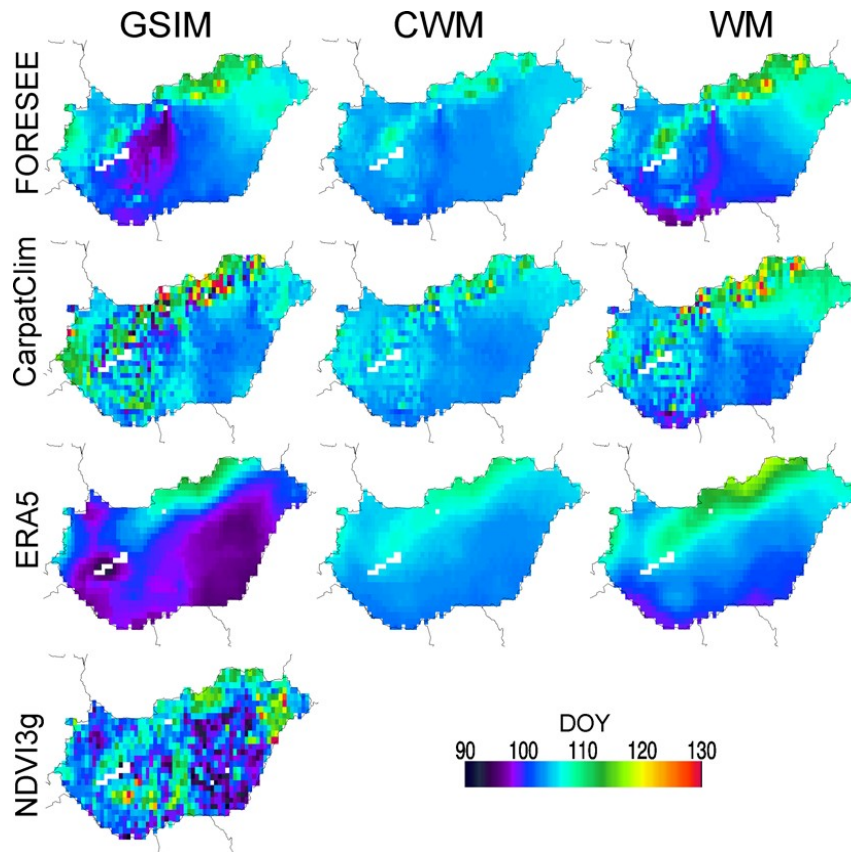
A műholdas megfigyelési adatokat a meteorológiai adatokhoz és a modelleredményekhez hasonlóan szabályos rácson kapjuk. A munka során MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) adatokkal korrigált harmadik generációs Normalizált Vegetációs Indexet (NDVI) tartalmazó adatbázist (NDVI3g) használtuk. Az NDVI egy olyan műholdas vegetációs index, ami a látható és a közeli infravörös tartományban történő eltérő sugárzás-visszaverődésen alapszik. Kern et al. (2016) írja le a módszert, amely során az NDVI3g indexből SOS értéket kapunk. Ez az adatbázis az 1982–2013 időszakot fedi le $1/12^\circ \times 1/12^\circ$ -os rácson.

Fenológiai kutatáshoz a tengerszint feletti magasságra is szükség van, hiszen az éghajlat nemcsak szélességi kör szerint, hanem a magassággal is változik. Jelen munkában az SRTM

(Shuttle Radar Topography Mission) Digital Elevation Database-t használtuk (Jarvis et al., 2008). A vizsgálatok során a vegetáció típusok között nem tettünk különbséget.

Eredmények bemutatása

Magyarország területét vizsgáltuk elsősorban az 1982–2010 időszakra, aminek az az oka, hogy így a három adatbázis és a műholdas mérési eredmények összehasonlíthatók. Az 1982-es évet a műholdas megfigyelési adatok limitálják, míg a 2010 a CarpatClim utolsó éve. Az adatokat $1/10^\circ \times 1/10^\circ$ -os rácsra interpoláltuk. Minden egyes modellt meghajtottuk mindhárom adatbázissal, az így kapott eredményeket hasonlítottuk össze (1. ábra).

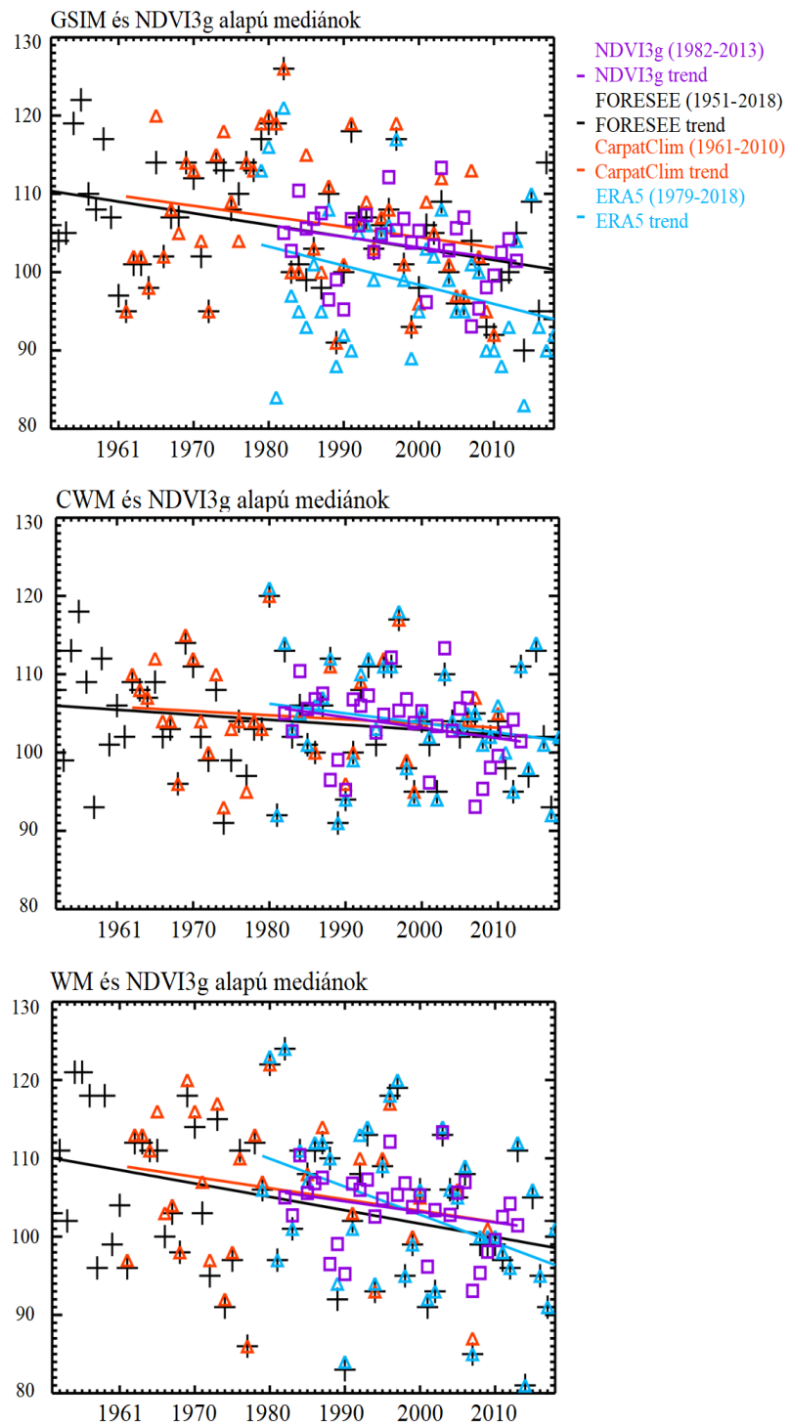


1. ábra: Az SOS időpontjának klimatológiája különböző meteorológiai adatbázisokkal meghajtott fenológiai modellek eredményei és műholdas adatok alapján (bal legalsó térkép).

A vizsgált időszak minden évre kaptunk egy értéket, ami a vegetációs időszak kezdetének dátuma. Ez az év adott napjában (angolul “Day Of Year”, DOY) van kifejezve. Ezeknek az értékeknek vettük az átlagát pixelenként, így jöttek létre az ábrán látható klimatológia térképek. Az 1. ábrán a bal alsó sarokban látható a műholdas megfigyelési adatokból készült klimatológia térkép. Vízszintesen a vezérlő adatbázisok, míg függőlegesen az egyes modellek láthatók. Az ábrán minél sötétebb, lilásabb egy pixel, annál korábban, tehát a tél végéhez közel történik a kizöldülés, míg a pirosas színek a késői vegetációs időszak kezdetét jelölik. A vizsgált időszakra vonatkozó megfigyelésen alapuló vegetációs időszak kezdetének mediánja a naptári év 104. napja, ami április 14-re esik nem szökőévben. Egy adott modellnél a különböző meteorológiai adatbázisok nagyon hasonló eredményeket adnak. A CarpatClim adatbázissal meghajtott eredmények mutatják a legnagyobb térbeli variabilitást, ezzel szemben, ahogy várható is volt, az $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ -os térbeli felbontással – a felbontás miatt – az ERA5 által vezérelt modell-eredmények simítottak. Vizuálisan a CarpatClim-mel meghajtott GSIM adja vissza legjobban

az NDVI3g-ből származtatott vegetációs időszakok kezdetét, ám statisztikai vizsgálat során (legmagasabb R^2 érték) a FORESEE alapú WM bizonyult a legjobbnak.

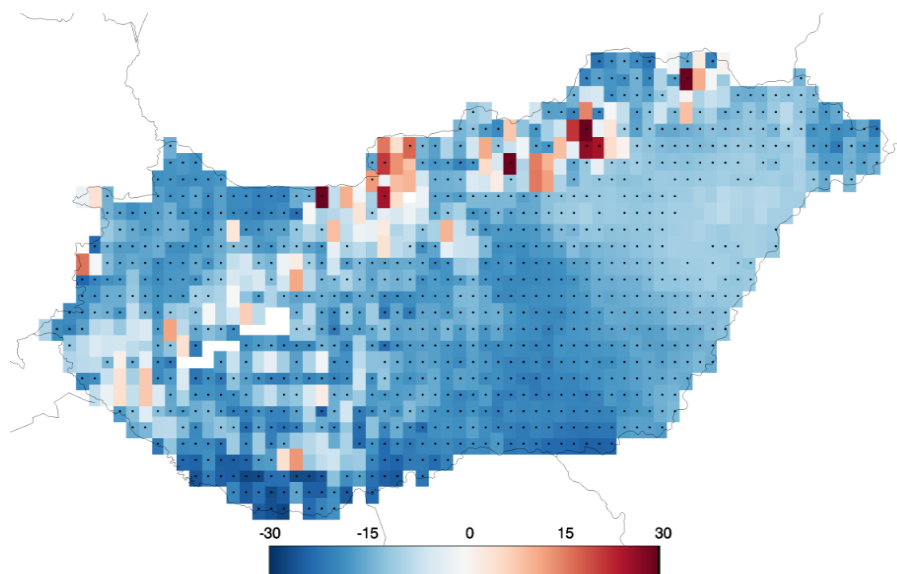
Eghajlati szempontból fontos, hogy a vegetációs időszak kezdete éven belül hova tolódik. A 2. ábrán az egyes adatbázisokat, illetve a megfigyelés teljes hosszát kihasználva az országos mediánokat jelöltük, továbbá a trendvonalakat. Mindegyik modell-adatbázis konstelláció eredménye és a megfigyelés is összhangban van abban a tekintetben, hogy a tavasz kezdete egyre korábbra tolódik.



2. ábra: A tavaszi kizöldülés időpontjának (SOS) mediánjai és trendjei különböző meteorológiai adatbázisok és fenológiai modellek eredményei és műholdas adatok alapján.

Célunk volt annak a kérdésnek a megválaszolása, hogy a kapott eredményre a meteorológiai adatbázis vagy a fenológiai modell struktúrája van-e nagyobb befolyással. Emiatt egy ún. *importance indicator*-t (IID) definiáltunk, ami számszerűen jellemzi a meteorológia, illetve a struktúra fontosságát térben explicit módon. A módszer pontos leírása szintén a Dávid et al. (2020) munkában olvasható.

A 3. ábra az ország IID térképét ábrázolja. A kék pixelek azt jelentik, hogy a modell választás volt a fontosabb, míg a piros pixelek esetén az adatbázis megválasztása a fontosabb. Az ábráról látható, hogy hegyvidéki területeken az adatbázis megválasztása nagyobb hatással van az eredményekre (5,5%), ám az esetek nagy részében a modell kiválasztása fontosabb.



3. ábra: IID térkép a modellstruktúra és a meteorológiai adatbázis megválasztásának fontosságáról. Minél sötétebb kék egy pixel, annál inkább a modellválasztás fontosságát jelöli, míg a piros pixelek a meteorológiai adatbázis megválasztásának nagyobb befolyását mutatják. A pöttyök a statisztikailag szignifikáns eredményeket mutatják ($p < 0,05$).

Diszkusszió és konklúzió

Jelen munka rövid összefoglalója a doktori képzés első éve során folytatott kutatásnak. Magyarországon több tanulmány is foglalkozott fenológiával (Dunay, 1984; Walkovszky, 1998; Menzel, 2000; Molnár et al., 2012; Varga et al., 2012; Kern et al., 2016; Szabó et al., 2016), ám nem mindegyik a kizöldülésre fektette a hangsúlyt, hanem egyéb fenológiai állapotra (pl. virágzási időre; Szabó et al., 2016). A doktori iskolában eltöltött első év kutatási eredmény újdonsága, hogy a vegetációs időszak kezdetét meghatározó fenológiai modelleket különböző meteorológiai adatbázisokkal hajtottuk meg, és az eredményeket műholdas megfigyelési adatokkal értékeltük ki.

További célunk, hogy a modelleket később az SOS előrejelzésére is fel tudjuk használni, illetve az őszi levélhullás időpontját is kívánjuk modellezni, hiszen az aktív vegetációs időszak hosszának (tavaszi kizöldülés és őszi levélhullás közötti időszak) jövőbeli változása az éghajlati rendszerre is kihatással van a szén- és a vízciklus által.

A tanulmányban a vegetációtípusokat együtt kezeltük, ám külön-külön is el fogjuk készíteni a vizsgálatot, különös tekintettel a gyepes és az erdős területekre. A fenológiai modellek vegetációtípus szerinti kalibrálása tovább javíthat az eredményeken.

Köszönetnyilvánítás

Az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-19-3 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának szakmai támogatásával készült.



Továbbá az OTKA FK-128709 számú pályázata és az MTA Bolyai János Kutatási Ösztöndíja is támogatta.

Hivatkozások

- Basler, D., 2016: Evaluating phenological models for the prediction of leaf-out dates in six temperate tree species across central Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 217: 10–21.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.11.007>
- Botta, A., Viovy, N., Ciais, P., Friedlingstein, P., Monfray, P., 2000: A global prognostic scheme of leaf onset using satellite data. *Global Change Biology*, 6: 709–725. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.00362.x>
- Cleland, E.E., Chuine, I., Menzel, A., Mooney, H.A., Schwartz, M.D., 2007: Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in Ecology and Evolution*, 22: 357–365.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.04.003>
- Copernicus Climate Change Service (C3S) 2017: ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. *Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS)*.
Elérhető: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>.
- Dobor, L., Barcza, Z., Hlásny, T., Havasi, Á., Horváth, F., Ittész, P., Bartholy, J., 2015: Bridging the gap between climate models and impact studies: the FORESEE Database. *Geoscience Data Journal*, 2: 1–11. <https://doi.org/10.1002/gdj3.22>
- Dávid, R.Á., Barcza, Z., Kern, A., Kristóf, E., Kis, A., Hollós, R., 2020: Fenológiai modellek érzékenységének vizsgálata a felhasznált meteorológiai adatbázis kiválasztására XXIII. Tavasz Szél Konferencia Kötet: "Mi és a tudomány jövője" Budapest, Magyarország: Doktoranduszok Országos Szövetsége (DOSZ) (lektorált, megjelenés alatt)
- Dunay, S., 1984: Növényfenológiai megfigyelések Magyarországon. *Léggör*, 29: 2–9.
- Forkel, M., Migliavacca, M., Thonicke, K., Reichstein, M., Schaphoff, S., Weber, U., Carvalhais, N., 2015: Codominant water control on global interannual variability and trends in land surface phenology and greenness. *Global Change Biology*, 21: 3414–3435.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12950>
- Jarvis, A., Reuter, H.I., Nelson, A., Guevara, E., 2008. Hole-Filled Seamless SRTM Data V4. International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), Elérhető: <http://srtm.csi.cgiar.org>
- Jeong, S.J., Medvigy, D., Shevliakova, E., Malyshev, S., 2012: Uncertainties in terrestrial carbon budgets related to spring phenology. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 117: 1–17.
<https://doi.org/10.1029/2011JG001868>
- Jolly, W.M., Nemani, R., Running, S.W., 2005: A generalized, bioclimatic index to predict foliar phenology in response to climate. *Global Change Biology*, 11: 619–632.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00930.x>
- Kern, A., Marjanović, H., Barcza, Z., 2016: Evaluation of the quality of NDVI3g dataset against collection 6 MODIS NDVI in Central Europe between 2000 and 2013. *Remote Sensing*, 8.
<https://doi.org/10.3390/rs8110955>
- Kern, A., Dobor, L., Horváth, F., Hollós, R., Márta, G., Barcza, Z., 2019: FORESEE: egy publikus meteorológiai adatbázis a Kárpát-medence tágabb térségére. In: Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában. (Szerk.: Molnár Vanda Éva), Debrecen Egyetemi Kiadó, X. Térinformatikai Konferencia és Szakkiállítás. Debrecen, 2019. május 23-24. 131-138. ISBN: 978-963-318-054-9

- Menzel, A., 2000: Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996. *International Journal of Biometeorology*, 44: 76–81. <https://doi.org/10.1007/s004840000054>
- Menzel, A., Sparks, T.H., Estrella, N., Koch, E., Aaasa, A., Ahas, R., Alm-Kübler, K., Bissolli, P., Braslavská, O., Briede, A., Chmielewski, F.M., Crepinsek, Z., Curnel, Y., Dahl, A., Defila, C., Donnelly, A., Filella, Y., Jatczak, K., Måge, F., Mestre, A., Nordli, Ø., Peñuelas, J., Pirinen, P., Remišová, V., Scheifinger, H., Striz, M., Susnik, A., Van Vliet, A.J.H., Wielgolaski, F.E., Zach, S., Züst, A., 2006: European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*, 12: 1969–1976. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x>
- Molnár, V.A., Tökölyi, J., Végvári, Z., Sramkó, G., Sulyok, J., Barta, Z., 2012: Pollination mode predicts phenological response to climate change in terrestrial orchids: A case study from central Europe. *Journal of Ecology*, 100: 1141–1152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2012.02003.x>
- Peaucelle, M., Janssens, I.A., Stocker, B.D., Descals Ferrando, A., Fu, Y.H., Molowny-Horas, R., Ciais, P., Peñuelas, J., 2019: Spatial variance of spring phenology in temperate deciduous forests is constrained by background climatic conditions. *Nature Communications*, 10: 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13365-1>
- Piao, S., Liu, Q., Chen, A., Janssens, I.A., Fu, Y., Dai, J., Liu, L., Lian, X., Shen, M., Zhu, X., 2019: Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges. *Global Change Biology*, 25(6): 1922–1940. <https://doi.org/10.1111/gcb.14619>
- Richardson, A.D., Keenan, T.F., Migliavacca, M., Ryu, Y., Sonnentag, O., Toomey, M., 2013: Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. *Agricultural and Forest Meteorology*, 169: 156–173. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.012>
- Schwartz, M.D., 1999: Advancing to full bloom: Planning phenological research for the 21st century. *International Journal of Biometeorology*, 42: 113–118. <https://doi.org/10.1007/s004840050093>
- Szabó, B., Vincze, E., Czúcz, B., 2016: Flowering phenological changes in relation to climate change in Hungary. *International Journal of Biometeorology*, 60: 1347–1356. <https://doi.org/10.1007/s00484-015-1128-1>
- Szalai, S., Auer, I., Hiebl, J., Milkovich, J., Radim, T., Stepanek, P., Zahradnicek, P., Bihari, Z., Lakatos, M., Szentimrey, T., Limanowka, D., Kilar, P., Cheval, S., Deak, Gy., Mihic, D., Antolovic, I., Mihajlovic, V., Nejedlik, P., Stastny, P., Mikulova, K., Nabyvanets, I., Skyrak, O., Krakovskaya, S., Vogt, J., Antofie, T., Spinoni, J., 2013: Climate of the Greater Carpathian Region. *Final Technical Report* Elérhető: www.carpatclim-eu.org.
- Thornton, P.E., Hasenauer, H., White, M.A., 2000: Simultaneous estimation of daily solar radiation and humidity from observed temperature and precipitation: An application over complex terrain in Austria. *Agricultural and Forest Meteorology*, 104: 255–271. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00170-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00170-2)
- Varga, Z., Varga-Haszonits, Z., Enzsölné Gerencsér, E., Lantos, Zs., Milics, G., 2012: A fehér akác (*Robinia pseudoacacia* L.) fejlődésének bioklimatológiai elemzése. *Acta Agronomica Ovariensis*, 54: 35–52.
- Walkovszky, A., 1998: Changes in phenology of the locust tree (*Robinia pseudoacacia* L.) *Internal Journal of Biometeorology*, 41: 155–160. <https://doi.org/10.1007/s004840050069>
-

ORCID

Dávid R. Á.  <https://orcid.org/0000-0002-7898-9715>

Barcza Z.  <https://orcid.org/0000-0002-1278-0636>

Kern A.  <https://orcid.org/0000-0002-3504-1668>

Kristóf E.  <https://orcid.org/0000-0001-9892-9552>

Hollós R.  <https://orcid.org/0000-0001-5137-7471>

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