

BIOGEOKÉMIAI MODELLRE ÉPÜLŐ SZIMULÁCIÓS KERETRENDSZER FEJLESZTÉSE ÉS ALKALMAZÁSA

Doktori értekezés tézisei
Hollós Roland

Eötvös Loránd Tudományegyetem,
Környezettudományi Doktori Iskola
Környezeti Földtudomány Program

Doktori Iskola vezető:
Dr. Turányi Tamás, egyetemi tanár



ELTE
EÖTVÖS LORÁND
TUDOMÁNYEGYETEM

Témavezetők:
Dr. Barcza Zoltán, egyetemi docens
Dr. Fodor Nándor, tudományos főmunkatárs

Budapest, 2024

1. Bevezetés és célkitűzések

A növényzettel borított szárazföldi területek meghatározó szerepet játszanak az éghajlati rendszer működésében, és emellett az élelmiszer-termelés vonatkozásában is alapvető jelentőségűek. Fontossága ellenére még ma sem ismerjük kielégítő pontossággal a talaj-növény rendszer működését, aminek következtében a változó környezeti feltételekhez kapcsolódó jövőbeli folyamatok, mint pl. a növekvő globális népesség élelmezése és a nyersanyagellátás nem tervezhetőek hitelesen. Emellett az éghajlati rendszer vonatkozásában alapvető fontosságú annak megértése is, hogy a szárazföldi ökológiai rendszerek milyen kapcsolatban állnak a mindenkori légköri üvegházhatású gáz mérleggel.

A megismerés egyik módszere a talaj-növény rendszer folyamatainak modellezése megfigyelési adatok bevonásával, és a vonatkozó felszín-légkör anyagforgalom számszerűsítése. Jelenleg számos ilyen modell áll rendelkezésünkre, amelyeket széles körben használnak (Canadell, 2021). A modellek fejlesztése azonban számos új kihívás elé állította a kutatói közösséget. A jelenleg használt modellek rendkívül bonyolultak, jelentős az adatigényük, és számos nehezen becsülhető paramétert használnak. Emiatt a modellek alkalmazása a legelső lépéstől kezdve bonyolult és többlépcsős. Gazdasági és politikai vonatkozásai miatt a jelenleg használt modellek kapcsán igény van arra, hogy azok használata egyszerűsödjön, és a modellezésben, illetve informatikában kevésbé jártas felhasználók is tudjanak informatív szimulációkat végrehajtani.

Doktori munkám célja olyan keretrendszerek létrehozása volt, amelyek lehetővé tették egy korszerű biogeokémiai modell, a Biome-BGCMuSo alkalmazását, összetett szimulációs esetekben. Ennek a rendszernek a részeként egy hiánypótló, tudomásom szerint a szakmában előzmény nélküli kalibrációs eljárást is kidolgoztam, amelyik alkalmas folyamatorientált modellek optimalizálására gépi tanulás felhasználásával. Végül egy könnyen használható grafikus döntéstámogatói

rendszer kialakítása és alkalmazása is célom volt, a hazai kukoricatermelés jövőben várható alakulásának vizsgálatára.

2. Adatok és módszerek

Munkám központi eleme a hazai fejlesztésű Biome-BGCMuSo biogeokémiai modell. Kutatásom részeként bekapcsolódtam a modell fejlesztésébe, és hozzájárultam a legújabb modellverzió kidolgozásához is (Hidy et al., 2021; 2022). A meteorológiai adatok forrása a FORESEE adatbázis volt, aminek a fejlesztésében szintén részt veszek (Kern et al., 2024). A modell talajadat-igényének a kielégítésére a DOSoReMI adatbázist használtam (Pásztor et al., 2020; Fodor et al., 2021). Felhasználtam a martonvásári mezőgazdasági tartamkísérletek adatait is, elsősorban a kukoricára vonatkozó vizsgálatok kapcsán.

Munkám egyik fő célja a Biome-BGCMuSo modell optimalizálása volt (más szóval kalibrációja), a valósághű szimulációk végrehajtása érdekében. Az optimalizálás mindenkor célja, hogy a nem pontosan ismert modellparaméterek bizonytalanságát (amelyet egy intervallum jellemez a lehetséges minimum és maximum értéke által meghatározva) csökkentsek. Ez a legtöbb esetben Monte Carlo alapú módszerrel történik. A modell optimalizálásával kapcsolatos nehézségek orvoslására (mint pl. az ekvifinalitás, amikor több beállítás mellett is hasonló eredményeket ad a modell) egy új módszert dolgoztam ki (Hollós et al., 2022). Ez a módszer ötvözi a hagyományos statisztikai módszereket a szakértői modellbeállítás gyakorlatával, és gépi tanulás alkalmazásával szűkíti le a paraméterteret a származtatott eredményekre vonatkozó minőségi kritériumok által. Az új módszer matematikai hátterének részletes leírása a disszertációban megtalálható.

Két szabad hozzáférésű szoftvercsomagot terveztem meg és hoztam létre a Biome-BGCMuSo szoftver alkalmazásának támogatására (RBBGCMuso és

AgroMo). Mindkét csomag R programnyelven készült, és magas szintű, általánosított függvények segítségével kínál megoldásokat a modell-adat fúzió komponenseire, mint pl. a modell optimalizálása, érzékenység-elemzése, a modell bizonytalanságának számszerűsítése, térbeli alkalmazása és validálása. Mindkét csomag elérhető a GitHub-on, és dokumentáció is a felhasználók rendelkezésére áll.

3. Eredmények: tézisek

A doktori kutatásom eredményei az alábbi tézispontokban foglalhatók össze.

1. Alapvető módszertani fejlesztésekkel járultam hozzá a Biome-BGCMuSo optimalizálásához és érzékenység-elemzéséhez. Az egyik ilyen módszer a folyamatorientált modellek Monte Carlo alapú szimulációinak támogatását célozza. Ez egy, a modellezés területén még nem elterjedt matematikai módszeren alapul, amelynek a neve Hit and Run (Chen & Schmeiser 1996), és megoldást nyújt olyan paraméterek mintázására, amelyek egymástól nagymértékben függenek, mint például a Biome-BGCMuSo számos paramétere. A másik módszer a Biome-BGCMuSo modell aszinkron párhuzamosítását tette lehetővé, ami nagyságrendekkel csökkentette a Monte Carlo szimulációk futási idejét. Ez által a százezres, vagy akár milliós nagyságrendű futtatás is megvalósítható lett személyi számítógépeken, reális időkereten belül.
2. Létrehoztam, és a kutatói közösség részére közzétettem az RBBGCMuso szoftvert, amelyik az R programozói környezetben integrálja a nehézkesen használható Biome-BGCMuSo modellt, és néhány R parancs segítségével hozzáférést biztosít magas szintű modellezési funkciókhoz. A kor elvárásainak megfelelően a nyílt forráskódú szoftvercsomagot közzétettem a GitHub-on, és dokumentáció is készült hozzá (Hollós et al., 2023). A csomagot már használták nemzetközi publikációban (Ren et al., 2022).

3. Kifejlesztettem és közzétettem az ún. CIRM (“Conditional Interval Reduction Method”) módszert, ami világviszonylatban is új megoldást kínál a folyamatorientált modellek optimalizálására, különböző tudományterületeken. A CIRM módszer különlegessége, hogy kombinálja a hagyományos, statisztikai alapú inverz módszereket és a mérési adatként kevésbé értelmezhető szakértői tudást, ami az optimalizáció eredményének valósághűségét hivatott biztosítani.
4. A CIRM módszert sikeresen alkalmaztam egy ún. adatszegény (angolul “low data”) szituációban, vagyis egy olyan modellezési feladat esetén, amikor kevés vagy nem megfelelő minőségű mérési adat áll rendelkezésre. A szimuláció a martonvásári tartamkísérletek alapján készült. A hagyományos optimalizálási módszer ebben a szituációban nem adott érdemi intervallum-csökkenést. Ezzel szemben a CIRM alkalmazásával átlagban 44% intervallum-csökkenést értem el, miközben a szimulációk bizonytalansága 42,3%-ot csökkent. Ezen felül a szűkített intervallumokban a futtatások 95,5%-a volt realisztikus, szemben a hagyományos módszer esetén elért 7%-kal.
5. Fő hozzájárulóként kifejlesztettem az AgroMo nevű, grafikus felhasználói felülettel rendelkező döntéstámogató szoftvercsomagot, amely lehetővé teszi pontbeli és térbeli szimulációk végrehajtását, és emellett alkalmas a Biome-BGCMuSo CIRM alapú optimalizálására, illetve különböző művelési forgatókönyvek létrehozására. Az AgroMo alapvetően épít az RBBGCMuso szoftverre, és ennek révén a felhasználó immár programozói tudás nélkül tudja kiaknázni a modellben rejlő lehetőségeket. Az AgroMo nyílt forráskódú szoftvercsomagot ugyancsak közzétettem a GitHub-on, és dokumentáció is készült hozzá.
6. A klímaváltozással összefüggő hatásvizsgálatot végeztem a létrehozott AgroMo szoftverrel, a hazai kukoricatermelés országos léptékű szimulációjával. A kísérlethez a meteorológiai adatokat a FORESEE adatbázis két scenáriója (RCP4.5 és RCP8.5) nyújtotta, míg a talajadatokat a DoSoReMi. A művelési

módok állandó szinten tartását feltételeztem, vagyis az időjárás és a növekvő légköri CO₂ koncentráció együttes hatását vizsgáltam Az eredmények szerint a 2001-2020-as időszakhoz viszonyítva Magyarországon átlagosan a század közepére -1% (-1,17 t/ha; RCP4.5) illetve -13% (-1,01 t/ha; RCP8.5) változással, míg a századfordulóra -10% (-0,77 t/ha; RCP4.5) illetve -28% (-2,20 t/ha; RCP8.5) változással lehet számolni. Az eddigi tanulmányoktól eltérően az RCP8.5 szcenárió a közeljövőre nézve kedvezőbb, mint az RCP4.5 forgatókönyv.

Az értekezés témakörében készült publikációk

Lektorált cikkek

Kern, A., Dobor, L., **Hollós, R.**, Marjanović, H., Torma, C.Z., Kis, A., Fodor, N., Barcza, Z., 2024. Seamlessly combined historical and projected daily meteorological datasets for impact studies in Central Europe: The FORESEE v4.0 and the FORESEE-HUN v1.0. *Climate Services* 33, 100443. doi:10.1016/j.cliser.2023.100443

Kalmár, T., Kristóf, E., **Hollós, R.**, Pieczka, I., Pongrácz, R., 2023. Quantifying uncertainties related to observational datasets used as reference for regional climate model evaluation over complex topography — a case study for the wettest year 2010 in the Carpathian region. *Theoretical and Applied Climatology* 153, 807–828. doi:10.1007/s00704-023-04491-4

Bellocchi, G., Barcza, Z., **Hollós, R.**, Acutis, M., Bottyán, E., Doro, L., Hidy, D., Lellei-Kovács, E., Ma, S., Minet, J., Pacskó, V., Perego, A., Ruget, F., Seddaiu, G., Wu, L., Sándor, R., 2023. Sensitivity of simulated soil water content, evapotranspiration, gross primary production and biomass to climate change factors in Euro-Mediterranean grasslands. *Agricultural and Forest Meteorology* 343, 109778. doi:10.1016/j.agrformet.2023.109778

Hollós, R., Fodor, N., Merganičová, K., Hidy, D., Árendás, T., Grünwald, T., Barcza, Z., 2022. Conditional interval reduction method: A possible new direction for the optimization of process based models. *Environmental Modelling and Software* 158, 105556. doi:10.1016/j.envsoft.2022.105556

Kern, A., Barcza, Z., **Hollós, R.**, Birinyi, E., Marjanović, H., 2022. Critical Climate Periods Explain a Large Fraction of the Observed Variability in Vegetation State. *Remote Sensing* 14, 5621. doi:10.3390/rs14215621

Haszpra, L., Barcza, Z., Ferenczi, Z., **Hollós, R.**, Kern, A., Kljun, N., 2022. Real-world wintertime CO, N₂O, and CO₂ emissions of a central European village. *Atmospheric Measurement Techniques* 15, 5019–5031. doi:10.5194/amt-15-5019-2022

Hidy, D., Barcza, Z., **Hollós, R.**, Dobor, L., Ács, T., Zacháry, D., Filep, T., Pásztor, L., Incze, D., Dencső, M., 2022. Soil-related developments of the Biome-BGCMuSo v6.2 terrestrial ecosystem model. *Geoscientific Model Development* 15, 2157–2181. doi: 10.5194/gmd-15-2157-2022

Gelybó, Gy., Barcza, Z., Dencső, M., Potyó, I., Kása, I., Horel, Á., Pokovai, K., Birkás, M., Kern, A., **Hollós, R.**, Tóth, E., 2022. Effect of tillage and crop type on soil respiration in a long-term field experiment on chernozem soil under temperate climate. *Soil and Tillage Research* 216, 105239. doi:10.1016/j.still.2021.105239

Fodor, N., Pásztor, L., Szabó, B., Laborczi, A., Pokovai, K., Hidy, D., **Hollós, R.**, Kristóf, E., Kis, A., Dobor, L., Kern, A., Grünwald, T., Barcza, Z., 2021. Input database related uncertainty of Biome-BGCMuSo agro-environmental model outputs. *International Journal of Digital Earth* 14, 1582–1601. doi:10.1080/17538947.2021.1953161

Dávid, R.Á., Barcza, Z., Kern, A., Kristóf, E., **Hollós, R.**, Kis, A., Lukac, M., Fodor, N., 2021. Sensitivity of spring phenology simulations to the selection of model structure and driving meteorological data. *Atmosphere* 12, 963. doi:10.3390/atmos12080963

Pokovai, K., **Hollós, R.**, Vidnyánszky-Bottyán, E., Kis, A., Marton, T., Pongrácz, R., Pásztor, L., Hidy, D., Barcza, Z., Fodor, N., 2020. Estimation of agro-ecosystem services using biogeochemical models. *Időjárás/Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service* 124, 209–225.

Nemzetközi illetve hazai konferenciákon a disszertáció témájában bemutatott előadások/poszterek

Fodor, N., Barcza, Z., Hidy, D., **Hollós, R.**, Dobor, L., Kis, A., Ádámné Pokovai, K., Gell, G., Pásztor, L., Takács, T.M., Cseresnyés, I., Nagy, Z., Salma, I., Bartholy, J., 2019. AgroMo - Interdiszciplináris Kísérleti Platform és Modellezési Keretrendszer. Előadás, AgroMo konferencia, Martonvásár, Magyarország 2019.04.18

Fodor, N., Pásztor, L., Tóth, B., Barcza, Z., Hidy, D., **Hollós, R.**, Kristóf, E., Kern, A., Kis, A., 2020. Database Sensitivity of the Biome-BGCMaG Biogeochemical Model, in: *Book of Abstracts: Second International Crop Modelling Symposium*. pp. 544–545.

Hidy, D., Fodor, N., **Hollós, R.**, Barcza, Z., 2020. Building a modelling framework to simulate ecosystem processes under changing climate: the long road from Biome-BGC to Biome-BGCMaG, in: *EGU General Assembly Conference 2020*. p. 21688.

Hidy, D., Fodor, N., **Hollós, R.**, Dobor, L., Ádámné Pokovai, K., Barcza, Z., 2019. A

biogeokémiai modellek szerepe az éghajlatváltozás kutatásában, AgroMo konferencia, Martonvásár, Magyarország, 2019.04.18.

Hollós, R., Fodor, N., Hidy, D., Marton, T., Bottyán, E., Barcza, Z., 2018. Mezőgazdasági célú Integrált Modellrendszer megvalósítása, in: Aktuális Környezeti Problémák az Időjárás és az Éghajlat Összefüggésében. pp. 69–75. doi:10.31852/EMF.30.2018.069.075

Hollós, R., Fodor, N., Kis, A., Kristóf, E., Hidy, D., Ádámné Pokovai, K., Dobor, L., Barcza, Z., 2019. Biome-BGCMuSo felhasználóbarát keretrendszerének alkalmazási lehetőségei a klímaváltozás vonatkozásában. AgroMo konferencia, Martonvásár, Magyarország, 2019.04.18.

Merganicova, K., Dobor, L., **Hollós, R.**, Merganič, J., Barcza, Z., Kurjak, D., Novák, J., Sitková, Z., Fleischer, P., Marjanovic, H., Hidy, D., Střelcová, K., and Hlásny, T., 2021. Can we reach a sensible balance between generality of model parameters and accuracy of simulations?, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-10889, doi:10.5194/egusphere-egu21-10889

Kern, A., Dobor, L., **Hollós, R.**, Marjanović, H., Torma, C., Kis, A., Fodor, N., Barcza, Z., 2022b. Climate data for 1951–2100 for scientific, societal and policy purposes in Central Europe: the FORESEE database, in: Book of Abstracts: Natural Resources, Green Technology and Sustainable Development. p. 32.

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 X.: Theory Meets Practice in GIS. pp. 131–138.

Kis, A., Barcza, Z., Hidy, D., **Hollós, R.**, Kristóf, E., Kern, A., Fodor, N., 2020. Bias correction of regional climate model results for crop simulations: hidden pitfalls and possible solutions, in: Book of Abstracts: Second International Crop Modelling Symposium. p. 410.

Sándor, R., Bellocchi, G., Bottyán, E.A.M., Doro, L., Hidy, D., **Hollós, R.**, Minet, J., Lelleiné Kovács, E., Ma, S., Perego, A., Ruget, F., Sanna, M., Seddaiu, G.W.L., Barcza, Z., 2019a. Sensitivity analyses of simulated biomass yield and carbon-fluxes from Euro-Mediterranean grasslands, in: 3rd Agriculture and Climate Change Conference, Budapest, Magyarország 2019.03.24. - 2019.03.26

Sándor, R., Fodor, N., **Hollós, R.**, Martin, R., Piseddu, F., Bellocchi, G., 2019b. Expanding the potential applications of dynamic agro-ecosystem models in support of the sustainable development of agricultural production, in: 2. Francia-Magyar Tudományos Kutatói Fórum. Budapest, Magyarország 2019.09.27. - 2019.09.27.

Egyéb publikációk

Hollós, R., Fodor, N., Hidy, D., Marton, T., Bottyán, E., Barcza, Z. 2018. Mezőgazdasági célú Integrált Modellrendszer megvalósítása. In. Aktuális környezeti problémák az időjárás és az

éghajlat összefüggésében, Budapest: ELTE TTK Meteorológiai Tanszék, Egyetemi Meteorológiai Füzetek. doi: /10.31852/EMF.30.2018.069.075

Hidy, D., Barcza, Z., **Hollós, R.**, Thornton, P., Running, S.W. és Fodor, N., 2021. User's Guide for Biome-BGCMuSo. 6.2. http://nimbus.elte.hu/bbgc/files/Manual_BBGCMuSo_v6.2.pdf

Felhasznált publikációk

Kern, A., Dobor, L., **Hollós, R.**, Marjanović, H., Torma, C.Z., Kis, A., Fodor, N., Barcza, Z., 2024. Seamlessly combined historical and projected daily meteorological datasets for impact studies in Central Europe: The FORESEE v4.0 and the FORESEE-HUN v1.0. Climate Services 33, 100443. doi:10.1016/j.cliser.2023.100443

Hollós, R., Kristóf, E., Fodor N., Hidy D., Horváth F., Barcza Z. 2023. RBBGCMuso: An R package to support the application of the Biome-BGCMuSo biogeochemical model[Computer software]. <https://github.com/hollorol/RBBGCMuso>

Hollós, R., Fodor, N., Merganičová, K., Hidy, D., Árendás, T., Grünwald, T., Barcza, Z., 2022. Conditional interval reduction method: A possible new direction for the optimization of process based models. Environmental Modelling & Software 158. doi:10.1016/j.envsoft.2022.105556

Ren, H., Zhang, L., Yan, M., Tian, X., Zheng, X., 2022. Sensitivity analysis of Biome-BGCMuSo for gross and net primary productivity of typical forests in China. Forest Ecosystems 9, 100011. doi:10.1016/j.fecs.2022.100011

Hidy, D., Barcza, Z., **Hollós, R.**, Dobor, L., Ács, T., Zacháry, D., Filep, T., Pásztor, L., Incze, D., Dencső, M., Tóth, E., Merganičová, K., Thornton, P., Running, S., Fodor, N., 2022. Soil-related developments of the Biome-BGCMuSo v6.2 terrestrial ecosystem model. Geoscientific Model Development 15, 2157–2181. doi:10.5194/gmd-15-2157-2022

Fodor, N., Pásztor, L., Szabó, B., Laborczi, A., Pokovai, K., Hidy, D., **Hollós, R.**, Kristóf, E., Kis, A., Dobor, L., Kern, A., Grünwald, T., Barcza, Z., 2021. Input database related uncertainty of Biome-BGCMuSo agro-environmental model outputs. International Journal of Digital Earth 14, 1582–1601. doi:10.1080/17538947.2021.1953161

Canadell, J.G., Monteiro, P.M.S., Costa, M.H., Cotrim da Cunha, L., Cox, P.M., Eliseev, A.V., Henson, S., Ishii, M., Jaccard, S., Koven, C., Lohila, A., Patra, P.K., Piao, S., Rogelj, J., Syampungani, S., Zaehle, S., Zickfeld, K., 2021. Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. doi:10.1017/9781009157896.007

Hidy, D., Barcza, Z., **Hollós, R.**, Thornton, P., Running, S.W., Fodor, N., 2021. User's Guide for Biome-BGC MuSo 6.2.

Pásztor, L., Laborcz, A., Takács, K., Illés, G., Szabó, J., Szatmári, G., 2020. Progress in the elaboration of GSM conform DSM products and their functional utilization in Hungary. *Geoderma Regional* 21, e00269. doi:10.1016/j.geodrs.2020.e00269

Chen, M.-H., Schmeiser, B.W., 1996. General Hit-and-Run Monte Carlo sampling for evaluating multidimensional integrals. *Operations Research Letters* 19, 161–169. doi:10.1016/0167-6377(96)00030-2