






AZ ŐSZI BÚZA PRODUKCIÓJÁNAK ÉS ÜVEGHÁZHASZÁRA GÁZ MÉRLEGÉNEK MODELLEZÉSE A BIOME-BGCMUSO MODELLEL

Zrinyi Nándor^(1,2), Barcza Zoltán^(1,3) , Hollós Roland^(1,2,3), Hidy Dóra⁽¹⁾,
Pintér Krisztina^(4,5) , Nagy Zoltán^(4,5) , Balogh János⁽⁵⁾ , Fodor Nándor⁽²⁾ 

⁽¹⁾ ELTE Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A.

⁽²⁾ HUN-REN Agrártudományi Kutatóközpont, Mezőgazdasági Intézet, 2462 Martonvásár, Brunszvik u. 2.

⁽³⁾ Czech Academy of Sciences, Global Change Research Institute, 603 00 Brno, Bělidla 986/4a, Czech Republic

⁽⁴⁾ HUN-REN-MATE Agroökológiai Kutatócsoport, 2100 Gödöllő, Páter Károly utca 1.

⁽⁵⁾ MATE Növénytermesztési-tudományok Intézet, 2100 Gödöllő, Páter Károly utca 1.

e-mail: nandor.zrinyi@gmail.com, zoltan.barcza@ttk.elte.hu, pinter.krisztina@uni-mate.hu, nagy.zoltan@uni-mate.hu, balogh.janos@uni-mate.hu, fodor.nandor@atk.hu

Bevezetés

A búza meghatározó szerepet játszik az emberiség élelmiszer-szükségletének kielégítésében, és a rizs után a második legfontosabb emberi fogyasztásra alkalmas haszonnövény. 2023-ban a globális szárazföldi termőterület kb. 6%-án arattak (őszi és tavaszi) búzát [1 – FAO]. Magyarországon is meghatározó szerepe van a búzának szántóföldi növénytermesztésben. Az elmúlt öt évben (2020–2024) átlagosan 5,42 tonna búzát arattak le hektáronként [2 – KSH], ami az egyik, ha nem a legfontosabb haszonnövényt teszi a búzát hazánkban. A nagy területeket érintő természetvédelmi miatt a búza fontos szerepet játszik a felszín-légkör kölcsönhatások alakításában, és az üvegházhatású gázok (ÜHG) felszíni mérlegének alakításában.

Ebből kifolyólag a búza produktivitásának, szénmérlegének, illetve egyéb ÜHG-kibocsátásának modellezése a klímaváltozás függvényben az élelmiszer-biztonság, illetve éghajlati visszacsatolások kérdéskörének fontos feladata. Ahhoz, hogy betekintést kaphassunk a jövőbeli trendekre, olyan modellekre van szükségünk, amik mechanisztikus kapcsolatot képeznek a talaj-növény-légkör rendszerek elemei között. A tanulmányban egy ilyen ún. biogeokémiai modell, a Biome-BGCMuSo kerül alkalmazásra (Hidy et al., 2016; 2022).

A Biome-BGCMuSo modell szénkörforgásra vonatkozó eredményeinek megfelelő értékeléséhez mérésekre van szükség. Ehhez jelenleg az ún. eddy-kovariancia mérőtoronyok mérései a legalkalmasabbak (Incze et al., 2023). Jelen tanulmányban is ezen mérés technika adatait használjuk három hazai kísérleti állomáson (Kartal, Pettend, Kajászó) a Biome-BGCMuSo modell eredményeinek kiértékeléséhez, ezzel képezve alapot a jövőbeli vizsgálatokhoz.

A biogeokémiai modelleket a leírt folyamatok komplexitása miatt minden esetben “be kell állítani”, azaz paraméterezni kell az adott ökoszisztémára vonatkozóan. Ez az ún. modellkalibráció viszont nem triviális feladat. Rengeteg nemlineáris folyamat, számos (mind növényhez, mind talajhoz kapcsolódó) paraméter okoz nehézséget a megfelelő eredmények elérésében. Több módszer is létezik a modell optimális paraméterezéséhez, amelyek többsége komoly matematikai és programozói tudásra épül. Jelen tanulmányban a leggyakrabban használt ún. manuális kalibráció („trial and error”) módszerét alkalmaztuk, elemezve, hogy az összeállított adatokból a három mérőhelyen milyen eredményt tudunk elérni csupán ezt a módszert használva. A „trial and error” kalibráció lehetővé teszi, hogy a felhasználó ráérezzen a modell működésére, és nagyobb magabiztossággal értelmezze a beállítandó paramétereket.

A kalibrációt egy saját fejlesztésű szoftverkörnyezetben végeztük, amelynek rövid bemutatása szintén célja a tanulmánynak.

Adatok és módszerek

A három vizsgált mérőállomás – Kartal, Kajászó és Pettend – Magyarországon belüli elhelyezkedése az *1. ábrán* látható. Első lépésként a három magyarországi mérőállomás művelési adatait gyűjtöttük össze és dolgoztuk fel, amelyek adatai az *1. táblázatban* láthatóak.



1. ábra: Kartal, Kajászó és Pettend földrajzi elhelyezkedése.

Mindhárom szántóföldi területen egy-egy eddy-kovariancia (EK) mérőtorony üzemel, amely egy áramlási és statisztikai alapokon nyugvó mikrometeorológiai mérési módszertan alapján számolja a felszín és a légkör közötti anyagáramlást (Baldochi, 2014). Ezt alkalmazva vertikális fluxusokat mérhetünk a talaj-növény rendszer és a légkör között, ami megfelelő módszerek alkalmazásával lehetőséget ad a növények fotoszintézisének és respirációjának, illetve a nettó szénmérlegének számszerűsítésére is. Ezen adatokat is összegyűjtöttük és feldolgoztuk a modell számára értelmezhető formára. Az eddy-kovariancia mérőállomásokon egyéb fluxusokat is mérnek (pl. evapotranspiráció), de a tanulmányban csak a nettó szénmérleg (net ecosystem exchange, NEE) eredményeit használjuk, amely a teljes ökoszisztéma respirációjának és a fotoszintézisnek az eredője. Az NEE-ből származtatott GPP (gross primary production, fotoszintézis) és Reco (total ecosystem respiration, respiráció) értékeit hasonlítjuk össze a modelleredményekkel.

Kartalon 2017 ősztől működik a szántóföldi területre telepített, a HUN-REN-MATE Agroökológia Kutatócsoport által üzemeltetett EK mérőtorony (Balogh et al., 2022). A 2024-ig tartott időszakban háromszor vetettek őszi búzát Kartalon. 2018-ban két egymáshoz közeli településen – Kajászón és Pettenden – telepítettek EK tornyokat az AgroMo projekt keretén belül (Barcza & Fodor, 2018). Kartalhoz hasonlóan az HUN-REN-MATE Agroökológia Kutatócsoport végzi az EK méréseket szántóföldi környezetben. 2019 óta őszi búzát, repcét, kukoricát, napraforgót, valamint árpat vetettek. Pettenden kétszer, Kajászón háromszor vetettek őszi búzát a vizsgált időszakban.

*1. táblázat: A három helyszín koordinátái, vetési és aratási adatai,
 kiemelve a tanulmányban vizsgált őszi búza adatait.*

Település	Haszonnövény	Vetés – Aratás időpont
Kartal é.sz. 47,6618° k.h. 19,5286° 153 m tszf.	Őszi búza	2017.10.03 – 2018.07.14
	Repce	2018.09.10 – 2019.05.01
	Cirok	2019.05.03 – 2019.09.30
	Őszi búza	2019.10.14 – 2020.07.16
	Napraforgó	2021.04.03 – 2021.09.03
	Őszi búza	2021.10.15 – 2022.07.03
	Kukorica	2023.05.04 – 2023.09.12
	Napraforgó	2024.04.14 – 2024.09.03
Pettend é.sz. 47,2598° k.h. 18,7325° 135 m tszf.	Őszi búza	2018.09.26 – 2019.07.17
	Repce	2019.09.06 – 2020.07.08
	Árpa	2021.10.10 – 2021.06.27
	Őszi búza	2021.10.12 – 2022.07.08
	Kukorica	2023.05.02 – 2023.09.12
	Napraforgó	2024.04.05 – 2024.09.03
Kajászó é.sz. 47,3209° k.h. 18,7436° 163 m tszf.	Őszi búza	2018.09.25 – 2019.07.17
	Árpa	2019.10.09 – 2020.06.27
	Repce	2020.08.28 – 2021.07.10
	Őszi búza	2021.10.03 – 2022.06.27
	Őszi búza	2022.09.20 – 2023.07.20*

* becsült adatok

Biome-BGCMuSo biogeokémiai modell

A Biome-BGCMuSo egy biogeokémiai modell, ami a Biome-BGC (Thornton, 2000; Thornton et al., 2002) hazai továbbfejlesztésének az eredménye. A modell az eredeti alapstruktúráját megtartva került továbbfejlesztésre. Az egyik első alapvető fejlesztés a többrétegű talajséma alkalmazása volt (innen származik a név is, a multi-layer soil, azaz „MuSo” alapján) (Hidy et al., 2016), emellett több haszonnövényekre jellemző mechanizmus (pl. csírázás, vernalizáció) beépítése is megtörtént a hazai 4M modellből (Fodor et al., 2003). A modell alkalmazható erdők, gyepek, cserjék és szántók modellezésére is. A tanulmányban vizsgált szántóföldeken alkalmazott vetésforgókat is képes kezelni a modell, ezáltal képesek lehetünk effektíven modellezni a haszonnövények működését.

RBBGCMuso keretrendszer

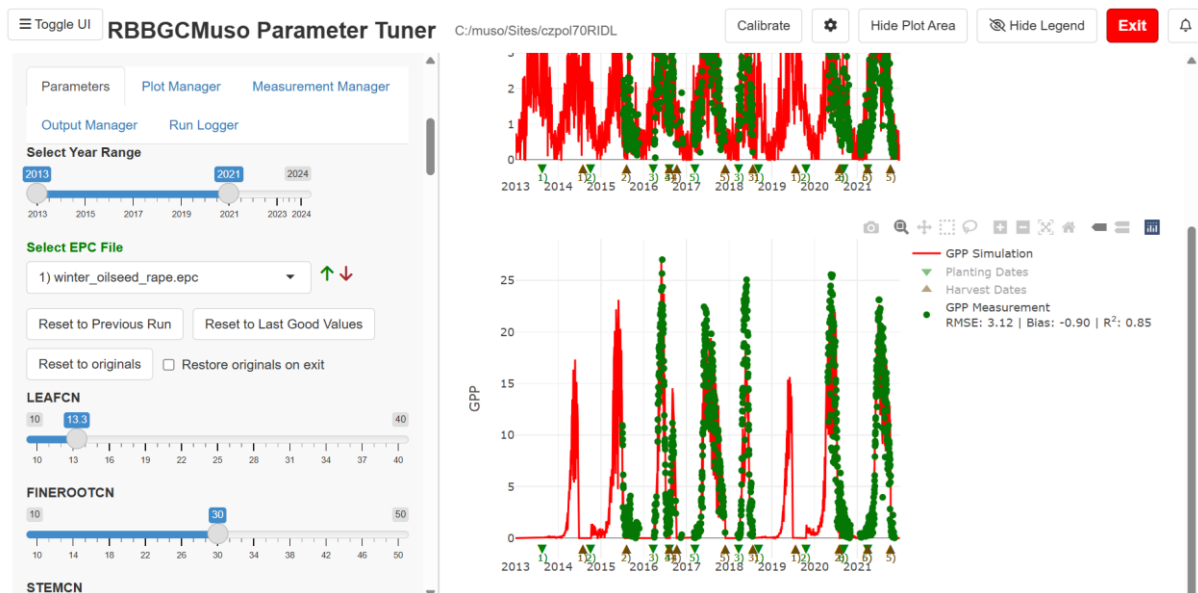
A Biome-BGCMuSo modell megfelelő színvonalú használata nem könnyű feladat. A modell használatához a bemenő adatok összegyűjtése után valamilyen programozói környezetre van szükség, mert pl. Microsoft Excellel a modell használata igen nehézkes. Mivel a modell bináris vagy ASCII formátumban származtatja az eredményeket, még a vizualizáció is

problematikus. A haladó szintű modellhasználat (érzékenység-vizsgálat végrehajtása, modell optimalizáció, vizualizáció) pedig tulajdonképpen megkerülhetetlenné teszi egy megfelelő szoftver létrehozását.

A Biome-BGCMuSo használatának megkönnyítésére született meg az ún. RBBGCMuso¹ szoftvercsomag (Hollós et al., 2025). Az RBBGCMuso egy R programozási nyelven megírt, nyílt forráskódú csomag, amelynek dedikált feladata a Biome-BGCMuSo modell használatának támogatása, a népszerű R programozási környezetben. Az RBBGCMuso használatával tulajdonképpen ki sem kell lépni az R környezetből a magas szintű eljárások kezeléséhez.

Az RBBGCMuso megköveteli bizonyos alapszintű R programozói tudás létezését, mivel R parancsok meghívásával történik az alkalmazása. Köszönhetően az utóbbi évek fejlesztéseinek ennek a programozói tudásnak a fontossága mára tulajdonképpen jelentősen lecsökkent, mivel a végfelhasználók részére születtek könnyen használható grafikus felhasználói felületek (GUIk). Ezek a felületek lehetővé teszik, hogy egy magas szintű felhasználói élmény nyújtása mellett a felhasználó könnyen elvégezhesen komplex feladatokat. Ilyen megoldások például tetszőleges földrajzi koordinátára összeállítani a modell bemenő meteorológiai adatait; tetszőleges helyre lekérni talajadatokat a modell által megkövetelt formátumban; a modellparaméterek állításával tesztelni a modell eredményeinek változását; vizsgálni és módosítani a modell által létrehozott ún. endpoint fájlt (ami a spinup, vagyis ön-inicializáció eredménye).

Jelen munkában az ún. tuneMuso modult használtuk, ami egy új fejlesztés az RBBGCMuso csomagon belül, és a modellparaméterek vizuális állítását teszi lehetővé oly módon, hogy a szimulált változó (pl. GPP, NEE, stb.) azonnal reagál a bemenő paraméter módosítására (2. ábra). A tuneMuso kiegészült egy olyan modullal, amiben haladó módon lehet különféle időbeli felbontású mérési adatokat összefésülni, és elmenteni későbbi felhasználás céljából.



2. ábra: A tuneMuso GUI vizuális megjelenése.

Az RBBGCMuso nem csak GUI megoldásokat kínál. A modell optimalizációja (más szóval kalibrációja, vagy paraméterbecslése) továbbra is programozói ismereteken alapul. Cserébe viszont az eredmények (mint pl. az ún. GLUE kalibráció alkalmazása után)

¹ <https://github.com/hollorol/RBBGCMuso>

vizuálisan vizsgálatok, és a paraméterek változása jól nyomon követhető az ún. “dotly plot”-ok formájában (magyarul kb. pöttyös ábrának fordíthatnánk, ami valójában azt jelenti, hogy a modell jóságát jelentő ún. likelihood értékek egy pöttyként jelennek meg az ábrán).

Az RBBGCMuso számos más megoldást kínál a Biome-BGCMuSo egyedi tulajdonságainak a kihasználására. Jelen munka során a tuneMuso alapján, trial-and-error módszerrel állítottuk be a modellt az őszi búza szénmérlegének a modellezésére. A tuneMuso a mérési adatok ismeretében automatikusan modell hiba metrikákat is számít, amik megjelennek az ábrán. Ily módon nem csak vizuális, de számszerű információt is kapunk a modelleredmény elfogadhatóságáról.

Kalibráció

Ahogy az előző alfejezetekben említettük, az EK-tornyok NEE-t mérnek. Ezeket az eredményeket utófeldolgozással bontják szét az említett két változóra (Reco, respiráció és GPP, fotoszintézis). A vizsgálatainkban ez utóbbi fluxusokat fogjuk vizsgálni, mert pontosabb képet adnak az ökoszisztéma működéséről, mint az NEE. Meg kell jegyezni, hogy a respirációnak több forrása van (a talaj szervesanyag-bomlása, növényi életfolyamatok, növekedés, avarbomlás), és bár a modell mindegyik említett folyamatot szimulálja, az EK-tornyok a teljes respirációt mérik, emiatt a modell összegzett respirációját (TR) fogjuk használni összehasonlításképpen a Reco méréssel. Az eredmény ábrák az előző alfejezetben említett tuneMuso modul által készültek. Három metrika, az RMSE (root mean square error, vagyis a négyzetes hibák átlagának négyzetgyöke), a BIAS (vagyis a teljes modellezett és mért adatsorok átlagának a különbsége), és a Pearson korrelációból származtatott R^2 alapján fogjuk értékelni az eredményeket, amiket a tuneMuso modul az ábrák „jelmagyarázat” mezejébe helyez, ahogy az már a 2. ábrán is látható volt.

Az ún. ökofiziológiai fájl (Biome-BGCMuSo terminológiával EPC-fájl) tartalmazza az egyes növényekhez kötődő paramétereket a modellben, tehát az őszi búza is rendelkezik ilyennel. A kalibráció tulajdonképpen az ökofiziológiai fájlban szereplő számértékek beállítását jelenti (ha eltekintünk a talajparaméterek beállításától). Az őszi búza parametizációjához az alapot egy cseh szántóföldön (Polkovice) korábban kalibrált őszi búza paraméterezése adta, amit kézi kalibrálás előtt és után is alkalmaztunk először Kartalon. Ezután a kartali parametizációt alkalmaztuk Pettenden és Kajászón, ahol tovább módosítottuk a paraméterezést. A tanulmányban az adott mérési hely első évének GPP és Reco adatait mutatjuk be ábrák formájában, amikor búzát vetettek, mert azokban az években alkalmaztunk a kalibrációt. A további búza évek adatait validációs adatnak tekintettük, amelyről statisztikai mérőszámokat származtattunk, és így számszerűen értékeltük a modellszimulációk jóságát független adatsorok segítségével is.

Eredmények

Kartal

Amint az a 3. ábrán látható, a referencia-paraméterezés alapján készített futtatás további finomítás nélkül nem adott kielégítő eredményt Kartalon a 2017-2018-as búza vegetációs időszakra. Bár a magyarázott variancia magas értéket mutat (80% feletti), és a modell a mérési eredmények változékonyságát jól adja vissza, az RMSE mind a GPP-nél, mind a Reco-nál magas, 3 gC/m²/nap feletti értékeket mutat, emellett abszolút értékben mindkét változó jelentősen alulbecsülte a méréseket. Tehát ránézésre elmondhatjuk, hogy a cseh szántóföldön alkalmazott parametizáció önmagában, kalibráció nélkül, nem adott kielégítő eredményt.



3. ábra: Napi léptékű mért és modellezett GPP és Reco értékek Kartal 2018-as (első) őszi búza évére a referencia parametrizáció (felső ábra) és a kalibrált paraméterek (alsó ábra) alapján. A pozitív tengely a Reco modelleredményét (piros folytonos vonal) és a méréseket (sárga szimbólumok) mutatja. A negatív tengely a GPP modelleredmények mínusz egyszeresét (zöld folytonos vonal) és a mérések mínusz előjelű eredményét (türkiz szimbólumok) mutatja. A vertikális szaggatott zöld vonal a számokkal a fenofázisokat mutatja. Az ábrán az őszi vetést követő előző évi fluxusok nem látszódnak.

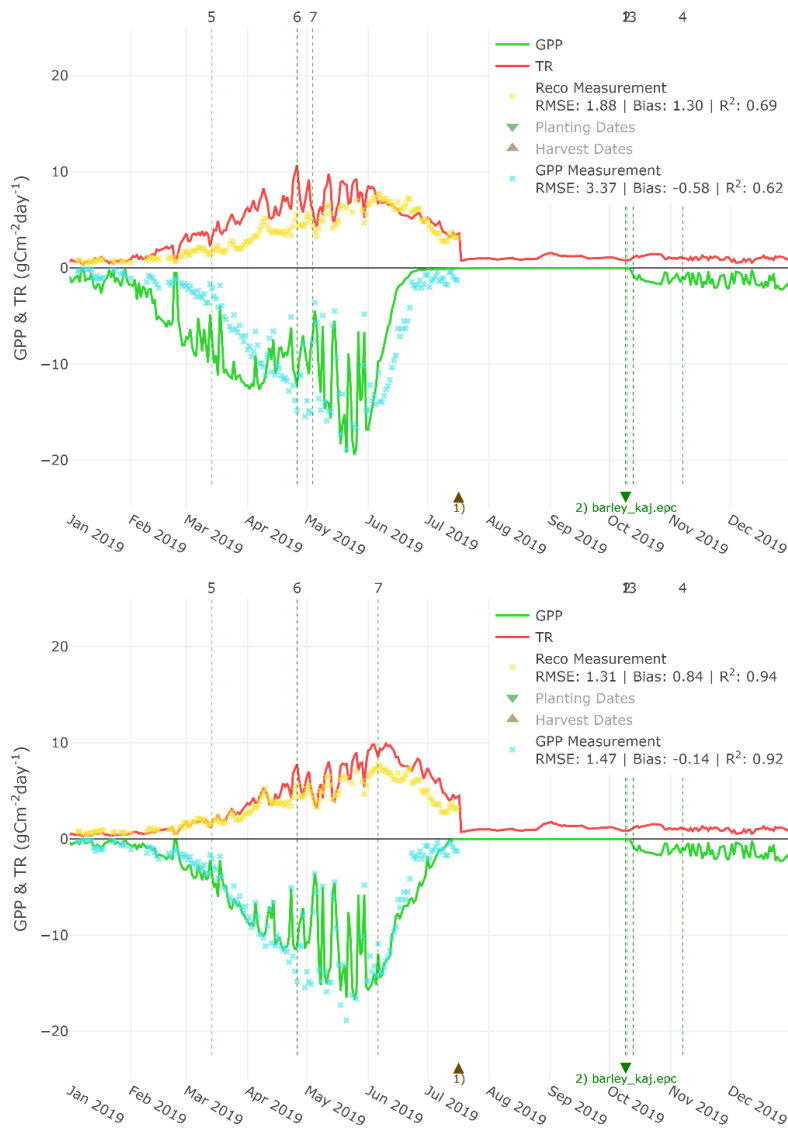
A 3. ábra alsó fele a kalibrált paraméterekkel készült futtatás eredményét mutatja. Az RMSE mindkét változónál nagyjából a felére csökkent, a BIAS-ok pedig ~72%-kal jobbak lettek, míg a GPP közel BIAS-mentessé vált. A magyarázott variancia értékén is sikerült javítani a GPP esetében, 82%-ról 91%-ra, azaz a mérési változékonyságot a modell jobban le tudta írni a referenciához képest.

Kajászó

A 4. ábra a kajászói eredményeket demonstrálja. Az ábra felső részén látható kartali referencia-paraméterezéssel készített modellfutás a 3. ábra referencia futásához képest rosszabb korrelációs értékeket mutat mindkét változó esetén. Emellett viszont jelentősen jobb BIAS mutatókkal rendelkeznek a szimulációk, a Reco esetében pedig 39%-kal jobb RMSE értékeket adott a szimuláció, tehát ezen változó nagyságrendre kevésbé tér el a méréstől, mint

a cseh referencia esetében Kartalon. A pontosabb eredmények mellett a GPP RMSE-je továbbra is magas, hasonló mértékű, mint Kartal referencia futása esetében, és emellett a korreláció értékek sem teljesen kielégítőek.

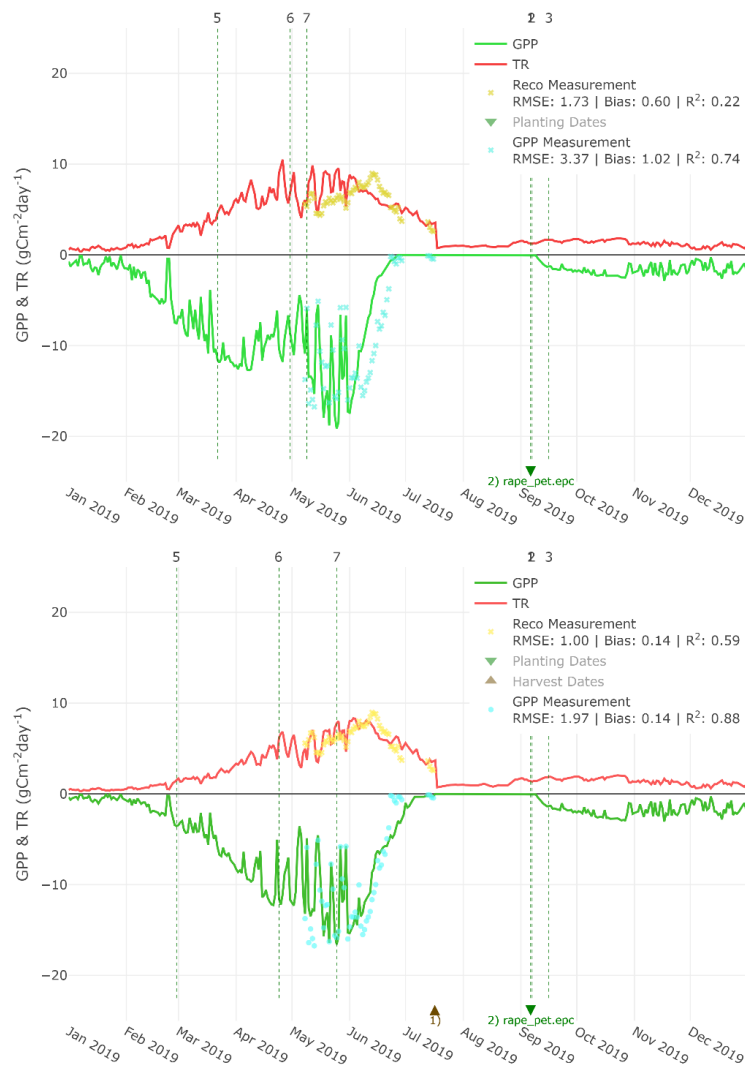
A 4. ábra alsó felén látható a kartali referencia paraméterezés kalibrált verziójának eredménye, amelynek hatására mindegyik metrika jelentősen javult, kiemelten a korrelációs együttható négyzete, ami ~37%-kal javult mindkét változó esetében. A GPP RMSE metrikája nagyjából a felére csökkent, és mint ahogy Kartalnál, itt is kvázi BIAS-mentessé vált a szimuláció, míg a Reco szimulációban egy kisebb felülbecslés mutatkozik nagyjából a hatodik fenofázistól kezdve.



4. ábra: Napi léptékű mért és modellezett GPP és Reco értékek Kajászó 2019-es (első) őszi búza évére a referencia parametrizáció (felső ábra) és a kalibrált paraméterek (alsó ábra) alapján. A pozitív tengely a Reco modelleredményét (piros folytonos vonal) és a méréseket (sárga szimbólumok) mutatja. A negatív tengely a GPP modelleredmények mínusz egyszeresét (zöld folytonos vonal) és a mérések mínusz előjelű eredményét (türkiz szimbólumok) mutatja. A vertikális szaggatott zöld vonal a számokkal a fenofázisokat mutatja. Az ábrán az őszi vetést követő előző évi fluxusok nem látszódnak.

Pettend

Az 5. ábra a pettendi eredményeket mutatja be. Az ábra felső felén látható, hogy a Kartal alapú referencia parametrizáció kisebb BIAS-t eredményezett a Reco esetén, mint Kajászó vonatkozásában. A GPP esetében ugyanezen metrika $\sim 0,5 \text{ gC/m}^2/\text{nap}$ értékkel nagyobbak. A fotoszintézis RMSE-ére ugyanolyan értéket adott a referencia parametrizáció, mint a kajászói szántóföld elsőéves búzájának. Az R^2 viszont $\sim 20\%$ -kal magasabb értékkel rendelkezik a GPP esetében, mint Kajászó referencia eredményénél. A Reco esetében ez a mérőszám jelentősen lecsökkent, 0,69-ről 0,22-re. Az 5. ábra alsó felén látható kalibrált futás ezt csak 0,59-re tudta javítani, ami a másik két esethez képest rosszabb mutató, viszont a javulás mértéke több mint kétszeres. A BIAS viszont mindkét változó esetében nagyon alacsony lett, az RMSE a GPP esetében körülbelül kétszer akkora, mint a respirációnál, viszont a 0,88-as R^2 értéke jelentősen meghaladja a másik változót.



5. ábra: Napi léptékű mért és modellezett GPP és Reco értékek Pettend 2019-es (első) őszi búza évére a referencia parametrizáció (felső ábra) és a kalibrált paraméterek (alsó ábra) alapján.

A pozitív tengely a Reco modelleredményét (piros folytonos vonal) és a méréseket (sárga szimbólumok) mutatja. A negatív tengely a GPP modelleredmények mínusz egyszeresét (zöld folytonos vonal) és a mérések mínusz előjelű eredményét (türkiz szimbólumok) mutatja.

A vertikális szaggatott zöld vonal a számokkal a fenofázisokat mutatja.

A validációs évek eredményeit a 2. táblázat foglalja össze. A táblázat alapján látható, hogy Kartal és Pettend esetében az első évre kalibrált parametrizáció legtöbbször javított mind a GPP, mind a Reco eredményein a referenciához képest. Az R^2 -nél ez minden esetben igaz volt az említett két helyszínen, bár igazán jó értékeket egyik metrikában sem értek el az első évhez képest a későbbi évek. Kajászó esetében történt túlllesztés a kalibráció során, mivel a második két évben (2022, 2023) nem hoztak jelentős mértékű javulást a referenciához képest.

2. táblázat: Az RMSE, BIAS és R^2 metrikák értékei a referencia paraméterezés (ref) és a kalibrált paraméterezés (kal) között az egyes években az adott helyszíneken, az őszi búzára.
 Az adott cellában a felső érték a Reco, az alsó a GPP eredménye.

Kartal	2018 ref	2018 kal	2020 ref	2020 kal	2022 ref	2022 kal
RMSE	3,06	1,59	1,47	1,35	2,20	2,39
	3,29	1,77	2,51	2,22	3,32	3,01
BIAS	-2,41	-0,66	-1,04	0,07	-1,20	0,54
	2,01	0,12	0,07	-0,67	0,16	-0,9
R^2	0,84	0,84	0,74	0,77	0,56	0,59
	0,82	0,91	0,71	0,81	0,51	0,61
Kajászó	2019 ref	2019 kal	2022 ref	2022 kal	2023 ref	2023 kal
RMSE	1,88	1,31	1,60	1,81	2,26	2,30
	3,77	1,47	4,10	3,62	3,21	3,22
BIAS	1,30	0,84	0,79	1,21	-1,24	-1,41
	-0,58	-0,14	0,40	0,91	2,20	1,90
R^2	0,69	0,94	0,63	0,65	0,41	0,39
	0,62	0,92	0,39	0,49	0,78	0,75
Pettend	2019 ref	2019 kal	2022 ref	2022 kal		
RMSE	1,73	1,00	2,26	1,98		
	3,37	1,97	4,42	2,20		
BIAS	0,60	0,14	1,23	0,90		
	1,02	0,14	0,11	0,20		
R^2	0,22	0,59	0,43	0,56		
	0,74	0,88	0,34	0,61		

Összefoglalás

A tanulmányban a Biome-BGCMuSo modellt alkalmaztuk őszi búza szénmérlegének modellezésére három magyarországi kísérleti mérőállomáson. A modellparaméterezés során „trial and error” módszert használtunk az RBBGCMuso szoftver tuneMuso moduljának segítségével, eddy-kovariancia méréseket használva az optimalizáláshoz és a validáláshoz. A cél az volt, hogy teszteljük, mennyire átvihető egy kalibrált növényi paraméterezés szántóföldek között, oly módon, hogy csupán a kézi kalibrálás módszerét használjuk. A

tanulmány megalapozza a további, objektív kalibrációs eljárások alkalmazását, és referencia értékeket nyújt a modell teljesítményére.

A kalibráció során a módosított paraméterek főképp a respirációt és a fotoszintézist befolyásoló fenofázis-hossz és allokációs paraméterek voltak. Nemlineáris folyamatok modellezésének tipikus nehézségeibe ütközünk mindhárom mérőállomás kapcsán. A tapasztalatok szerint amikor egy változóval már adott évben elégedettek vagyunk, viszont egy másikkal (jelen esetben GPP vagy Reco) nem, adott paraméter változtatásával javulhat a korábban gyengébben teljesítő modelleredmény, de a másik változó kárára. Emellett mindig fennáll a túlkalibrálás esélye is (angolul “overfitting”), ami azt jelenti, hogy adott év túl jól illeszkedik a mérésre, más évben viszont ugyanazon paraméterekkel rossz a szimuláció. Ez utóbbi Kajászó esetében fordult elő leginkább, az első év eredményei sokkal jobbak voltak a későbbiekhez képest. Ezeket segít felülkerekedni az úgynevezett multiobjektív kalibráció, aminél valamilyen optimalizáló módszer több kimenő változó értékeit figyelembe véve keresi az optimális paraméter kombinációkat. Kézi kalibrációt követően ez a módszer alkalmazható lehet.

Fontos megjegyezni, hogy vetésforgó esetén a többi növény produkciója és az emberi beavatkozás is hathat a következő haszonnövény növekedésére, aszerint, hogy milyen mértékben változtatja meg a talajban lévő szervesanyagot, illetve a nedvességi állapotát. A kalibrálás során a többi haszonnövényhez a cseh szántóföldön kalibrált paraméterezést használtuk, kézi kalibrálást utána már nem végeztünk rajtuk. Ez a tanulmány limitációja.

Ugyancsak említésre méltó, hogy a búzafajták közt is jelentős eltérések vannak, az elvetett vetőmag kiválasztása is befolyásolja a búza növekedését, a fenofázisok hosszát, az allokációt, a búza érzékenységet különböző környezeti változókra, a növény produktivitását, a magasságát, illetve adott esetben a vernalizációt is. Emiatt egy adott év paraméterezése nem feltétlenül alkalmazható változtatás nélkül egy másik évre, illetve egy adott helyen kedvelt búzafajta nem feltétlenül kerül kiválasztásra egy másik helyen. Emiatt valószínűleg nem lesz egyszerű az objektív optimalizáció sem.

Összefoglalásképp elmondhatjuk, hogy a tanulmány során elvégzett tesztek szerint egy adott helyen beállított parametrizáció őszi búza esetén jó kiindulási alap lehet, de önmagában nem ad egy teljesen kielégítő eredményt. A kézi kalibráció viszont hasznos és effektív módja a modelleredmények javításának, viszont megvannak a limitációi, ha több változót vagy évet szeretnénk egyszerre kalibrálni.

Köszönetnyilvánítás

Készült az RRF-2.3.1-21-2022-00014 azonosítószámú „Éghajlatváltozás Multidiszciplináris Nemzeti Laboratórium létrehozása” elnevezésű projektben a Magyarország Helyreállítási és Ellenállóképességi Tervének keretében, az Európai Unió Helyreállítási és Ellenállóképességi Eszközének támogatásával.

Hivatkozások

- Balogh, J., Pintér, K., Fóti, S., De Luca, G., Mészáros, Á., Bouteldja, M., ... & Nagy, Z., 2022: Szántóföldi szénmérleg egy közép-magyarországi mintaterületen. *Agrokémia és Talajtan*, 71(2): 273–288. <https://doi.org/10.1556/0088.2022.00125>
- Barcza, Z., Fodor, N. (szerk.), 2018: Az AgroMo megközelítés: integrált biogeokémiai és mezőgazdasági modellrendszer kialakítása a hazai agroklimatológiai környezetben – modellfejlesztés és megfigyelőrendszer kapcsolata és együttműködése. Martonvásár. 150 p.

- Baldocchi, D., 2014: Measuring fluxes of trace gases and energy between ecosystems and the atmosphere – the state and future of the eddy covariance method. *Global Change Biology*, 20: 3600–3609. <https://doi.org/10.1111/gcb.12649>
- Fodor, N., Máthéné-Gáspár, G., Pokovai, K., Kovács, G. J., 2003: 4M-software package for modelling cropping systems. *European Journal of Agronomy*, 18: 389–393. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00126-0](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00126-0)
- Hidy, D., Barcza, Z., Marjanović, H., Ostrogović Sever, M. Z., Dobor, L., Gelybó, G., ... & Nagy, Z., 2016: Terrestrial ecosystem process model Biome-BGCMuSo v4. 0: summary of improvements and new modeling possibilities. *Geoscientific Model Development*, 9(12): 4405–4437. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-4405-2016>
- Hidy, D., Barcza, Z., Hollós, R., Dobor, L., Ács, T., Zacháry, D., ... & Fodor, N., 2022: Soil-related developments of the Biome-BGCMuSo v6.2 terrestrial ecosystem model. *Geoscientific Model Development*, 15(5): 2157–2181. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-2157-2022>
- Hollós, R., Kristóf, E., Fodor, N., Hidy, D., Horváth, F., Barcza, Z., 2025: RBBGCMuso: an R package to support the application of the Biome-BGCMuSo biogeochemical model. URL: <https://github.com/hollorol/RBBGCMuso>
- Incze, D., Barcza, Z., Pintér, K., Nagy, Z., Balogh, J., Fodor, N., Haszpra, L., 2023: Eddy-kovariancia alapú evapotranszspiráció mérések összehasonlító elemzése. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, 35: 41–53. <https://doi.org/10.31852/EMF.35.2023.041.053>
- Thornton, P.E., 2000: User's Guide for Biome-BGC, Version 4.1.1. Available online at ftp://daac.ornl.gov/data/model_archive/BIOME_BGC/biome_bgc_4.1.1/comp/bgc_usede_41.pdf
- Thornton, P. E., Law, B. E., Gholz, H. L., Clark, K. L., Falge, E., Ellsworth, D. S., ... & Sparks, J. P., 2002: Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113: 185–222. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00108-9)

Internetes hivatkozások

- [1 – FAO] <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (utolsó elérés: 2025.08.31)
[2 – KSH] https://www.ksh.hu/stadat_files/mez/hu/mez0071.html (utolsó elérés: 2025.08.31)
-

ORCID

- Barcza Z.  <https://orcid.org/0000-0002-1278-0636>
Pintér K.  <https://orcid.org/0000-0001-8737-706X>
Nagy Z.  <https://orcid.org/0000-0003-2034-9333>
Balogh J.  <https://orcid.org/0000-0003-3211-5120>
Fodor N.  <https://orcid.org/0000-0002-6460-1767>