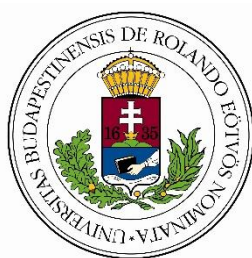


# Az éghajlatváltozás lehetséges hatásai a mezőgazdasági szénmérlegre és produktivitásra Magyarországon

Doktori értekezés

**Dobor Laura**

Környezettudományi Doktori Iskola  
Környezeti földtudomány program



Iskolavezető: **Dr. Jánosi Imre**, egyetemi tanár

Programvezető: **Dr. Szabó Csaba**, egyetemi docens

Témavezetők: **Dr. Barcza Zoltán**, egyetemi docens  
Eötvös Loránd Tudományegyetem  
Meteorológiai Tanszék

**Dr. Havasi Ágnes**, egyetemi adjunktus  
Eötvös Loránd Tudományegyetem  
Alkalmazott Analízis és Számításmatematikai Tanszék

Eötvös Loránd Tudományegyetem  
Meteorológiai Tanszék  
Budapest, 2016

„Not everything that can be counted  
counts, and not everything that counts  
can be counted.”

/Albert Einstein /

# Tartalomjegyzék

1. Bevezető.....	5
2. Irodalmi áttekintés .....	10
2.1. A mezőgazdasági produkció modellezésének lehetőségei.....	15
3. Adatok és módszerek .....	17
3.1. A szénmérleg komponensei .....	17
3.2. Modellek .....	18
3.2.1. A 4M mezőgazdasági modell .....	19
3.2.1.1. A modell működése .....	19
3.2.1.2. A modell bemenő és kimenő adatai .....	22
3.2.2. A Biome-BGCMuSo biogeokémiai modell.....	23
3.2.2.1. A modell működése .....	24
3.2.2.2. A modell bemenő és kimenő adatai .....	31
3.3. Meteorológiai adatbázis .....	32
3.3.1. Múltbeli adatok összeállítása .....	33
3.3.2. Jövőbeli adatok összeállítása .....	34
3.3.2.1. A csapadékos napok számának korrekciója.....	37
3.3.2.2. A csapadékmennyiség korrekciója .....	39
3.4. Talajfizikai és domborzati adatbázisok.....	41
3.5. Szén-dioxid keverési arány és nitrogénülepedés .....	42
3.6. A jövőre vonatkozó mezőgazdasági művelési kalendárium összeállítása .....	43
3.6.1. Vetési időpontok meghatározása .....	44
3.6.1.1. Vetési időpont becslő módszerek rangsorolása .....	47
3.6.2. Öntözés és trágyázási scenáriók.....	48
3.7. Megfigyelési adatok.....	51
3.8. Modellkalibráció .....	53
3.8.1. GLUE módszertan .....	53
3.8.1.1. A 4M kalibrálása.....	56
3.8.1.2. A Biome-BGCMuSo kalibrálása .....	56
3.9. Validáció .....	57
3.9.1.1. A 4M validációja .....	57
3.9.1.2. A Biome-BGCMuSo validációja .....	58
3.10. Az alkalmazott modellezési stratégia egyszerűsítései és korlátai .....	58
4. Eredmények .....	60
4.1. FORESEE adatbázis .....	60
4.2. Vetési kalendárium .....	63
4.2.1. A vetési időpont becslő módszerek validációja.....	63
4.3. A kalibráció eredményei .....	66
4.3.1. 4M.....	66
4.3.2. Biome-BGCMuSo .....	70
4.4. A validáció eredményei .....	74
4.4.1. 4M.....	74

4.4.2.	Biome-BGCMuSo .....	76
4.5.	Hazai termésátlag-eredmények .....	80
4.5.1.	4M.....	80
4.5.1.1.	Változatlan művelési scenárió .....	80
4.5.1.2.	Alternatív művelési scenáriók.....	83
4.5.2.	Biome-BGCMuSo .....	89
4.5.2.1.	Változatlan művelési scenárió .....	89
4.5.2.1.	Alternatív művelési scenáriók.....	92
4.6.	Hazai mezőgazdasági szénmérleg eredmények .....	97
4.6.1.	Kukorica.....	97
4.6.2.	Búza .....	100
4.7.	Bizonytalanság.....	102
5.	Modelleredmények összevetése/szintézis.....	105
6.	Összefoglalás .....	108
	Köszönetnyilvánítás .....	114
	Irodalomjegyzék .....	115
I.	Melléklet. A 4M modell növény- és talajparametrizációja.....	130
II.	Melléklet. A 4M és Biome-BGCMuSo modellek összehasonlítása.....	135
III.	Melléklet. A 4M modell megyei szintű validációja.....	136
IV.	Melléklet. A Biome-BGCMuSo modell megyei szintű validációja.....	138



## 1. Bevezető

Bár az elmúlt fél évszázad során jelentősen megnövekedett a világ élelmiszertermelése (Foley et al., 2011), Földünk népessége megduplázódott, és a jövőben további népességnövekedésre lehet számítani. A XXI. század közepére a mai 7,3 milliárd helyett várhatóan 9 milliárd ember ételmezéséről kell gondoskodni (Godfray et al., 2010).

Az Egyesült Nemzetek Szervezetének Élelmezésügyi és Mezőgazdasági Szervezete (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) szerint Földünk felszínének 12,6 százalékát borítják mezőgazdasági termelés alá vont területek (FAO, 2015). Míg a XIX. század első felében főleg új területek bevonásával értek el magasabb termésátlagokat, később nagyobb szerepet játszott a már bevont területek egyre intenzívebb művelése. Az elmúlt 50 évben az öntözött területek kiterjedése megduplázódott, miközben a trágyával kezelt termőföldek kiterjedése mintegy 500 százalékkal növekedett globálisan (Foley et al., 2011).

A mezőgazdasági művelés alá vont területek növelése nem jelent megoldást a jövő ételmezési problémáira, hiszen e folyamat során a természetes ökológiai rendszerek helyére gabonanövények kerülnek, mellyel csökken a biodiverzitás. Továbbá a korábbi vegetáció kiirtása során jelentős mennyiségű üvegházhatású gáz (ÜHG) jut a légkörbe (Friedlingstein et al., 2010; Foley et al., 2011). A megoldás az intenzívebb, de egyúttal fenntartható mezőgazdasági művelés kialakítása, elterjedése lehet (Godfray et al., 2010; Tilman et al., 2011), melyet különböző speciális művelési módszerekkel, új technológiákkal érhetünk el.

A népességnövekedéssel egy időben az éghajlatváltozás okozta kihívásokkal is szembe kell néznünk (Parry et al., 1999; Lobell and Field, 2007; Schmidhuber and Tubiello, 2007; Lobell et al., 2011). Az éghajlatváltozásnak különböző mértékű és irányú hatásai lehetnek kontinentális és regionális skálán a mezőgazdasági produktivitásra. Míg egyes területek akár előnyre is tehetnek szert, máshol a drasztikus csapadékcsökkenés, a szélsőséges időjárási jelenségek gyakoriságának növekedése vagy a felmelegedés okozhat jelentős károkat (Ramankutty et al., 2006; Flato et al., 2013). A fokozottan sújtott területek felmérése (Ramankutty et al., 2002), a lehetséges negatív hatások enyhítése (Mueller et al., 2012; Powlson et al., 2014, 2015) valamint a változásokhoz történő alkalmazkodás (Vermeulen et al., 2012) világszerte kulcsfontosságú kutatások alapját képezi, amelyek célja, hogy a jövőbeli ételmezési kihívásokra megoldásokat találjanak. A FAO világszinten

foglalkozik a népesség jövőbeli élelmezési problémáival; 2009-es könyvében az éghajlatváltozás mezőgazdaságra tett hatásait tárgyalja (FAO, 2009).

A hazai agrometeorológiai kutatások jelentős múltra tekintenek vissza (Szász, 2013), melyek egy része az elmúlt évtizedekben fokozatosan a klímaváltozás hatásainak vizsgálata felé fordult (Vermees, 1995; Ruzsányi, 1996; Birkás and Jolánkai, 2008; Veisz and Bencze, 2008; Birkás, 2009; Dióssy and Anda, 2009; Harnos et al., 2010).

A 2003-ban indult Változás-Hatás-Válaszadás (VAHAVA) projekt keretében foglalkoztak az éghajlatváltozás hazai hatásaival, többek között a mezőgazdaság vonatkozásában. A 2007-ben megjelent VAHAVA jelentésben (Láng et al., 2007) a PRUDENCE (Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects; Christensen et al., 2007) projekt keretében készült klímaprojekciók alapján következtettek a mezőgazdaság veszélyeztetettségére, mely hazánkban főként a felmelegedéssel, csökkenő évi csapadékmennyiséggel, valamint a szélsőséges időjárási jelenségek gyakoriságának várható növekedésével köthető össze. Az éghajlatváltozás negatív hatásainak csökkentése céljából a jelentés számos további javaslatot közöl (Láng et al., 2007). A VAHAVA-projekt eredménye továbbá a Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia (NÉS) megalkotása, aminek keretében két évente Nemzeti Éghajlatváltozási Program kerül végrehajtásra. A 2013-ban megjelent NÉS-2 a Nemzeti Alkalmazkodási Stratégia (NAS) keretében a fenntartható vízgazdálkodás fontosságára hívja fel a figyelmet a mezőgazdasági ágazattal kapcsolatban (NÉS, 2013).

Az éghajlatváltozás lehetséges hatásaira való felkészüléshez a VAHAVA projekt keretében készült szakértői becsléseken túl elengedhetetlen, hogy számszerű projekciókat készítsünk a jövőbeli mezőgazdasági produktivitásra. Jövőre vonatkozó becsléseket modellek segítségével készíthetünk. Mivel a VAHAVA projekt keretében nem történt modellező munka, így a mezőgazdasági produktivitás tekintetében sem tudott számszerű becsléseket adni a jövőre vonatkozóan. A tudomány jelenlegi állása mellett mezőgazdasági és biogeokémiai modellekkel szimulálhatjuk a gabonanövények növekedését, a jelenlegi vagy akár megváltozott környezeti feltételek mellett (Sinclair and Seligman, 1996). A mezőgazdasági (angolul "crop", azaz termény) modellek kifejezetten a mezőgazdasági kultúrnövények produktivitásának és terméshozamainak számszerű modellezésére lettek kifejlesztve. Már az 1970-es évek végén megjelentek az első mezőgazdasági növény-szimulációs modellek. Ezek a modellek többnyire empirikus összefüggéseken keresztül számítják a termés mennyiségét és a produkciót (Brisson et al., 2003; Jones et al.,

2003; Keating et al., 2003; Stockle et al., 2003; Rötter et al., 2012). A kezdetben még egyszerű egyenleteken alapuló modellek a tudomány előrehaladtával egyre komplexebb összefüggéseket képesek figyelembe venni (Loomis et al., 1979; Nix, 1980; Spitters, 1990; Boote et al., 1995).

A biogeokémiai modellek folyamatorientáltan írják le a növények működését. E modellek fejlesztése általában természetes ökoszisztémáktól indult szintén a 70-es években (Junge et al., 1975; Emanuel et al., 1985; King et al., 1987, 1989), amiket az idő múlásával mezőgazdasági növényekre is kiterjesztettek, illetve fejlesztéseik jelenleg is folyamatban vannak (Ma et al., 2011; Fisher et al., 2014). Ezen modellek előnye, hogy részletes képet kaphatunk a produktivitáson kívül a szénmérleg komponenseiről, így a növény működése során elnyelt és kibocsátott szénmennyiségről is, melynek mértéke megadja az adott terület szén ciklusban betöltött szerepét (Cramer et al., 1999; Wullschleger et al., 2002; Bondeau et al., 2007; Smith et al., 2010; Van den Hoof et al., 2011; Drewniak et al., 2013).

A szén ciklus szorosan összefügg a légköri szén-dioxid ( $\text{CO}_2$ ) koncentráció értékével, így Földünk éghajlatával, továbbá annak megváltozásával is (Friedlingstein et al., 2003; Schimel et al., 2015). A szárazföldi vegetáció fotoszintézis révén szén-dioxidot vesz fel a légkörből, azonban a szén-dioxid formájában kivont szén mennyisége évről évre igen erősen változhat a különböző környezeti feltételek hatására (Reichstein et al., 2013; Frank et al., 2015). Az elmúlt évtizedek megfigyelései azt mutatják, hogy a légköri szén-dioxid koncentráció nem növekedett olyan mértékben, mint azt a fosszilis tüzelőanyagok égetése, a cementgyártás, valamint a földhasználat-váltás során kibocsátott szén-dioxid mennyisége indokolná (Le Quéré et al., 2009; Friedlingstein and Prentice, 2010; Friedlingstein et al., 2010). Ennek oka a felszíni nyelők intenzitásának növekedésében keresendő. Egyrészt növekszik az óceán szén-dioxid felvétele, másrészt a szárazföldi vegetáció szén-felvétele is egyre fokozódik, habár igen nagy évek közötti változékonyságot mutat (Sarmiento et al., 2010; Le Quéré et al., 2015).

A szárazföldi vegetáció fokozott szénmegkötését részben a megemelkedett légköri szén-dioxid koncentráció fotoszintézisre tett hatásával, másrészt a felmelegedés hatására meghosszabbodott vegetációs időszakokkal indokolják (Ciais et al., 2013; Schimel et al., 2015). Az, hogy a szénmegkötés mértéke meddig és hogyan tud növekedni az éghajlat változása során, egyelőre ismeretlen. Számos kutatás foglalkozik a Föld különböző területeinek, különböző szárazföldi ökológiai rendszereinek vizsgálatával, modellezésével (Scurlock and Hall, 1998; Jones, 1999; Kirschbaum, 2003; Clark, 2004). Mivel a

biogeokémiai modellek szimulálják az adott ökológiai rendszer által felvett szén mennyiségét, így becsülhetjük adott terület jövőbeli szénmérlegben betöltött szerepét, és ezen keresztül a szénmérleg és az éghajlat közötti visszacsatolást (Ciais et al., 2013; Piao et al., 2013).

Hazánkban a szénmérleg explicit leírását célzó tanulmányok főként természetes ökoszisztémákra történtek, emiatt a mezőgazdasági területeket művelt gyepek formájában igyekeztek tekintetbe venni (Grosz et al., 2010). Fontos megjegyezni, hogy jövőre vonatkozó tanulmányok korábban nem készültek. A mezőgazdasági produktivitás mezőgazdasági modellel történő becslésével korábban Fodor és munkatársai (2014) foglalkoztak, azonban valós klímamodell-eredményekkel meghajtott modellszimulációk csak az utóbbi években kezdődhettek el, korlátozott számú klímamodell-eredmény alapján, a 4M modellel.

A doktori munka célja, hogy modellek segítségével térben explicit módon számszerűsítsük a két legjelentősebb hazai gabonanövény – az őszi búza és a kukorica – termésmennyiségét és szénmérlegét, és megvizsgáljuk, hogy a jövőben a változó éghajlat milyen hatással lehet a termésátlagokra és a szénmérlegre. A szimulációk elvégzéséhez két olyan modellt használtunk fel, melyek alapját külföldön kifejlesztett modellek képezték, de ma már számos hazai fejlesztést tartalmaznak, így az évek során önálló, új modellekké nőttek ki magukat, és figyelembe veszik a hazai adottságokat.

A 4M (Magyar Mezőgazdasági Modellezők Műhelye; Fodor, 2006) mezőgazdasági modell mellett a Biome-BGCMuSo biogeokémiai modellt (Hidy et al., 2012) használtuk. Fontos célunk volt, hogy összevessük a két különböző logika alapján működő modell eredményeit, és így módon képet kapjunk a projekciók konzisztenciájáról.

A modellszimulációk bemenő adatigényét egy újonnan létrehozott meteorológiai adatbázissal, a FORESEE-val (Open Database for Climate Change Related Impact Studies in Central Europe; Dobor et al., 2015) elégítettük ki, amely a doktori munkám keretében létrehozott szabad hozzáférésű, napi léptékű meteorológiai adatbázis. Az adatbázis létrehozását az indokolta, hogy nem állt rendelkezésre olyan adatsor, amellyel számszerű projekciókat tudnánk készíteni a hazai mezőgazdasági termelés kapcsán. A modellezési munkát a művelési beállításokat tartalmazó, időjárásfüggő vetési kalendárium és a jövőre vonatkozó, különböző alternatív művelési forgatókönyvek kidolgozásával bővítettük ki.

Doktori kutatásom során további célunk volt, hogy két növénymodell és több klímamodell-eredmény felhasználásával egy olyan multi-modell ensemble szimulációs

rendszer alkossunk, mellyel robosztus becsléseket adhatunk a mezőgazdasági produktivitás és szénmérleg jövőben várható változásaira. Ez a modellezési technika az időjárás számszerű előrejelzésében terjedt el először (Zhu, 2005), majd más tudományterületeken is sikeresnek bizonyult (Duan et al., 2007; Tebaldi and Knutti, 2007; Asseng et al., 2013; Bassu et al., 2014; Martre et al., 2015; Sándor et al., 2016).

A következő öt pontban fogalmaztuk meg doktori munkám célkitűzéseit:

1. A modellek számára szükséges bemenő adatok összegyűjtése illetve kifejlesztése
  - a. Meteorológiai megfigyelések összegyűjtése a múltira vonatkozóan, valamint hibakorrigált klímamodell-eredményeket tartalmazó, napi léptékű meteorológiai adatbázis létrehozása a jövőre
  - b. Vetési kalendárium létrehozása a jövőre vonatkozóan
  - c. Egyéb bemenő adatok összegyűjtése (pl. talajtextúra, nitrogénüledés)
2. A modellek tesztelése, kalibrálása és validálása, múltbeli megfigyelések alapján
3. Jövőbeli őszi búza és kukorica termésátlag becslések készítése a 4M és a Biome-BGCMuSo modellek alapján
4. Hazánk jövőbeli mezőgazdasági szénmérlegének becslése
5. Különböző alternatív művelési módok kidolgozása, és azok hatásának vizsgálata az éghajlatváltozás lehetséges negatív hatásának enyhítése szempontjából

## 2. Irodalmi áttekintés

A nemzetközi szakirodalom által gyakran használt élelmezésbiztonság ("food security"; Rosegrant and Cline, 2003; Schmidhuber and Tubiello, 2007) fogalmát a FAO a következőképp definiálja: „az az állapot, amikor fizikai, szociális és gazdasági értelemben minden ember mindenkor elegendő, biztonságos és tápláló élelmiszerhez jut hozzá, napi táplálkozási szükségleteinek és élelmiszer-preferenciáinak megfelelően, hogy kielégítse aktív és egészséges életvitelének szükségleteit” (FAO, 2002). FAO statisztikák alapján napjainkban világszerte még mindig 795 millió ember alultáplált, ami főként a fejlődő országokat érinti (bár a népességnövekedés ellenére az elmúlt 10 évben 167 millióval csökkent ez a szám; FAO, 2015). A FAO mindenkori célja, hogy mindenki számára elegendő és megfelelő minőségű élelmiszer álljon rendelkezésre a fent definiáltaknak megfelelően.

Az éghajlatváltozás jelentős hatással lehet az élelmezésbiztonságra a jövőben, mivel a gabonanövények termésátlagai összefüggésben állnak a fennálló meteorológiai viszonyokkal (Brown and Funk, 2008). Korábbi tanulmányok alapján elmondhatjuk, hogy az éghajlatváltozás hatásai a rendelkezésre álló élelmiszer mennyiségére már jelenleg is kimutathatók és számszerűsíthetők (Penuelas and Filella, 2001; Lobell and Field, 2007; Lobell et al., 2011).

Lobell és Field (2007) munkája szerint a vegetációs időszak hőmérséklet- és csapadékviszonyai több mint 30%-ban magyarázzák a hat leggyakoribb gabonanövény globális termésátlagának évek közötti változékonyságát. Statisztikai modellel vizsgálták az 1981-2002 időszakban fennálló éghajlati trendek hatását a búza, kukorica és árpa termésátlagaira, mely során az éves csökkenést 40 Mt-ra becsülték (Lobell and Field, 2007). Fontos kihangsúlyozni, hogy az éghajlatváltozás a Föld különböző régióiban eltérő hatással lehet a mezőgazdaságra. A globális felmelegedés mellett igen fontos a szélsőséges időjárási jelenségek, valamint a csapadékeloszlás változásainak hatása, amelyek globálisan nem egységes képet mutatnak. A klímaváltozásnak leginkább kitett területek ("hot-spotok"; Hlásny et al., 2015) – ahol a várható változások mértéke a legnagyobb – meghatározásán túl azt is vizsgálni kell, hol lehet az éghajlat megváltozásának legnagyobb hatása a mezőgazdaságra. Lobell és munkatársai (2008) 12 olyan régiót vizsgáltak, melyeknek kitettsége globális szinten a legjelentősebb, és 2030-ra vonatkozóan végeztek termésátlag szimulációkat. A tanulmányból kiderül, hogy egyes területeken – habár a

jelenleg legelterjedtebb gabona termésátlagának drasztikus csökkenésére számíthatunk – más növények termesztése kifejezetten előnyös lehet, például a Száhel-övezetben a cirok helyett egy babfajta számára lehet megfelelő a klíma a jövőben (Lobell et al., 2008).

Számos tanulmány foglalkozik az éghajlatváltozás mezőgazdasági produkcióra tett negatív hatásainak mérséklésével. A technológiai fejlődés és öntözőrendszerek telepítése megoldást jelenthet a szárazság által sújtott területek számára. Azonban a fenntarthatóság jegyében törekedni kell olyan művelési módszerek alkalmazására, amelyek segítenek a tápanyagokat és a nedvességet a talajban tartani és megállítják a talajminőség folyamatos romlását, melyet az intenzív művelés okoz (Lal, 2004; Godfray et al., 2010; Birkás et al., 2015). Ilyen művelési forma lehet a hagyományos művelés helyett a csökkentett talajművelésű ("reduced tillage") vagy talajhábortatás nélküli ("no-till") gazdálkodás és különböző talajtakarók használata (az aratás során levágott növénymaradványok szétterítése), melyek csökkentik a párolgást (Foley et al., 2011). A művelés menetszámának vagy mélységének csökkentésével mérsékelhetjük a talajbolygatás és a gépi taposás okozta mechanikai tömörödés mértékét (Birkás et al., 2008; Zsebeli et al., 2015).

Talajvédő művelési módnak ("conservation tillage") nevezik, ha a felszín vetés után is legalább 30%-ban fedett marad a talajmaradványokkal, valamint a talaj el- és lesodrása legalább 50%-kal kisebb mértékű, mint a hagyományos művelés ("conventional tillage") esetén. Hagyományos művelés során a teljes felület vetési mélységnél mélyebb bolygatása és a talajmaradványok talajba forgatása valósul meg (Birkás, 1993; Huzsvai et al., 2003).

Felmerül továbbá szárazságtűrő fajok nemesítése, a vetési időpontok újragondolása, valamint más gabonák termesztésére való áttérés (Barnabás et al., 2008; Cattivelli et al., 2008; Tambo and Abdoulaye, 2012; Marton and Spitkó, 2013; Spitkó et al., 2014; Mickelbart et al., 2015).

A várható változások, valamint a megfelelően alkalmazható módszerek a klímaváltozás negatív hatásainak mérséklésére régióról régióra mások és mások. Habár Európa nem tartozik globális szinten a legveszélyeztetettebb területek közé, az extrém időjárási jelenségek, valamint az aszályos időszakok gyakoriságának növekedése jelentős károkat okozhat (Beniston et al., 2007; Nikulin et al., 2011). Klímamodell-eredmények alapján megállapítható, hogy az európai melegedés mértéke évtizedenként kb. 0,1 és 0,4 °C között várható, a legnagyobb változásokra Dél-Európában és Északkelet-Európában

számíthatunk. A csapadék tekintetében Észak-Európában 1-2%-os növekedés, míg Dél-Európában 1%-os csökkenés várható évtizedenként (Parry, 2000).

A növények várhatóan különböző biofizikai válaszokkal reagálnak a megváltozó klímára. Az egyik leginkább számszerűsíthető a megnövekedett légköri CO<sub>2</sub> hatása a fotoszintézisre, mely függ az adott növény típusától (C3 vagy C4). Számos olyan kísérlet folyik, ahol CO<sub>2</sub>-ban dúsított környezetben vizsgálják különböző növények működését (free air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE); Garcia et al., 1998; Kimball et al., 2002; Nowak et al., 2004; Ainsworth et al., 2008; Medlyn et al., 2015). A C3-as növények (pl. őszi búza) esetén a CO<sub>2</sub> koncentráció emelkedése jobban stimulálja a szénfelvételt, mint a C4-es (főként trópusi növények, a kukoricát beleértve) típusúak esetén (Leakey et al., 2009). Továbbá kimutatható, hogy a többlet CO<sub>2</sub> hatására a sztómák nyitottsága és az idő múlásával azok sűrűsége is csökken (Field et al., 1995; Drake et al., 1997; Bettarini et al., 1998). Ennek hatására idővel korlátozódik a szénmegkötés növekedése, miközben csökkenhet a transzspiráció, ami a talajnedvesség jobb hasznosulását eredményezheti (Medlyn et al., 2001; Nelson et al., 2004; Ainsworth and Rogers, 2007; Flexas et al., 2014).

Európa közepes és magasabb szélességén a felmelegedés várhatóan hosszabb vegetációs időszakot eredményez, aminek következtében a gabonák vetése korábbra tolódhat. A mezőgazdaság alá vont területek észak felé terjeszkedhetnek (pl. Finnországban és Oroszországban). Közép-Európában jobban elterjedhet a melegigényes kukorica és szőlő. Mindeközben a melegebb déli területeken a melegedés a párolgás fokozódásához, így kevésbé előnyös környezeti adottságokhoz vezethet (Olesen and Bindi, 2002). A felmelegedés hatására a talajban lévő szervesanyagok bomlása felgyorsulhat, feltéve, ha elegendő nedvesség áll rendelkezésre, ami hatással lehet a talajból a légkörbe kerülő szén mennyiségére, így a talaj széntartalmára is (Lal, 2004; Smith et al., 2005; Davidson and Janssens, 2006).

Olesen és munkatársai (2011) egy széleskörű kutatás keretében vizsgálták az éghajlatváltozás hatását Európa különböző régióinak gabonatermelésére. Eredményeik alapján elmondható, hogy a kukorica termésátlagait az aszályok és a hóhullámok fogják a leginkább érinteni, főként a mediterrán területek déli részén, az Ibériai-félsziget, valamint a Pannon-medence térségében.

Az őszi búzát illetően a középső és északi területeken (a Pannon-medencét is beleértve) a kártevőkkel és kórokozókkal szembeni kitettség okozhatja a legnagyobb



problémát. Hazánk területére vonatkozóan – bár számszerű becslések nem készültek a hivatkozott tanulmányban – a várható változások közül a hőhullámok és az évszakos változékonyság lehet negatív hatással a búzára (Olesen et al., 2011).

A hazai VAHAVA jelentés (Láng et al., 2007) szakértői becslései, a külföldi tanulmányokhoz hasonló problémákat fogalmazzak meg hazánk területére (szárazság, melegedés, szélsőséges időjárási események gyakoriságának növekedése, új kártevők és növénybetegségek megjelenése), és hasonló megoldásokat is javasolnak (pl. víztakarékos talajművelés). Továbbá felmerül az öntözött területek kiterjesztése, valamint az elárasztásos művelési rendszerek kialakítása. A vegetációs időszak várható változása kapcsán a termesztett gabonanövényeknek és azok vetésforgójának az újragondolását javasolják (Láng et al., 2007).

A Pannon Egyetem Georgikon Karán Anda Angéla csoportja foglalkozik az éghajlatváltozás gabonanövényekre tett hatásaival (Anda, 2005; Dióssy and Anda, 2009). Témavezetésével több doktori disszertáció is készült. Kocsis Tímea (2008) a Goudriaan (1977) féle Mikrometeorológiai Szimulációs Modell (CMSM) segítségével vizsgálta az éghajlatváltozás hatását kukorica állományokra. Munkája során vizsgálta a fotoszintézis intenzitását, valamint a sztómányitottságot a talajnedvesség, a léghőmérséklet és a légköri CO<sub>2</sub> koncentráció függvényében. A szimulációk során az éghajlatváltozás hatására a sztómányitottság csökkenését becsülte, míg a fotoszintézis intenzitása a kezdeti növekedés után csökkenést mutatott (Kocsis, 2008). Dióssy László szintén a CMSM modellel szimulálta a kukorica növényélettani folyamatait, amihez 8 különböző scenáriót vizsgált, melyeket a PRUDENCE projekt keretében készült klímamodell-eredmények hazánkra vonatkozó várható változásai alapján állított fel. Az egyes scenáriók azonban nem valós klímamodell-eredmények voltak, hanem a projektált várható változásokat adták hozzá a múltbeli mérésekhez (pl. 6°C-os hőmérsékletnövekedés és 25%-os csapadékcsökkenés).

Eredményei kimutatták, hogy a CO<sub>2</sub> koncentráció növekedése önmagában a fotoszintézis intenzitásának jelentős növekedését okozná, azonban az éghajlati hatás figyelembevételével együtt ez már nem áll fenn. Az általa végzett szimulációk azt mutatták, hogy a megkétszerezett CO<sub>2</sub> koncentráció a sztómák nyitottságát kb. felére csökkenti (Dióssy, 2011).

A gabonanövények produkciójának és termésmennyiségének napi léptékű szimulációja, valamint azok valós meteorológiai adatokkal történő meghajtása az Magyar Tudományos Akadémia (MTA) Talajtani és Agrokémiai Intézetében már az 1990-es évek

elején megkezdődött a CERES (Crop Estimation through Resource and Environment Synthesis; Ritchie, 1998) és CROPGRO (Jones et al., 2003) modellek alkalmazásával. Harnos Noémi vizsgálta a megemelkedett légköri CO<sub>2</sub> koncentráció hatását a kalászos gabonafélékre a CERES modell segítségével (Harnos, 2000, 2002; Harnos et al., 2002). A későbbiekben pedig a martonvásári vetési idő kísérletekkel tesztelték a CERES-Wheat (Ritchie and Otter, 1985) modellt, mely során megállapították, hogy az átlagnál hűvösebb években a modell alulbecsli a termés mennyiségét (Harnos et al., 2010). A CERES modell alapján a Magyar Mezőgazdasági Modellezők Műhelye egy új modell fejlesztésén kezdett el dolgozni, amely a 4M nevet kapta (Fodor and Kovács, 2003; Fodor, 2006).

A 4M termésbecslő modell napi léptékben szimulálja a növények fejlődését, a víz mérlegét a talajban, az evapotranszpirációt, valamint a növény nitrogénháztartását. Erdélyi Éva doktori munkájában az őszi búza termesztetőségi feltételeit vizsgálta az éghajlatváltozás szempontjából a 4M modell használatával Debrecenre vonatkozóan. Az eredményei azt mutatták, hogy a felmelegedés következtében az őszi búza fenológiai fázisainak eltolódására számíthatunk, az érés időpontja évtizedenként várhatóan 1 nappal korábbra esik majd. Továbbá kimutatta, hogy ha a vetés időpontját két héttel korábbra tesszük, magasabb termésmennyiséget kapunk (Erdélyi, 2008). Sándor Renáta a 4M és a HYDRUS-1D (Šimůnek et al., 1998) hidrológiai modellel szimulált talajnedvesség és talajhőmérsékleti viszonyokat vizsgálta különböző léptékű problémák feltárására (Sándor, 2014). Fodor Nándor és munkatársai számos vizsgálatot végeztek a 4M modellel (Fodor and Kovács, 2003; Fodor et al., 2008; Fodor, 2012), melyek közül egyes tanulmányok az éghajlatváltozás lehetséges hatásaival foglalkoznak. A jövőre vonatkozóan a kukorica termésátlagainak csökkenő tendenciáját mutatták ki, míg az őszi búzára várhatóan kedvező hatással lesz az éghajlatváltozás, utóbbi a megnövekedett CO<sub>2</sub> koncentráció C3-as fotoszintézisre tett hatásának tudható be (Kovács and Fodor, 2005). Fodor és munkatársai (2014) 30%-os termésnövekedést és a termésátlagok nagyobb évek közötti ingadozását prognosztizálták hazánk területére a XXI. század végére a kukorica, búza, napraforgó, árpa és repce összevont vizsgálata során.

## 2.1. A mezőgazdasági produkció modellezésének lehetőségei

A mezőgazdasági növények modellezésére különböző logikán alapuló modellcsaládok használata terjedt el (Stehfest et al., 2007). A két alapvető, széles körben használt és korszerű modellcsalád a mezőgazdasági modellek és a biogeokémiai modellek. Jelen munka esetén alapvető célunk volt, hogy egy időben, ugyanarra a célra alkalmazzuk mindkét modellcsalád egy-egy tipikus képviselőjét, és összehasonlítsuk a modelleredményeket.

A mezőgazdasági modellek kifejezetten mezőgazdasági kultúrnövények terményének szimulálására lettek kifejlesztve. Ebbe a modellcsaládba tartozik például az APSIM (Agricultural Production Systems sIMulator; Keating et al., 2003), a DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer; Jones et al., 2003), a CropSyst (Cropping Systems Simulation Model; Stockle et al., 2003), a STICS (Simulateur mulTI disciplinaire pour les Cultures Standard; Brisson et al., 2003), valamint a CERES modell (Crop Environment REsource Synthesis; Ritchie et al., 1994) és az utóbbiból fejlesztett hazai 4M modell (Fodor, 2006).

A mezőgazdasági modellek empirikus összefüggések alapján szimulálják a talaj-növény-légkör rendszerben zajló folyamatokat. Az egyes gabonanövények produkcióját a bemenő adatok, úgymint meteorológia, talaj és növényparaméterek, valamint a művelési beállítások függvényében számítja a modell. Jelen munka során a 4M modellt használtuk a mezőgazdasági modellek családjából az őszi búza (továbbiakban többnyire csak búzaként említve) és kukorica szimulálására.

A másik elterjedt modellcsalád a biogeokémiai modellek, melyek nem csupán a növényi produkciót, de a felszín és légkör között zajló szénáramokat is szimulálják. Ide tartozik például a CENTURY (Parton et al., 1987), az LPJ (Lund-Potsdam-Jena; Sitch et al., 2003) az LPJmL (Lund-Potsdam-Jena managed Land; Bondeau et al., 2007), az ORCHIDEE (Organising Carbon and Hydrology In Dynamic Ecosystems; Krinner et al., 2005), az ORCHIDEE-STICS (Gervois et al., 2004), a JULES (Joint UK Land Environment Simulator; Clark et al., 2011), a JULES-SUCROS (Joint UK Land Environment Simulator - Simple and Universal Crop growth Simulator; Van den Hoof et al., 2011), a CLM (Community Land Model; Oleson et al., 2008), a CLM-Crop (Drewniak et al., 2013), a Biome-BGC (Biome BioGeochemical Cycles; Running and Hunt, 1993), az ANTHRO-BGC (Ma et al., 2011) és a SIBcrop (Simple Biosphere Model; Lokupitiya et

al., 2009) modellek. Doktori munkám során a Biome-BGC modell egy hazai továbbfejlesztését, a Biome-BGCMuSo modellt használtuk (Hidy et al., 2012, 2016a).

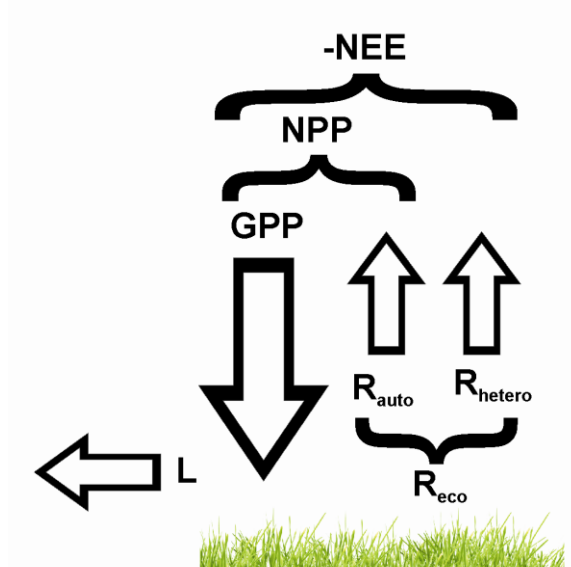
A biogeokémiai modellek által szimulált legfontosabb folyamatok a fotoszintézis, respiráció, mortalitás, evapotranszspiráció, a talajban tárolt szerves anyag mérlege, allokáció, a szén (és adott esetben a nitrogén) és a víz mérlege (Thornton, 2000). Az éghajlatváltozás szempontjából egy adott terület szénmérlege kiemelt fontosságú. Az ökoszisztémák fotoszintézis során szénfelvétellel, valamint respiráció (légzés) során szén-dioxid kibocsátással befolyásolják a szén-dioxid légköri koncentrációját. Jelen munkában a talaj-növény rendszer és a légkör közötti szén-dioxid kicserélődést számszerűsítettük, de a teljes szénmérleget, beleértve a laterális szénfluxusokat nem származtattuk.

### 3. Adatok és módszerek

Ebben a fejezetben bemutatjuk a szénmérleg komponenseit, illetve a kutatás során felhasznált modelleket és adatbázisokat. A modellek működésének, valamint a kalibrációs és validációs módszerek áttekintése után rátérünk a modellezéshez felhasznált adatbázisok tárgyalására.

#### 3.1. A szénmérleg komponensei

A felszín (talaj-növény rendszer) és a légkör közötti kicserélődési folyamatok leírására a szakirodalom fluxus (áram) jellegű mennyiségeket használ (1. ábra). Egy adott terület szénmérlegének becslése során elengedhetetlen a különböző szénáramok ismerete, így a következőkben bemutatjuk az ide kapcsolódó komponenseket.



1. ábra. Az egyszerűsített biosféra-légkör rendszer szénáramai.

A bruttó elsődleges produkció ("Gross Primary Production", *GPP*) a növény által egységnyi idő alatt egységnyi területen, fotoszintézis során felvett CO<sub>2</sub> mennyisége (általában szén-egyenértékben kifejezve). Autotróf respiráció ("Autotrophic respiration", *R<sub>auto</sub>*) alatt értünk minden növényi eredetű respirációt (CO<sub>2</sub> kibocsátást). Így a két ellentétes irányú fluxus eredőjét nettó elsődleges (vagy primér) produkciónak (Net Primary Production, *NPP*) nevezzük:

$$NPP = GPP - R_{auto} \quad (1)$$

A növényzeten kívüli, talajban zajló, főként bakteriális és gomba eredetű bomlási folyamatok során fellépő respirációt heterotróf respirációnak nevezzük (Heterotrophic Respiration,  $R_{hetero}$ ). Továbbá a heterotróf és autotróf respiráció összege a teljes ökoszisztéma légzés "Total Ecosystem Respiration" ( $R_{eco}$ ):

$$R_{eco} = R_{hetero} + R_{auto} \quad (2)$$

A fentiek alapján felírható az ökoszisztéma nettó szén-dioxid forgalma ("Net Ecosystem Exchange",  $NEE$ ), ami a teljes ökoszisztéma légzés és a bruttó elsődleges produkció különbsége. Tehát, ha egy ökoszisztéma szén-dioxid nyelőként viselkedik a légkör szempontjából, akkor az  $NEE$  előjele definíció szerint negatív, míg ha szén-dioxid forrásként, akkor pozitív (Chapin et al., 2006).

$$NEE = R_{eco} - GPP \quad (3)$$

A vertikális áramokon kívül oldalirányú, laterális szénmozgást is definiálunk ( $L$ ), amely többek között a mezőgazdasági területek szénmérlegének meghatározása során igen jelentős. Az aratással vagy kaszálással levágott növényzet egy része majdnem mindig elszállításra kerül. Az elvitt szénmennyiség előbb vagy utóbb felhasználása során visszajut a légkörbe, így a respirációval megegyező irányú fluxusként definiáljuk. Az említett fluxusokon kívül más áramok is jelen vannak, melyek esetén a szén nem szén-dioxid formájában jut a légkörbe (metán, illékony és oldott szerves szén, szén-monoxid). Az utóbbi fluxusokat közösen  $F$ -fel jelölve felírható a nettó ökoszisztéma szénegyensúly ("Net Ecosystem Carbon Balance",  $NECB$ ), melynek nagyobb tér- és időskálára vett integrálja adja a nettó biom produkciót ("Net Biome Production",  $NBP$ ; Chapin et al., 2006).

$$NECB = -NEE + L + F \quad (4)$$

### 3.2. Modellek

Munkánk során két, alapvetően eltérő logikával felépített modellt használtunk a mezőgazdasági növények működésének szimulálására. A 4M modell (Fodor, 2006; Fodor et al., 2008) a mezőgazdasági kultúrnövények fejlődését, tápanyagigényét, termését szimulálja, míg a Biome-BGCMuSo különböző ökoszisztémák produkciójának becslésén kívül azok biogeokémiai ciklusainak leírására lett kifejlesztve (Hidy et al., 2012, 2016a).

Mint azt már a bevezetőben is említettük, a mezőgazdasági modellek a gabonanövények termését illetve produktóját (általában szárazanyagban kifejezve), míg a biogeokémiai modellek a szén egyenértékben kifejezett produkción túl a növény szénfelvételt a fotoszintézis és respiráció folyamatának részletes leírásával igyekeznek meghatározni.

A 4M és a Biome-BGCMuSo modellek közötti legfontosabb különbségeket a II. Mellékletben táblázat formájában foglaltuk össze.

### 3.2.1. A 4M mezőgazdasági modell

#### 3.2.1.1. A modell működése

A 4M modell a növényi produkció és termésmennyiség mellett a talajnedvesség, talajhőmérséklet és a növényi tápanyagforgalom szimulációját is magában foglalja. Figyelembe veszi a három fő tápanyag (nitrogén, foszfor, kálium) átalakulását és mozgását, valamint a nitrátkimosódás és a denitrifikáció folyamatát is. A modell peremfeltételei (input) a napi meteorológiai viszonyok és a talajvíz mélysége, míg a kényszerfeltételeket az emberi beavatkozással (szántás, trágyázás, vetés, öntözés és betakarítás) kapcsolatos befolyásoló tényezők adják.

A mezőgazdasági modellezés során a növény fejlődése általában egy ún. hőmérsékleti összeg, vagy más néven hőösszeg (Growing Degree Day; *GDD*; °C-ban kifejezve; Cross and Zuber, 1972; McMaster and Wilhelm, 1997) nevű változótól függ, ami a napi aktív hőmérsékleti értékekből származtatható ( $T_{akt}$ ). Az aktív hőmérséklet a napi középhőmérséklet ( $T_k$ ) és egy növénytől függő bázishőmérséklet ( $T_b$ ) különbsége abban az esetben amikor  $T_k > T_b$ . A bázishőmérséklet az a hőmérséklet, amely alatt a növény már nem fejlődik (növényenként más és más). Abban az esetben, amikor a napi középhőmérséklet kisebb, mint a bázishőmérséklet, akkor a napi aktív hőmérséklet definíció szerint 0°C:

$$T_{akt} = T_k - T_b, \text{ amikor } T_k > T_b. \quad (5a)$$

A hőmérsékleti összeg az év egy adott napján ( $GDD_i$ ) az adott napig összegyűlt napi aktív hőmérsékleti értékek összegeként adódik:

$$GDD_i = \sum_{i=1}^n T_{akt}(i), \quad (5b)$$

ahol  $n$  a vegetációs időszak hosszát jelenti napokban kifejezve.

A fenofázisok hossza attól függ, hogy milyen értéket állítunk be a növény adott életsiklusának a hosszára. A modell napról napra összegzi az aktív hőmérsékleti értékeket, így ha annak értéke ( $GDD$ ) elért egy küszöbértéket, a modellben letelt egy adott fenofázis. Például a kukorica esetén, ha az ún. levélnövekedés felfutó szakaszának hossza  $150^{\circ}\text{C}$   $GDD$ -re van állítva, akkor aznap, amikor a hőmérsékleti összeg eléri az  $150^{\circ}\text{C}$ -ot, lezárul a fázis, és a következő nap indul az ún. levélnövekedés lineáris szakasza nevű fázis. A növényi paraméterek egy része fenofázisonként más-más értéket vesz fel, ezzel szimulálva a növény működésében fellépő változásokat (I. Melléklet).

A fotoszintézis szimulációja a 4M modellben tapasztalati összefüggéseken alapul. Az ún. "fényhasznosulási-hatékonyságon" alapuló egyenlettel (Light Use Efficiency,  $LUE$ ; Monteith, 1972, 1977) definiálja a modellben a szervesanyag-képződést:

$$PDM = a \cdot \frac{R \cdot (1 - e^{-b \cdot LAI})}{PLD} \cdot \min(S_T, S_W, S_N) \cdot f(\text{CO}_2), \quad (6)$$

ahol  $PDM$  a potenciálisan előállítható anyag (száraz tömeg,  $\text{kg nap}^{-1}$ ), amely függ a növényfüggő sugárzás hasznosítási hatékonyságtól ( $a$ ,  $\text{kg MJ}^{-1}$ ), a beérkező globálisugárzás mennyiségétől ( $R$ ,  $\text{MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ ), a levélfelületi indextől ( $LAI$ ,  $\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$ ), a tőszámtól ( $PLD$ , növény  $\text{m}^{-2}$ ), valamint egy  $b$  növény-specifikus modell paramétertől. Továbbá függ a léghőmérséklet ( $S_T$ ), víz- ( $S_W$ ) és nitrogénhiány ( $S_N$ ) stresszfaktorok minimumától és a légköri szén-dioxid koncentrációtól (I. Melléklet, 2. táblázat). A stresszfaktorok értéke 0 és 1 között változhat (1, amikor nem áll fenn stresszhatás, 0 amikor a stressz hatására adott folyamat – esetünkben a fotoszintézis – teljesen leáll). A képlet végleges formáját az adott növény parametrizációja során megadott értékek figyelembevételével kapja (I. Melléklet, 1-3. táblázatok).

A keletkező szerves anyagot a növény 4 fő része (gyökér, levél, szár, termés) között osztja szét. Az allokáció aránya fejlődési szakaszonként más és más (Ritchie et al., 1998); a kukoricára és búzára vonatkozó allokáció paraméterei az I. Melléklet 4. táblázatában találhatók. A levélbe kerülő anyagmennyiség és a fajlagos levélfelület szorzásával kapjuk a levélfelület-növekményt. A fajlagos levélfelület egy fenofázistól függő, növényre jellemző paraméter, csak úgy, mint a levél élettartalmát jellemző érték. Minden levélnek van egy életkora, mely a hőmérsékleti összeggel együtt növekszik. Amikor ez az érték meghaladja



a levél előre definiált élettartamát, akkor az adott levélfelület egység elhal, és nem vesz részt többé a fotoszintézisben (genetikailag programozott sejthalál).

A lefelé történő gyökérnövekedést ( $RE$ ,  $\text{cm nap}^{-1}$ ) a napi aktív hőmérséklet ( $T_{akt}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ), valamint a vízhiány és a nitrogénhiány stresszfaktorok minimuma befolyásolja:

$$RE = a \cdot T_{akt} \cdot \min(S_W, S_N). \quad (7)$$

A vízmérleg tekintetében a modell számítja felszíni elfolyást, talajpárolgást, párologtatást (transzspiráció), valamint a talajban lefelé és felfelé szivárgó víz mennyiségét. A modell a talajt egymás alatt elhelyezkedő víztartályok együtteseként jeleníti meg, melyeket négy paraméterrel jellemez: maximális vízkapacitás ( $\Theta_{max}$ ,  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), szabadföldi vízkapacitás ( $\Theta_{fc}$ ,  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), hervadásponthoz ( $\Theta_{wp}$ ,  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) és telítési vízvezető képesség ( $K_S$ ,  $\text{ms}^{-1}$ ) (I. Melléklet, 5. táblázat). Ha egy adott rétegbe érkező víz telíti a réteget ( $\Theta > \Theta_{max}$ ), akkor a vízfelesleg visszatorlódik az eggyel fentebbi rétegbe, vagy adott esetben a felszínre, ahonnan elfolyik (Ritchie, 1998). Lefelé történő gravitációs vízmozgás akkor következik be, ha egy adott réteg nedvességtartalma nagyobb, mint a szabadföldi vízkapacitás ( $\Theta_{max} \geq \Theta > \Theta_{fc}$ ). Ekkor a víz egy része ( $Q$ ) az eggyel lejjebb elhelyezkedő rétegbe áramlik az alábbi egyenlet alapján:

$$Q = DC \cdot (\Theta - \Theta_{fc}) \cdot \Delta z, \quad (8)$$

ahol  $\Delta z$  a réteg vastagsága,  $DC$  pedig egy ún. drénkonstans, mely a hidraulikus vízvezető képességből ( $K_S$ ) számítható:

$$DC = 0,1122 \cdot K_S^{0,339}. \quad (9)$$

Ha a nedvességtartalom hervadásponthoz alá csökken, akkor az adott talajrétegből a növény nem tud már vizet felvenni.

A talajhőmérsékleti profil számítása során a modell figyelembe veszi a talaj adott rétegének felszínétől vett távolságát. A mélyebb rétegekbe a felszínre érő energia hatása kétszerezve és gyengítve jelentkezik, melynek mértéke a feltalaj átlagos nedvességtartalmának és térfogattömegének a függvénye (Fodor et al., 2014).

A nitrogénmérleg be- és kimeneti oldalon szereplő tényezőit (léggöri N üledés, trágyázás, mineralizáció, nitrifikáció, immobilizáció, denitrifikáció, növényi felvétel és kimosódás) a modell empirikus egyenletekkel írja le. A léggöri eredetű nitrogén

mennyisége lineáris függvénye a csapadékmennyiségnek, míg a mineralizáció üteme a talaj humusz- és nedvességtartalmától, illetve hőmérsékletétől függ. Utóbbi kettő befolyásolja továbbá a nitrifikáció és denitrifikáció ütemét is, melyek a talaj ammónium- és nitráttartalmának függvényei is.

A növény által felvehető nitrogén mennyiségét a talajban található gyökérzet és egy talajnedvességtől függő faktor befolyásolja. A ténylegesen felvett mennyiség azonban függ a növény nitrogénigényétől is, amely az adott napon előállított anyag és a növény fajlagos nitrogéntartalmának szorzata. Ez a növényfüggő paraméter szintén fenofázisonként változó értéket vesz fel. A nitrátkimosódás mértéke a talaj nitrát koncentrációjával és a gyökérzónát lefelé elhagyó víz mennyiségével arányos.

### **3.2.1.2. A modell bemenő és kimenő adatai**

A modell bemenő adatigénye modellparaméterekből, illetve kezdeti, perem- és kényszerfeltételekből áll. A növények fejlődését, növekedését, víz- és tápanyagforgalmát, a talaj hőmérsékletét, valamint nedvesség- és tápanyagforgalmát a paraméterek által szabályozott modellfüggvények írják le (I. Melléklet).

A szimuláció indításakor meg kell adni a meteorológiai adatsort, a művelési beállításokat, valamint a talaj fizikai féleségét (I. Melléklet, 5. táblázat). A meteorológiai adatsor napi léptékben tartalmazza a globálsugárzás összegét, a minimum- és maximumhőmérsékletet, illetve csapadékatokat és opcionálisan a légköri szén-dioxid koncentrációt. A vetés beállítása során megadjuk, hogy milyen növényt vetünk, ezzel kiválasztunk egy paraméteregyüttest, amely tartalmazza az adott növény növekedésének szimulálásához szükséges paraméterértékeket.

A modellszimulációk során lehetőség van éves vagy napi léptékű eredményt kérni. Az éves eredmények tartalmazzák a termést, a produkciót, a kumulált evapotranszpirációt és a nitrátkimosódást, öntözés esetén az öntözött napok számát és a kijuttatott víz mennyiségét. A napi léptékű eredmény 62 változó napi szintű értékeit tartalmazza, mint például a különböző talajrétegek nedvességtartalma, hőmérséklete és nitráttartalma, illetve különböző növényi részek tömege, vagy más hidrológiai változók.

### 3.2.2. A Biome-BGCMuSo biogeokémiai modell

A Biome-BGC (Biome-BioGeoChemical Cycles) egy széleskörűen használt folyamatorientált biogeokémiai modell, amelyet a légkör és a különböző szárazföldi ökológiai rendszerek és azok komponensei közötti víz-, szén-, és nitrogénforgalom szimulálására fejlesztettek ki az egyesült államokbeli Montanai Egyetemen (<http://www.ntsg.umt.edu/project/Biome-BGC>). Az elmúlt években számos kutatócsoport fejlesztette tovább és használta a modellt. A Biome-BGC modellcsalád először erdők szimulációjára volt alkalmas, amelyet a későbbiekben további ökológiai rendszerekre is kiterjesztettek.

A munkánk során használt modell alapját a Max Planck Intézetben (Németország) továbbfejlesztett Biome-BGC 4.1.1. verzió alkotta. A hazai modellfejlesztések Hidy Dóra és Barcza Zoltán nevéhez fűződnek. A több éves munka célja a szimulációk pontosságának javítása a már meglévő modulok továbbfejlesztésével vagy új, egyre komplexebb modulok beépítésével, valamint a gyakorlatban megjelenő emberi beavatkozások figyelembevételének beépítése a modellbe.

A fejlesztések első szakaszában a modellstruktúra javítására került sor (pl. a töbrétegű talajmodul bevezetése, a szárazság miatt fellépő növényi pusztulás hatásának figyelembevétele és a modellfenológia javítása), valamint beépítésre került néhány emberi beavatkozást szimuláló modul (pl. legelés, kaszálás) (Hidy et al., 2012). Az új, hazai fejlesztési ág a Biome-BGCMuSo nevet kapta, utalva a töbrétegű talajmodulra (**M**ultilayer **S**oil module).

A második fejlesztési szakaszban többek között további olyan fejlesztések történtek, melyek javították a mezőgazdasági növények szimulációit (Hidy et al., 2016a). Mivel a szántóföldeken végzett munkálatoknak jelentős hatása van az elért termésre, az adott év szénmérlegére, így az emberi beavatkozás leírása a modell működése szempontjából kulcsfontosságú. Új művelési tevékenységek kerültek beépítésre, melyeknek speciálisan mezőgazdasági növényeknél van jelentőségük (vetés, trágyázás, öntözés, szántás és aratás). Az évek során számos verziója született a modellnek (Biome-BGCMuSo v1.0, v1.1, v1.2, v1.3, v2.0, v2.1, v2.2, v3.0 és v4.0); jelen munka eredményei a legutóbbi, 4.0 modellverzióval készültek. Az éppen aktuális modellverzió, valamint az ahhoz tartozó modell dokumentáció megtalálható a Biome-BGCMuSo modell hivatalos honlapján (<http://nimbus.elte.hu/bbgc/>).

Egy modellszimuláció a Biome-BGC logikája alapján két részből áll. Az első az ún. spin-up futás (felfutási fázis, vagy egyensúlyi fázis, vagy más néven ön-inicializálás), melynek célja a második ún. normál futás kezdeti feltételeinek megalkotása. A modell alacsony szén- és nitrogéntartalomról indul, és a spin-up futási fázis végére egyensúlyba kerül az adott hely éghajlatával (Thornton, 2000; Thornton and Rosenbloom, 2005). Az így létrejött egyensúlyi állapotból indul az ún. normál futás, amely már a szimulálni kívánt időszakra fut.

A legújabb modellverzióban az eredeti kétlépéses modell-logika kibővült. Mivel az eredeti megközelítés szerint a spin-up futás alatt állandó CO<sub>2</sub> koncentrációt és nitrogénülepedést feltételeztünk, hogy szimuláljuk az ipari forradalom előtti kvázi egyensúlyi állapotot, a normál futás során használt változó, valós értékű CO<sub>2</sub> koncentráció és a nitrogénülepedés értékek ugrást okoztak a két szimuláció között, irreális eredményeket adva a normál futás elejére. Ennek kiküszöbölésére egy ún. tranziens futás került beiktatásra a két alap fázis közé, amely a spin-up időszak végén egy átmeneti (tranziens) futást biztosít, ahol megadhatunk változó környezeti tulajdonságokat, valamint akár művelési tevékenységeket is, ezzel nagyrészt elkerülve a szakadást a spin-up és normál futások között.

Az eredeti modellben nem volt lehetőség arra, hogy a spin-up és normál futás során különböző növényborítottságot feltételezzünk. E hiányosság a gabonanövények szimulációi során szembetűnő, hiszen általában nem feltételezhetjük, hogy az ipari forradalom előtti időkben is mezőgazdasági művelés folyt az adott területen. A modell logikája szerint a különböző növényi részek szén és nitrogén (C:N) aránya egy adott növényre jellemző paraméter. E paraméter hirtelen megváltozása a két futási fázis között problémát okozott a normál futás elején, ahol a szén- és nitrogéntározók hirtelen más arányú szétosztására került sor. Az új fejlesztések során ez a probléma megoldódott, és már van lehetőség földhasználatváltás szimulálására (Hidy et al., 2016b).

### **3.2.2.1. A modell működése**

A Biome-BGCMuSo esetén a legfontosabb modellezett folyamatok a fotoszintézis, az evapotranszpiráció, az allokáció, a szárazodás, valamint a szén, nitrogén és víz mérlege (Thornton, 2000).

A modell növény, talaj és elhalt növényi anyag részekre osztja az ökológiai rendszert. Különböző tározókat különít el: levél (szén, nitrogén és víz), finom gyökérszövet

(szén, nitrogén), termés (szén, nitrogén), lágyszár (szén, nitrogén), talaj (szén, nitrogén, víz) és elhalt növényi anyag (szén, nitrogén). (Fás szárúak esetén további tározókat is definiál a modell, azonban jelen munka szempontjából ez lényegtelen).

A termés és lágyszár tározók bevezetésére a legújabb modellverzióban került sor. A termés tározóba történő anyag felhalmozódása a 4M-hez hasonlóan hőmérsékleti összeg (GDD) alapján történik. Egy, a felhasználó által definiált érték felett a modell allokációja módosul, és a termés nőni kezd. A lágyszár allokációja a finomgyökérzet allokációjával párhuzamosan zajlik. A lágyszár bevezetésének az volt a célja, hogy valószerűbbé váljon a lágyszárú ökológiai rendszerek szimulációja, amelyek esetén eddig minden felszín feletti biomassza a levelekben tárolódott, ezáltal a modell jelentősen felülbecsülte a levélfelületi indexet (Hidy et al., 2016a).

A többi tározóhoz hasonlóan az új tározókra vonatkozóan is meg kell adni a hozzájuk tartozó allokáció értékeket, a C:N arányt és az elhalt növényi anyag könnyen bomló és cellulóz részarányait. A Biome-BGCMuSo esetén a tározók C:N aránya időben állandó, amíg a 4M modellben fenofázisonként különböző értékeket adhatunk meg. Ezt a különbséget érdemes szem előtt tartani az eredmények kiértékelése során.

Minden szén- és nitrogéntározónak három altározója van funkcióját tekintve: aktuális, raktár és transzfer tározó. Az aktuális tározóban lévő szén és nitrogén mennyisége adott napon a növekedésre fordítódik. A raktár tározó a növekedési időszak folyamán töltődik. Az itt összegyűlt anyag a következő évben lesz hozzáférhető, úgy, hogy az év végén a tartalma átkerül a transzfer tározóba, amiben átvivődik a következő évre, és hozzásegíti a növényt tavasszal a kezdeti levélbontáshoz. Az átvitt anyag aránya növényfüggő paraméterként állítható, és adott növénytípus esetén ki is kapcsolható.

A talajban zajló folyamatokat a Biome-BGCMuSo 4.0 egy hétrétegű talaj almodellel szimulálja. A felső hat különálló réteg a felszíntől indulva sorra egyenként 10, 20, 30, 40, 100 és 100 cm vastagságúak. A legalsó, inaktív hetedik réteg 7 m vastagságú (300-1000 cm mélységben). A modell feltételezései alapján a talaj tulajdonságai 3 méter alatt állandók. A legalsó réteg hőmérséklete egyenlő az évi átlaghőmérséklettel, nedvességtartalma egyenlő a szabadföldi vízkapacitással, nitrogéntartalma állandó ( $1 \text{ kgN ha}^{-1}$ ). A vízmennyiség, amely ebbe a rétegbe leszivárog, a rendszert tekintve veszteség, míg az innen az aktív rétegekbe feljutó víz nyereség.

## Asszimiláció és respiráció

A doktori munkám keretében adott ponton bekapcsolódtam a modell fejlesztésébe, amely során a fotoszintézis leírásának elméleti alapjait vizsgáltam. Az általam javasolt fejlesztéseket Hidy Dóra építette be a modellkódba, amelynek tesztelését közösen végeztük el. Ebben a fejezetben tömören bemutatjuk a fotoszintézist leíró egyenleteket és az újonnan bevezetett változtatásokat.

A modellben a fotoszintézist irányító, Farquhar-féle módszer egyenletei határozzák meg a növény működése során asszimilálódó szén mennyiségét (Farquhar et al., 1980; De Pury and Farquhar, 1997; Von Caemmerer and Evans, 2010). A módszer által használt kinetikus konstansokat Woodrow and Berry (1988) munkája alapján számítja a modell (Golinkoff, 2010).

A fotoszintézis során felvett szén mennyiségét kétféle limitáló hatás alakíthatja. A végső asszimiláció mértékét az elektrontranszport által limitált ( $A_j$ ), valamint a karboxiláció által limitált ( $A_v$ ) asszimiláció minimumaként kapjuk. Az ezeket leíró egyenletekben szereplő  $V_{cmax}$  (maximális karboxiláció;  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), valamint  $J_{max}$  (maximális elektrontranszport;  $\mu\text{mol elektron m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) értékek összefüggésére vezettünk be új egyenleteket.  $J_{max}$  meghatározása az eredeti modellben a  $J_{max}=2,1*V_{cmax}$  összefüggés alapján történt, azonban Rogers és munkatársai (2014) Wullschleger (1993) mérési adatbázisa alapján megállapították, hogy a  $J_{max}=1,97*V_{cmax}$  arány pontosabb, így a régi összefüggést erre cseréltük.

Felülvizsgáltuk továbbá, hogy a fotoszintézist leíró egyenletek a klímaváltozás szempontjából hogyan állják meg a helyüket a jövőre vonatkozó futtatások során. A növényzet különböző módon reagálhat a megváltozott környezeti feltételekre. Smith és Dukes (2012) alapján azonnali válaszról ("Instantaneous response") beszélhetünk (más források alapján ez stresszválasz), ha a növény rövid időn belül, visszafordítható módon reagál egy adott környezeti megváltozásra. Például, ha a  $\text{CO}_2$  koncentrációt hirtelen megemeljük, a növény által felvett szén mennyisége hirtelen megnövekszik.

Akklimációnak nevezzük a növény egy kiemelt stresszfaktorra adott válaszát, mely során – az azonnali válasszal ellentétben – fiziológiai, strukturális vagy biokémiai változás lép fel. Akklimáció például, ha a felmelegedés hatására egy adott növény fotoszintézisének optimális hőmérséklete eltolódik.

Akklimatizáció alatt azt értjük, amikor több különböző stresszfaktor esetén bekövetkezett összetett változásokra ad kiegyensúlyozó választ a növény. Ebben az

esetben a változást kiváltó okok természetesek (pl. évszakok váltakozása). Ilyen folyamat például magashegységben élő egyed optimális hőmérsékletének megváltozása a nedvességi és hőmérsékleti viszonyok megváltozásának együttes hatására.

Amikor a növényfaj hosszútávon fennálló stressznek van kitéve, az adott változás már genetikailag felfedezhető az öröklődés során. Ekkor adaptálódásról beszélhetünk.

Általában a modellekben szereplő egyenletek azonnali válaszokat írnak le. Egy adott folyamatot leíró egyenletben adott időlépcsőre vonatkozó mennyiségek szerepelnek, így nem hordoznak információt arról, hogy milyen hatása lehet egy-egy környezeti feltétel hosszabb idejű megváltozásának. Az éghajlatváltozás hatására fellépő azonnali válaszok azonban hosszabb időszak alatt megváltozhatnak, és akklimáció vagy akklimatizáció, később adaptáció léphet fel. A távoli jövőre vonatkozó modellszimulációk esetén e hatásoknak jelentős szerepe lehet (Smith and Dukes, 2012). Ezért számos kutatás fordult a fotoszintézist és respirációt leíró egyenletek újragondolása felé, és próbáltak olyan empirikus kiegészítéseket tenni, melyekkel valamely módon leírhatók azok az összefüggések, melyek kísérletekkel kimutathatók. A Biome-BGCMuSo legújabb változatába beépítettünk egy egyszerű módszert a fotoszintézis hőmérsékletre adott akklimációjára, ami a felhasználó által opcionálisan bekapcsolható.

A  $J_{max}$  és  $V_{cmax}$  közötti állandó arány helyére az elmúlt 30 nap átlaghőmérsékletétől ( $t_{30days}$ ) függő összefüggés került (Kattge and Knorr, 2007):

$$J_{max} = (a + b * t_{30days}) * V_{cmax}, \quad (10)$$

ahol  $a$  és  $b$  Kattge és Knorr (2007) által beállított paraméterek, melyek értékét mérések alapján állapították meg ( $a=2,59$ ;  $b=-0,035$ ).

Térjünk át a szénfelvétel után a respiráció leírására. Az eredeti Biome-BGC-ben az önfenntartó légzés egy állandó  $Q_{10}$  értéktől függ (11. egyenlet). A  $Q_{10}$  érték megadja, hogy egy adott mennyiség – esetünkben a respiráció – hogyan reagál  $10^{\circ}\text{C}$  hőmérsékletváltozás hatására.

$$R_T = R_{ref} * Q_{10}^{\frac{(t-t_{ref})}{10}}, \quad (11)$$

ahol  $R_T$  a respiráció ( $\text{gC m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ ),  $R_{ref}$  a referencia respiráció ( $\text{gC m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ ) adott  $t_{ref}$  hőmérsékleten ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $t$  a léghőmérséklet ( $^{\circ}\text{C}$ ). A modellben korábban használt állandó  $Q_{10}$  érték 2,0 volt.

A respiráció modul fejlesztése két lépésben történt. Először a  $Q_{10}$  állandó értékét cseréltük le egy hőmérsékletfüggő képletre, ezzel javítva a respiráció rövid távú hőmérsékletfüggését (Tjoelker et al., 2001), azaz lehetővé tettük a respiráció azonnali válaszát a hőmérsékletre:

$$Q_{10} = 3,22 - 0,046 * t, \quad (12)$$

ahol  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) a napi középhőmérséklet. Az így szimulált respiráció egy optimális hőmérsékleten eléri a maximumát, majd az e feletti hőmérsékleteken csökkenést mutat. Ez a modell realisabb eredményeket ad, azonban még nem képes reagálni a hosszú távú hőmérsékletváltozásokra, vagyis az akklimációra.

Második lépésben Atkin és munkatársai (2008) alapján építettük be a modellbe a hosszú távú hőmérsékletváltozásra történő akklimációt:

$$R_a = R_T * 10^{C*(t_{10days} - t_{ref})}, \quad (13)$$

ahol  $R_a$  az akklimált respiráció ( $\text{gC m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ ),  $R_T$  az akklimáció nélkül kapott respiráció ( $\text{gC m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ ),  $t_{10days}$  a 10 napos átlaghőmérséklet,  $C$  egy empirikus konstans (-0,00794),  $t_{ref}$  pedig a referenciahőmérséklet, amellyel az  $R_T$  kiszámításánál dolgoztunk (11. egyenlet).

### **Evapotranszspiráció**

A fotoszintézisen kívül szintén alapvető folyamat a párolgás és párologtatás, melynek összegét evapotranszspirációnak nevezünk. A Biome-BGC ezt a folyamatot a Penman-Monteith egyenlet alapján veszi figyelembe és teszi függővé a levegő hőmérsékletétől, a vízgőztelítettségi hiánytól és a légnyomástól, a beeső napsugárzás intenzitásától illetve a vízgőztranszportra vonatkozó ellenállásoktól (Golinkoff, 2010).

A levelek párologtatása különböző mértékben függ a határreteg ellenállástól, a sztóma ellenállástól és kutikuláris ellenállástól, attól függően, hogy az adott ökoszisztéma esetén mennyire jelentős a sztómák transzspirációra kifejtett hatása (Anda, 1989; Ács, 2008). Mivel ez minden ökológiai rendszerre eltérő lehet, így a felsorolt három ellenállás



mértéke ökofiziológiai paraméterként adhatók meg, mint bemeneti adat. A teljes levél vízgőztranszporttal szembeni ellenállása e három ellenállás kombinációjából adódik.

A sztóma nyitottságát a modell a maximális sztómanyitottság alapján számítja, különböző limitáló hatások alapján (Jarvis, 1976): fotoszintetikusán aktív sugárzás, talajvíz potenciál, minimum hőmérséklet és vízgőz telítettségi hiány. A felsorolt 4 limitáló faktoron túl a legújabb modellverzióban egy CO<sub>2</sub> koncentrációtól függő szorzót is implementáltunk, mivel annak jól dokumentált módon hatása lehet a sztóma nyitottságára (Franks et al., 2013). A bemeneti adatokban megadott maximális sztómaellenállást egy CO<sub>2</sub> koncentrációtól függő hányadossal szoroztuk be, mely Franks és munkatársai (2013) által közölt tanulmánya alapján veszi figyelembe a sztóma ellenállás relatív változását (Hidy et al., 2016a).

### **Szárazodás**

Szárazság hatására kezdetben hervadni kezd a növény, mely adott esetben, ha a vízhiány huzamosabb ideig fennáll, növénypusztuláshoz is vezethet. Az ily módon bekövetkezett pusztulás szimulációja az eredeti modellből teljesen hiányzott, mely főként a lágyszárú növények modellezése esetén okozott jelentős problémát.

Már az első modellfejlesztések során bekerült egy, a szárazodás ökofiziológiai hatását figyelembe vevő modul (Hidy et al., 2012), mely a későbbiekben további fejlesztéseken esett át (Hidy et al., 2016b). A szárazodásnak a felszín feletti és felszín alatti biomasszára is hatása van. A modellben a szárazodás mértéke függ attól, hogy mennyi ideje tart a szárazság, valamint hogy mekkora mértékű a talajnedvesség okozta stressz. Mindkét hatás elérhet egy olyan kritikus pontot, ahol a növény egy része elpusztul, így az élő növényi részek az elhalt növényi részek tározójába kerülnek. Ezzel lehetővé válik a növény részleges vagy teljes pusztulása a szárazság hatására, amelyre az eredeti modellel nem volt lehetőség.

A szárazság okozta szövetpusztuláson kívül a 4M modellhez hasonlóan a Biome-BGCMuSo modellben is implementáltuk a genetikailag programozott levélpusztulást (Hidy et al., 2016b). A szárazodás a felhasználó által megadott mértékben és a beállított növekedési hőmérsékleti összeg után indul be. A tesztelések során kiderült, hogy ez a fejlesztés jelentősen javította a kukorica szimulációját.

## **Mezőgazdasági művelés**

A Biome-BGCMuSo modellben nyolc, műveléssel kapcsolatos tevékenység szimulálható: gyepek esetén kaszálás, legeltetés; mezőgazdasági növények esetén szántás, vetés, trágyázás, öntözés és aratás; illetve fás ökoszisztémák esetén szálalás.

A modellben vetés után a vetőmag a már említett transzfer tározóból indul, majd a vegetációs időszak beindulásával a szén- és a nitrogéntartalma az aktuális tározóba kerül át (levél, szár és gyökérzet). Az egyes növényi részek közötti allokáció a beállított ökofiziológiai paraméterek alapján történik.

Az aratás során történik a termés összegyűjtése. Feltételezzük, hogy az aratás után a szár csonkja és a gyökérzet a helyszínen marad, mint élő növényi rész. A modellben a levágott növényi részek különböző utakat járhatnak be, csak úgy, mint a valóságban. A termés minden esetben elszállításra kerül, míg a levelek és szárok elszállíthatók (pl. állattartás során máshol kerülhet hasznosításra), de helyben is hagyhatók. Utóbbi esetben, mint elhalt növényi anyag, javíthatják a talaj minőséget. Az aratással kapcsolatosan az elszállított és helyben hagyott biomassza aránya a felhasználó által beállítható, és értéke jelentősen befolyásolhatja a talaj széntartalmát. A modell logikája szerint a helyben hagyott levágott növényi anyag (avar) egy időszakos tározóba kerül, ahonnan fokozatosan kerül át az elhalt növényi anyag tározójába, melynek átalakulási sebessége beállítható, mint ökofiziológiai paraméter. Az elhalt növényi anyagok tározójába kerülő anyag a parametrizáció során beállított arányok szerint oszlik szét a három különböző típusú tározók között (gyorsan bomló, cellulóz és lignin). A modellben a levágott növényi részek víztartalma a feltételezések alapján elpárolog.

A szántás során a termőföld felszínét átforgatják. A modellben három különböző mélységű szántás állítható be: sekély, közepes és mély, amelyeknek rendre a legfelső, a felső kettő valamint a felső három talajrétegre van hatása. A szántás során a modellben a talaj textúrája, hőmérséklete és nedvességtartalma adott mélységig homogenizálódik.

A trágyázás során kihelyezett anyag lehet iparilag előállított műtrágya, vagy szerves trágya, melynek tápanyagtartalmát a növények a gyökérzetükön keresztül veszik fel a talajból. A modellben a trágyázás a talaj mineralizált nitrogéntartalmán keresztül fejti ki hatását. A trágyázás napján az egész nitrogénmennyiség egy erre kialakított tározóba kerül, ahonnan fokozatosan jut ki a talaj felső rétegébe. A nitrogén egy része nem kerül be a talaj tározóiba, hanem kimosódik, melynek mértéke szintén állítható. Mivel a trágya nitráttartalma a növény által közvetlenül felvehető, így a modellben a megfelelő

nitrátmennyiség a talaj mineralizált nitrogén tározójához adódik hozzá. Az ammóniumnak először nitrifikálódnia kell, mielőtt a növényzet felvehetné, így az elhalt növényi anyagok nitrogén altározójába kerül, míg a szerves trágya széntartalma a szén altározójába kerül. E folyamatok során fokozatosan csökken a trágya tározója a trágyázás napját követően, mindaddig, míg ki nem ürül, és a trágyázás hatása meg nem szűnik.

Az öntözés során a felhasználó által megadott napon a felhasználó által definiált mennyiségnek megfelelő vízhez jut a növény, hasonlóan a csapadékhoz.

### **3.2.2.2. A modell bemenő és kimenő adatai**

Alapvető bemenő adat a már korábban említett meteorológiai adatsor, valamint a talajtextúra, a tengerszint feletti magasság, földrajzi szélesség és talaj albedó. A növényi működést leíró legfontosabb bemenő adatok az ún. ökofiziológiai paraméterek (pl. maximális sztómaellenállás, specifikus levélfelület, különböző növényi részek C:N tömegaránya, szárazodást szabályozó, valamint allokációval kapcsolatos paraméterek stb.), amelyek megadják, milyen típusú ökológiai rendszert kívánunk szimulálni.

Jelenleg 108 ökofiziológiai paramétert kell definiálni, melyek közül számos paraméter nem igényel változtatást. A paraméterek részletes leírása elérhető a felhasználói kézikönyvben (Hidy et al., 2016b).

További opcionális bemeneti adatok a CO<sub>2</sub> koncentrációra, nitrogénülepedésre, mortalitásra, talajvízre, valamint a művelésre vonatkozó adatsorok, amelyek a szimuláció időszakára állandó vagy akár évente változó módon is megadhatók.

A BioVeL (Biodiversity Virtual e-Laboratory) projekt keretében az MTA Ökológiai Kutatóintézzettel (ÖK) együttműködve a modellt egy webes környezetbe ágyaztuk, amihez készítettünk egy adatbázist. Az ún. Biome-BGC Projects Database & Management System (BBGCDB) felületen (<http://ecos.okologia.mta.hu/bbgcdb/>), regisztrációt követően elérhetjük az adatbázist, ahol különböző modellfuttatásokhoz készíthetünk elő bemenő adatokat, vagy használhatjuk a már felvitt fájlokat. Egy másik felületen, az ún. BioVeL Portal-on (<https://portal.biovel.eu/>) keresztül indíthatunk el modellfuttatásokat. A számítások ún. "webes szolgáltatások" ("web service"-ek) segítségével valósulnak meg az MTA ÖK tulajdonában lévő szerveren, vagy kiosztásra kerülnek a SZTAKI Desktop Grid rendszerére (EDGES@HOME, <http://szdg.lpds.sztaki.hu/szdg/>), ahol számtalan gép erőforrása áll rendelkezésre. Az egyszerű modellfuttatásokon kívül bonyolultabb ún. munkafolyamatokat ("workflow"-kat) is

implementáltunk, melyek különböző utófeldolgozási feladatokat látnak el (Horváth et al., 2014). Doktori munkám keretében részt vettem három munkafolyamat megírásában és tesztelésében, melyek ún. Monte Carlo futásokat, érzékenységvizsgálatot, valamint kalibrációt (lásd 1.7.1 fejezet) hajtanak végre.

A projekt 2014-ben lezárult, de azóta is folyamatosan új funkciókkal bővül a rendszer. Lehetőség van már nem csak pontbeli, hanem térbeli futtatások indítására is, amelyekhez az adatokat GIS alapú térképek feltöltésével tehetjük meg. A doktori munkám keretében készült FORESEE meteorológiai adatbázist (lásd 3.2 fejezet) is csatoltuk az BBGCDB rendszerhez, mellyel könnyen végezhetünk térbeli szimulációkat.

A Biome-BGCMuSo modell folyamatos fejlesztése miatt a BBGCDB is folyamatos fejlesztésre szorult, mely egy kis időkéséssel tudja csak követni a modellfejlesztéseket. Ezért a dolgozatban közölt eredmények nem a BioVeL Portal-on készültek, de a Monte Carlo futtatásokhoz igénybe vettük a SZTAKI Desktop Grid erőforrásait egy ún. demo grid-en keresztül, mely jelentősen lecsökkentette a futási időt.

### **3.3. Meteorológiai adatbázis**

Az éghajlatváltozással kapcsolatos számszerű hatásvizsgálatokhoz szükség van múltira vonatkozó mért meteorológiai adatokra, valamint lehetőleg minél több, jövőre vonatkozó éghajlati projekcióra. Doktori munkám elején nem állt rendelkezésre megfelelő adatbázis, amely közvetlenül kielégítette volna a mezőgazdasági és biogeokémiai modellek meteorológiai adatigényét. Így első lépésben létrehoztunk egy általános célú meteorológiai adatbázist, amely nem csak jelen munkához, hanem bármely más hatásvizsgálathoz is szabadon felhasználható (pl. hidrológiai modellezés). A megalkotott FORESEE (Open Database **FOR** Climat**E** Change-Related Impact Studies in C**EN**tral Europe, <http://nimbus.elte.hu/FORESEE/>) adatbázis 2.1 verziója az 1951-2014 múltbeli időszakra megfigyeléseket, míg a 2015-2100 időszakra hibakorrigált klímamodell-eredményeken alapuló projekciókat tartalmaz. Az adatbázisban napi léptékű minimum- és maximumhőmérséklet és csapadék adatok szerepelnek.

A további alfejezetekben bemutatjuk az adatbázis létrehozásához felhasznált adatokat és módszereket.

### 3.3.1. Múltbeli adatok összeállítása

A múltra vonatkozó adatok alapját az ENSEMBLES projekt (Van der Linden and Mitchell, 2009) keretében készült E-OBS adatbázis (Haylock et al., 2008) képezte, amely egy méréseken alapuló, interpolált, 25×25 km-es térbeli felbontású, napi léptékű rácsponti adatbázis Európára. Az E-OBS napi átlag-, minimum- és maximumhőmérséklet, továbbá csapadékösszeg és átlagos tengerszinti légnyomás adatokat tartalmaz, amelyek közül munkánk során a középső hármat használtuk fel.

A FORESEE adatbázis 1.0 verzióját 2012-ben készítettük el, amikor az E-OBS adatbázis legújabb verziója a 7-es volt. A későbbiekben frissített 1.1, 2.0, valamint a 2015 végén elkészült 2.1 FORESEE verziókban újabb és újabb E-OBS verziókat implementáltunk.

A FORESEE v2.1 adatbázis létrehozásához az E-OBS 10. verzióját használtuk fel, melyet kiegészítettünk a 11. verzió 2014-re vonatkozó adataival, amely így az 1951-2014 időszakot fedte le. A FORESEE fejlődése nyomon követhető az adatbázis honlapján (amely szintén doktori munkám eredménye), a "Latest news" menüpont alatt (<http://nimbus.elte.hu/FORESEE/index-news.html>).

Az E-OBS-on kívül felhasználtuk még a CRU TS 1.2 adatbázist (Climatic Research Unit, University of East Anglia, UK; Mitchell et al., 2004), amely havi adatokat tartalmaz az 1901-2000 időszakra egy 1/6×1/6 fokos horizontális felbontású rácson Európára vonatkozóan. Az E-OBS egész Európa területét lefedi, azonban a felhasznált mérési adatok sűrűsége területenként jelentősen eltérő (Klok and Klein Tank, 2008). Előzetes tanulmányok megmutatták, hogy a CRU TS 1.2 adatbázis havi szinten igen pontos, összehasonlítva más rácsponti adatbázisokkal, ezért úgy döntöttünk, felhasználjuk a napi léptékű E-OBS javítására. Szabó (2008) különböző rácsponti adatbázisokat vetett össze a nagy felbontású, magyarországi meteorológiai méréseket tartalmazó ún. HUGRID adatbázissal, amely során a CRU TS 1.2 mutatta a legjobb egyezést. Annak érdekében, hogy alátámasszuk az E-OBS adatbázis CRU TS 1.2-vel történő korrigálását, további összehasonlításokat végeztünk a CarpatClim adatbázis segítségével (<http://www.carpatclim-eu.org/>; Szalai et al., 2013), amely egy napi léptékű meteorológiai adatbázis a Kárpátok területére. Az adatbázis alapját képező mérési idősorok nagy száma, valamint a korszerű interpolációs technikák alkalmazása miatt indokolt egyfajta összehasonlítási alapnak tekinteni más adatbázisok pontosságának megállapításához. Mivel

a CarpatClim a FORESEE célterületének csak 38%-át fedi le, valamint nem tartalmazza hazánk egész területét, így számunkra nem használható a múltbeli adatok kinyerésére.

Az összehasonlítás eredménye alapján elmondható, hogy a CRU TS 1.2 jobban illeszkedik a CarpatClim adatbázishoz, mint az E-OBS adatbázis legújabb verziója, így indokolt havi szinten illeszteni a napi léptékű adatokat a CRU TS 1.2 idősorokhoz (Dobor et al., 2015).

A FORESEE adatbázis móltra vonatkozó adatainak előállítására során a CRU adatbázis 1/6×1/6 fokos horizontális felbontású rácsát tekintettük célrácsnak, és erre interpoláltuk az E-OBS adatokat, az inverz távolságokon alapuló interpolációs módszerrel. Majd az E-OBS napi léptékű idősorait havi szinten illesztettük a CRU TS 1.2 adatbázishoz, úgy, hogy az E-OBS adatbázisból számított havi hőmérsékleti átlagokat és csapadékösszegeket összehasonlítottuk a CRU TS 1.2 adatbázis adott év adott hónapjára vonatkozó értékekkel. A hőmérséklet esetén az így kapott átlagos különbözettel eltoltuk a napi értékek mindegyikét, amíg a csapadékadatok esetén a két havi összeg érték hányadosát szorzóként alkalmaztuk. Mivel a CRU TS 1.2 adatbázis nem áll rendelkezésre a 2001-2014 időszakra, így erre a 14 évre az 1951-2000 évek átlagolt korrekciós faktorait alkalmaztuk.

### **3.3.2. Jövöbeli adatok összeállítása**

A FORESEE adatbázis jövöbeli adatainak előállításához az ENSEMBLES projekt (Van der Linden and Mitchell, 2009) keretében végzett regionális klímamodell (RCM) szimulációk eredményeit használtuk fel. Az ENSEMBLES projekt honlapján 31 modelleredmény volt elérhető az adatbázis készítésének időpontjában (<http://ensemblesrt3.dmi.dk/>). A FORESEE adatbázishoz a modellek kiválasztása az alábbi logikát követte. Olyan modelleket választottunk, amelyeket a 1951-2100 időszakra futtattak, nem csupán 2050-ig, valamint az A1B üvegházgáz kibocsátási scénárión alapultak. (Az A1B scénárió a felhasznált energiaforrások közötti egyensúlyt feltételezi, valamint a különböző technológiák együttes fejlődését; Nakicenovic et al., 2000). A projekt keretében rendelkezésre bocsátott 31 modelleredményből 30 alapult ezen a scénárión. A 30 modellfutás közül 23 futott nagy, 25×25 km-es felbontással, de csupán 14 modelleredmény vonatkozott a teljes 1951-2100-as időszakra, így a továbbiakban a modellek ezen alcsoportjával foglalkoztunk. Kihagytunk 2 modelleredményt, melyeket ugyanazon globális klímamoddellel hajtottak meg, azonban alacsony és magas

érzékenységgű regionális klímamodell-beállításokkal (HadRM3Q0-HadCM3Q0 modellpára vonatkozóan). A megmaradt 12 modellből egy hosszú távon nem volt elérhető a honlapon (ALADIN-ARPEGE korábbi verziója), valamint egy másik túl sok hiányzó adatot tartalmazott az idősor végén (RCA3-HadCM3Q16). A megmaradt 10 modell alkotta a FORESEE adatbázis készítésének az alapját (1. táblázat).

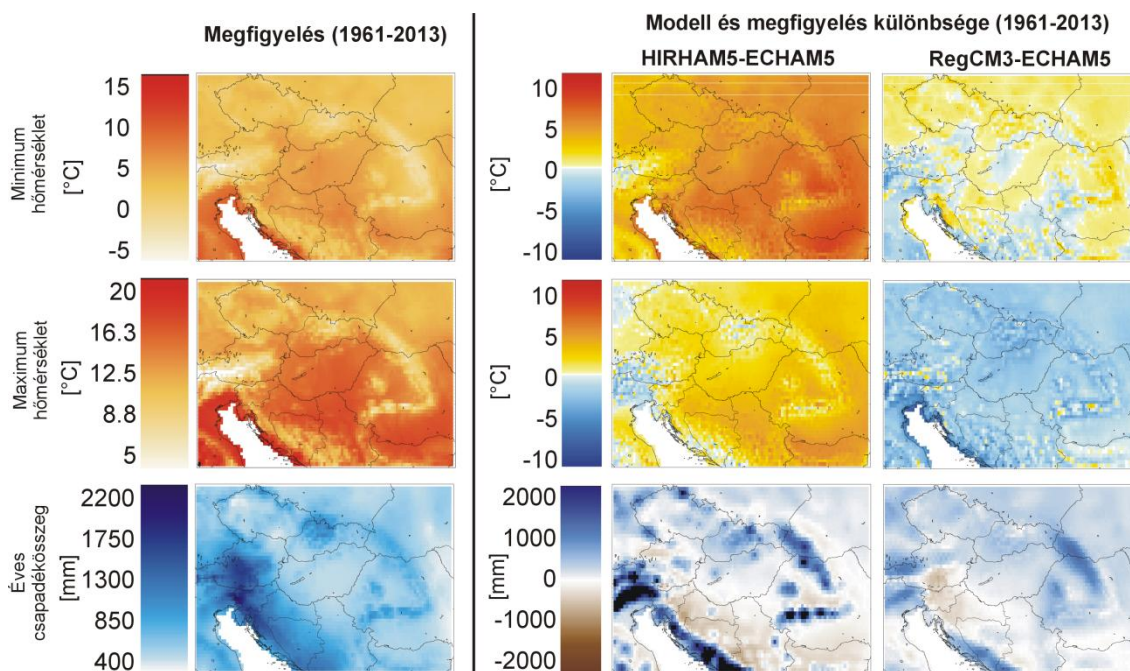
1. táblázat. A FORESEE adatbázisban felhasznált regionális klímamodellek listája.

ID	Modell neve (RCM-GCM)	Fejlesztő intézmény
1	ALADIN-ARPEGE	National Centre for Meteorological Research (CNRM)
2	CLM-HadCM3Q0	Swiss Federal Institute of Technology Zürich (ETHZ)
3	HadRM3Q0-HadCM3Q0	Hadley Centre for Climate Prediction and Research (HC)
4	HIRHAM5-ARPEGE	Danish Meteorological Institute (DMI)
5	HIRHAM5-ECHAM5	Danish Meteorological Institute (DMI)
6	RACMO2-ECHAM5	Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI)
7	RCA-ECHAM5	Sweden's Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)
8	RCA-HadCM3Q0	Sweden's Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)
9	RegCM3-ECHAM5	The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP)
10	REMO-ECHAM5	Max-Planck-Institute for Meteorology (MPI)

Habár a kiválasztott 10 RCM ugyanazon projekt keretében készült, mégis jelentős strukturális különbségek vannak a közzétett adatsorokban, amelyek kiküszöbölése alapvető egy egységes adatbázis készítése során. Néhány modell 360 napos dátumozást, néhány pedig standard dátumozást használt, szökőévekkel. Egységesítés és további modellezés céljára történő előkészítés végett minden idősort 365 napos évekre alakítottuk át (szökőévek nélkül). A standard dátumozást használó idősorok esetén minden szökőévből eltávolítottuk a december 31-re vonatkozó adatot, és minden adatot eggyel előre csúsztattunk az időtengelyen március 1-től kezdve. Így a február 29-ei adat március 1-re került, a december 30 pedig december 31-re. Az év utolsó napjának kivétele mögött az a logika áll, hogy négyévente egy téli nap átugrásának nincs akkora hatása a hidrológiára, növénynövekedésre vagy más folyamatokra, mintha tavasz elejéről vennénk ki a február 29-ei értékeket. Olyan esetekben, amikor a klímamodell 360 napos dátumozást (minden hónap 30 napos) használt, utólagos napok beillesztésére volt szükség január, március, május, július, augusztus, október és december hónapokban. Ezen kiegészítő napokhoz az azt megelőző és azt követő napok hőmérsékleteinek átlagát, valamint 0 mm csapadékot rendeltünk, kiküszöbölve, hogy beavatkozzunk a modell által szimulált hidrológiába. Február esetén a hónap végéről 2 napot elhagytunk. Néhány esetben az idősor végéről hiányzott az utolsó év egésze, ez esetben megismételtük a 2099-es évet, mint 2100.

Az időbeli egységesítés után következett a térbeli leszűkítés. Minden RCM eredményt interpoláltunk az 1/6×1/6 fokos szabályos célrácsra, az említett inverz távolságok módszerével.

A nyers klímamodell-adatok a szisztematikus hibák miatt nem használhatók fel közvetlenül (Christensen et al., 2008), így a hibakorrekció kikerülhetetlen lépés, mielőtt a modelladatokat hatásvizsgálatba vonnánk be (Dosio and Paruolo, 2011). A 10 kiválasztott RCM műltra vonatkozó eredményeinek összehasonlítása a mérési adatokkal egyértelműen rámutat a hibakorrekció szükségességére. A minimum- és maximumhőmérséklet, valamint csapadékösszeg 1961-1990 időszakra vonatkozó átlagait láthatjuk a 2. ábra bal oldali oszlopában megfigyelések alapján. A középső és jobb oldali ábrán ugyanezre az időszakra láthatjuk két kiválasztott klímamodell mérésektől vett eltérését. A további nyolc modell hibái a Dobor és munkatársai (2015) tanulmány függelékében tekinthetők meg.



2. ábra. Az 1961-2013 időszakra vonatkozó átlagos minimum- és maximumhőmérséklet, valamint évi csapadékösszeg a megfigyelések alapján (bal oldali oszlop), valamint két nyers klímamodell eredmény megfigyelésektől vett eltérése (középső és jobb oldali oszlop).

A klímamodell-eredményekben felfedezhető szisztematikus hibák ellehetetlenítik a további modellező munkát. Tekintsünk egy egyszerű példát. A hőmérsékletadatokat terhelő legkisebb szisztematikus hiba is rendkívül nagy hatással lehet a mezőgazdasági modellekben a növénynövekedés szimulációjára. Láthattuk, hogy például a 4M esetén az egyes fenofázisok hőmérsékleti összeg alapján különülnek el, így a napi hőmérsékleti



adatok szisztematikus hibája könnyen hatványozódhat, és így a modellezés értelme megkérdőjelezhető. Tehát elengedhetetlen, hogy statisztikai értelemben hosszabb időszak átlagában a szisztematikus hibákat valamilyen módszerrel eltávolítsuk a klímamodell-eredmények időszoraiból.

A csapadék adatok hibáinak vizsgálata összetettebb, mint a különböző hőmérséklet adatoké, ugyanis nem csak az éves csapadékösszeg lehet hibával terhelt, hanem a csapadékos napok időbeli eloszlása is. Korábbi kutatások kimutatták, hogy a klímamodellek sok esetben felülbecslik a csapadékos napok számát (Mearns et al., 1990; Gutowski et al., 2003; Dosio and Paruolo, 2011; Themeßl et al., 2012).

Feltételezve, hogy a szisztematikus hibák időben stabilak (Maraun, 2012), a modellezett és mért adatok összehasonlítása során (1951-2013) korrekciós faktorokat határozhatunk meg, melyeket alkalmazhatunk a jövőbeli futtatásokra (2014-2100), így eltávolítva a szisztematikus hibákat a teljes időszorból. A hibakorrekció referenciájára az 1951-2013-as időszakot jelöltük ki.

A hibakorrekciót az eloszlásfüggvények illesztésén alapuló módszerrel (kvantilis illesztés, ami hisztogram kiegyenlítés néven szintén ismert a szakirodalomban) végeztük el havi szinten (Ines and Hansen, 2006; Déqué, 2007; Piani et al., 2009; Dosio and Paruolo, 2011; White and Toumi, 2013) minden rácspontra a kijelölt célterületen. A csapadék és hőmérséklet adatsorok különböző statisztikai tulajdonságai miatt különböző hibakorrekciós módszerek szükségesek (Hansen et al., 2006). A csapadék esetén korrigáltuk mind a csapadék mennyiségét, mind a csapadékos napok számát. A hőmérséklet esetén a korrekciós faktorok egy eltolást valósítanak meg, míg a csapadék esetén meghatározott korrekciós faktorokat szorzóként használjuk. A továbbiakban az alkalmazott korrekciós eljárást a csapadékadatokon keresztül mutatjuk be, mivel ez esetben a korrekció két részből áll (gyakoriság és mennyiség); a hőmérséklet korrigálása a csapadék korrekció második lépésének megfelelően történik.

### **3.3.2.1. A csapadékos napok számának korrekciója**

A csapadékos napok számának korrigálása a megfigyelt ( $N_{wd}^o$ ) és a múltra modellezett ( $N_{wd}^m$ ) havi csapadékos napok számának összehasonlításán alapul (csapadékos napok azok a napok, amikor a napi csapadékösszeg nagyobb vagy egyenlő, mint 0,1 mm):

$$N_{wd}^o = \sum_{i=1}^k w_i^o, \text{ ahol } w_i^o = \begin{cases} 1, x_i^o \geq 0,1\text{mm} \\ 0, x_i^o < 0,1\text{mm} \end{cases}, i = 1, k, \quad (14)$$

$$N_{wd}^m = \sum_{i=1}^k w_i^m, \text{ ahol } w_i^m = \begin{cases} 1, x_i^m \geq 0,1\text{mm} \\ 0, x_i^m < 0,1\text{mm} \end{cases}, i = 1, k, \quad (15)$$

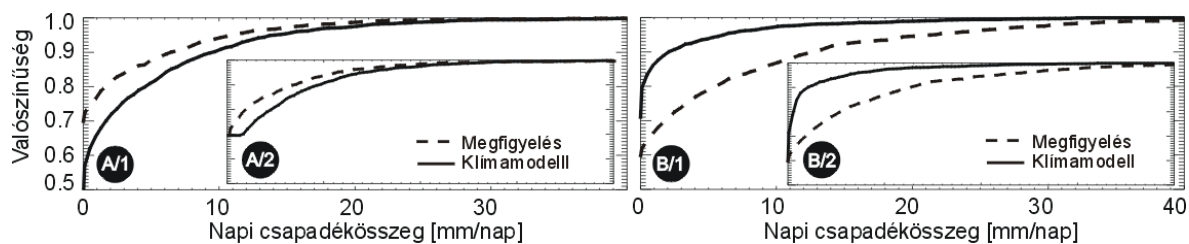
ahol  $k$  azon napok számát jelenti, amelyek adott hónaphoz tartoznak az egész 1951-2013 időszakból,  $x_i^o$  és  $x_i^m$  a megfigyelt és modellezett csapadéértékeket jelenti az adott hónapban, valamint  $w_i^o$  és  $w_i^m$  megadják, hogy az adott nap csapadékos nap-e vagy sem.

Ha a modell több csapadékos napot szimulál, mint a megfigyelések ( $N_{wd}^m > N_{wd}^o$ ), akkor csapadékos napok kerülnek eltávolításra a legkisebb csapadékmennyiségtől kezdve. Ha a modell túl kevés csapadékos napot ad ( $N_{wd}^m < N_{wd}^o$ ), akkor csapadékeseményeket hozunk létre adott hónapban belül véletlenszerűen kiválasztott napokra. A létrehozott csapadékmennyiséget szintén véletlenszerűen választjuk meg 0,1 mm és a modellezett adatsor 90. percentilise között.

Mivel a fő cél a jövőbeli adatok korrekciója, ezért a múltbeli adatok alapján korrekciós faktorok meghatározására van szükség. A korrekciós faktorokat ( $f_{corr}$ ) a múltbeli időszakban megfigyelt csapadékos napok számának, valamint a múlt szimulált csapadékos napok számának hányadosaként számítottuk ki:

$$f_{corr} = \frac{N_{wd}^o}{N_{wd}^m} \quad (16)$$

A korrekciós faktorokat havi szinten rácspontonként határoztuk meg. A jövőbeli (2014-2100) havi csapadékos napok számát minden évben az adott havi korrekciós faktoral szoroztuk be, melyet az 1951-2013 időszak alapján számítottunk ki a (14) egyenletnek megfelelően. A 3. ábrán két példát láthatunk, a megfigyelt és mért csapadék összegek eloszlásának eltérésére. Adott időszak száraz napjainak az aránya az eloszlásfüggvény  $y$  tengellyel vett metszéspontjánál olvasható le. A bal oldali esetben a modell túl kevés száraz napot szimulált, a jobb oldali esetben pedig túl sokat a megfigyelésekhez viszonyítva (A/1 és B/1 ábrák). A görbék  $y$  tengellyel vett metszéspontja adja meg a száraz napok részarányát. Az A/2 és B/2 ábrák mutatják a csapadékos napok számának korrigálása utáni eloszlásfüggvényt (folytonos vonal).



3. ábra. A klímamodell által adott, valamint a mért havi csapadékeloszlások eltérését mutató példák (A/1 és B/1 ábrák). A bal oldali A esetben csapadékos napok felülbecslése, míg a jobb oldali B esetben azok alulbecslése figyelhető meg. A beágyazott ábrák (A/2 és B/2) a csapadékos napok számának korrekciója utáni állapotot mutatják. A korrekció két lépése után a két görbe teljesen egybeesik, így erre vonatkozó ábrát nem mutatunk be.

A mennyiségi korrekció után a modellezett adatsor eloszlásfüggvénye megegyezik a megfigyelések eloszlásfüggvényével (mindkét esetben a folytonos vonal rákerül a szaggatott vonalra), amelyre külön ábrát nem mutatunk be.

### 3.3.2.2. A csapadékmennyiség korrekciója

A mennyiségi korrekciót a gyakoriság korrekciója után kell elvégezni, hogy a véletlenszerűen generált csapadékmennyiségek értékeit is megfelelő módon korrigáljuk. A mennyiségi korrekcióhoz eloszlásfüggvények illesztésén alapuló módszert használtunk (Ines and Hansen, 2006; Dosio and Paruolo, 2011).

$p$ -edik kvantilisnek nevezzük azt a csapadéértéket ( $q_p$ ), amelynél egy véletlenszerűen kiválasztott csapadéérték  $p/1000$  ( $p = 1, 2, \dots, 1000$ ) valószínűséggel lesz kisebb vagy egyenlő. Jelen esetben 1000 részre osztottuk fel a  $[0, 1]$  valószínűségi intervallumot. Ez a felosztássűrűség már biztosítja a folytonosságot, de a számítási igényt elfogadható szinten tartja:

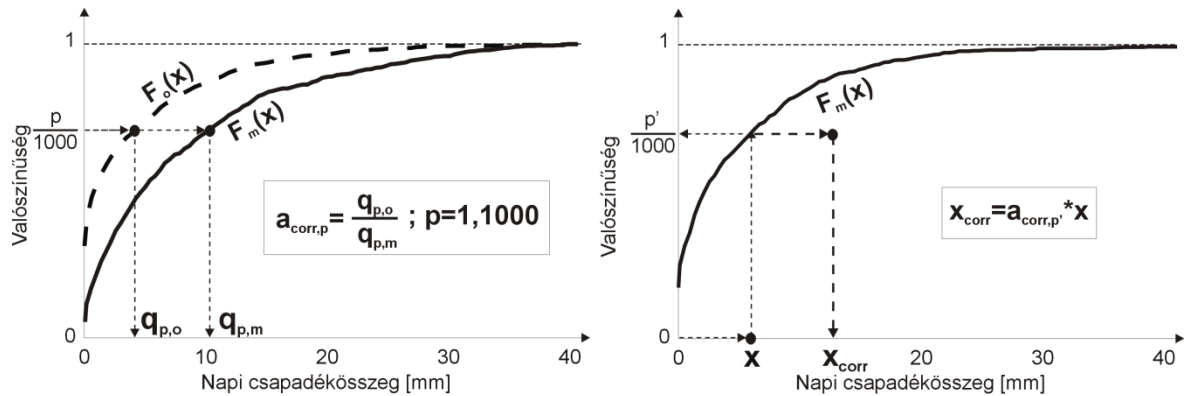
$$q_p = \inf \left\{ X \in \mathbb{R} : \frac{P}{1000} \leq F(X) \right\}, \quad (17)$$

ahol  $F(X)$  az adott hónap csapadék idősorának ( $x$ ) eloszlásfüggvénye:

$$F(X) = P(x \leq X). \quad (18)$$

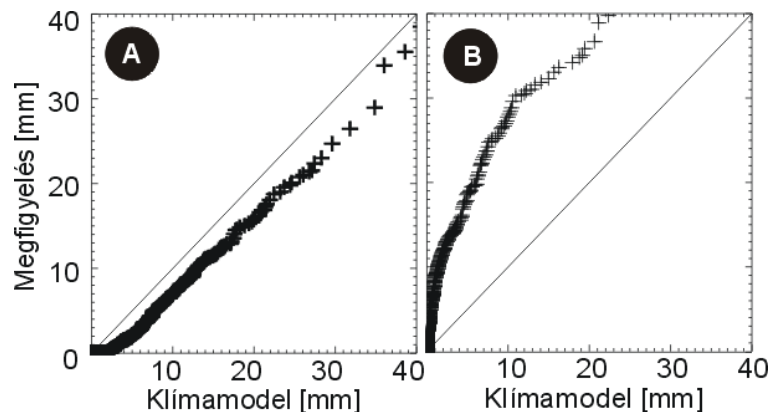
A kvantilis függvényeket (vagy inverz eloszlás függvényeket) 1000 db felosztással határoztuk meg a mért és a gyakorisági korrekción már átesett modellezett csapadék adatok alapján, adott rácspontra, adott hónapra.

Jelen esetben az  $a_{corr,p}$  ( $p = 1,2,\dots,1000$ ) korrekciós faktorokat a mért és modellezett csapadékadatok  $p$ -edik kvantilisainak páronként vett hányadosai által alkotott 1000 elemű vektorok adják. Egy adott csapadéérték ( $x$ ) korrekciója során meghatározzuk, hogy hányadik ( $p'$ ) kvantilis érték esik a legközelebb az adott csapadéértékhez az 1000 elemű kvantilis függvényből, és sorszáma alapján ( $p'$ ) kiválasztjuk a hozzá tartozó korrekciós faktort ( $a_{corr,p'}$ ) a szintén 1000 elemű korrekciós tömbből (4. ábra). A korrekciós faktort végül beszorozzuk az eredeti csapadékmennyiséget.



4. ábra. A csapadékmennyiség korrekciójának szemléltetése. A bal oldali ábra mutatja a korrekciós faktorok ( $a_{corr,p}$ ) meghatározását adott  $p$ -edik kvantilishez, ahol a szaggatott vonal a megfigyelések, a folytonos vonal pedig a modelleredmények eloszlásfüggvényét mutatja. A jobb oldali ábrán az  $x$  csapadékösszegnek a  $p'$ -edik kvantilishez tartozó korrekciós faktortal történő korrekcióját láthatjuk, ahol a két eloszlásfüggvény illeszkedik egymásra.

A jövőbeli csapadéértékek korrekciója ugyanilyen módon történik. A csapadékmennyiséghez legközelebb álló kvantilis sorszáma segítségével a múlt alapján készített korrekciós faktorokat tartalmazó tömb megfelelő elemét kiválasztva elvégezzük a beszorzást.

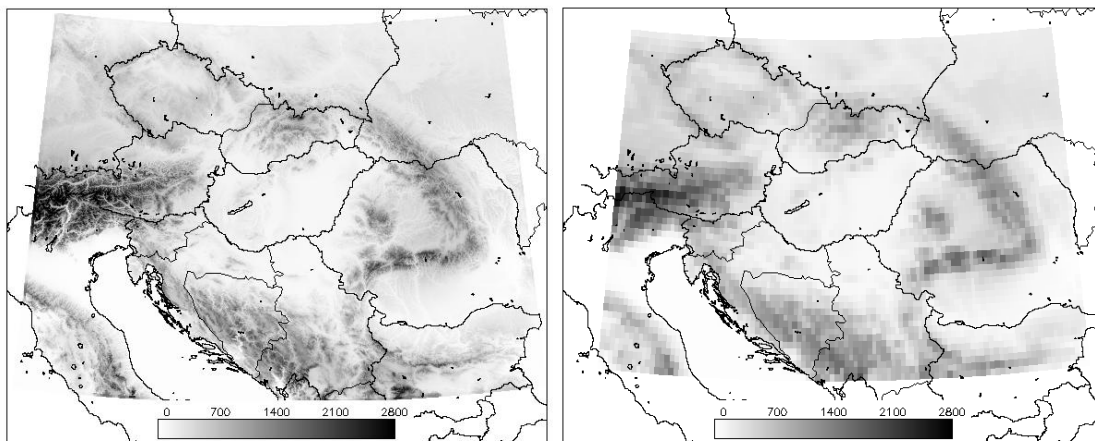


5. ábra. A mért és a klímamodell által adott kvantilis-kvantilis függvények ("q-q plot" ábrák). A bal oldali esetben a klímamodell alulbecsülte a csapadékos napok számát, míg a jobb oldali esetben felülbecsülte.

Az 5. ábra mutatja a kvantilis-kvantilis függvények kapcsolatát ("q-q plot"; Déqué, 2007; Calanca and Semenov, 2013) a HIRHAM5-ECHAM5 modell alapján a korrekció előtt. Az ábra a napi csapadékmennyiségi adatokat mutatja egy adott hónapra a teljes 1951-2013 időszakra (például összes februári napi csapadék, ami ebben az időszakban előfordult), egy adott rácspontra. A bal oldali ábra egy olyan esetet mutat, amikor a modell túl sok csapadékos napot szimulált a mérésekkel összehasonlítva (február), a jobb oldali ábra pedig egy olyan hónapot, amikor túl keveset (augusztus). A korrekció után korrigált modellkimenetek és a mért adatok kvantilisei lényegében megegyeznek (a pontok az 1-1 egyenesen helyezkednek el, ezért itt nem mutatjuk be).

### 3.4. Talajfizikai és domborzati adatbázisok

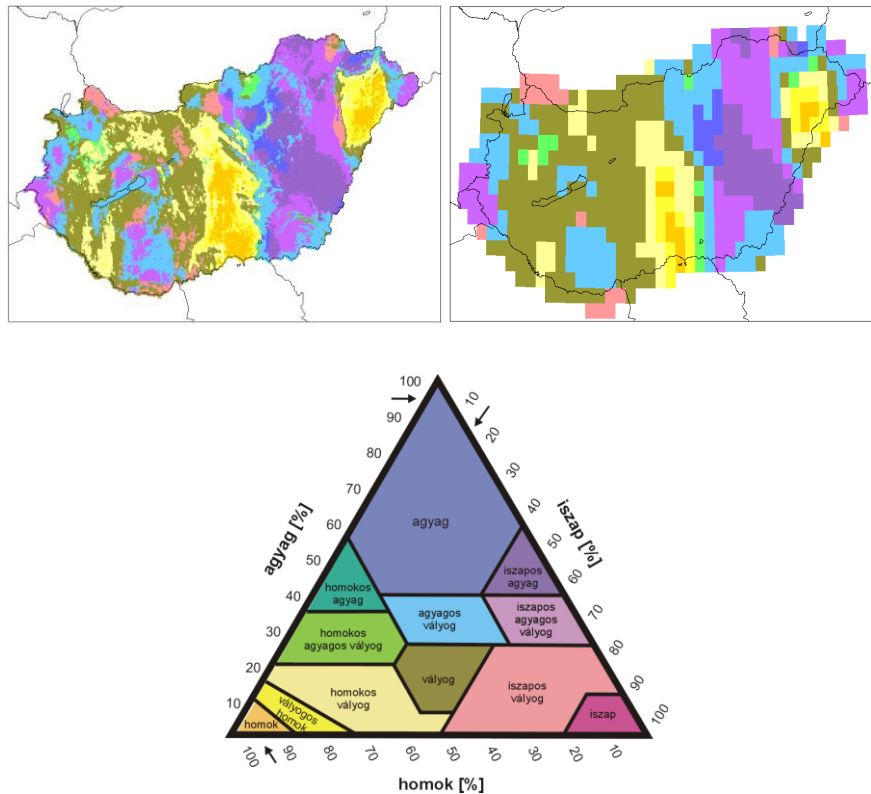
A modellezéshez szükséges domborzati és talajfizikai adatokat összegyűjtöttük, és átmintavételeztük a FORESEE (1/6×1/6 fokos horizontális felbontású) rácására. A tengerszint feletti magasság meghatározásához az ún. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Digitális Terep Modellt használtuk (Jarvis et al., 2008). A 6. ábrán láthatjuk a domborzat nagy felbontású, valamint a közös rácstra átlagolt képét a FORESEE adatbázis teljes célterületére.



6. ábra. Tengerszint feletti magasság (m) az STRM Digitális Terepmodell alapján az eredeti felbontásban (bal oldalon), valamint a FORESEE adatbázis rácására átlagolva (jobb oldalon).

A talajtextúrát a Talajtani és Agrokémiai Intézet (Magyar Tudományos Akadémia Agrártudományi Kutatóközpont) által létrehozott Soil Terrain Database (SOTER) georeferált talajadatbázisából nyertük ki (Várallyai et al., 1994). Minden rácsponthoz hozzárendeltünk egy paraméteregyüttest, amely az adott cella domináns talajviszonyait (térfogat sűrűség, szervesanyag-tartalom, szabadföldi vízkapacitás, telítési vízvezető

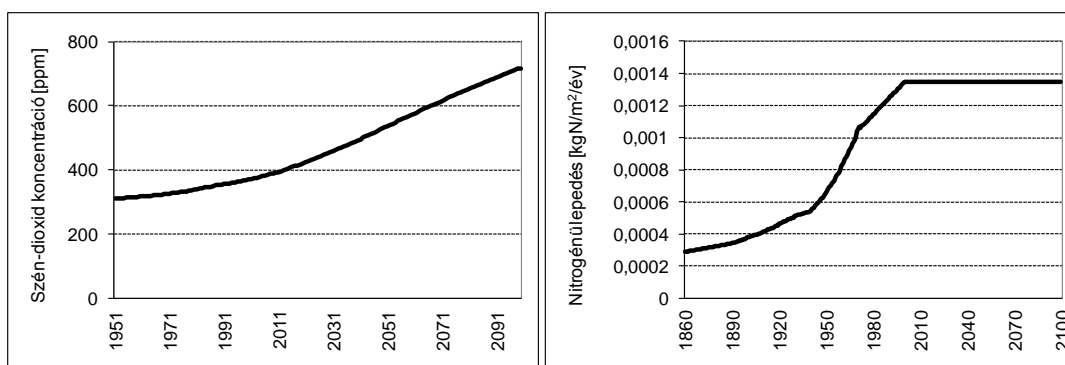
képesség stb.) jellemzi a feltalajra (0-40 cm) és az altalajra (40-100 cm). A 7. ábrán láthatjuk hazánk feltalajának textúráterképét, 1 km-es felbontásban, illetve az országos fúttatásokhoz használt rácson.



7. ábra. A hazai feltalaj textúrája a SOTER talajadatbázis alapján eredeti felbontásban, valamint a FORESEE adatbázis rácsára átlagolva. Az egyes színek a talajtextúra-háromszög által definiált textúrák kategóriáit reprezentálják.

### 3.5. Szén-dioxid keverési arány és nitrogénülepedés

A légköri szén-dioxid keverési arányát 1958-ig az antarktiszi Law Dome mérőállomás jégfurat mintáiból származtatott adatok alapján (Etheridge et al., 1996), 1958-tól kezdődően a Mauna Loa-i mérő állomás adatai alapján adtuk meg a múltira vonatkozóan (Keeling and Whorf, 2005). A jövőre az A1B kibocsátási forgatókönyv alapján feltételezett értékeket vettük figyelembe (Nakicenovic et al., 2000), mivel a klímaprojekciók, melyek alapján a FORESEE adatbázis készült, e forgatókönyvet feltételezték. Az alkalmazott CO<sub>2</sub> koncentráció értékeket az 8. ábra mutatja az 1951-2100 időszakra.



8. ábra. A modellezés során alkalmazott CO<sub>2</sub> keverési arány (ppm, bal oldal) és nitrogénülepedés (kgN m<sup>-2</sup> év<sup>-1</sup>, jobb oldal) értékei az 1951-2100 időszakra.

A nitrogénülepedés mértéke szintén egy bemeneti adat a biogeokémiai modellnek. Korábbi Biome-BGC alkalmazások során a Churkina és munkatársai (2010) által alkalmazott adatbázist használtuk, mely Rodhe és munkatársai (2002), valamint Dentener és munkatársai (2006) munkáin alapul (8. ábra, jobb oldal).

### 3.6. A jövőre vonatkozó mezőgazdasági művelési kalendárium összeállítása

A modellezés során úgy állítottuk össze a szimulációkat, hogy az ország szántóföldek által borított területére vagy kukoricát, vagy őszi búzát vetettünk. Habár a KSH feljegyzései között megyei szinten rendelkezésre áll a különböző gabonák vetési területe, nem ismert, hogy az általunk használt rácshálózaton mindez milyen arányban oszlik el. Továbbá jelen dolgozat keretében csak két gabonával foglalkozunk, de a valóságban más növényeket is termesztenek (pl. napraforgó, repce, stb.). A jövőre vonatkozó futások során nem célszerű bármilyen feltételezéssel élni adott évben adott helyen vetett gabonát illetően. Célravezetőbb, ha a vizsgált gabona mindegyikét, mindenhova és minden évre vonatkozóan szimuláljuk. Jelen kutatás során az a célunk, hogy az ország egészére vizsgáljuk az éghajlatváltozás hatását a búzára és kukoricára, így ezzel a modellszimulációs eljárással minden potenciális területet megvizsgálhatunk.

A mezőgazdasági műveléssel kapcsolatos információ a modelleknek fontos bemenő adata. A gabonanövények produkcióját jelentősen befolyásolja az alkalmazott művelési mód megválasztása és időzítése, ezért a modellezés során is nagy figyelmet kell fordítani az erre vonatkozó beállításokra. Nem áll rendelkezésre olyan művelési kalendárium, amely múltbeli művelési időpontokat tartalmazna országos szinten. A jövőre vonatkozóan pedig értelemszerűen elkerülhetetlen, hogy valamilyen feltételezéssel éljünk. Mivel az

éghajlatváltozás jelentősen befolyásolhatja a vegetációs időszak hosszát, ezért nem célszerű minden évre ugyanazokat a művelési időpontokat megadni. A vetés időpontját általában az adott év meteorológiai viszonyai alapján választják meg, így van lehetőségünk a modellekbe bemenő meteorológiai adatok alapján becsülni az első művelési lépést a gabona életében.

A téma fontossága miatt ebben a fejezetben részletesen tárgyaljuk a vetési időpontok problematikáját, valamint a jövőbeli vetési időpontok becslésére rendelkezésre álló, valamint az általunk kifejlesztett módszereket. Továbbá bemutatjuk, hogy milyen különböző scenáriókat alkalmaztunk az öntözésre és trágyázásra vonatkozóan a jövőbeli modellfutások során.

### **3.6.1. Vetési időpontok meghatározása**

A különböző fenofázisok eltérő nedvesség- és hőigénye miatt a vetés időzítése jelentős hatással van a termés mennyiségére (Árendás et al., 2003). A hazai mezőgazdasági kultúrnövények vetése általában az adott év meteorológiai viszonyaitól függ. A termelők akkor vetnek, ha a körülményeket megfelelőnek találják a magok számára.

A kukorica esetén például a túl hűvös talaj lelassítja a csírázást (Miedema, 1982), ami előnytelen a kártevőkkel szembeni védekezést tekintve (Andrejko and Kuperman, 1961). Hazánkban általában 10-12 cm mélységben mérik meg a talaj hőmérsékletét, ami akkor megfelelő a vetés számára, ha elérte a 8-12°C-ot (Vágvölgyi and Varga, 2011). Különböző kukorica fajták esetén ez a küszöbérték eltérő lehet. A talaj hőmérsékletén kívül annak vízellátottsága is fontos tényező (Eitzinger et al., 2012). Mind a túl száraz, mind a túl nedves viszonyok kerülendők.

Búza vetése esetén a cél az, hogy a növény egy ideális fejlettségi állapotba kerüljön még a tél beállta előtt. Korai vetés esetén túlzottan fejlett lesz a növény, ami szintúgy rontja a télállóságot, mint a kései vetés okozta fejletlenség (Pepó and Sárvári, 2011).

A mezőgazdasági növények modellezése tekintetében három fő módszer létezik a vetési időpont megadására. A módszer kiválasztása a kutatás céljától és a szimulációk térbeli és időbeli kiterjedésétől is függenek. Az első esetben egy adott gabonára megfigyelések alapján fix vetési időpontot alkalmaznak minden évben (De Noblet-Ducoudré et al., 2004; Fodor and Pásztor, 2010; Drewniak et al., 2013; Elliott et al., 2015). A második esetben az optimális vetési időpontot igyekeznek megtalálni, vagyis azt, amellyel a legtöbb termés érhető el (Stehfest et al., 2007; Waongo et al., 2015; Wolf et al.,



2015). A harmadik esetben időjárási illetve talajviszonyok alapján becslik a vetés időpontját (Bondeau et al., 2007; Waha et al., 2012). Az irodalomban fellelhető mezőgazdasági modellek esetén már találkozhatunk néhány olyan modellel, melyek tartalmazzak egy-egy egyszerű vetési időpont meghatározó modult, amelyekben a különböző változók küszöbértékeit mi adhatjuk meg (Jones et al., 2003; Stockle et al., 2003; De Noblet-Ducoudré et al., 2004; Holzworth et al., 2014). A 4M modellhez azonban nem tartozott ilyen előre beépített modul, így nem csak a küszöbértékek megválasztását, hanem a megfelelő módszer kidolgozását is a doktori munkám keretében végeztük el, amit később a Biome-BGCMuSo szimulációihoz is felhasználtunk.

Célunk az volt, hogy a vetési időpont meghatározása minél inkább tükrözze a vetés megkezdésének gyakorlati okait. Így azt az alapelvet tartottuk szem előtt, hogy olyan információk alapján válasszuk meg a vetés időpontját, amelyek a gazdák számára is rendelkezésre állnak.

Első megközelítésben a fellelhető irodalmi módszereket gyűjtöttük össze és teszteltük (2. táblázat), majd saját módszereket fejlesztettünk ki, keresve a hazánkra legmegfelelőbb vetési időpontbecslő módszert (3. táblázat). A kapott eredmények validálásához rendelkezésünkre állt egy feljegyzéseken alapuló adatbázis, melyet a 3.6 fejezetben tekintünk át.

2. táblázat. **Az irodalomban fellelhető vetési időpont meghatározó módszerek kukoricára és búzára.** *doy*: adott nap sorszáma az évben; *T*: napi átlagos léghőmérséklet; *3dayTprec*: az elmúlt 3 nap csapadékösszege; *NWC*: a feltalaj normalizált nedvességtartalma (19. egyenlet); *soilT*: a feltalaj hőmérséklete; *Tc*: a leghidegebb hónap átlagos léghőmérséklete.

KUKORICA		
kód	feltétel(ek)	forrás
M-1	<i>doy</i> amikor $T > 8^{\circ}\text{C}$	Birch et al. (1998)
M-2	<i>doy</i> amikor $T > 10^{\circ}\text{C}$	Coffman (1923); Pan et al. (1999)
M-3	<i>doy</i> amikor $T > 12.8^{\circ}\text{C}$	Kiniry et al. (1995)
M-4	<i>doy</i> amikor $T > 12.1^{\circ}\text{C}$	Sacks et al. (2010)
M-5	<i>doy</i> amikor $T > 14^{\circ}\text{C}$	Waha et al. (2012)
M-6	<i>doy</i> amikor 7 napig $T > 10^{\circ}\text{C}$	Lokupitiya et al. (2009)
ŐSZI BÚZA		
W-1	<i>doy</i> amikor $T < 12^{\circ}\text{C}$	Waha et al. (2012)
W-2	$doy = 3,06 * Tc + 281$	Sacks et al. (2010)

Az időjárásfüggő vetési időpontokat a FORESEE meteorológiai adatbázis (lásd 1.2 fejezet) alapján számítottuk ki hazánk területére, az 1951-2100 időszakra. Eltekintettünk

azon rácsponctoktól, ahol az átlagos tengerszint feletti magasság meghaladja a 300 m-t, mivel a mezőgazdasági művelés e területeken nem jellemző.

Nyolc, az irodalomban fellelhető módszert próbáltunk ki hazánk területére (2. táblázat). Ezek közül hatot kukoricára, kettőt őszi búzára vonatkozóan. Ezen kívül tizenkét új, általunk megalkotott módszert teszteltünk: nyolcat kukoricára, négyet búzára. Mivel a kukoricát hazánkban az év első felében, az őszi búzát pedig az év második felében vetik, ennek megfelelően kerestük a dátumokat. Az irodalmi módszerek csupán a napi középhőmérséklet alapján becslik a vetés időpontját. Az általunk bevezetett új módszerek többsége nem csupán a levegő, de a talaj hőmérsékletét, illetve nedvességtartalmát is figyelembe veszi (3. táblázat).

3. táblázat. Az általunk újonnan bevezetett vetési időpont becselő módszerek kukoricára és búzára vonatkozóan. *doy*: adott nap sorszáma az évben; *T*: napi átlagos léghőmérséklet; *3dayTprec*: az elmúlt 3 nap csapadékösszege; *NWC*: a feltalaj normalizált nedvességtartalma (19. egyenlet); *soilT*: a feltalaj hőmérséklete.

<b>KUKORICA</b>	
kód	feltétel(ek)
M-I	<i>doy</i> amikor 7 napig $aT > 12^{\circ}\text{C}$
M-II	<i>doy</i> amikor $T > 12^{\circ}\text{C}$ for 7 days és $3\text{dayTprec} < 2\text{ mm}$
M-III	<i>doy</i> amikor $T > 12^{\circ}\text{C}$ for 7 days és $20\% < \text{NWC} < 80\%$
M-IV	<i>doy</i> amikor 7 napig $T > 12^{\circ}\text{C}$ és $20\% < \text{NWC} < 80\%$ és 10 napig $\text{soilT} > 10^{\circ}\text{C}$
M-V	<i>doy</i> amikor 5 napig $T > 12^{\circ}\text{C}$ és $20\% < \text{NWC} < 80\%$ és 5 napig $\text{soilT} > 10^{\circ}\text{C}$
M-VI	<i>doy</i> amikor 7 napig $T > 10^{\circ}\text{C}$ és $20\% < \text{NWC} < 80\%$ és 5 napig $\text{soilT} > 10^{\circ}\text{C}$
M-VII	<i>doy</i> amikor 7 napig $T > 10^{\circ}\text{C}$ és $20\% < \text{NWC} < 80\%$ és 7 napig $\text{soilT} > 10^{\circ}\text{C}$
M-VIII	<i>doy</i> amikor 5 napig $T > 11^{\circ}\text{C}$ és $20\% < \text{NWC} < 80\%$ és 5 napig $\text{soilT} > 11^{\circ}\text{C}$
<b>ŐSZI BÚZA</b>	
W-I	<i>doy</i> amikor 7 napig $T < 12^{\circ}\text{C}$
W-II	<i>doy</i> amikor 7 napig $T < 12^{\circ}\text{C}$ és $20\% < \text{NWC} < 80\%$
W-III	<i>doy</i> amikor 7 napig $T < 13^{\circ}\text{C}$ és $20\% < \text{NWC} < 80\%$
W-IV	<i>doy</i> amikor 7 napig $T < 14^{\circ}\text{C}$ és $20\% < \text{NWC} < 80\%$

Ezen új változók bevezetése az alkalmazott módszerekben azt a célt szolgálja, hogy a gazdák viselkedését egy másik aspektusból is figyelembe vegyük. Túl nedves talajra ugyanis nem lehet munkagépekkel ráhajtani a területen lévő sár következtében fellépő talajroncsolás miatt (Rotz and Harrigan, 2005; Eitzinger et al., 2012). Továbbá a túl száraz talaj a magok csírázását tekintve kedvezőtlen, így a gyakorlatban kerülendő. Az általunk alkalmazott módszerek esetén a 20-80%-os normalizált víztartalommal (*NWC*) rendelkező talajt tekintettük vetésre megfelelőnek. A normalizált víztartalmat az alábbi képlettel definiálhatjuk:

$$NWC = 100 \cdot \frac{\Theta - \Theta_r}{\Theta_s - \Theta_r}, \quad (19)$$

ahol  $\Theta$  a volumetrikus talajnedvesség, a  $\Theta_r$  és  $\Theta_s$  a reziduális és a telítési talajnedvesség. A normalizált víztartalom használatának előnye, hogy közvetve a talaj fizikai féleségét is figyelembe veszi. A felső küszöbérték (80%) beállítása során az 50, 60, 70 illetve 75%-ot is teszteltük, melyek közül az alacsonyabbak jobban megfelelnek a gyakorlatnak, azonban a 4M modell kimenő adatai alapján ezekben az esetekben sok évben nem találtunk vetésre megfelelő napokat. A 4M modell talajnedvesség szimulációjának pontosságát jelen munka keretében nem vizsgáltuk. A vetési időpont becslő módszer paramétereit úgy állítottuk be, hogy a megfigyelt vetési időpontokat minél jobban közelítsük. Ha a vetési kalendárium megalkotásához más modell eredményeit használjuk, e paraméterek újrakalibrálására lehet szükség. Erre a Biome-BGCMuSo szimulációi során nem volt szükség, mivel a vetési időpontok bemenő adatként szerepeltek (dátumok), nem kerültek újra kiszámításra az adott módszerek alapján.

Mivel a vetési gyakorlatban általában figyelembe veszik a talaj felső rétegének hőmérsékletét, így az M-IV – M-VIII módszerek során Sárvári és Futó (2001) valamint Nagy (2007) munkái alapján talajhőmérsékleti küszöböt is bevezettünk.

Az új vetési időpontot számító módszerekhez szükséges talajviszonyokat (talajnedvesség és-hőmérséklet) a 4M modell segítségével szimuláltuk, egy előfuttatás segítségével, ahol valószerűtlenül késői vetést állítottunk be.

A módszerek kifejlesztésénél igyekeztünk olyat létrehozni, mely a jelen korra átlagosan visszaadja a megfigyelt vetési időpontokat. Minden módszerre kiszámítottuk a területi átlagokat és szórásokat az 1951-2013 illetve a 2014-2100 időszakokra. A jövőbeli vetési dátumok 10 klímamodell eredményei alapján készültek a FORESEE adatbázis alapján. A különböző klímamodell-eredmények használatával becsülhetjük a vetési időpontok várható eltolódásának bizonytalanságát is.

### **3.6.1.1. Vetési időpont becslő módszerek rangsorolása**

A megfigyelt és szimulált vetési időpontokat néhány alapvető statisztikai mérőszámmal hasonlítottuk össze (medián, átlag, szórás, minimum, maximum, 5. és 95. percentilis). Továbbá két mintás Kolmogorov-Szmirnov próbát alkalmaztunk az eloszlások

összevetésére. Ez a próba megadja a legnagyobb távolságot az eloszlások között, és alkalmazható két adatsor hasonlóságának, avagy különbözőségének felmérésére.

A statisztikákon kívül egyszerűbb feltételt is használtunk az egyes módszerek elfogadhatóságának vizsgálatakor. Az alkalmazott kritérium szerint az a módszer felelt meg az elvárásainknak, amely országos átlagban legalább az esetek 90%-ában egy előre meghatározott időablakba eső időpontokat becsült a múltra vonatkozóan. Ez az időablak a megfigyelési adatbázis alapján került meghatározásra, a 2001-2010 időszakot tekintve. A kukorica számára ez az április 3. (93. nap) és május 14. (134. nap), a búza esetén, pedig a szeptember 18. (261. nap) és november 11. (315. nap) közé eső intervallumok. Gyakorlatilag ez azt jelenti, hogy az egész 63 éves időszakban (1951-2013) legfeljebb 6, a 2001-2010 időszakban legfeljebb egyetlen intervallumon kívül eső becsléssel rendelkező módszer fogadható el.

Az, hogy egy módszer elfogadható, nem jelenti azt, hogy az a legjobb módszer. További két szempont alapján két optimális vetési időpont meghatározó módszert választottunk ki. Az első szempont alapján azt a módszert választottuk ki, amely a legjobban tudta reprodukálni a megfigyelt vetési időpontokat. Ehhez egy egyszerű metrikát alkalmaztunk a becsült vetési időpontokra. Egy kétdimenziós döntési teret hoztunk létre, ahol a két tengely a vetési időpontok kívül esése az előre definiált időablakból, illetve az átlagos becsült dátum eltérése az átlagos megfigyelt dátumtól. Az origótól való távolság alapján rangsoroltuk a módszereket, és a legkisebb távolságra esőt választottuk a legjobbnak.

A második esetben azt vizsgáltuk, hogy melyik módszer adja vissza legjobban a 4M modellel történő szimulációk során a hazai termésátlagokat a 1990-2013 időszakra.

A munka további részében a második szempontból legjobbnak ítélt módszereket alkalmaztuk. Olyan módszereket akartunk választani, amelyekkel a jelenre vonatkozóan a lehető legpontosabb termésátlag-eredményeket kapjuk.

### **3.6.2. Öntözés és trágyázási scenáriók**

A vetési időponton kívül a műtrágyázás és az esetleges öntözés időpontja és mennyisége is bemenő adat a modellek számára. A 4M modell korábbi alkalmazásai során a kukorica esetén a nitrogén műtrágyázást 10 nappal a vetés elé ( $170 \text{ kgN ha}^{-1}$ ), míg a búza esetén 14 nappal a vetés elé, valamint 146 és 190 nappal a vetés utánra időzítették ( $30$ ,  $100$ , illetve  $20 \text{ kgN ha}^{-1}$ ). A fő szimuláció során ezt a megszokott művelési módot (amelyet

"business-as-usual", azaz BAU scenáriónéven hivatkozom a továbbiakban) használtuk minden évben, változatlanul. Az értékek a Magyar Tudományos Akadémia Agrártudományi Kutatóintézet munkatársai szerint tükrözik az országos átlagot, és a 4M modell korábbi használata során ezek az értékek adtak reális terméseredményeket országos léptékben. A valóságban az alkalmazott műtrágya mennyiségében térben jelentős különbségek lehetnek, melyet jelen munka során elhanyagoltunk. Öntözést nem alkalmaztunk. A műtrágyázás időpontját a vetés időpontjától számítjuk, így az évről évre változó vetési időponttal együtt a műtrágyázás időpontja is változik.

A megszokott művelési módon kívül különböző alternatívákat teszteltünk a jövőre vonatkozóan annak érdekében, hogy megvizsgáljuk a modellek és a jövőbeli termésmennyiségek érzékenységét a műtrágyahasználat vonatkozásában.

4. táblázat. **Kukoricára vonatkozó műtrágyázási forgatókönyvek.**

Időpont eltolás a szokásos beállításhoz képest	Trágyázás időpontja	Tavaszi trágyázás mennyisége	
		190 kgN ha <sup>-1</sup> (BAU+20 kgN ha <sup>-1</sup> )	250 kgN ha <sup>-1</sup> (BAU+80 kgN ha <sup>-1</sup> )
-5 nap	5 nappal a vetés előtt	F1	F3
+10 nap	20 nappal a vetés előtt	F2	F4

5. táblázat. **Búzára vonatkozó műtrágyázási forgatókönyvek.**

Időpont eltolás a szokásos beállításhoz képest	Tavaszi első trágyázás időpontja (mennyiség 83%-a)	Tavaszi második trágyázás időpontja (mennyiség 17%-a)	Tavaszi trágyázás mennyisége összesen	
			80 kgN ha <sup>-1</sup> (BAU-40 kgN ha <sup>-1</sup> )	160 kgN ha <sup>-1</sup> (BAU+40 kgN ha <sup>-1</sup> )
-10 nap	136 nappal a vetés után	180 nappal a vetés után	F1	F3
+10 nap	156 nappal a vetés után	200 nappal a vetés után	F2	F4

A kukorica esetén az egy időpontra eső műtrágyázás mértékét növeltük különböző mértékben, valamint a vetéstől számított időbeli távolságát változtattuk. A búzára vonatkozóan a két tavaszi műtrágyázás időpontját és mértékét változtattuk, úgy, hogy azok egymáshoz viszonyított időbeli távolsága és mennyiségének aránya ne változzon. A búza esetén a műtrágya mennyiségének csökkentését is vizsgáltuk a növelés lehetősége mellett. Ez a fajta logika értékes információt nyújthat a potenciálisan elérhető termésmennyiségről

("yield gap"). A kijuttatott műtrágya mennyisége és időpontja által kifeszített kétdimenziós térben létrejövő metszéspontok definiálták az egyes scenáriókat, 4-et kukorica, és 4-et búza esetén, melyeket rendre F1-F4 jelöléssel láttunk el (4. és 5. táblázat).

A kukorica esetén az öntözés fontossága kiemelkedő lehet, hiszen a nyári csapadékmentes időszakok száma és hossza a jövőben megnövekedhet (Bartholy et al., 2007; Bartholy and Pongrácz, 2010), ami kedvezőtlenül hat a kukorica fejlődésére. Mivel a búzát az év más időszakában vetik (nincs kivéve a nyári aszályos időszakoknak, mint a kukorica), öntözésének lehetőségével jelent dolgozatban nem foglalkoztunk. Három különböző öntözési scenáriókat alkalmaztunk a kukoricára. Mind a három esetben az öntözés időpontját a talaj nedvességi állapota szabályozta. A 4M modellbe beépített öntözési modulban egy ún. szárazsági index alapján történik az öntözés szükségességének megállapítása. Ez az érték a szárazság fennállása során ténylegesen keletkező anyag és a potenciálisan keletkező anyag mennyiségének a hányadosa, amely ha 0,5 alá csökken, automatikusan bekövetkezik az öntözés, melynek mértéke állítható. A három scenárió az öntözővíz mennyiségében tért el, 20, 30 valamint 40 mm csapadéknak megfelelő vízmennyiséget alkalmaztunk napi szinten. A modellkimenetetek közül kinyerhető az öntözővíz mennyisége, mely kijuttatásra került, valamint az öntözött napok száma. A 4M modellben öntözni kívánt napok manuálisan, dátum alapján nem állíthatók be.

A Biome-BGCMuSo modellnek előre meg kell adni az öntözni kívánt napok sorszámát az évben (doy: "day of year", Julián-dátum szerű számozás), melyek évente 7 alkalomra időzíthetők. Mivel a 4M modellből nem volt lekérhető az öntözött napok konkrét dátuma, és sok esetben azt láttuk, hogy az öntözött napok száma meghaladta a 7-et, így arra az elhatározásra jutottunk, hogy a szárazság-stressznek leginkább kitett időszakban egyenletesen osztjuk el a 7 napot a Biome-BGCMuSo szimulációi során.

A szárazság-stressznek leginkább kitett időszak meghatározásához az öntözés nélküli futások eredményeit használtuk fel. A modell több száz kinyerhető napi léptékű változója közül kettőt használtunk fel erre a célra. Az első a vegetáció által megkötött szénmennyiség az adott napon ( $vegC$ ,  $gC\ m^{-2}\ nap^{-1}$ ), mellyel elosztottuk az adott napon elszáradt vegetáció szén tartalmát ( $spsc\_vegC$ ,  $gC\ m^{-2}\ nap^{-1}$ ). Ezzel megkaptuk, hogy a növény mekkora hányada száradt el adott napon a szárazságstressz hatására. Mind a 10 klímamoddellel, minden rácspontra és minden év minden napjára kiszámítottuk ezt az értéket, majd képeztünk egy térbeli, időbeli és multi-modell átlagot. Amikor ez az érték

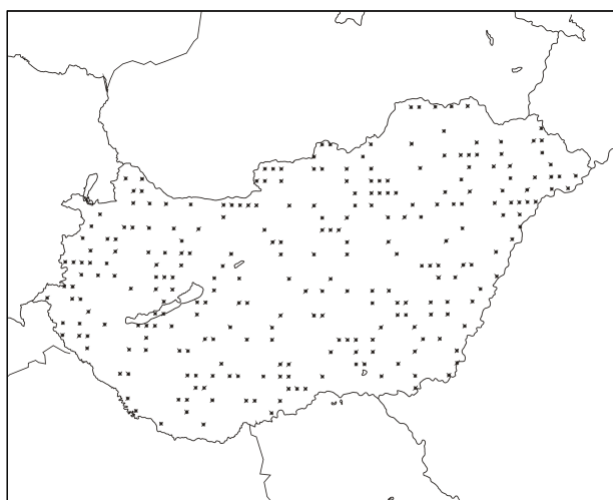
meghaladta 0,01-et azaz az 1%-ot, akkorra időzítettük az öntözési időszak kezdetét, és amikor újra ez alá csökkent, akkorra a végét.

Habár a dátumok nem, de az előntözött víz mennyisége adott évre a 4M modell kimenő adatai között szerepel, mely térben és időben változó, és megadja, hogy adott rácsponton adott évben a 4M modell mennyi vizet öntözött el. Így a 4M szimulációja során előntözött víz mennyiségét "öntöztük el" a Biome-BGCMuSo szimulációi során is, egyenletesen elosztva hét napon. Amikor adott évben adott rácsponton nem történt öntözés, akkor a Biome-BGCMuSo-val sem öntöztünk.

### 3.7. Megfigyelési adatok

Ebben a fejezetben áttekintjük a validációs és kalibrációs célra használt megfigyelési adatokat.

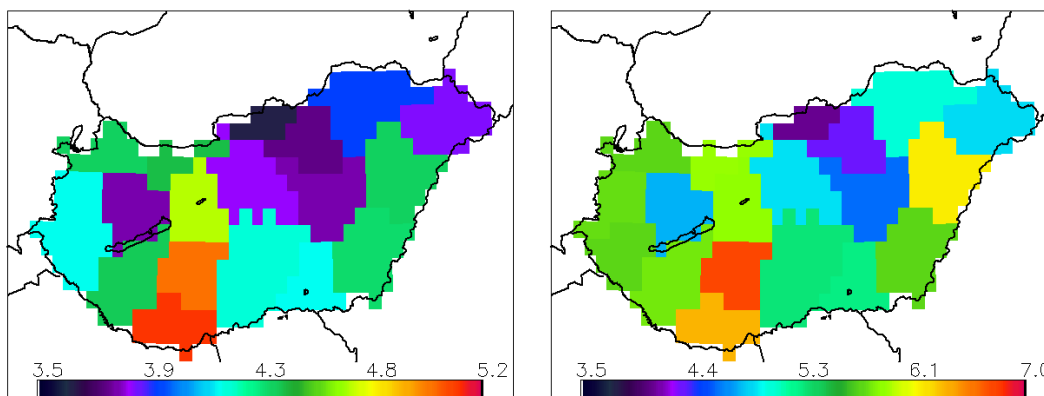
A vetési időpontok validálásához 294 hazai gazdaság feljegyzését használtuk fel (Dobor et al., 2016). Az gazdaságok anonimitása miatt a földrajzi elhelyezkedésük csak megközelítőleg ismert (9. ábra). Az adatbázis a 2001-2010 időszakra búzára és kukoricára ad információt a vetési időpontokról, és jól tükrözi a hazai gazdák szokásait.



9. ábra. A vetési időpont adatbázisban szereplő gazdaságok megközelítő földrajzi elhelyezkedése.

A Központi Statisztikai Hivatal (KSH) megyei szintű feljegyzéseit ([https://www.ksh.hu/agrarcenzusok\\_hosszu\\_idosorok\\_tablak](https://www.ksh.hu/agrarcenzusok_hosszu_idosorok_tablak)) használtuk a szimulált őszi búza és kukorica termésátlagok kalibrációjára és validációjára, melyek az 1986-2015 időszakra álltak rendelkezésre (10. ábra). A termésátlag a KSH módszertana szerint a termés mennyiségének és az adott megyében adott gabonatípus vetése céljából művelés alá

vont terület hányadosa alapján származtatott érték ( $t\ ha^{-1}$ ). A megyei termésátlagok bizonytalanságát a kukorica esetén 4%-ra, a búza esetében 3,4%-ra becsülték a KSH munkatársai (Major Tamás és Árva Katalin, személyes megkeresés).



10. ábra. A búza (balra) és a kukorica (jobbra) átlagos megyei termésátlagai ( $t\ ha^{-1}$ ) a KSH adatbázisa alapján az 1986-2015 időszakra vonatkozóan a FORESEE adatbázis rácsára vetítve.

A Biome-BGCMuSo modell által szimulált szén-dioxid fluxusok validációjára a Hegyhátsági ún. eddy-kovariancia (EK) mérések eredményeit használtuk (Haszpra et al., 2005; Barcza et al., 2009a; Tóth et al., 2010). Az EK módszer a felszín és a légkör közötti függőleges szén-dioxid csere mértékét a szén-dioxid keverési arány, valamint a szélesebbé igen sűrű, 4-20 Hz frekvenciával történő mérése alapján becsli. Ezzel a módszerrel egy adott terület nettó szén-dioxid kicserélődését (NEE; lásd 3.1. fejezet) határozhatjuk meg. A mérés forrásterülete ("footprint"-je), vagyis az, hogy milyen területről érkező információt mértünk, a meteorológiai viszonyok függvényében változik (Schmid and Oke, 1990; Schmid, 1994; Barcza et al., 2009b).

Hazánkban három mérőhelyen folynak hosszú távú EK mérések, főként természetes gyep felett. Azonban a Vas megyei Hegyhátsálon üzemelő mérőállomás, amelyet az ELTE Meteorológiai Tanszék és az Országos Meteorológiai Szolgálat együttesen tart fenn, két szinten rendelkezik EK műszeregyüttessel. Az alacsonyabb, 3 méteres magasságban lévő állomás az Antenna Hungária Rt. üzemeltetése alatt álló TV adótorony kertjében a gyep szénmérlegét méri, míg a toronyra szerelt, 82 m magasságban elhelyezkedő műszeregyüttes forrásterülete egy heterogén, kisparcellás mezőgazdasági terület. A mezőgazdasági terület szénmérlegének mérése 1997 óta folyamatos (<http://nimbus.elte.hu/hhs/>). Habár pontosan nem ismert, hogy milyen gabonákat termeltek ezen időszak alatt a mért területen, mégis van rá lehetőség, hogy a modelleredményeket



valamilyen szinten összehasonlítsuk a mérésekkel. Korábbi kutatások kimutatták, hogy általában közel fele-fele arányú az őszi és tavaszi vetésű gabonák hozzájárulása a mért fluxusokhoz (ami a régióban főként őszi búza és kukorica, (Barcza et al., 2009b).

### **3.8. Modellkalibráció**

#### **3.8.1. GLUE módszertan**

A modellek által használt bemenő paraméterek értéke sokszor kevésbé ismert, illetve gyakran előfordul, hogy értékük nem egy mérhető tulajdonság, hanem a tapasztalati képletek együtthatója, melynek nincs konkrét fizikai jelentése. Amennyiben rendelkezünk mérési adatokkal arra a mennyiségre, amit modellezni szeretnénk, az első lépés sok esetben e paraméterek beállítása, azaz a kalibráció (vagy más szóval paraméterbecslés, vagy optimalizálás).

Jelen munkában a kalibrációt az ún. GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) módszerrel végeztük el (Beven and Binley, 1992, 2014; Beven and Freer, 2001), melyet először hidrológiai modellek kalibrációjához fejlesztettek ki, de a későbbiekben más tudományterületek is átvették (Mo and Beven, 2004; Montanari, 2005; Gelybó, 2014).

A módszer alapja, hogy az ismeretlen paraméterek értékeit véletlenszerűen, de egyszerre változtatjuk bizonyos előre meghatározott intervallumon belül. Első lépés, hogy a paraméterek közül kiválasztjuk azokat, melyekre a modell érzékeny. Ezt előzetes tapasztalatok, valamint érzékenységvizsgálat alapján tehetjük meg. Azután ún. Monte Carlo szimulációt végzünk, azaz random módon előállított paraméter-együttesekkel nagyszámú modellfuttatást végzünk, úgy, hogy minden paraméteregyüttes egy-egy lehetséges beállításnak felel meg. Az így kapott eredményeket mért értékekkel vetjük össze, és olyan paraméteregyüttest keresünk, mely jobb eredményt adott a többinél.

Az egyes modellfutasok jóságának vizsgálatát különböző misfit vagy likelihood függvényekkel tehetjük meg. A szakirodalomban megjelenő különböző likelihood függvények számos kérdést vetettek fel a jó mérőszám kiválasztásával kapcsolatban. Jelen munkában Stedinger és munkatársai (2008) munkáját vettük figyelembe, akik az alábbi mérőszámot javasolták, ami alapján a likelihood származtatható:

$$f_{\theta|Q}[\theta|Q] = \kappa \cdot \exp\left\{-\frac{n}{2} \cdot \frac{1 - R^2(\Theta)}{1 - R^2(\Theta_{MLE})}\right\}, \quad (20)$$

ahol  $Q$  a kalibrációhoz felhasználni kívánt megfigyelések vektora,  $\Theta$  a modellparaméterek vektora, azaz egy adott paraméteregyüttes.  $\kappa$  egy skálázási konstans,  $n$  a megfigyelések száma, valamint az  $R^2$  statisztikák a következőképpen írhatók fel:

$$R^2(\Theta) = \left[1 - \frac{S_\varepsilon^2}{S_Q^2}\right], \quad (21)$$

$$R^2(\Theta_{MLE}) = \left[1 - \frac{\hat{\sigma}_\varepsilon^2}{S_Q^2}\right], \quad (22)$$

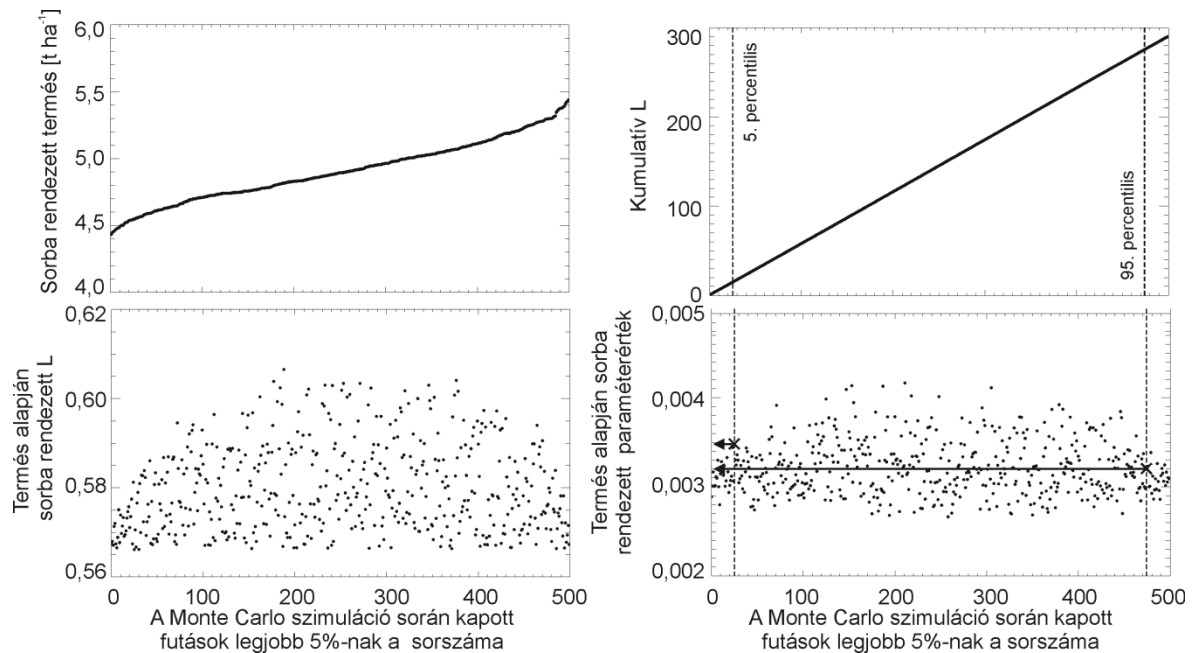
ahol  $S_Q^2$  a megfigyelések varianciája,  $S_\varepsilon^2$  a modelleredmények átlagos négyzetes hibája, és  $\hat{\sigma}_\varepsilon^2$  a modellhiba varianciájának maximum likelihood becslése.

Minden paraméteregyütteshez, azaz a Monte Carlo szimuláció minden futásához tartozik egy, a 20. egyenlettel kiszámolt likelihood érték. A nagyobb értékek jobb egyezést mutatnak a megfigyelések és modelleredmények között.

Ha a likelihood értékeket összevetjük a paraméterek értékeivel, megállapíthatjuk, hogy van-e az adott paraméternek olyan beállítása, amely mellett a modell jobb eredményt adott. A GLUE módszernél széles körben használt ún. "dotty plot" ábrák segítenek a kalibráció végső kiértékelésében. A "dotty plot" esetén az x tengelyen ábrázoljuk a paraméterértéket, az y tengelyen pedig a likelihood értéket. Szigorúan véve akkor beszélhetünk likelihood függvényről, ha annak integrálja 1-et ad ki (20. egyenlet). Nagy számú modellfuttatás esetén így az egyes likelihood értékek nagyon kicsik lesznek, ezért a könnyebb interpretálás érdekében 0 és 1 közé skáláztuk fel a 20. egyenlettel kiszámolt likelihood értékeket, és a továbbiakban L értéknek nevezzük őket. Mivel a magasabb L érték jobb eredményekre utal, a kalibráció szempontjából az az ideális, ha valamilyen mintázatot figyelhetünk meg a "dotty plot" ábrán, amely jelzi, hogy a paraméter mely értékei mellett kapunk jobb eredményt. A feladat az, hogy megtaláljuk azokat a paramétereket, melyek változtatásával javíthatjuk a modelleredményeket. Azonban előfordul, hogy a modell nem különösebben érzékeny az adott paraméter értékére. Sok

paraméter esetén nem figyelhető meg jó kalibrálhatóság, ez az ún. ekvifinalitás jelenség, amit Beven (2006) részletesen tárgyal.

A kalibrált paraméterértékek meghatározására növekvő sorrendbe rendeztük az L értékeket és vagy a legnagyobb, vagy a legjobb 5%-hoz tartozó paraméterértékek átlagát tekintettük az új paraméterértéknek. Kiszámítottuk továbbá a legjobb 5%-hoz tartozó L értékek ferdeségi együtthatóját is, ami megadja, hogy mennyire nem szimmetrikus az értékek eloszlása. A ferdeség negatív, ha az eloszlás sűrűségfüggvénye a szimmetrikustól balra, és pozitív, ha jobbra nyúlik el.



**11. ábra. A GLUE módszerrel történő bizonytalanság meghatározásának bemutatása egy példán keresztül. A Monte Carlo szimuláció során kapott futások legjobb 5%-ának megőrzése után az L (bal alsó ábra), a paraméter értékeit (jobb alsó ábra) valamint a termést (bal felső ábra) az utóbbi alapján sorba rendezzük. Az ily módon kumulált L értékek 5. és 95. percentilise által kijelölt paraméter értékek adják a bizonytalanság alsó és felső határát (keresztek és nyilak a jobb alsó ábrán).**

A GLUE módszer, mint azt a neve is mutatja, lehetőséget ad a modelleredmények bizonytalanságának becslésére is (Beven and Freer, 2001; Prihodko et al., 2008). A kalibrált paramétereken kívül két további értékhez állítunk elő, melyekkel 90%-os bizonytalansági intervallumot fedhetünk le.

A bizonytalanság kiszámításánál már kizárólag a legjobb 5%-hoz tartozó L, valamint a hozzájuk tartozó paraméter értékeket, továbbá a modell által számított termésátlagokat vesszük figyelembe. Növekvő sorba rendezzük mind a három

értékhalmozta a termésátlagok alapján (12. ábra, bal felső és a két alsó ábra). Ezek után a kumulatív L értéksor (12. ábra, jobb felső ábra) 5. és 95. percentiliséhez tartozó paraméteregyütteseket vesszük rendre a bizonytalanság alsó és felső határának (Prihodko et al., 2008). Az alsó és felső határra kapott parametrizációkkal futtatott modellszimulációk eredményeinek különbségét vettük a modellfutások bizonytalanságának.

### **3.8.1.1. A 4M kalibrálása**

A 4M modellt őszi búzára és kukoricára kalibráltuk az 1986-2013 időszak megfigyelési adatai alapján. Először a paraméterek egy nagyobb csoportját változtattuk egyszerre egy 10000 futtatást tartalmazó Monte Carlo szimuláció során. Mivel megyei szintű termésátlagok állnak rendelkezésre, ezért a futási idő csökkentése érdekében megyénként egy rácspontra futtattuk a 4M modellt a 10000 különböző paraméteregyüttesel. Azokat a rácspontokat választottuk ki, amelyek korábbi futtatások során a megyei átlagokhoz közeli termésátlagokat produkáltak. A likelihood értékek meghatározásánál a 19 megye megfigyeléseit vetettük össze a 19 megyét reprezentáló pixelekre végzett 4M futtatások eredményeivel. A "dotty plot" ábrákat áttekintve kiválasztottuk azokat a paramétereket, melyekre a modell érzékenységet mutatott. Az intervallumok felülvizsgálása után egy újabb 10000-es szimulációt végeztünk, és ennek segítségével beállítottuk a modell paramétereket. A paraméterek becslése a legjobb 5% L-hez tartozó értékek alapján történt.

### **3.8.1.2. A Biome-BGCMuSo kalibrálása**

A Biome-BGCMuSo modell kalibrálása során szintén a GLUE módszert alkalmaztuk. A kalibrációt egy pontra, a hegyhátsági mérőállomást tartalmazó FORESEE rácspontra végeztük el. Korábbi tapasztalatok alapján elmondható, hogy ez a terület a megyei átlagoknak megfelelően viselkedik a termésátlagokat tekintve. Így a Vas megyei termésátlagokkal kalibráltuk a búza és kukorica pontbeli modellfutásait az 1986-2013-as időszakra. A modell a termés szénmennyiségét becsli, így a modelleredményeket La Scala és munkatársai (2006), valamint Loomis és munkatársai (1979) alapján váltottuk át a KSH feljegyzéseivel összevethető mértékegységre ( $t\ ha^{-1}$ ). Ezek alapján először a szárazanyag tömegét határoztuk meg (ami megközelítőleg 85%-a a teljes biomasszának), majd a termés szén-aránya alapján megbecsültük a termés tömegét hektáronként (a szárazanyag kb. 45%-a szén).

20000 futást tartalmazó Monte Carlo szimulációt végeztünk búzára és kukoricára külön-külön, irodalmi adatok alapján beállított modellparametrizációval. A futtatásokat a SZTAKI Desktop Grid erőforrásainak a segítségével végeztem el (lásd 1.1.2.2. fejezet; Horváth et al., 2014).

A kalibráció helyszínére természetlag és szénfluxusmérések is rendelkezésre álltak, azonban utóbbiak vegyes mezőgazdasági területről származnak, és egyszerű módszerrel nem különíthetők el gabonánként (legalábbis nem napi szinten; Barcza et al., 2009b), így nem használhatók fel közvetlenül az egyes gabonákra vonatkozó paraméterek kalibrálásához. A célunk az volt, hogy a természetlagokra történő optimalizáláson túl a szénfluxusokat is valamilyen közvetett módon figyelembe vegyünk.

Az L értékek kiszámításához a természetlagokra vonatkozó KSH megfigyeléseket és a modelleredményeket vetettük össze. Azonban különböző indexeket számítottunk ki a mért és modellezett GPP értékek között az alábbiak alapján, amelyet mint szűrőt alkalmaztunk. A napi léptékű mért és modellezett GPP értékek évenkénti maximumát vetettük össze, mivel a próbafuttatások során azt tapasztaltuk, hogy a természetlagra történő optimalizáció következtében a GPP értékek sok esetben irreálisan lecsökkennek, amit igyekeztünk elkerülni. Ennek értelmében a módszer kifejlesztése során a mért éves maximum GPP kétszeresének a 90, 80, 70 illetve 60%-át követeltük meg a modellszimulációk eredményeiben (a kétszeres szorzót a hegyhátsági mérések reprezentativitása indokolja; Barcza et al., 2009b). A "jósági" indexek értékét az adta meg, hogy ezek a feltételek a 10 évből hányszor teljesülnek. A kiértékelések során végül a 60%-os kitélt követeltük meg legalább 8 évben, mindkét gabonára külön-külön. A továbbiakban csak a szűrésen átesett modellfutásokhoz tartozó L értékeket vettük figyelembe.

A kalibrált paraméteregyüttest a legnagyobb L-hez tartozó értékekre állítottuk be (maximum likelihood), mert országos szinten ez a beállítás jobb eredményt adott, mint a legjobb 5%-hoz tartozó értékek.

### **3.9. Validáció**

#### **3.9.1.1. A 4M validációja**

A 4M modell validációját a kalibráció után végeztük el az egész országra vonatkozóan. A futtatásokat az 1986-2013-as időszakra készítettük el a két vizsgált

gabonanövénnyel. Az így kapott  $1/6 \times 1/6$  fokos rácson lévő eredményekből megyei és országos átlagokat számítottunk, és azokat összevetettük a KSH feljegyzéseivel. A területi átlagok számításánál figyelembe vettük, hogy az egyes pixelekkal fedett területek mekkora mértékben járulhatnak hozzá a megye szántóföldjeihez. A rendelkezésre álló felszínborítottsági adatok nem adnak információt arról, hogy milyen gabona van az adott területen (ami nagy valószínűséggel évről évre változik), csupán hogy mekkora területen folyik szántóföldi művelés. Így a búzával és a kukoricával vetett területeket nem tudtuk elkülöníteni, azonban annyiban pontosítottuk becsléseinket, hogy a kevésbé művelt területek kisebb súllyal szerepeltek a megyei, illetve országos átlagok meghatározásakor.

### **3.9.1.2. A Biome-BGCMuSo validációja**

A pontbeli kalibráció után a termésátlagokra vonatkozóan országos szintű validációt végeztünk. A rácsponti eredményeket megyei szinten átlagoltuk, és az 1986-2013 időszakra vonatkozóan vetettük össze éves szinten a KSH termésátlag feljegyzéseivel.

A szénmérleg tekintetében pontbeli validációt végeztünk a hegyhátsági vegyes mezőgazdasági területre. A búzára és kukoricára kapott modellszimulációk eredményét átlagoltuk, és összehasonlítottuk a hegyhátsági EK mérésekkel. Ez esetben természetesen nem várhatunk el teljes egyezést, hiszen nem áll rendelkezésre pontos információ a területen vetett gabonákról, valamint a mérés forrásterülete nem csak mezőgazdasági területeket tartalmaz (pl. egy kis erdős folt is található a közelben). A mért és modellezett GPP, Reco és NEE szénáramokat hasonlítottunk össze napi szinten.

## **3.10. Az alkalmazott modellezési stratégia egyszerűsítései és korlátai**

Mint minden modellezési feladat, jelen munka is számos előfeltételezésen és egyszerűsítésen alapul, melyek korlátokat szabnak a valóság modellezhetőségének (Boote et al., 1995; Olesen et al., 2011).

Jelen kutatás alapvető hipotézise a business-as-usual megközelítés, mely feltételezi a mezőgazdasági termelésre jellemző jelenlegi állapot fennmaradását a jövőben. Ennek számos különböző aspektusa van. A modellezés során nem vesszük figyelembe a gabonák genotípusában fellépő esetleges változásokat, mint például a szárazságtűrőbb fajok nemesítését, valamint különböző hibridek elkülönítésére sincs lehetőség. Mivel a modellek

kalibrációja megyei szintű kukorica és búza termésmennyiségek alapján történt, így a modellezett növény egy átlagos, hazai kukoricát és búzát reprezentál.

Nem vesszük számításba invazív gyomok esetleges megjelenést, vagy különböző kártevők elszaporodását, melyek az éghajlatváltozás során komoly veszélyeket hordozhatnak (Rosenzweig et al., 2001). Elhanyagoljuk a növényeket érintő ózonkárokat (Van Dingenen et al., 2009), valamint a földhasználat-váltás lehetőségét. Feltételezzük, hogy térségünkben 2100-ig nem alakul ki olyan egészségügyi, társadalmi vagy politikai helyzet (pl. háború), mely alapjaiban változtatná meg a mezőgazdasági termelés lehetőségét és eszközeit (Pongratz et al., 2008).

A modellezés során minden hazai rácsontra minden évben vagy kukoricát, vagy búzát szimulálunk. Vetésforgó használatára a Biome-BGCMuSo modellel egyelőre nincs lehetőség, így a szimulációk egységessége miatt ezt nem vizsgáltuk, habár a 4M-el lenne rá lehetőség.

A mezőgazdasági művelés tekintetében alapvetően a napjainkban megszokott művelési stratégiákat követtük, azonban néhány esetben vizsgáltunk különböző alternatív beállításokat. Ezek elsődleges célja a modellek érzékenységeinek vizsgálata a szimulált termésmennyiségek vonatkozásában, nem pedig a jövőben javasolt művelési módok keresése (Birkás et al., 2013). A műtrágyázás mennyiségének növelésének komoly környezeti hatásai lehetnek (Sárdi, 2011; Nkoa, 2014). A helytelen műtrágyahasználat során növekedhet az élővizek nitrát tartalma, fokozódhat a felszíni vizek eutrofizációja és a talajok savassága, továbbá gyengülhet a növények kórokozókkal szembeni ellenálló képessége (Sárdi, 2011). Hazánkban 2006 óta nitrát rendelet van érvényben a környezet védelme érdekében (27/2006., II. 7. sz. kormányrendelet).

Az intenzív mezőgazdasági termelés komoly talajdegradációhoz és a talaj termőképességének, széntartalmának csökkenéséhez vezethet (Birkás, 2009; Birkás et al., 2012, 2015). Olyan művelési módokat kell kifejleszteni és elterjeszteni, melyek fenntartható módon képesek növelni, illetve fenntartani a talaj termőképességét (pl. talajtakarás, szervesanyag-védelem; Birkás et al., 2006, 2008). Számos kísérlet folyik, melyek során különböző talajművelési módok talajminőségre tett hatásait vizsgálják (pl. a Szent István Egyetem Hatvan melletti kísérleti telepén; Farkas et al., 2009), azonban e módszerek modellekkel történő szimulálása még nem, illetve csak részben lehetséges.

## 4. Eredmények

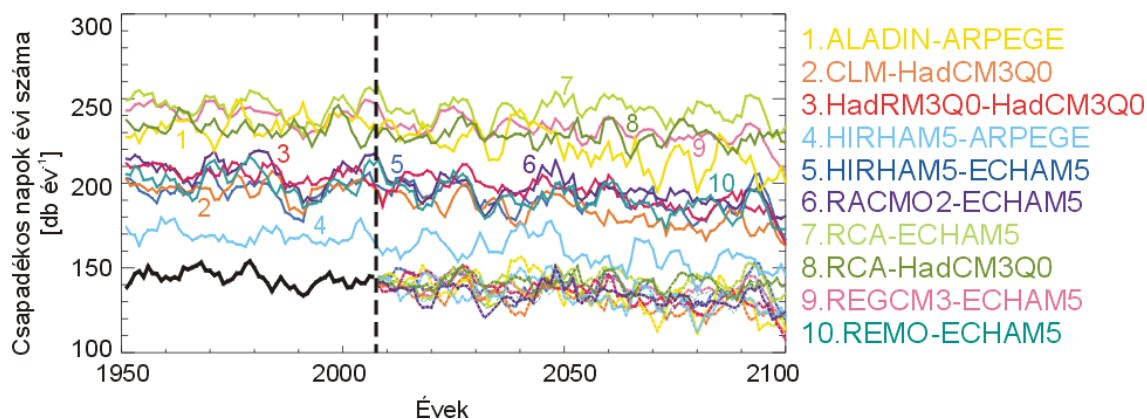
Az eredmények bemutatását a FORESEE adatbázisban szereplő klímaprojekciók áttekintésével kezdjük, mivel a további eredmények értelmezéséhez szükség van a jövőben várható éghajlati trendek számszerűsítésére. Ezt a különböző időjárásfüggő vetési időpont meghatározó módszerekkel kapott eredmények követik. Ezután rátérünk a modellszimulációk eredményeinek a tárgyalására. A modellek kalibrációjának és validálásának bemutatása után a jövőbeli becslések és különböző alternatív művelési módokkal kapott eredményeket tekintjük át. A fejezet végén a két modell eredményeinek szintézise kerül bemutatásra.

### 4.1. FORESEE adatbázis

A hibakorrekciónál során a múltbeli és jövőbeli klímodell-eredményeket korigáltuk a korábban bemutatott, eloszlásfüggvény-illesztésen alapuló módszerrel (3.2. fejezet). A nyers klímodell-eredményeket terhelő hiba (2. ábra, 3.2 fejezet) a korrekció után szinte nullára csökkent. A csapadék esetén minden modellre 2 mm alá, míg a minimum- és maximumhőmérséklet esetén rendre 0,05 és 0,1 °C alá csökkent 30 év átlagában a különbség a modelleredmények és a megfigyelések között. Az átlagok különbségén túl vizsgáltuk a csapadékra vonatkozó modelleredmények szórását, melyet a Dobor és munkatársai (2015) által közölt tanulmány mellékletében ismertettük. A modelleredmények és a megfigyelések szórásának hányadosa a korrekció után 1-hez közeli, így a megfigyelések és a korigált klímodellek szórása közel egyforma lett.

Az alkalmazott csapadékgyakoriság-korrekciónál hatását szemlélteti a 12. ábra, ahol az évi csapadékos napok számát ábrázoltuk a teljes célterület átlagát tekintve az 1951-2100 időszakra, a megfigyelések, a nyers klímodell-eredmények, valamint a hibakorigált modelleredmények alapján. Látható, hogy a nyers klímodell-eredmények különböző mértékben, de kb. 2-3-szor több csapadékos napot adnak a múltbeli időszakra, mint a megfigyelések, ami a hibakorrekciónál alapját képező feltevés alapján a jövőben is jelentős felülbecslést jelent. A hibakorigált modelleredményekben ez a különbség megszűnik.



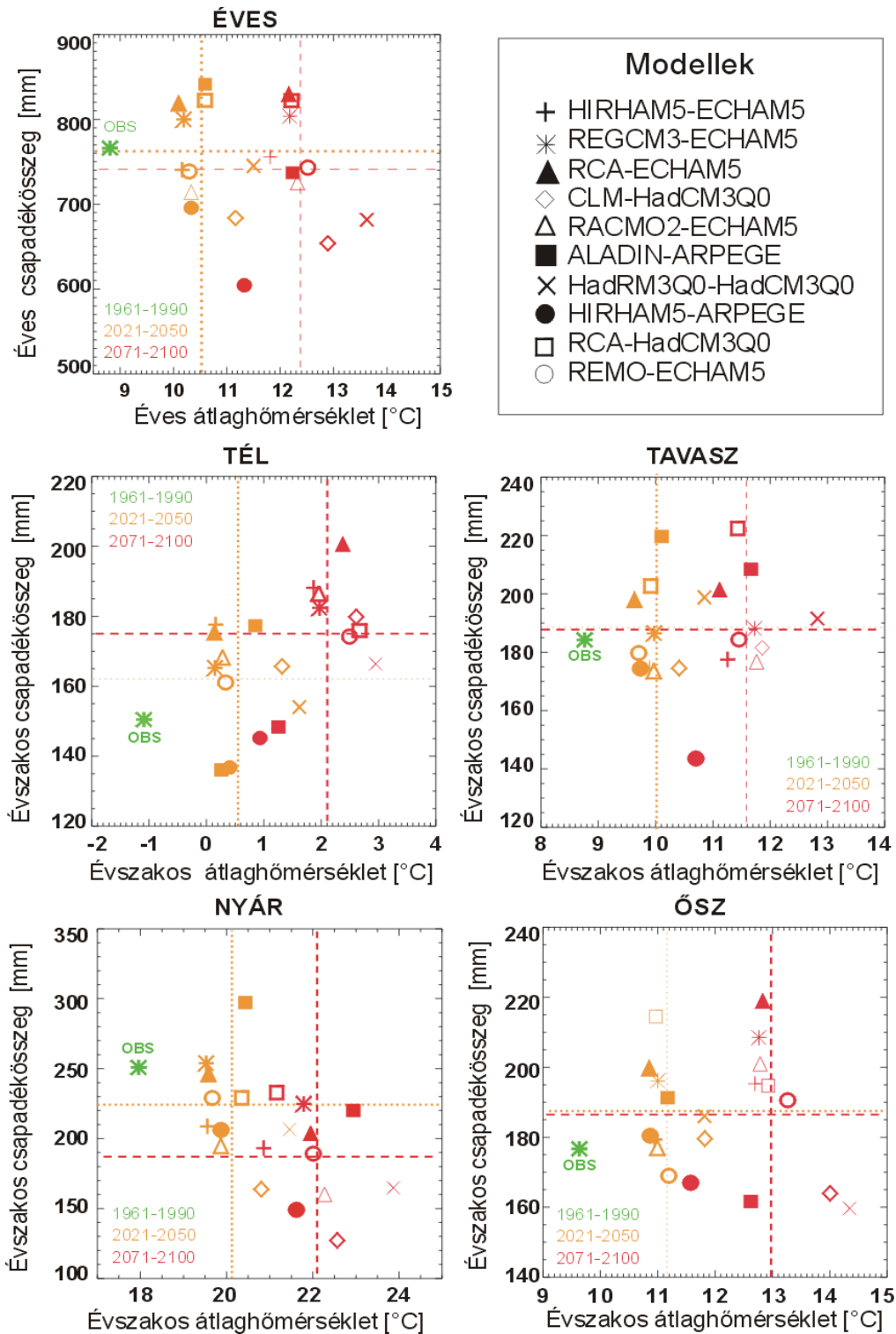


12. ábra. Térben átlagolt évi csapadékos napok száma a közép-európai célterületre, az 1951-2100 időszakra, 5 éves mozgóátlaggal simítva. A fekete vonal a megfigyeléseket, míg a folytonos színes vonalak a számokkal is jelzett nyers klímamodellek eredményeit mutatják. A jövőre vonatkozó, múltbeli megfigyelésekhez csatlakozó színes szaggatott vonalak a különböző hibakorrigált klímamodell-eredmények alapján becsült csapadékos napok számát reprezentálják.

Ezután röviden tekintsük át a FORESEE által projektált jövőbeli éghajlatot. Az adatbázisban lévő modelleredmények alapján várható változásokat hőmérséklet-csapadék diagramokon (ún. thermo-pluviogramokon) jelenítettük meg (13. ábra). Éves és évszakos bontásban is megjelenítettük az országos átlaghőmérsékletet és csapadékösszeget egy múltbeli referencia-időszakra (1961-1990) és két jövőbeli időszakra vonatkozóan (2021-2050, 2071-2100).

Megállapítható, hogy minden modell várható melegedést jelez, viszonylag kis modellek és évszakok közötti különbségekkel. A FORESEE alapján hazánk területére, a 2021-2050 időszakra  $1,7 \pm 0,46$  °C, míg a távoli jövőre  $3,5 \pm 0,62$  °C melegedésre számíthatunk a referencia-időszakhoz viszonyítva.

A hőmérséklettel ellentétben a várható csapadékváltozások klímamodelltől és évszaktól függően igen eltérő képet mutatnak. Éves átlagban 2021-2050-re  $2,9 \pm 56,4$  mm év<sup>-1</sup>, míg 2071-2100-ra  $27,5 \pm 72,6$  mm év<sup>-1</sup> csapadékcsökkenés várható az 1961-1990 időszakhoz képest. Azonban a változások évszakonként eltérőek lehetnek. A téli és tavaszi hónapok várhatóan csapadékosabbá válnak, 2021-2050-re  $11,2 \pm 15$  és  $3,6 \pm 15,8$  mm évszak<sup>-1</sup>, 2071-2100-ra  $25,1 \pm 17,9$  mm évszak<sup>-1</sup> és  $3,0 \pm 21,1$  mm évszak<sup>-1</sup> csapadéknövekedést becsülnek a modellek. Nyáron  $27,9 \pm 36,3$  mm évszak<sup>-1</sup> csapadékcsökkenésre lehet számítani a közeljövőben, mely csökkenés  $64,6 \pm 35$  mm évszak<sup>-1</sup> mértékűre nő a század végére. Az őszi csapadékváltozások nem mutatnak egyértelmű irányt, nagy a modellek közötti változékonyság.



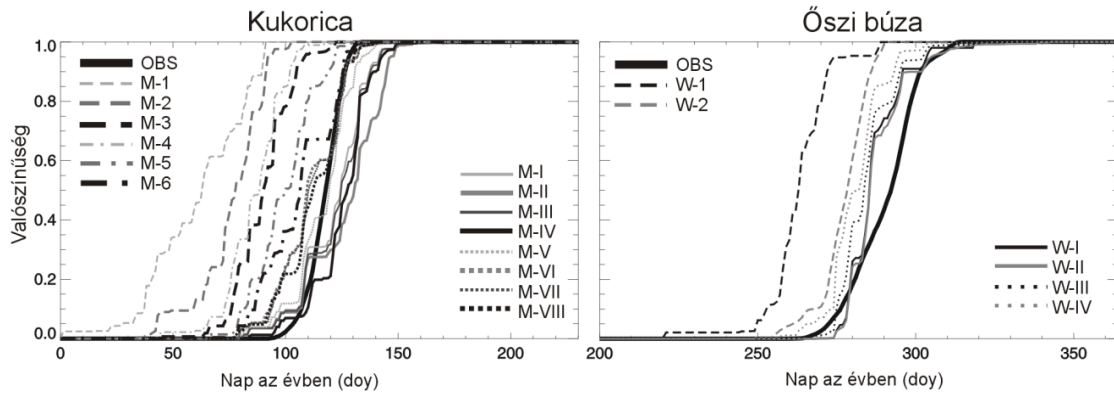
13. ábra. Csapadék-hőmérséklet diagramok (thermo-pluviogramok) éves és évszakos bontásban hazánk területére. Zöld csillag jelöli az 1961-1990 időszakra vonatkozó megfigyelések területi átlagát. Narancssárga és piros jelek mutatják rendre a 2021-2050 és 2071-2100 időszakra várható csapadék- és hőmérsékletviszonyokat. A különböző formájú jelek különböző klímamodell-szimulációk eredményét reprezentálják a jobb felső sarokban látható jelmagyarázatnak megfelelően. A szaggatott célkeresztek a két jövőbeli időszak multi-modell átlagát jelölik.

A FORESEE adatbázis létrehozásának lépéseit Dobor és munkatársai (2015) munkájában részletesen ismertették. Egy kérdőívet hoztunk létre az adatok publikálása előtt, hogy felmérjük a meteorológiai adatbázisokkal dolgozó kutatók (lehetséges felhasználók) igényeit. A kérdőív eredményeit közzétettük (Dobor et al., 2015), majd az igények figyelembevétele mellett igyekeztünk megfelelő felületet létrehozni az adatok közzététele érdekében. Doktori munkám részeként létrehoztunk egy honlapot az adatbázis számára, ahol a legfrissebb információk, publikációk, valamint az adatok is elérhetők (<http://nimbus.elte.hu/FORESEE>). Az adatokhoz történő hozzáférés két úton lehetséges. Egyrészt NetCDF kiterjesztésű fájlokat tölthetünk le, melyek az egész célterületet és időszakot lefedik. A másik lehetőség egy térképes lekérő felület használata ([http://nimbus.elte.hu/FORESEE/map\\_query](http://nimbus.elte.hu/FORESEE/map_query)), mellyel egy-egy rácsponti idősor letöltése egyszerűvé és felhasználóbaráttá vált. Ez esetben a honlapon egy oldalmenüben kereshetünk akár település szinten, vagy koordináták alapján, avagy egyszerűen a térképen egérgattintással rácspontot. Majd a kívánt időszak, a meteorológiai változó(k), és a klímamodell kiválasztása után egy egyszerű text (csv formátumú) fájlt tölthetünk le, ami a későbbiekben Microsoft Excelben is könnyen kezelhető, és nem igényel programozási tudást. Több rácspont adatainak együttes letöltésére is lehetőség nyílik (maximum 100). Az adatbázist elérhetővé tettük továbbá a Zenodo tudományos megosztó honlapon is, ahol önálló doi azonosítót kapott (doi: 10.5281/zenodo.9614). Több hazai és külföldi kutatás alapját képezte és képezi jelenleg is a FORESEE adatbázis, melyek során az éghajlatváltozás különböző hatásait vizsgálták, illetve vizsgáltuk (Galvánék et al., 2013; Farkas et al., 2014; Hlásny et al., 2014, 2016; Horemans et al., 2016).

## **4.2. Vetési kalendárium**

### **4.2.1. A vetési időpont becslő módszerek validációja**

Különböző időjárásfüggő módszereket teszteltünk a kukorica és a búza vetési időpontjának meghatározásához (3.5.1. fejezet; 2-3. táblázatok). Az összesen 20 módszerrel kiszámított dátumokat hazai megfigyelésekkel vetettük össze. A 14. ábrán láthatjuk a megfigyelések és a különböző módszerek által adott dátumok (doy) eloszlásfüggvényeit. Jelen munkában a vetési időpontokat csak az időjárás hatásának függvényében vizsgáltuk.



14. ábra. A megfigyelések és a különböző kukorica és búza vetési időpont becslő módszerek által adott dátumok eloszlása a 2001-2010 időszakra, 294 helyszínrre vonatkozóan. Az OBS a megfigyeléseket mutatja, míg az M-1 – M-6, M-I – MVIII, illetve W-1, W-2, W-I – W-IV a 2. és 3. táblázatban bemutatott módszereket jelöli.

Az eredmények azt mutatták, hogy egyik szakirodalmi módszer sem képes az elvárásoknak megfelelően (lásd 3.5.1.1 fejezet) becsülni a hazai vetési időpontokat. Kukorica esetén az M-1 – M-6 módszerek túl korai időpontokat adtak, így ezeket elvetettük. Búzára a W-1 módszer szintén túl korai időpontokat becsült, míg a W-2 esetén túl kicsi volt a kapott dátumok területi szórása, ami a módszerben alkalmazott képletre vezethető vissza, így ezeket a módszereket is elvetettük. A megfigyelések alapján hazánkban az északi és déli területek vetési időpontja között 5-7 nap különbség is lehet a búza esetén.

A kukoricára újonnan bevezetett módszerek esetén a hőmérsékletre vonatkozóan többnapos kritériumot állítottunk be (az M-6-hoz hasonlóan), melyet az M-I esetén 12°C-ra emeltünk, így az irodalmi módszerekben látható túl korai vetések mérséklődtek. A csapadékatatok bevonása irreálisan megnövelte a dátumok szórását, és számos esetben a dátumok kívül estek az előre definiált vetési ablakon (lásd 3.5.1.1 fejezet), így az M-II módszert elvetettük. A talajnedvesség bevonása a csapadékatatok helyett javított a becsléseken (M-III). Az M-IV módszer esetén a talajhőmérsékletet is figyelembe vettük, melynek további finomhangolásai az M-V – M-VIII módszerek. Mivel a vetési ablakot tekintve túl sok évben adtak kívül eső dátumokat, az M-IV és M-VI módszereket elvetettük.

Összességében a vetési időpontra vonatkozó megfigyeléseket az M-V módszer adta vissza a legjobban, az intervallumon kívül esések számát és a megfigyelésekhez viszonyított hiba által kifizített kétdimenziós döntési teret tekintve. Azonban a hazai

termésátlagok reprodukálása tekintetében az M-VIII módszer mutatkozott a legjobbnak, az 1990-2013-as időszakra csupán  $-0,05 \text{ t ha}^{-1}$  eltérést mutatott a KSH feljegyzéseihez képest.

A búza esetén a már legegyszerűbb W-I módszer is elfogadható eredményt adott a vetési ablakot tekintve. A W-II és W-III módszereket elvetettük a nagyszámú kívül eső dátum miatt. Mindkét elfogadható módszer kissé alulbecsli a megfigyeléseket. A termésátlagok tekintetében a W-IV állt a legközelebb a megfigyelésekhez,  $0,04 \text{ t ha}^{-1}$  átlagos eltéréssel.

A 14. ábrát tekintve láthatjuk, hogy egyik módszer sem tudta tökéletesen visszaadni a megfigyeléseket, aminek számos egyéb oka lehet. Ilyen például a vetéshez szükséges munkagépek foglaltsága. A jövőben gyökeresen megváltozhatnak a művelési technológiák, és új, szárazságtűrő fajok kinevelése következtében megváltozhat a növények tenyészidőszaka, és így a vetés időzítése is. Ezeket a tényezőket jelen kutatás során módszertani okokból nem vettük figyelembe.

Megvizsgáltuk, hogy a különböző, elfogadhatónak ítélt vetési időpont meghatározó módszerek által becsült vetési időpontok a jövőben várhatóan hogyan alakulnak. A kapott eredményeket Dobor és munkatársai (2016) tanulmányában tárgyaljuk részletesebben. A kukorica esetén az átlagos várható előretolódás mértéke átlagosan  $4 \pm 3$  nap 2021-2050-re, míg 2071-2100-ra  $12 \pm 3$  nap az 1961-1990 időszakhoz viszonyítva. Búza esetén az eltolódás iránya ellenkező előjelű, ez esetben a vetési időpont várhatóan későbbre tolódik,  $9 \pm 3$  nappal a közeljövőre, míg  $17 \pm 6$  nappal a távoli jövőre. A kiválasztott vetési módszerekkel kapott, jövőre vonatkozó termésátlagokat összevetettük a fix napos módszerrel kapott eredményekkel. Míg az időjárásfüggő vetési idő kis mértékben magasabb értékeket adott a kukorica esetén, mindez a búzáról nem mondható el. A fix napos esetben magasabb termésátlagokat kaptunk búzára, mint a W-IV módszerrel (Dobor et al., 2016). Mivel más nemzetközi irodalom is alátámasztotta ezt a megállapítást (Torriani et al., 2007; Vanuytrecht et al., 2015), így a búza esetén nem használtuk a változó vetési időpontot a továbbiakban, hanem egy alternatív "ajánlott módszert" dolgoztunk ki. Ez alapján szeptember 25-től indulva november 11-ig keresünk olyan napot, amikor a talaj megfelelő állapotban van ahhoz, hogy a munkagépekkel ráhajtsanak ( $20\% < \text{NWC} < 80\%$ ). Így olyan módszert kaptunk, amely időjárásfüggő, azonban nem ad szisztematikus változást a jövőre vonatkozóan.

### **4.3. A kalibráció eredményei**

A kalibrációt először a 4M, majd a Biome-BGCMuSo modellre mutatjuk be. Az alkalmazott módszer modellspecifikus jellemzőit az 1.7.1.1 és 1.7.1.2 fejezetekben tekintettük át.

#### **4.3.1. 4M**

A 4M modellel hazai használata nagy múltra tekint vissza, ezért rendelkezésre álltak előre beállított növényparametrizációk, melyek közül a kukoricával és az őszi búzával foglalkoztunk (Fodor and Kovács, 2003; Kovács and Fodor, 2005; Fodor, 2006, 2012; Fodor and Pásztor, 2010; Fodor et al., 2014).

A próbaszimulációk kimutatták, hogy a növényi paraméterek pontosítására, azaz kalibrációra van szükség, melyet a GLUE módszerrel (lásd 3.7.1 fejezet) végeztünk el 19 hazai rácspontra. Megyénként egy rácspontot választottunk, melynek a termésátlaga a legközelebb állt a megye átlagához (lásd 3.8.1.1 fejezet).

A 6-7. táblázat foglalja össze azokat a paramétereket, amelyeket a kalibráció első lépésében változtattunk annak érdekében, hogy megtaláljuk, mely paraméterekre érzékeny a modell a termésátlagok tekintetében. Láthatjuk a paraméterek eredeti értékét és az intervallumot, melyen belül randomizáltuk őket. A táblázat utolsó oszlopában jelöltük, mely paraméterekre találtuk érzékenynek a modellt.

Második körben kizárólag az érzékeny paramétereket változtattuk a 8. táblázatban megadott értékhatárok között.

Az 15. és 16. ábrán láthatjuk az érzékeny paraméterekre vonatkozó "dotty plot" ábrákat kukoricára és búzára. Minden paraméter esetén a sorba rendezett L értékek közül a legnagyobb 5%-ba eső paraméterértékek átlagát vettük figyelembe, és állítottuk be, mint kalibrált paramétert (Prihodko et al., 2008). A 8. táblázat utolsó oszlopában láthatjuk a kalibráció után kapott paraméterértékeket. Az új parametrizációval készült futtatások összevetését a megyei termésátlagokkal a 4.4.1 fejezetben tárgyaljuk.

6. táblázat. A kalibráció első lépésében változtatott paraméterek intervallumai és érzékenységei az őszi búza esetén.

Sorszám	Paraméter neve	Minimum	Maximum	Megjegyzés
1	Maximális gyökerezési mélység [cm]	126	234	
2	Fajlagos levélfelület [m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> ] a bokrosodás alatt	17,5	32,5	
3	Fajlagos levélfelület [m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> ] a szárbaindulás alatt	15,75	29,25	
4	Fajlagos levélfelület [m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> ] a kalászolás alatt	14	26	
5	Fenofázisok hossza, <i>GDD</i> [°C]: kelés	35	65	
6	Fenofázisok hossza, <i>GDD</i> [°C]: bokrosodás	175	325	
7	Fenofázisok hossza, <i>GDD</i> [°C]: szárbaindulás	210	390	
8	Fenofázisok hossza, <i>GDD</i> [°C]: kalászolás	105	195	
9	Fenofázisok hossza, <i>GDD</i> [°C]: virágzás	105	195	
10	Fenofázisok hossza, <i>GDD</i> [°C]: szemtelítődés	525	975	
11	Fotoszintézis 'a' paraméter	0,00119	0,00221	érzékeny
12	Fotoszintézis 'b' paraméter	0,441	0,819	érzékeny
13	Vízstressz 'c' paraméter	0,45	2,55	érzékeny
14	Elosztás gyökérbe [%] bokrosodás alatt	A többi elosztás érték alapján számolódik úgy, hogy fenofázisonként a különböző részekbe történő elosztás 100%-ot tegyen ki.		
15	Elosztás gyökérbe [%] szárbaindulás alatt			
16	Elosztás gyökérbe [%] kalászolás alatt			
17	Elosztás gyökérbe [%] virágzás alatt			
18	Elosztás gyökérbe [%] szemtelítődés alatt			
19	Elosztás szárba [%] szárbaindulás alatt	37,8	70,2	
20	Elosztás szárba [%] kalászolás alatt	56	104	
21	Elosztás szárba [%] virágzás alatt	56	104	
22	Elosztás szárba [%] szemtelítődés alatt	3,5	6,5	
23	Elosztás levélbe [%] bokrosodás alatt	49	91	
24	Elosztás levélbe [%] szárbaindulás alatt	14,7	27,3	
25	Elosztás levélbe [%] kalászolás alatt	3,5	6,5	
26	Elosztás levélbe [%] virágzás alatt	3,5	6,5	
27	Elosztás termésbe [%] virágzás alatt	3,5	6,5	
28	Elosztás termésbe [%] szemtelítődés alatt	63	117	
29	Növényessűrűség	350	650	
30	Beavatkozás mélysége [cm]	21	39	
31	Trágyázás mennyisége, okt. 1 [kgN ha <sup>-1</sup> ]	21	39	
32	Trágyázás mennyisége, márc. 10 [kgN ha <sup>-1</sup> ]	70	130	
33	Trágyázás mennyisége, ápr. 23 [kgN ha <sup>-1</sup> ]	14	26	

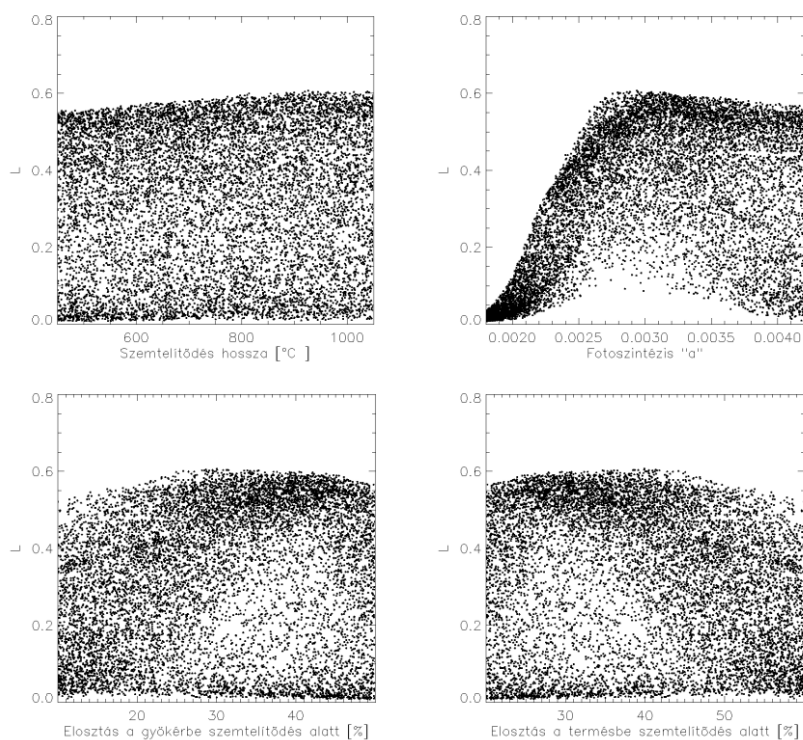
7. táblázat. A kalibráció első lépésében változtatott paraméterek intervallumai és érzékenységei a kukorica esetén.

Sorszám	Paraméter neve	Minimum	Maximum	Megjegyzés
1	Maximális gyökerezési mélység [cm]	119	221	
2	Fajlagos levélfelület [m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> ] a levélnövekedés felfutó szakaszában	14	26	
3	Fajlagos levélfelület [m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> ] a levélnövekedés lineáris szakaszában	10,5	19,5	
4	Fajlagos levélfelület [m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> ] virágzás alatt	10,5	19,5	
5	Fenofázisok hossza, GDD [°C]: kelés	35	65	
6	Fenofázisok hossza, GDD [°C]: levélnövekedés felfutó szakasza	105	195	
7	Fenofázisok hossza, GDD [°C]: levélnövekedés lineáris szakasza	350	650	
8	Fenofázisok hossza, GDD [°C]: virágzás	87,5	162,5	
9	Fenofázisok hossza, GDD [°C]: szemtelítődés	560	1040	érzékeny
10	Fotoszintézis 'a' paraméter	0,00259	0,00481	érzékeny
11	Fotoszintézis 'b' paraméter	0,441	0,819	
12	Vízstressz 'c' paraméter	1,4	2,6	
13	Elosztás gyökérbe [%] a levélnövekedés felfutó szakaszában	A többi elosztás érték alapján számolódik úgy, hogy fenofázisonként a különböző részekbe történő elosztás 100%-ot tegyen ki.		
14	Elosztás gyökérbe [%] a levélnövekedés lineáris szakaszában			
15	Elosztás gyökérbe [%] virágzás alatt			
16	Elosztás gyökérbe [%] szemtelítődés alatt			érzékeny
17	Elosztás szárba [%] a levélnövekedés felfutó szakaszában	3,5	6,5	
18	Elosztás szárba [%] a levélnövekedés lineáris szakaszában	35	65	
19	Elosztás szárba [%] virágzás alatt	52,5	97,5	
20	Elosztás szárba [%] szemtelítődés alatt	17,5	32,5	
21	Elosztás levélbe [%] a levélnövekedés felfutó szakaszában	45,5	84,5	
22	Elosztás levélbe [%] a levélnövekedés lineáris szakaszában	17,5	32,5	
23	Elosztás levélbe [%] virágzás alatt	3,5	6,5	
24	Elosztás levélbe [%] szemtelítődés alatt	3,5	6,5	
25	Elosztás termésbe [%] szemtelítődés alatt	42	78	érzékeny
26	Növényzsűrűség	4,9	9,1	
27	Beavatkozás mélysége [cm]	21	39	
28	Trágyázás mennyisége [kgN ha <sup>-1</sup> ]	119	221	

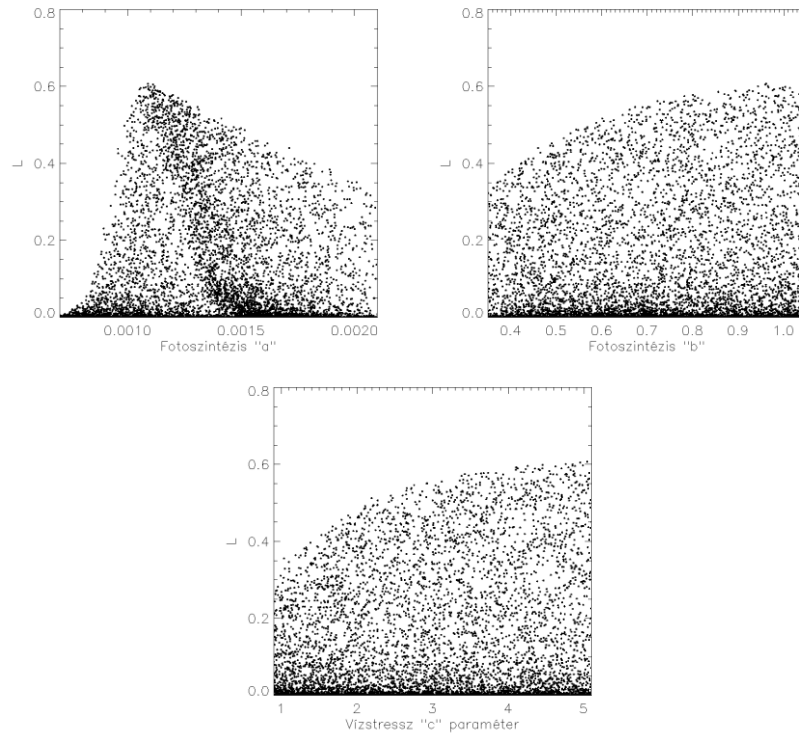


8. táblázat. A 4M érzékeny paramétereit búzára és kukoricára vonatkozóan, azok kalibrálatlan értékei, a kalibráció során randomizált paraméterek legkisebb és legnagyobb értékei, valamint az így kapott kalibrált paraméterértékek.

Sorszám	Paraméter neve	Eredeti érték	Minimum	Maximum	Kalibrált érték
Kukorica					
1	Fenofázisok hossza, GDD [°C] Szemtelítődés	800	45	1050	875,7
2	Fotoszintézis 'a' paraméter	0,0027	0,0018	0,0042	0,0032
3	Elosztás gyökérbe [%] szemtelítődés alatt	10	10	50	36,8
4	Elosztás termésbe [%] szemtelítődés alatt	60	20	60	33,2
Búza					
1	Fotoszintézis 'a' paraméter	0,0022	0,0007	0,0021	0,0012
2	Fotoszintézis 'b' paraméter	0,63	0,35	1,05	0,827
3	Vízstressz 'c' paraméter	1	0,9	5,1	3,75



15. ábra. A kukorica érzékeny paramétereire vonatkozó ún. "doty plot" ábrák, ahol minden pont egy, az x tengelyen látható paraméter beállításal futtatott szimulációnak felel meg. A nagyobb L értékek jelzik a szimulált termésátlagok jobb egyezését a megfigyelésekkel.



16. ábra. Az őszi búza érzékeny paramétereire vonatkozó ún. "dotty plot" ábrák, ahol minden pont egy, az x tengelyen látható paraméter beállítással futtatott szimulációnak felel meg. A nagyobb L értékek jelzik a szimulált termésátlagok jobb egyezését a megfigyelésekkel.

#### 4.3.2. Biome-BGCMuSo

A Biome-BGCMuSo modell kalibrálását a Vas megyei Hegyhátsálra vonatkozóan végeztük el, a 4M modellhez hasonlóan a GLUE módszerrel.

A modell 107 állítható ökofiziológiai paramétere közül számos nem igényel változtatást (Hidy et al., 2016b), más paraméterek pedig jól becsülhetők az irodalomban fellelhető mérési adatok alapján. A kalibráció során először 20-20 paramétert változtattunk Monte Carlo módszerrel, melyek közül érzékenyséjük alapján 10-et választottunk ki a búzára, és 8-at a kukoricára vonatkozóan a további vizsgálatokhoz (9. táblázat).

A hegyhátsáli mérőállomást magába foglaló FORESEE rácsontra futtatott Monte Carlo szimuláció során létrejött eredmények közül a termés mennyiségét vetettük össze a Vas megyei termésátlagokkal. Az így kapott L értékeket az 17. és 18. ábrán láthatjuk búzára és kukoricára vonatkozóan.

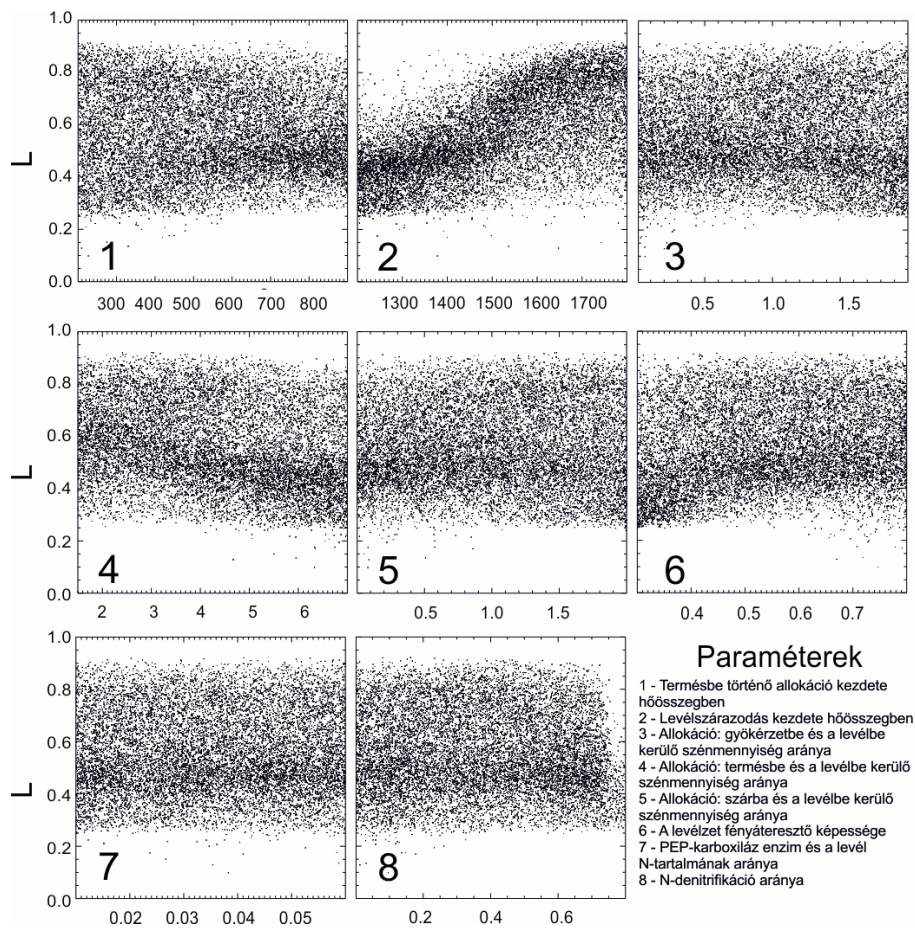
9. táblázat. A Biome-BGCMuSo érzékeny paramétereinek búzára vonatkozóan, azok kalibrálatlan értékei, a kalibráció során randomizált paraméterek legkisebb és legnagyobb értékei, valamint az így kapott kalibrált paraméterértékek.

Búza					
Sorszám	Paraméter neve	Eredeti érték	Minimum	Maximum	Kalibrált érték
1	Termésbe történő allokáció kezdete hőmérsékleti összegben	750	700	950	895
2	Levélszárazodás kezdete hőmérsékleti összegben	825	700	900	730
3	Allokáció: a gyökérzetbe és a levélbe kerülő szénmennyiség aránya	0,5	0,5	0,8	0,775
4	Allokáció: a termésbe és a levélbe kerülő szénmennyiség aránya	1,2	0,5	1,2	0,857
5	Allokáció: a szárba és a levélbe kerülő szénmennyiség aránya	0,8	0,7	1,6	1,54
6	A levélzet fényátersztő képessége	0,5	0,3	0,8	0,687
7	A levélzet fenológiai hervadási együtthatója	0,03	0,02	0,08	0,049
8	N-denitrifikáció aránya	0,01	0,001	0,04	0,003
9	N-denitrifikáció aránya száraz körülmények között	0,005	0,001	0,006	0,0012
10	N-mobilizáció aránya	0,1	0,05	0,15	0,139

10. táblázat. A Biome-BGCMuSo érzékeny paramétereinek kukoricára vonatkozóan, azok kalibrálatlan értékei, a kalibráció során randomizált paraméterek legkisebb és legnagyobb értékei, valamint az így kapott kalibrált paraméterértékek.

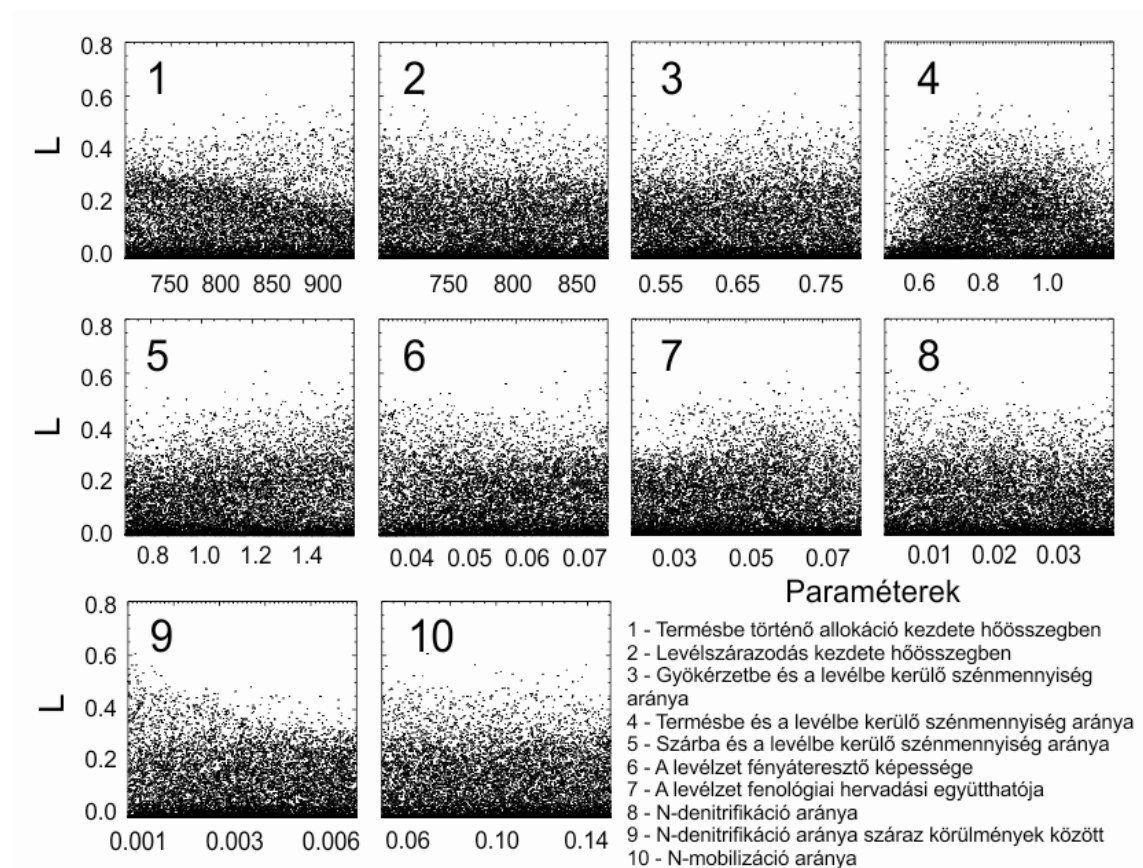
Kukorica					
Sorszám	Paraméter neve	Eredeti érték	Minimum	Maximum	Kalibrált érték
1	Termésbe történő allokáció kezdete hőmérsékleti összegben	825	200	900	219
2	Levélszárazodás kezdete hőmérsékleti összegben	1400	1200	1800	1782
3	Allokáció: gyökérzetbe és a levélbe kerülő szénmennyiség aránya	1,02	0,01	2	0,295
4	Allokáció: termésbe és a levélbe kerülő szénmennyiség aránya	0,56	1,5	7	1,71
5	Allokáció: szárba és a levélbe kerülő szénmennyiség aránya	2,05	0,001	2	1,57
6	A levélzet fényátersztő képessége	0,5	0,3	0,8	0,69
7	PEP-karboxiláz <sup>1</sup> enzim és a levél N-tartalmának aránya	0,03	0,01	0,06	0,0424
8	N-denitrifikáció aránya	0,01	0,001	0,8	0,051

<sup>1</sup> Az ún. foszfo-enolpiroszólósav (PEP) megkötésével együtt következik be a légköri szén-dioxid fixálása a PEP-karboxiláz enzim közreműködésével.



17. ábra. A kukorica érzékeny paramétereire vonatkozó ún. "dotty plot" ábrák, ahol minden pont egy, az x tengelyen látható paraméter-beállítással futtatott Biome-BGCMuSo szimulációnak felel meg. A nagyobb L értékek jelzik a szimulált termésátlagok jobb egyezését a megfigyelésekkel.

Ezen kívül vizsgáltuk az 3.7.1.2 fejezetben bemutatott szűrési módszer hatását a "dotty plot" ábrákra. Ebben az esetben figyelembe vettük a modellezett és mért GPP értékek nagyságrendi egyezését is. Mivel a hazai mezőgazdasági szénmérleg vizsgálata is a célkitűzéseink között szerepel, az volt a célunk, hogy elkerüljük azt az eshetőséget, hogy a termésre történő optimalizálás során a szénmérleg komponenseinek szimulációját lerontsuk. A kukorica példáján mutatjuk be, hogy hogyan vettük figyelembe a GPP-re vonatkozó eredményeket a végső kalibrált érték meghatározásakor. A 20. ábrán csak azon futásokat ábrázoltuk, melyek átmentek ezen a szűrésen. Az L értékek nagysága (tehát a pöttyök helyzete) a 20. ábrán még mindig a termésre vonatkozó eredmények "jóságát" mutatja, csak az ábrára felkerült pöttyök száma csökkent le, kizárólag azokra, melyek GPP szempontjából is megfeleltek a kitűzött kritériumoknak (3.7.1.2 fejezet). Fontos ésszben tartani, hogy egy pötty az összes paraméter beállításának a hatását hordozza, és minden más paraméterre vonatkozó ábrán megtalálható a párja.

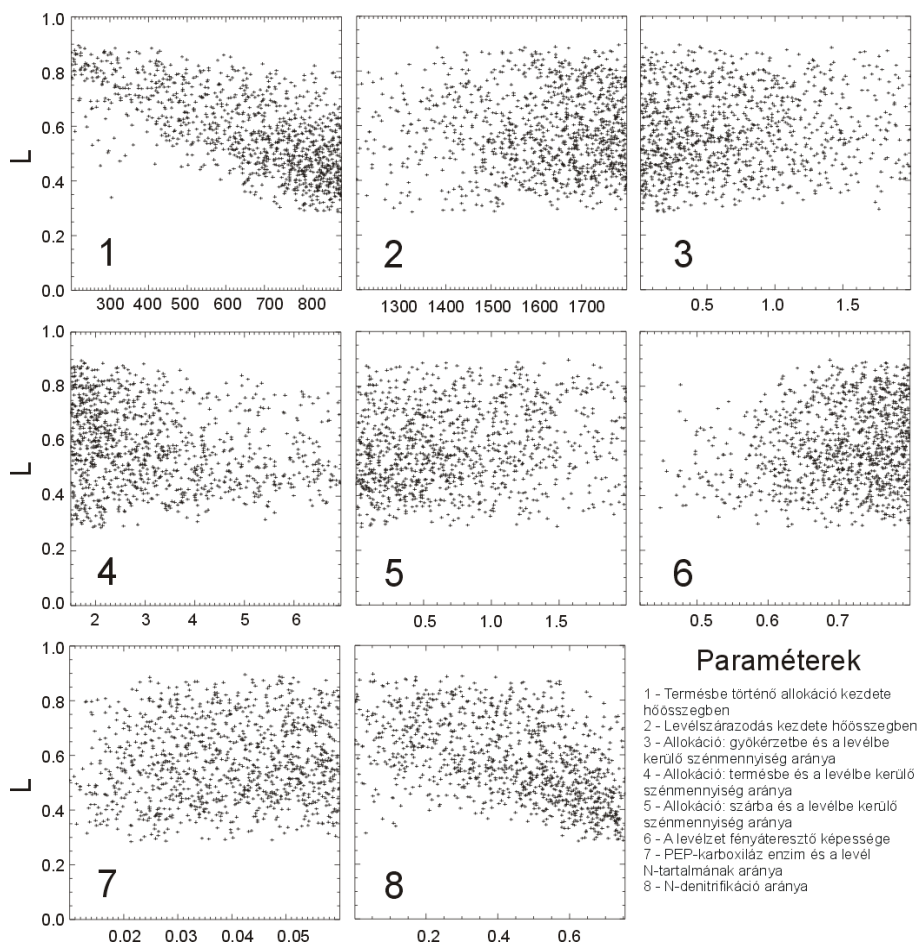


18. ábra. A búza érzékeny paramétereire vonatkozó ún. "dotty plot" ábrák, ahol minden pont egy, az x tengelyen látható paraméter-beállítással futtatott Biome-BGCMuSo szimulációnak felel meg. A nagyobb L értékek jelzik a szimulált termésátlagok jobb egyezését a megfigyelésekkel.

A 17. és 19. ábrát együtt tekintve érdemes megvizsgálni a különbségeket. A termés allokációjának kezdetét tekintve (17. és 19. ábra, bal felső kép) több esetben kaptunk jó eredményt a GPP értékeire is, ha nagyobb hőösszeg-érték volt beállítva (több pötty tömörül az ábra jobb oldalán; 19. ábra, bal felső kép). Azonban volt néhány olyan beállítás, ahol kis hőmérsékleti összeg értékekre is megfelelő volt a GPP szimulációja is, és ez esetben a szimulált termés mennyisége jobbnak bizonyult, így a legnagyobb L értékhez tartozó paraméterérték ez esetben 219-nek bizonyult. Mindkét gabona esetén az így kapott "dotty plot" ábrákon látható legnagyobb L értékhez tartozó paraméteregyüttest választottuk ki. Különböző módszerek tesztelése után azt láttuk, hogy az országos validáció során ezzel kapjuk a legjobb egyezést a megfigyelésekkel.

A kalibráció során előfordulhat, hogy az adott, fizikai tartalommal bíró növényi paraméter optimális értéke irreális, vagy az irodalomban fellelhető értékektől eltérő. Ekkor valószínűleg valamilyen modell strukturális hiba áll fenn, amit a kalibráció igyekszik

kompenzálni annak érdekében, hogy az eredmények – jelen esetben a termésmennyiség – a mérésekhez a lehető legjobban illeszkedjen. Így minden növényi paraméteregyüttes csak adott modellre vonatkozóan értelmezhető, és minden jelentősebb fejlesztést követően a kalibráció újra elvégezendő.



19. ábra. A kukorica érzékeny paramétereire vonatkozó ún. "dotty plot" ábrák, a GPP-re vonatkozó szűrés alkalmazása mellett.

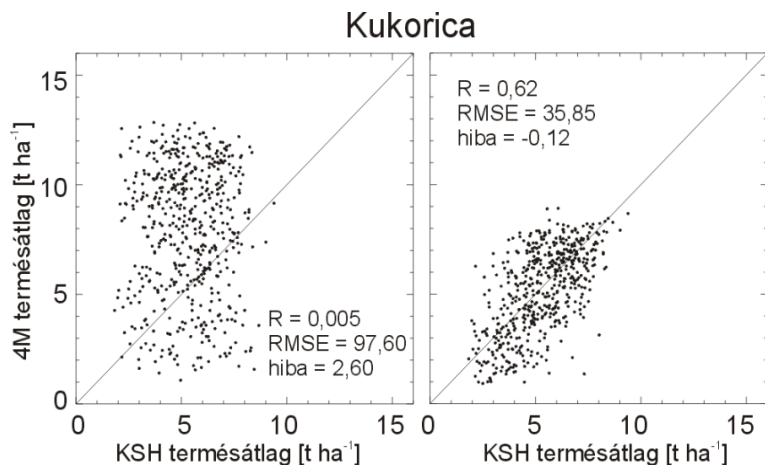
## 4.4. A validáció eredményei

### 4.4.1. 4M

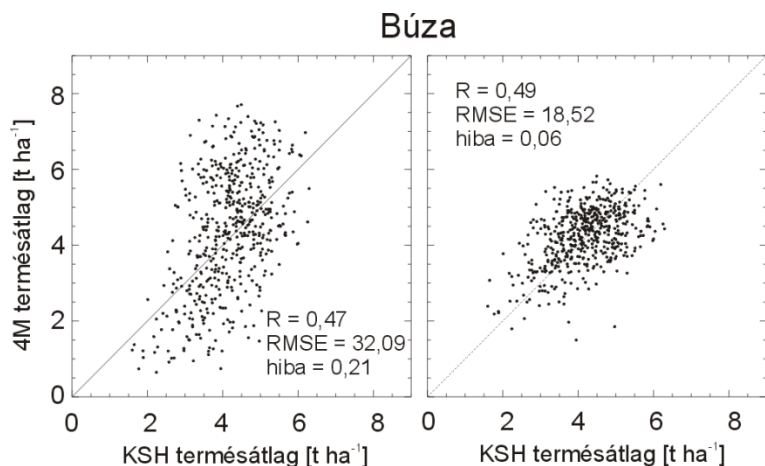
Az országos szintű validációhoz a kalibrált növényi paramétrizációval futtatott modelleredményeket vetettük össze a KSH termésátlag-feljegyzéseivel. A 20-21. ábrákon láthatjuk a kalibráció hatását a 4M modell termésátlag-szimulációjára. A bal oldali ábrákon a kalibráció előtti, míg a jobb oldalon a kalibráció utáni eredményeket láthatjuk. A rácsponti szimulációkat megyei szinten átlagolva, éves bontásban vetettük össze a megfigyelésekkel. Mind a búza, mind a kukorica esetén jelentősen javult a szimulációk



pontossága. A modell és a mérés közötti korreláció a kukorica esetén 0,6-ra, míg a búza esetén 0,48-ra növekedett. Az RMSE (root mean square error, azaz az átlagos négyzetes eltérés négyzetgyöke) mindkét esetben jelentősen lecsökkent, valamint a bias (szisztematikus hiba, vagyis a két adatsor átlagának az eltérése) a kukorica esetén -0,1-re, a búza esetén 0,06 t ha<sup>-1</sup>-ra csökkent (20. és 21. ábra).



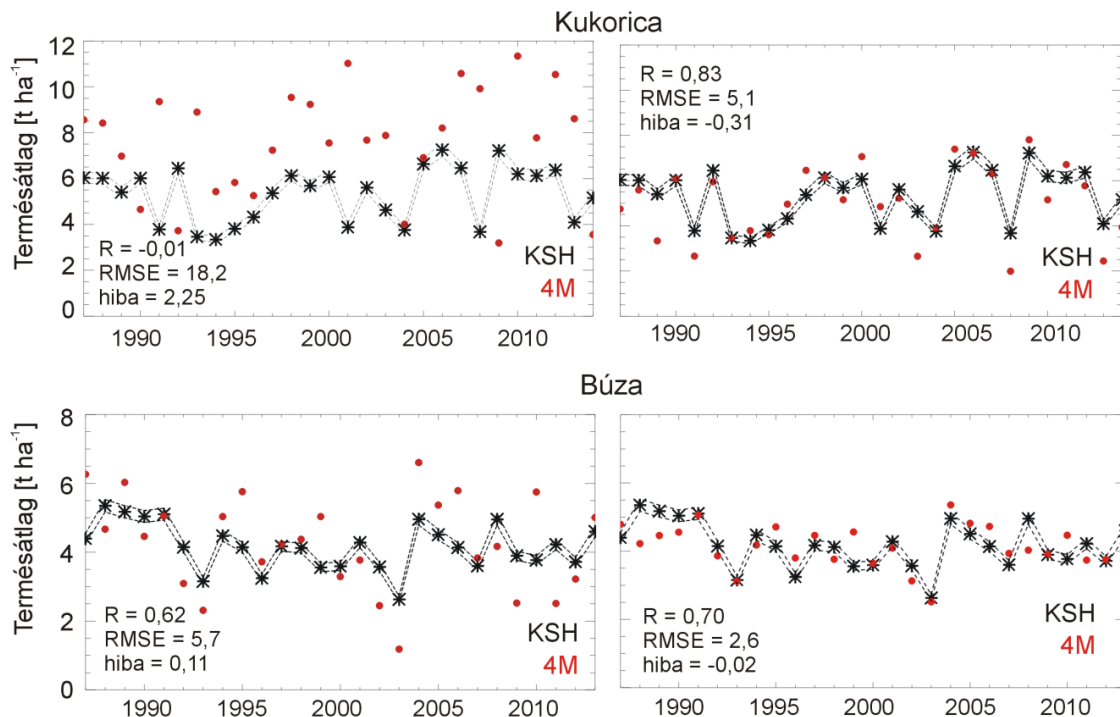
20. ábra. A kalibráció előtti (bal oldal) és a kalibrált (jobb oldal) parametrizációval futtatott 4M alapú kukorica termésátlag szimulációk eredményének összehasonlítása a KSH feljegyzésekkel. A bemutatott összehasonlítás megyei termésátlagok alapján történt.



21. ábra. A kalibráció előtti (bal oldal) és a kalibrált (jobb oldal) parametrizációval futtatott 4M alapú búza termésátlag szimulációk eredményének összehasonlítása a KSH termésátlag feljegyzésekkel. A bemutatott összehasonlítás megyei termésátlagok alapján történt. A modelleredmények esetén adott megyébe eső rácpontok átlagát tekintettük megyei termésátlagoknak.

A modelleredmények megyei szintű validációját tekintve (III. Melléklet, M1. és M2. ábra) láthatjuk, hogy kukorica esetén öt megyében is 0,8 feletti korrelációt értünk el (Pest, Fejér, Hajdú-Bihar, Bács-Kiskun és Csongrád megyében). Az átlagos hiba Pest megyére a legkisebb (-0,002 t ha<sup>-1</sup>), és Nógrád megyében a legnagyobb (1,8 t ha<sup>-1</sup>). Búzára

négy megyében haladja meg a korreláció a 0,7 feletti értéket (Borsod-Abaúj-Zemplén, Heves, Nógrád és Hajdú-Bihar megyében). Az átlagos hiba a kukoricához hasonlóan Nógrád megyében a legnagyobb ( $1,12 \text{ t ha}^{-1}$ ), és Hajdú-Bihar megyében a legkisebb ( $-0,05 \text{ t ha}^{-1}$ ). Az országos átlagok idősorát tekintve (22. ábra) láthatjuk, hogy a modell az új növényi parametризációval képes visszaadni az évek közötti változékonyság mértékét.



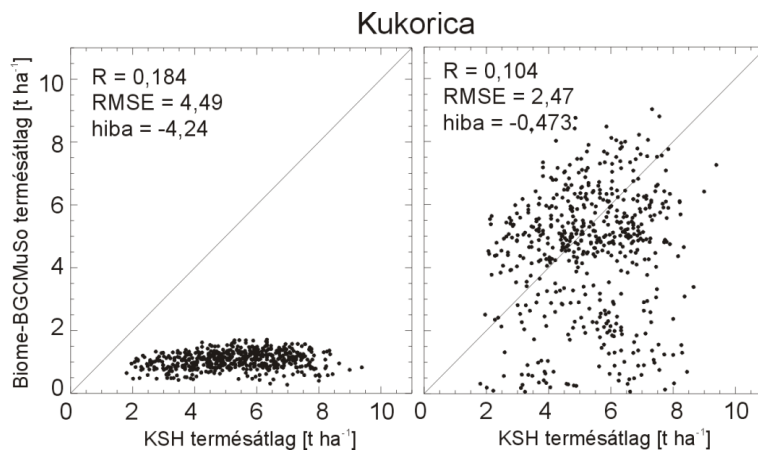
22. ábra. A kalibráció előtti (bal oldal) és a kalibrált (jobb oldal) parametризációval futtatott termésátlag szimulációk országos idősorának összehasonlítása a KSH termésátlag feljegyzésekkel kukoricára (fenn) és búzára (lenn). A megfigyeléseket körülvevő szaggatott vonalak a KSH feljegyzések bizonytalanságát jelölik. A modelleredmények esetén adott megyébe eső rácspontok átlagát tekintettük megyei termésátlagoknak.

#### 4.4.2. Biome-BGCMuSo

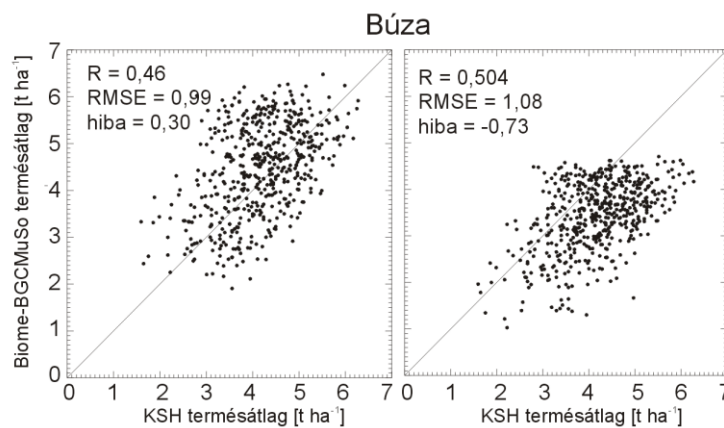
A kalibrált modellparaméterekkel kapott országos szimulációk alapján megyei átlagokat számítottunk a Biome-BGCMuSo modellel, és összevetettük azokat a KSH termésátlag-feljegyzéseivel. A 23. és 24. ábrán láthatjuk a kalibráció előtti és utáni megyei termésátlag eredmények validációját az 1986-2013 időszakra.

A kukoricára vonatkozó eredmények jelentősen javultak a kalibráció hatására. Nagyságrendileg megfelelő tartományba kerültek, de még így is magas a termésátlagok szórása, és sok esetben figyelhető meg nagymértékű alulbecslés. Országos szinten a korreláció alacsony ( $0,104$ ), az  $RMSE$   $2,47 \text{ t ha}^{-1}$ , valamint az átlagos hiba  $-0,473 \text{ t ha}^{-1}$  a kalibráció után (23. ábra).





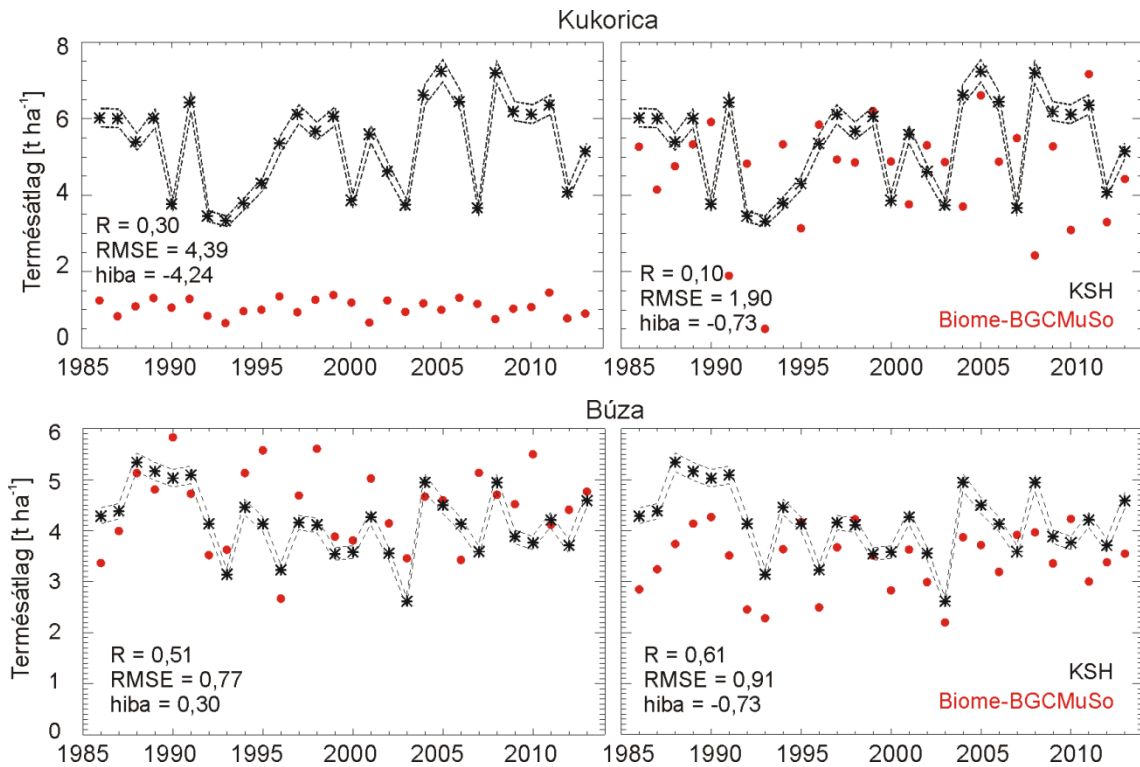
23. ábra. A kalibráció előtti (bal oldal) és a kalibrált (jobb oldal) parametrizációval futtatott Biome-BGCMuSo alapú kukorica termésátlag szimulációk eredményeinek összehasonlítása a megyei termésátlag-feljegyzésekkel (KSH). A modelleredmények esetén adott megyébe eső rácspontok átlagát tekintettük megyei termésátlagoknak.



24. ábra. A kalibráció előtti (bal oldal) és a kalibrált (jobb oldal) parametrizációval futtatott Biome-BGCMuSo alapú búza termésátlag szimulációk eredményének összehasonlítása a megyei termésátlag-feljegyzésekkel (KSH). A modelleredmények esetén adott megyébe eső rácspontok átlagát tekintettük megyei termésátlagoknak.

A validáció azt mutatja, hogy a búzára a modell jobb eredményeket ad, mint kukoricára. A korreláció ez esetben 0,504, az RMSE 1,08 t ha<sup>-1</sup>, valamint az átlagos hiba -0,73 t ha<sup>-1</sup> (24. ábra). A kalibráció során a korreláció növekedett, azonban az átlagos hiba is kissé megnőtt, és így alulbecslés alakult ki. Vegyük figyelembe, hogy a kalibráció során nem csak a termésátlagokra, hanem valamelyest a GPP-re is optimalizáltunk.

A 25. ábrán láthatjuk a két gabonanövényre a modellezett és megfigyelt országos termésátlagok összehasonlítását a kalibráció előtt és után az 1986-2013 időszakra.



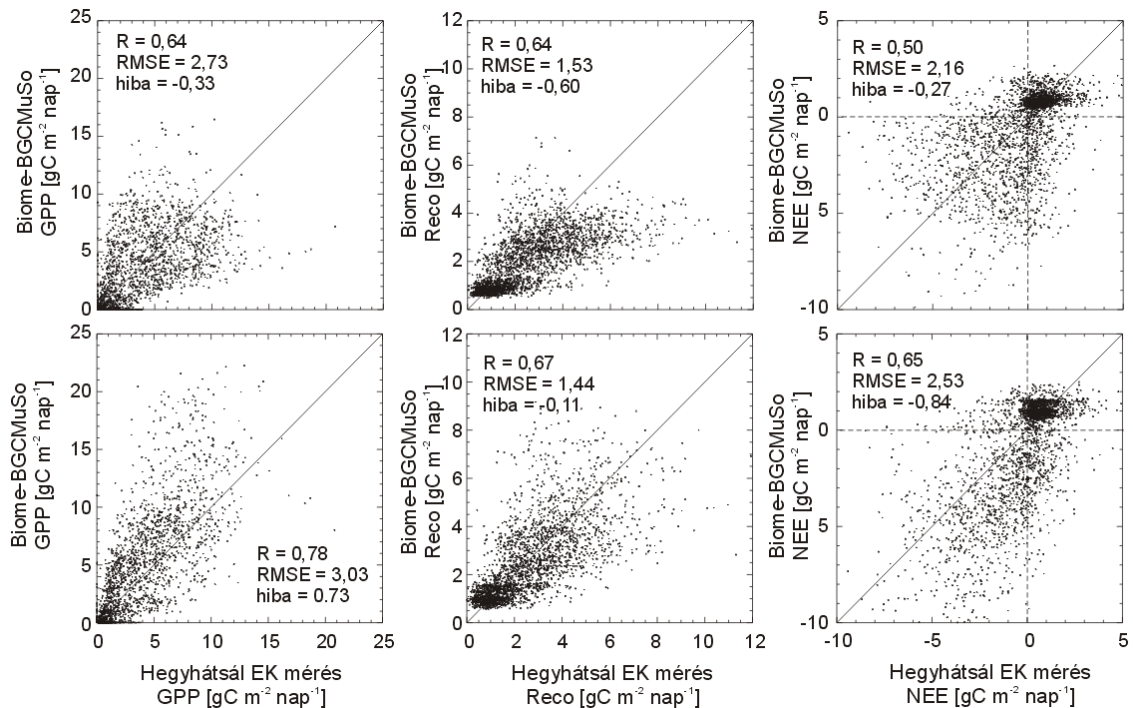
25. ábra. A kalibráció előtti (bal oldal) és a kalibrált (jobb oldal) parametrizációval futtatott termésátlag szimulációk országos átlagainak összehasonlítása a megyei termésátlag-feljegyzések országos átlagával kukoricára (fenn) és búzára (lenn). A megfigyeléseket körülvevő szaggatott vonalak a KSH feljegyzések bizonytalanságát jelölik. A modelleredmények esetén adott megyébe eső rácspontok átlagát tekintettük megyei termésátlagoknak.

A megyei szintű összehasonlítást az IV. Mellékletben láthatjuk (M3. és M4. ábra). A kukoricára vonatkozóan hat megyére kaptunk 0,2 feletti korrelációt (emelkedő sorrendben: Zala, Bács-Kiskun, Veszprém, Csongrád, Hajdú-Bihar, Győr-Moson-Sopron megyékre). Azonban Baranya, Somogy és Tolna megyében a korreláció a kalibráció után is negatív. A búza esetén Pest, Csongrád és Bács-Kiskun megyére kaptunk 0,6 feletti korrelációt. A legkisebb értéket Hajdú-Bihar megye mutatja, ott a korreláció csak 0,36. Az eredmények alapján nyilvánvaló, hogy a 4M modell jelenleg lényegesen pontosabb becsléseket ad a termésátlagok vonatkozásában, mint a Biome-BGCMuSo.

Egyéb referencia-adat hiányában a szénfluxusokra vonatkozó modelleredményre pontbeli validációt végeztünk, a hegyhatsálsi EK mérések segítségével. A mért és a modellezett értékek összehasonlítása során azzal a feltételezéssel éltünk, hogy a vegyes mezőgazdasági terület felett elhelyezett műszer fele-fele arányban méri a búza és kukorica szénmérlegét (Barcza et al., 2009b). Ezért a búzára és kukoricára kapott modelleredményeket átlagoltuk, majd összevetettük a mérésekkel. A kalibráció előtti és

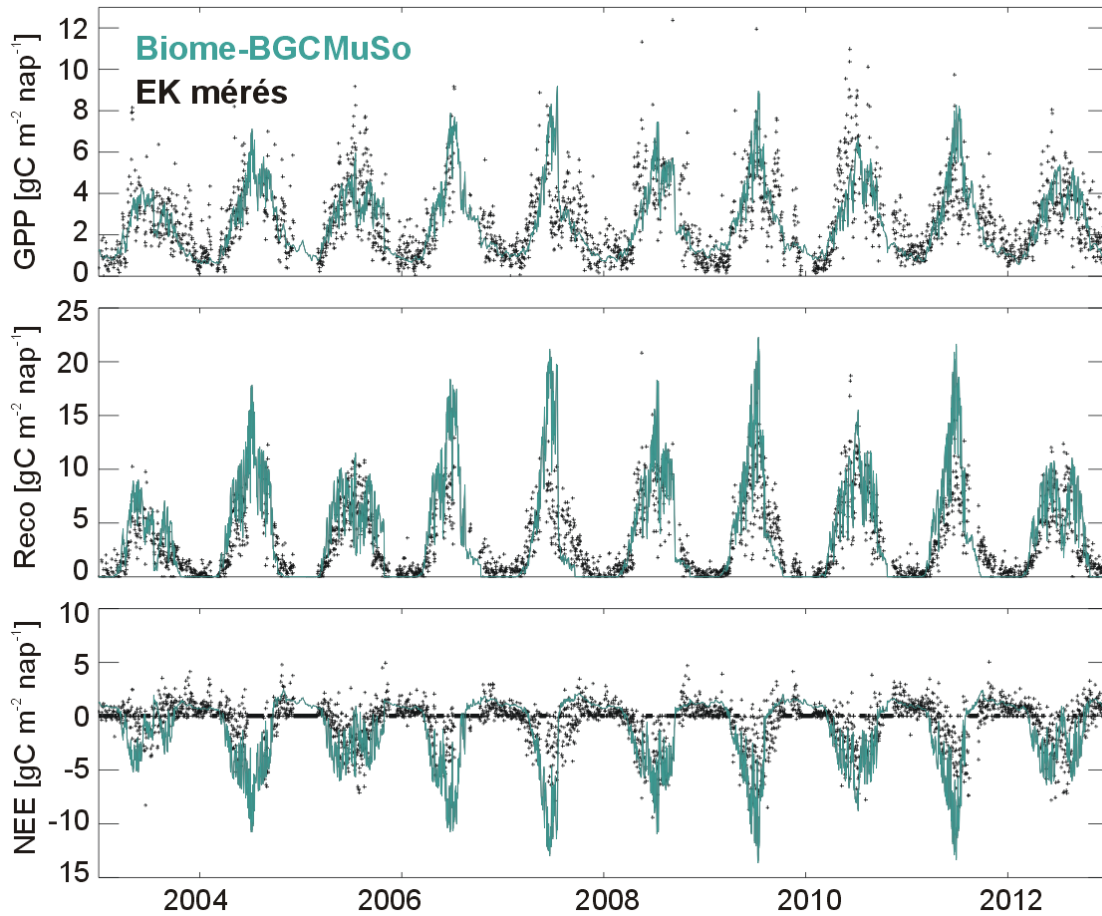
utáni összehasonlításokat a 26. ábrán láthatjuk. Mivel a kalibráció során csak közvetve, nagyságrendileg vettük figyelembe a GPP-re vonatkozó méréseket, így nem várunk nagymértékű javulást. Az volt a célunk, hogy a termésátlagokra vonatkozó optimalizálás során ne csökkenjen jelentősen a mért és modellezett szénfluxusok egyezése.

Az eredmények alapján azt láthatjuk, hogy a GPP esetén bár az átlagos hiba  $-0,33 \text{ gC m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ -ről  $0,73 \text{ gC m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ -ra növekedett, a korreláció  $0,64$ -ről  $0,78$ -ra nőtt. A respiráció esetén is nőtt a korreláció, és a hibák is csökkentek, valamint az NEE korrelációja is nőtt, az átlagos hiba azonban negatív irányba nőtt (26. ábra).



26. ábra. A kalibrálatlan (felső sor) és a kalibrált (alsó sor) parametrizációval futtatott Biome-BGCMuSo szimulációk GPP, Reco és NEE-re vonatkozó összehasonlítása a hegyhátsáli EK mérések eredményével (2003-2012) napi időléptékben. A modelleredmények a búza és kukorica szimulációk átlagát reprezentálják.

A kalibrált parametrizációval végzett kukorica és búza futtatások átlagának az idősorát láthatjuk a 27. ábrán GPP-re, Reco-ra és NEE-re vonatkozóan. Az ábra alapján látható, hogy a modelleredmények konzisztensek a méréssel. A hegyhátsáli régió heterogén földhasználata miatt (Barcza et al., 2009) ennél pontosabb eredményt lényegében nem is várhatunk.



27. ábra. A kalibrált parametrizációval futtatott Biome-BGCMuSo szimulációk napi léptékű GPP, Reco és NEE eredményének (zöld vonal) összehasonlítása a hegyhátsági EK mérésekkel (fekete pontok). A modelleredmények a búza és kukorica szimulációk átlagát reprezentálják.

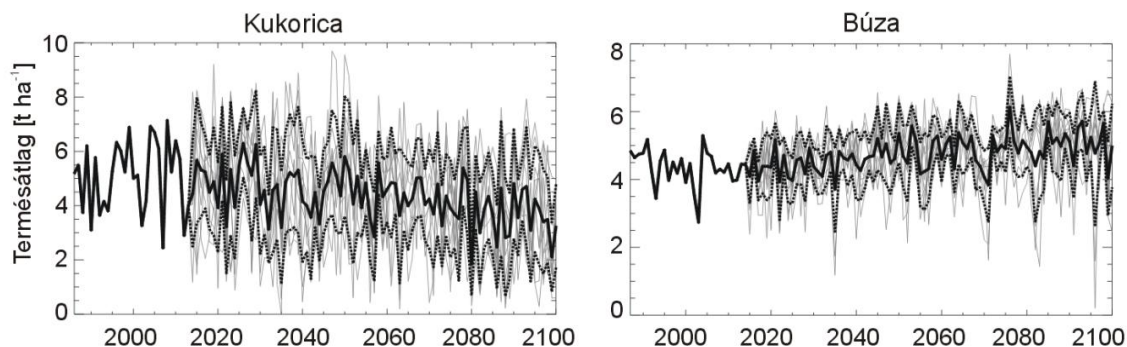
## 4.5. Hazai termésátlag-eredmények

### 4.5.1. 4M

#### 4.5.1.1. Változatlan művelési scenárió

A FORESEE adatbázisban szereplő 10 klímamodell-eredmény alapján futtattuk a 4M modellt az 1986-2013 és a 2014-2100 időszakokra (a továbbiakban múltbeli és jövőbeli időszakként hivatkozunk ezekre az időszakokra) búzára és kukoricára vonatkozóan. A termésátlagok országos szintű területi átlagának idősorait láthatjuk a 28. ábrán abban az esetben, amikor a trágyázás az alapbeállításoknak megfelelően történt, és öntözést nem alkalmaztunk ("business-as-usual", azaz BAU scenárió). A 28. ábrán szürke vonalakkal láthatjuk a különböző klímamodell-eredmények alapján futtatott szimulációk eredményeit. A 10 klímamodell alapján kapott eredmények átlagát (a továbbiakban multi-

modell átlag; ez tekinthető jelen munkában a legrobosztusabb becslésnek) vastag fekete vonallal jelöltük, ami körül vastag fekete pontozott vonallal ábrázoltuk a különböző klímamodell-eredmények használatából adódó szórást.

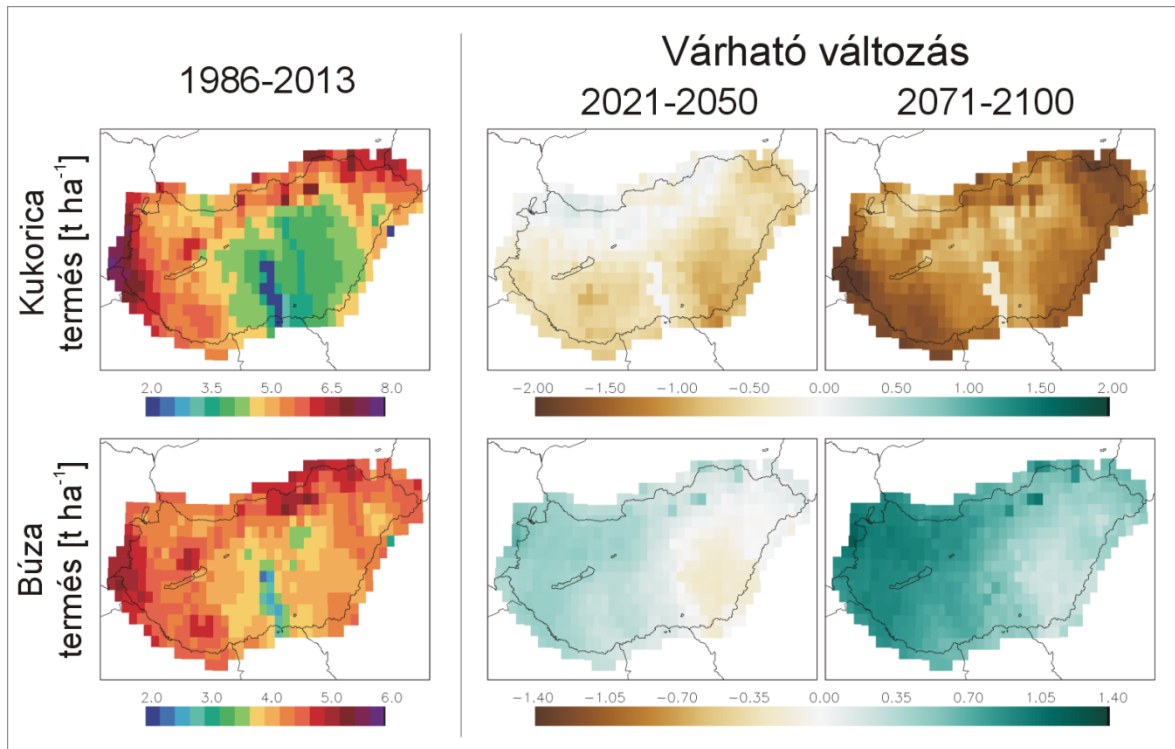


28. ábra. A 4M modellel szimulált kukorica és búza termésátlagok az 1986-2100 időszakra. A jövőre vonatkozóan a 10 klímamodell alapján kapott eredményeket ábrázoltuk szürke vonalakkal (az egyedi modellek nem azonosíthatóak). Vastag fekete vonallal jelöltük a 10 modell átlagát (multi-modell átlag), pontozott vonalakkal a 10 modell által definiált bizonytalanságot (átlag plusz/mínusz szórás).

Az eredmények eltérő irányú változásokat mutatnak a két gabonanövényre. A multi-modell átlagot tekintve a kukorica termésmennyiségének csökkenésére számíthatunk, melynek mértéke országos átlagban  $0,15 \text{ t ha}^{-1}$  évtizedenként. A búza termésátlaga azonban várhatóan  $0,07 \text{ t ha}^{-1}$ -al növekszik évtizedenként (28. ábra, vastag folytonos vonalak). A modellek által adott szórás időbeli átlaga a jövőbeli időszakra nézve  $1,7 \text{ t ha}^{-1}$  a kukorica esetén, és  $0,7 \text{ t ha}^{-1}$  a búza esetén.

A jövőbeli termésátlag becslések várható változásának szignifikancia-vizsgálatát t-próbával végeztük el,  $p < 0,01$  és  $p < 0,001$  szignifikanciaszintek mellett. A vizsgálat azt mutatta, hogy  $p < 0,01$  szignifikanciaszint mellett a kukorica esetén a 10-ből 8 klímamodell alapján,  $p < 0,001$  szignifikanciaszint mellett 10-ből 4 modell esetén szignifikáns a várható változás. Búza esetén mindkét szinten 10-ből 5 klímamodell-eredmény alapján szignifikáns a várható trend. A multi-modell átlagot tekintve mindkét mezőgazdasági kultúrnövény esetén szignifikáns ( $p < 0,001$ ) a termésátlagok trendje.

A várható változások területi eloszlásának vizsgálata során két jövőbeli időszakra készítettünk különbség térképeket. 2021-2050 és 2071-2100 időszakok átlagos termésmennyiségeit hasonlítottuk össze az 1986-2013 időszakra (referencia-időszak) vonatkozó, szintén modellszimuláció során kapott értékekkel, mind a 10 klímamodellre.



29. ábra. A kukorica (fenn) és a búza (lenn) termésátlaga az 1986-2013 időszakra a 4M modell szimulációi alapján (bal oldal), valamint az ehhez viszonyított várható változások mértéke a 2021-2050 és 2071-2100 időszakokra (jobb oldal). Az értékek a 10 klímamoddellel kapott eredmények átlagát reprezentálják (multi-modell átlag).

A 29. ábra bal oldalán a referencia-időszakra szimulált termésátlagok értékeit, ettől jobbra pedig a két jövőbeli időszakra a referencia-időszakhoz viszonyított várható változások mértékét mutatjuk be, a multi-modell átlagra, valamint a két gabonanövényre vonatkozóan. Minden jövőbeli futást ezekhez a modelleredményekhez viszonyítunk (későbbiekben referenciatutásnak vagy referencia időszaknak nevezve), a várható változásokat ezekhez képest becsüljük.

A kukorica esetén 2021-2050-re az ország északi területeinek kivételével csökkenés várható, de 2071-2100-ra már az egész országban jelentős termésnövekedésre számíthatunk. Területi átlagban a csökkenés mértéke a közeli jövőre (2021-2050)  $0,35 \text{ t ha}^{-1}$ , a távoli jövőre (2071-2100) pedig  $1,31 \text{ t ha}^{-1}$  a referencia-időszakhoz viszonyítva.

A búza esetén éppen ellenkező irányú eredményeket láthatunk. 2021-2050-re az ország dél-keleti része kivételével növekedés, 2071-2100-ra pedig további termésátlag-növekedés várható, melynek mértéke nyugat felé haladva növekszik. Országos átlagot tekintve a változások mértéke kisebb, mint a kukoricára:  $0,21 \text{ t ha}^{-1}$  2021-2050-re és  $0,66 \text{ t ha}^{-1}$  2071-2100-ra.



A 11. táblázat összefoglalja a különböző klímamodell-eredményekkel meghajtott szimulációkkal kapott várható változások mértékét.

11. táblázat. A búza és kukorica termésátlagainak várható változása az 1986-2013 időszakhoz viszonyítva a 2021-2050 és 2071-2100 időszakokra különböző klímamodell-eredmények alapján.

Klímamodell (GCM-RCM)	Várható változás a referencia időszakhoz képest [ $t\ ha^{-1}$ ]			
	Kukorica		Búza	
	2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
ALADIN-ARPEGE	0,23	-1,75	0,33	0,32
HIRHAM5-ECHAM5	-0,22	-0,32	0,54	1,09
CLM-HadCM3Q0	-1,85	-2,59	-0,16	0,36
HadRM3Q0-HadCM3Q0	-1,28	-2,11	-0,09	0,12
HIRHAM5-ARPEGE	-0,53	-1,73	0,33	0,38
RCA-HadCM3Q0	0,47	0,36	0,37	1,26
RCA-ECHAM5	0,48	-1,11	0,37	0,98
REGCM3-ECHAM5	0,51	-0,83	0,21	0,76
RACMO2-ECHAM5	-1,01	-1,93	-0,06	0,47
REMO-ECHAM5	-0,30	-1,12	0,27	0,85
<b>Multi-modell átlag</b>	<b>-0,35</b>	<b>-1,31</b>	<b>0,21</b>	<b>0,66</b>
<b>Modellek szórása</b>	<b>0,82</b>	<b>0,89</b>	<b>0,23</b>	<b>0,38</b>

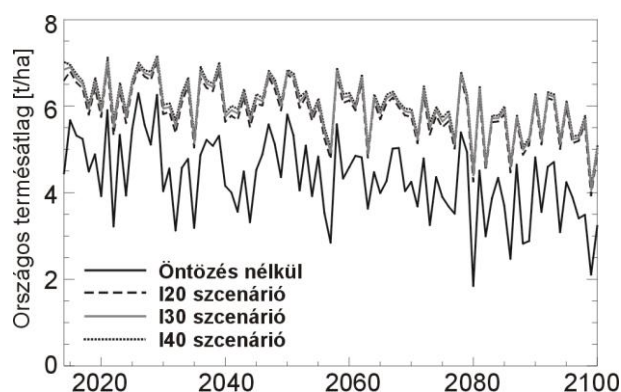
#### 4.5.1.2. Alternatív művelési scenáriók

A napjainkban leggyakrabban alkalmazott művelési normáktól eltérve öntözést szimuláltunk a kukorica esetén, és vizsgáltuk annak hatását a jövőbeli termésátlagokra. Három különböző öntözési scenáriót vezettünk be, melyek során az öntözés időpontját a 4M modell beépített modulja szabályozta (lásd 3.5.2. fejezet). Alkalmanként 20, 30 és 40 mm öntözővíz kihelyezését teszteltük. Az eredmények azt mutatták, hogy habár az alkalmanként 20 mm-rel öntözött esetben az évek során felhasznált vízmennyiség kevesebb volt, több alkalommal volt szükség beavatkozásra, és a termésátlagok is alacsonyabbak voltak, mint az alkalmanként nagyobb vízmennyiséggel öntözött esetekben (12. táblázat). A bemutatott értékek a multi-modell átlagot, a hazai rácspontok, valamint 30-30 év átlagát reprezentálják.

12. táblázat. **Különböző öntözési scenáriók által öntözött napok száma, az öntözővíz mennyisége, valamint az öntözéssel elért termésátlag-növekedések kukoricára vonatkozóan. A százalékos értékek azt mutatják, hogy adott jövőbeli időszakban mennyivel érhetünk el magasabb termésátlagokat, ha a megszokott művelés helyett öntözést alkalmazunk.**

Öntözési scenárió	Öntözött napok éves száma		Elhasznált öntözővíz átlagos mennyiség [mm]		Öntözéssel elért termésátlag növekedés mértéke [%]		
	Időszak	2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
I20		12	10	72,3	73,5	31%	19%
I30		10	9	80,7	80,5	33%	22%
I40		9	8	89,2	87,9	35%	24%

A 30. ábrán láthatjuk az öntözés nélküli, valamint a három öntözött scenárió által szimulált termésátlagok multi-modell átlagait. Látható, hogy öntözéssel jelentős termésnövekedés érhető el, és az egyes scenáriók közötti különbség igen csekély. Habár öntözéssel magasabb termésátlagokat kaphatunk, a jövőbeli csökkenő trend továbbra is fennáll, melynek mértéke  $0,14 \text{ t ha}^{-1}$  évtizedenként.



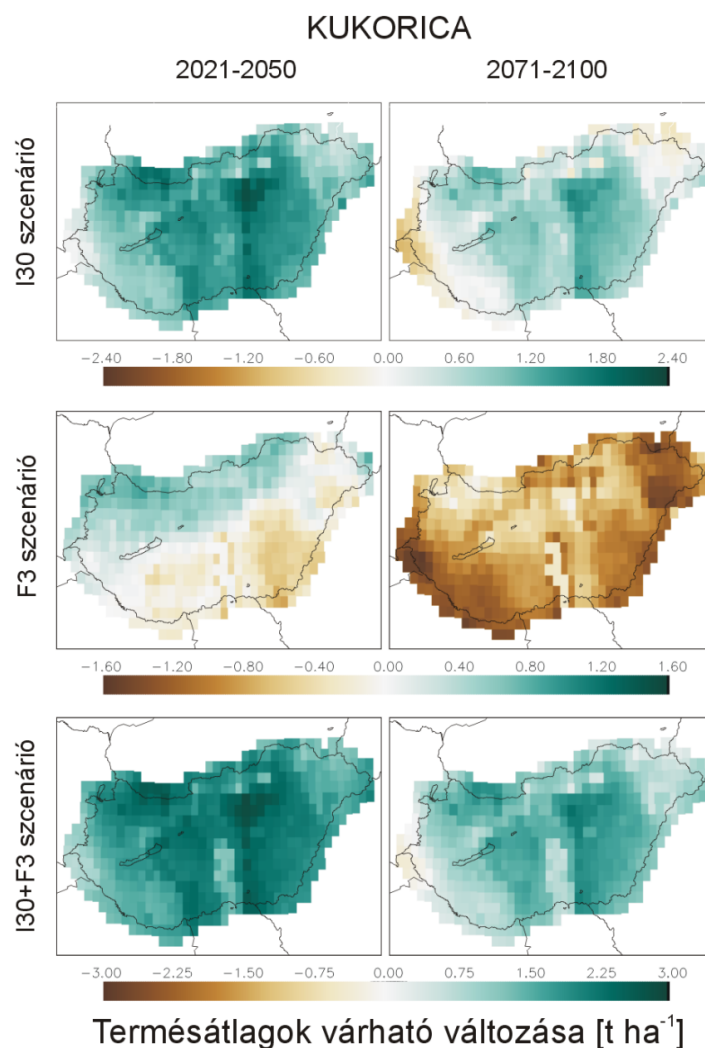
30. ábra. **A kukorica jövőbeli termésátlagának szimulált alakulása a multi-modell átlag alapján öntözés nélküli (fekete folytonos vonal), valamint a három öntözött scenárió esetén.**

A 30 mm-es esetet (I30) választottuk ki a várható változások területi eloszlásának bemutatására (31. ábra első sora). Ha összehasonlítjuk az öntözés nélküli (29. ábra első sora) és az I30-as scenárió által prognosztizált termésátlag-változásokat, láthatjuk, hogy a várható termésnövekedés helyett ez esetben termésátlag-növekedést prognosztizálhatunk. Referenciaként a megszokott művelés feltételezése mellett 1986-2013-ra kapott 4M szimulációk eredményét használtuk (29. ábra bal felső térképe). A csökkenő trend itt is megfigyelhető, hiába érünk el magasabb termésátlagokat öntözéssel, az idő előrehaladtával a század végére, a szárazság okozta stressz csökkentésével már csak kis mértékben kapunk jobb eredményeket, mint a jelenlegi éghajlati (1986-2013) körülmények mellett termesztett kukorica esetén. 2021-2050-re várhatóan  $1,22 \text{ t ha}^{-1}$ -al, 2071-2100-ra pedig már csak



0,47 t ha<sup>-1</sup>-ral érhetünk el magasabb termésmennyiséget országos átlagban, mint az öntözés nélküli múltbeli esetben.

Ha összehasonlítjuk a 30. ábrán a grafikon két végét, ugyanezt figyelhetjük meg. A 2090-2100 időszak öntözéssel elért termésátlagai majdnem a 2015-2025 időszak öntözés nélküli termésátlagainak szintjére süllyednek.

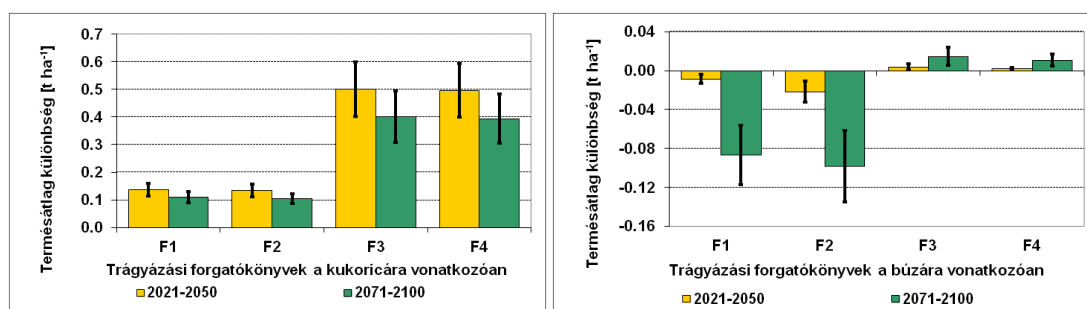


31. ábra. A kukorica termésátlagainak alakulása 2021-2050-re (balra) és 2071-2100-ra (jobbra) a 4M modell szerint, az 1986-2013 referencia időszakra végzett szimuláció eredményeihez képest az I30-as öntözési, az F13-as trágyázási szenarió, valamint ezek együttes alkalmazását feltételező I30+F13 szenariót tekintve. Az értékek a 10 klímamoddellel kapott szimulációk átlagát reprezentálják.

A műtrágyázás időpontjának és mennyiségének változtatása során négy szenarióval és mind a 10 klímamodell-eredménnyel végeztünk szimulációkat (lásd 3.5.2 fejezet). Az eredmények azt mutatták, hogy a kukorica termésátlagaira nagyobb hatással van a kijuttatott műtrágya mennyisége, mint annak időzítése.

A 32. ábra bal oldali diagramján láthatjuk, hogy a négy scenárió (F1-F4) a 30 éves átlagokat tekintve milyen mértékű termésátlag különbséget mutat a modell alapbeállításaival (BAU) kapott eredményekhez képest. Minden oszlop a multi-modell átlag térben és időben átlagolt értékeit mutatja. A hibahatárok mindkét irányban a 10 klímamodell által adott szórást jelölik. Mivel mind a négy scenárió a  $170 \text{ kg N ha}^{-1}$  alapbeállításnál nagyobb mértékű műtrágyázást feltételezett, így minden eset az eredeti műtrágyázáshoz viszonyítva nagyobb termésátlagokat eredményezett.

A legnagyobb terméshövelkedést a F3-as scenárió adta mindkét időszakra vonatkozóan, csekély különbséget mutatva az F4-es scenárióhoz képest. 2021-2050-re mintegy  $0,5 \text{ t ha}^{-1}$ , 2071-2100-ra  $0,4 \text{ t ha}^{-1}$ -ral érhetünk el magasabb termésátlagokat, ha a műtrágyázást az F3-as scenárió szerint végezzük el. A továbbiakban e scenárió alapján kapott várható változásokat vizsgáljuk, ami szerint a műtrágyázás mértéke  $250 \text{ kg N ha}^{-1}$ , melyet 5 nappal a vetés előtt helyezünk ki.



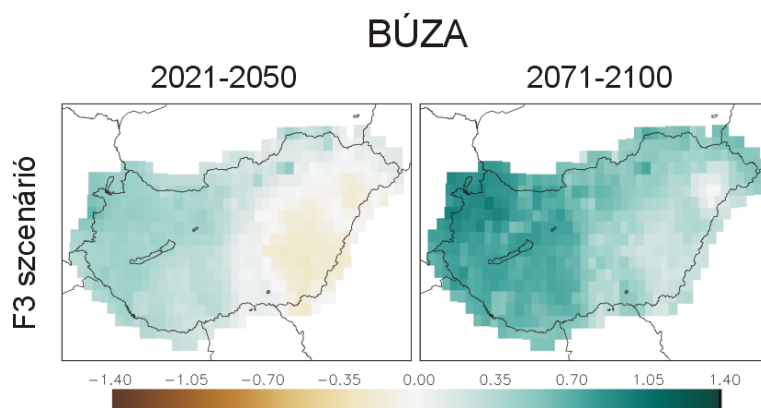
32. ábra. Különböző trágyázási scenáriók hatása a kukorica (bal oldal) és a búza (jobb oldal) országos és időben átlagolt termésátlagaira 2021-2050 és 2071-2100 időszakokra, a megszokott (BAU) művelést alkalmazó szimulációk eredményéhez képest a 4M modell szerint.

A 31. ábra középső sorában láthatjuk a F3-as scenárióval kapott várható változásokat a referencia-időszakra futtatott eredményekhez képest. Habár kisebb mértékű csökkenésre számíthatunk, mint a változatlan (BAU) művelési beállítások esetén (29. ábra), a közel másfélszeres műtrágyamennyiség kihelyezésével nem értünk el olyan pozitív változást, mint az öntözéssel. Az eredmények szerint országos átlagban a közeljövőben  $0,16 \text{ t ha}^{-1}$  terméshövelkedésre (az Alföldön kismértékű csökkenésre, az ország többi részén növekedésre), azonban a távoli jövőben  $0,92 \text{ t ha}^{-1}$  termésűcsökkenésre számíthatunk. A jövőbeli termésátlagok multi-modell átlaga ebben az esetben is szignifikáns ( $p < 0,001$ ) csökkenő trendet mutat (évtizedenként  $0,19 \text{ t ha}^{-1}$ ).

Miután külön-külön megvizsgáltuk a két művelési mód hatását a kukoricára, készítettünk egy kombinált scenáriót is, ahol az I30 és F3-as scenárió beállításait egyszerre alkalmaztuk, azaz virtuálisan öntöztünk, és a kihelyezett műtrágya mennyiségét is megnöveltük (I30+F3). A 31. ábra alsó sorában láthatjuk, hogy ebben az esetben 2021-2050-re az egész országra terméshövelkedés érhető el, míg a XXI. század végére is csupán néhány, nyugati határ menti rácsponton számíthatunk kismértékű csökkenésre. A jövőre vonatkozó multi-modell átlag 2021-2050-re 1,93 t ha<sup>-1</sup>, 2071-2100-ra, pedig 1,11 t ha<sup>-1</sup> terméshövelkedést prognosztizál az 1986-2013 időszakra vonatkozó referenciafuttatáshoz képest. A csökkenés szignifikáns (p<0,001) trendje a jövőre vonatkozó modellszimulációk alapján az I30+F3 scenárió esetén évtizedenként 0,15 t ha<sup>-1</sup>.

13. táblázat. A 2021-2050 és a 2071-2100 időszakokra várható országos terméshövelkedés változások 10 klímamodell-eredmény alapján, három különböző művelési scenáriót (I30, F3, I30+F3) feltételezve a referencia-időszakhoz képest, kukoricára vonatkozóan. A referencia-időszakban a megszokott (BAU) művelési scenáriót követtük, mely kevesebb trágyázást jelent, és öntözést egyáltalán nem alkalmaz.

Klímamodell (GCM-RCM)	Várható változás a referencia-időszakhoz képest [t ha <sup>-1</sup> ]					
	Kukorica – I30		Kukorica – F3		Kukorica – I30+F3	
	2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
ALADIN-ARPEGE	1,25	-0,05	0,79	-1,38	1,95	0,49
HIRHAM5-ECHAM5	1,55	1,37	0,29	0,17	2,27	2,12
CLM-HadCM3Q0	0,48	0,00	-1,52	-2,33	1,12	0,58
HadRM3Q0-HadCM3Q0	0,58	-0,45	-0,91	-1,81	1,15	0,05
HIRHAM5-ARPEGE	1,18	0,42	0,01	-1,37	1,84	1,08
RCA-HadCM3Q0	1,46	1,27	0,99	0,88	2,15	1,98
RCA-ECHAM5	1,62	0,53	1,11	-0,65	2,40	1,20
RegCM3-ECHAM5	1,72	0,81	1,14	-0,39	2,53	1,53
RACMO2-ECHAM5	1,13	0,19	-0,55	-1,61	1,86	0,79
REMO-ECHAM5	1,27	0,64	0,27	-0,68	2,02	1,32
<b>Multi-modell átlag</b>	<b>1,22</b>	<b>0,47</b>	<b>0,16</b>	<b>-0,92</b>	<b>1,93</b>	<b>1,11</b>
<b>Modellek szórása</b>	<b>0,41</b>	<b>0,58</b>	<b>0,91</b>	<b>0,97</b>	<b>0,47</b>	<b>0,66</b>



**33. ábra. A búza termésátlagainak alakulása a 2021-2050 és a 2071-2100 időszakokra vonatkozóan a 4M modell szerint az 1986-2013 referencia-időszakhoz képest F3-as trágyázási szcenáriót feltételezve. Az értékek a 10 klímamoddellel kapott szimulációk átlagát reprezentálják.**

A búza esetén a műtrágyázás megváltoztatása (F1-F4 szcenáriók, 14. táblázat) kisebb hatással volt a termésátlagok alakulására, mint a kukorica esetén. Ez esetben is a mennyiség volt meghatározóbb, mint az időzítés, azonban a mennyiség növelése átlagban kevesebb, mint  $0,02 \text{ t ha}^{-1}$  növekményt okozott a megszokott műveléshez képest. A műtrágya mennyiségének csökkentésének abszolút értékben nagyobb hatása volt, de ennek mértéke is  $0,1 \text{ t ha}^{-1}$  alatt maradt (32. ábra, jobb oldali diagram). A referencia-időszakra végzett futtatásokhoz viszonyított várható változások a műtrágyázás alapbeállításával futtatott szimulációhoz képest csupán kis mértékben változtak. Az F3-as szcenárió esetén – mely a legnagyobb növekedést adja – a várható változások a 33. ábrán látható módon alakulnak. Országos átlagban a 2021-2050-re a várható változás mértéke ( $0,21 \text{ t ha}^{-1}$ ) megegyezik a megszokott művelési szcenárióval kapott értékkel (két tizedes jegy pontosságig), 2071-2100-ra  $0,66$  helyett  $0,67 \text{ t ha}^{-1}$  termésátlag-növekedést mutatnak a modelleredmények.

A 10 klímamodell alapján készült modellfutások eredményei az 15. táblázatban láthatók, ahol egy növelt (F3) és egy csökkentett mennyiségű (F2) műtrágyázást feltételező szcenárióra vonatkozó várható változásokat mutatunk be. Hiába csökkentjük a műtrágya mennyiségét, még így is  $0,19$  illetve  $0,56 \text{ t ha}^{-1}$  növekedés várható a két jövőbeli időszakra a referencia-időszakhoz képest. Ez ugyan kevesebb, mint a megszokott művelési mód mellett becsült növekedés (ami  $0,21$  és  $0,66 \text{ t ha}^{-1}$  a két időszakra), de a pozitív szignifikáns trend ( $p < 0,001$ ) a multi-modell átlagot tekintve így is fennáll. A búza esetén általánosságban elmondható, hogy a 4M modell eredményei szerint a különböző művelési

szcenáriók csak nagyon kis mértékben voltak hatással a jövőbeli termésátlagok alakulására.

14. táblázat. A 2021-2050 és 2071-2100 időszakokra várható országos termésátlag változások 10 klímamodell eredmény alapján két különböző művelési scenárió (F2, F3) feltételezve a referencia-időszakhoz (megszokott művelés) képest, búzára vonatkozóan.

Klímamodell (GCM-RCM)	Várható változás a referencia-időszakhoz képest [t ha <sup>-1</sup> ]			
	Búza – F2		Búza – F3	
	2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
ALADIN-ARPEGE	0,32	0,26	0,34	0,33
HIRHAM5-ECHAM5	0,51	0,92	0,55	1,11
CLM-HadCM3Q0	-0,17	0,27	-0,16	0,36
HadRM3Q0-HadCM3Q0	-0,10	0,08	-0,09	0,12
HIRHAM5-ARPEGE	0,31	0,29	0,33	0,38
RCA-HadCM3Q0	0,32	1,15	0,38	1,28
RCA-ECHAM5	0,34	0,84	0,37	1,01
REGCM3-ECHAM5	0,18	0,65	0,21	0,78
RACMO2-ECHAM5	-0,08	0,38	-0,06	0,49
REMO-ECHAM5	0,26	0,75	0,28	0,86
<b>Multi-modell átlag</b>	<b>0,19</b>	<b>0,56</b>	<b>0,21</b>	<b>0,67</b>
<b>Modellek szórása</b>	<b>0,23</b>	<b>0,35</b>	<b>0,24</b>	<b>0,39</b>

## 4.5.2. Biome-BGCMuSo

### 4.5.2.1. Változatlan művelési scenárió

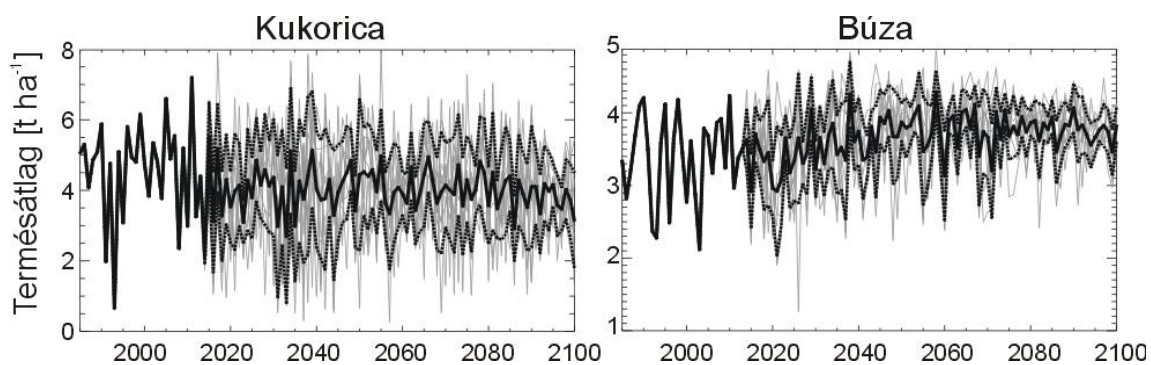
A 4M modellhez hasonlóan a Biome-BGCMuSo modellt is a 10 különböző klímamodell-eredmény által leírt meteorológiai viszonyok feltételezésével futtattuk. A szimulációkat a 1986-2100 időszakra végeztük el, melyből szintén az 1986-2013 időszakot tekintettük referenciának. A továbbiakban, a 4M eredményeinek a bemutatásához hasonlóan a referencia-időszakra szimulált termésátlagokhoz és szénfluxusokhoz hasonlítottuk a várható változásokat a jövőben.

A 34. ábrán láthatjuk a teljes 1986-2100 időszakra az alapbeállításokkal szimulált termésmennyiségek országos átlagát, ahol szürke vonallakkal a 10 klímamodell-eredménnyel kapott termésátlagokat, fekete vastag vonallal a multi-modell átlagot, és pontozott vonallal a klímaprojekciók megválasztásából adódó szórást láthatjuk.

A multi-modell átlag a kukorica termésátlagainak csökkenését mutatja, melynek mértéke évtizedenként 0,06 t ha<sup>-1</sup>. A búza esetén a várható növekedés mértéke 0,05 t ha<sup>-1</sup> évtizedenként (34. ábra). A különböző klímamodell-eredményekkel kapott termésátlagok szórása a multi-modell átlag körül 1,3 t ha<sup>-1</sup> a kukorica, és 0,4 t ha<sup>-1</sup> a búza esetén. A szórás

mértéke kisebb, mint a 4M modell eredményei esetén, de abban megegyeznek, hogy a kukoricára 2,5-3-szor nagyobb szórást mutatnak a futtatások, mint a búzára.

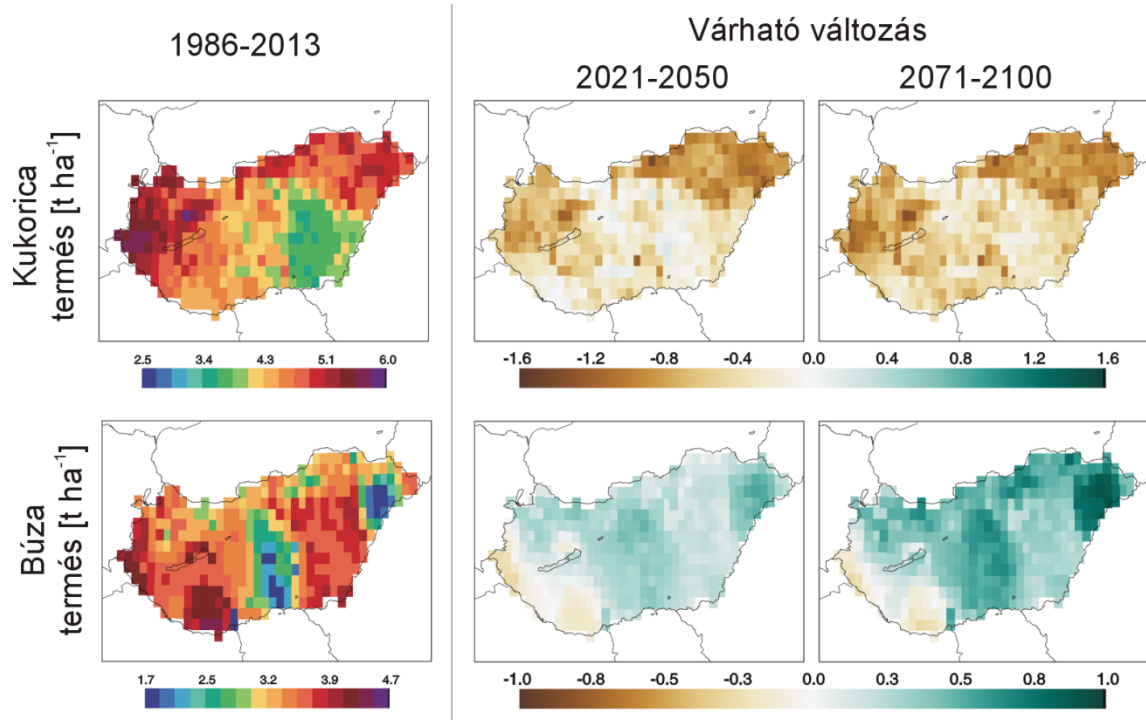
A t-próbával végzett szignifikanciavizsgálat azt mutatta, hogy  $p < 0,001$  szignifikanciaszint mellett a kukorica esetén a 10-ből 1,  $p < 0,01$  szint mellett 2 klímamodell alapján szignifikáns a várható változás a teljes 1986-2100 időszakot vizsgálva. A búza esetén  $p < 0,001$  mellett 10-ből 6,  $p < 0,01$  mellett 10-ből 9 klímamodell alapján szignifikáns a várható változás. A multi-modell átlagot tekintve a búza esetén mindkét szinten szignifikáns a termésátlagok várható változása, a kukorica esetén csak  $p < 0,05$  szignifikanciaszint mellett igaz mindez.



34. ábra. A Biome-BGCMuSo modellel szimulált kukorica és búza termésátlagok az 1986-2100 időszakra. A jövőre vonatkozóan 10 klímamodell alapján kapott eredményeket láthatjuk szürke vonalakkal. Vastag fekete vonallal jelöltük a 10 modell átlagát (multi-modell átlag), pontozott vonalakkal a 10 modell által definiált bizonytalanságot (átlag plusz/mínusz szórás).

A 35. ábra jobb oldalán láthatjuk a várható változások területi eloszlását a két vizsgált jövőbeli időszakra vonatkozóan. Bal oldalt az 1986-2013 időszakra futtatott modelleredmények láthatók, melyekhez a jövőbeli futások eredményeit hasonlítjuk. Az ábrán a 10 klímamodellel kapott eredmények átlagát mutatjuk be. A kukorica esetén mindkét jövőbeli időszakra termésnövekedésre számíthatunk, melynek mértéke országos átlagban 0,51 és 0,61  $t ha^{-1}$ . A 4M-mel kapott eredményekkel (29. ábra) ellentétben itt nem figyelhető meg a termésnövekedés jelentős fokozódása a század végére (35. ábra).

A búza esetén az ország nagy részén (a dél-nyugati területeket leszámítva) termésnövekedésre számíthatunk 2021-2050-re és 2071-2100-ra is, melynek mértéke országos átlagban 0,19 és 0,37  $t ha^{-1}$  (35. ábra). A távoli jövőre a Biome-BGCMuSo modellel becsült várható változások búza esetén is kisebbek, mint azt a 4M modellel kapott eredmények mutatják (29. ábra). Az 15. táblázatban láthatjuk számszerűen a különböző klímamodell-eredményekkel meghajtott szimulációk során kapott várható változásokat.



35. ábra. A kukorica (fenn) és a búza (lenn) termésátlaga az 1986-2013 időszakra a Biome-BGCMuSo modell szimulációi alapján (bal oldal), valamint az ehhez viszonyított várható változások mértéke a 2021-2050 és 2071-2100 időszakra (jobb oldal). Az értékek a 10 klímamoddellel kapott eredmények átlagát reprezentálják (multi-modell átlag).

15. táblázat. A Biome-BGCMuSo modellel szimulált búza és kukorica termésátlagok várható változása az 1986-2013 időszakhoz viszonyítva 2021-2050-re és 2071-2100-ra a különböző klímamodell-eredmények alapján.

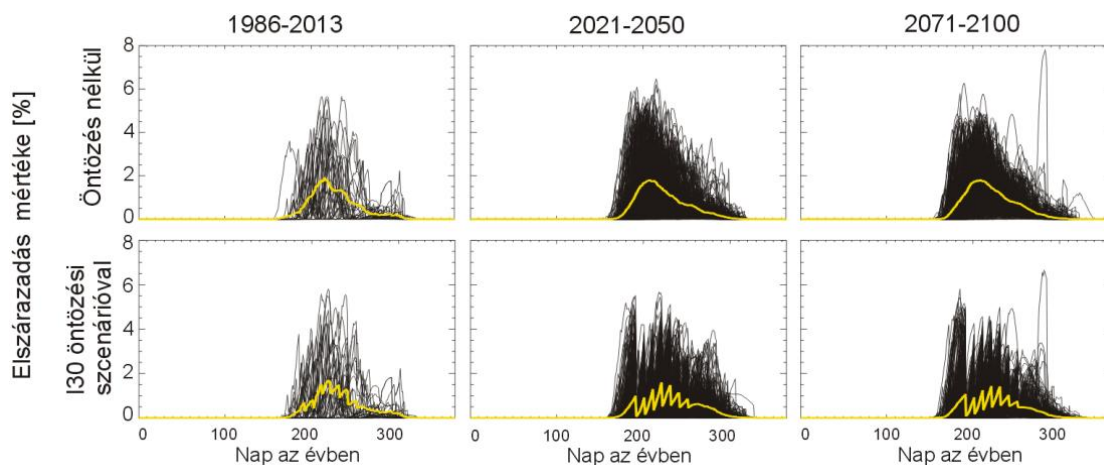
Klímamodell (GCM-RCM)	Várható változás a referencia-időszakhoz képest [t ha <sup>-1</sup> ]			
	Kukorica		Búza	
	2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
ALADIN-ARPEGE	-0,67	-0,88	0,38	0,41
HIRHAM5-ECHAM5	-0,22	-0,43	0,22	0,51
CLM-HadCM3Q0	-1,33	-1,15	0,29	0,42
HadRM3Q0-HadCM3Q0	-1,04	-1,38	0,48	0,51
HIRHAM5-ARPEGE	-0,65	-0,64	0,17	0,15
RCA-HadCM3Q0	0,16	-0,41	0,08	0,36
RCA-ECHAM5	-0,62	-0,80	0,03	0,31
REGCM3-ECHAM5	-0,60	-0,59	0,16	0,35
RACMO2-ECHAM5	-0,36	-0,01	0,07	0,39
REMO-ECHAM5	0,25	0,14	0,05	0,33
Multi-modell átlag	-0,51	-0,61	0,19	0,37
Modellek szórása	0,49	0,47	0,15	0,11



#### 4.5.2.1. Alternatív művelési scénáriók

A Biome-BGCMuSo modellel igyekeztünk ugyanazokat az alternatív művelési módokat alkalmazni, mint a 4M modellel. A trágyázás esetén ez egyszerűen kivitelezhető volt a dátumok és a műtrágya mennyiségének a változtatásával, azonban az öntözésnél más módszert kellett kidolgoznunk, mert a két modell működése ebből a szempontból jelentősen eltér. Az alkalmazott módszer logikáját a 3.5.2-es fejezetben tekintettük át.

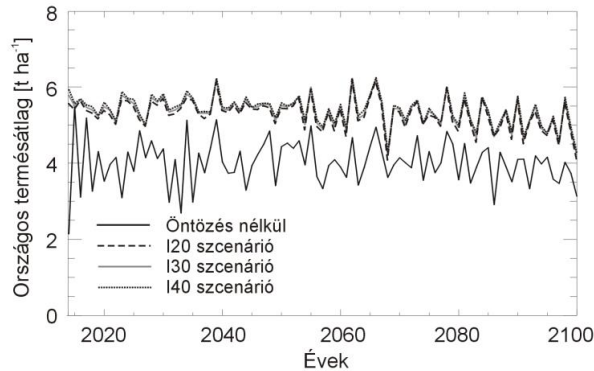
A szimulációk során csak a jövőbeli időszakra szimuláltunk öntözést (2014-2100), míg az 1986-2013 időszakban lineárisan növeltük az öntözővíz mennyiségét nulláról, a 2014-2024 időszak átlagára. Az 36. ábrán mutatjuk be az öntözés időpontjának meghatározására használt elszáradt növényi anyag és a növény teljes C tartalmából képzett százalékos arány országos átlagának éven belüli menetét, három időszakra (jövőbeli időszakok esetén mind a 10 modellre). A 36. ábrán látható, hogy az öntözések időpontjában az elszáradás mértéke visszaesik, majd addig növekszik, amíg a következő öntözés bekövetkezik. Ha az éves menetek átlagát a nullától különböző napokon átlagoljuk, azt láthatjuk, hogy az öntözés bevezetésével, a 2021-2050 időszakban 0,39%-ról 0,28%-ra, a 2071-2100 időszakban 0,40%-ról 0,26%-ra csökkent a szárazodás mértéke.



36. ábra. A Biome-BGCMuSo által modellezett, szárazság következtében fellépő növényi elhalás mértéke kukoricára, melyet az elszáradt növényi részek szénttartalmának és a teljes szénttartalomnak hányadosából képeztünk százalékos arányban, napi szinten. A felső sorban az öntözés nélküli esetet, az alsó sorban az I30-as öntözési scenárióval alkalmazva kapott eredményeket láthatjuk három időszakra vonatkozóan. A fekete vonalak az elszáradás mértékének országos átlagait reprezentálják a különböző évekre, melyeket együtt, egy 365 nappól álló tengely mentén ábrázoltunk. Sárga vonallal jelöltük az adott ábrán megjelenített összes éves menet átlagát. A jövőbeli időszakokra minden év 10-szer szerepel, a 10 különböző klímamodell-eredmény alkalmazása miatt.



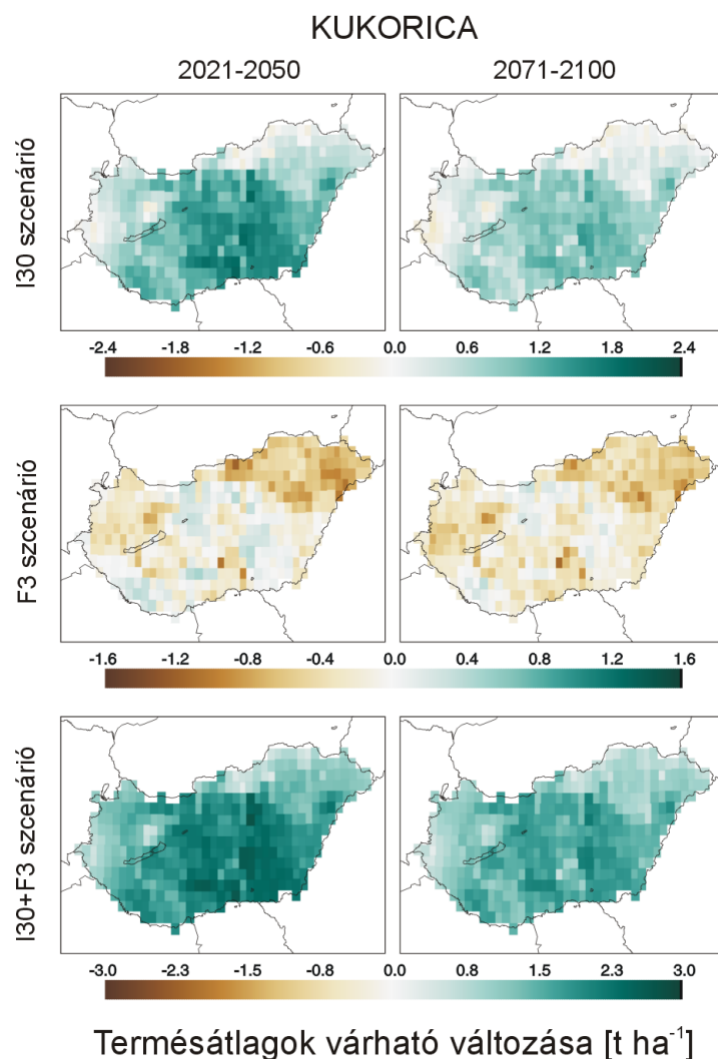
Fontos megjegyezni, hogy a Biome-BGCMuSo esetén az I20, I30 és I40 scenáriók során nem 20, 30 és 40 mm csapadékkal megegyező vízmennyiséget öntözünk el alkalmanként, hanem a 4M szimulációk során adott évben, adott öntözési scenárióval kijuttatott vízmennyiséget osztjuk le 7 alkalomra. A célunk az volt, hogy az összehasonlíthatóság érdekében megegyező vízmennyiség kerüljön előntözésre mindkét modell alkalmazása során.



37. ábra. **Jövőbeli termésátlag alakulása a multi-modell átlag alapján öntözés nélküli (fekete folytonos vonal), valamint a három öntözött scenárió esetén kukoricára vonatkozóan.**

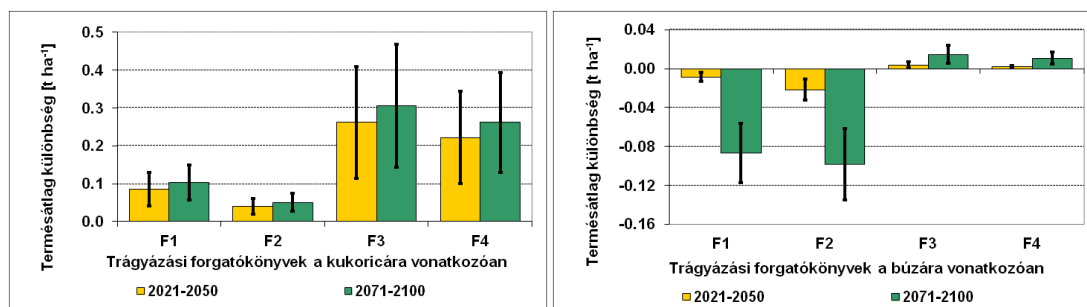
Ha az öntözést alkalmazó futtatások átlagának idősorát vizsgáljuk a jövőre, a 4M modell eredményeihez hasonló képet láthatunk (37. ábra). A különböző öntözési scenáriók (I20, I30, I40) közötti különbség igen csekély, de jelentősen magasabb termésátlagokat érhetünk így el, mint öntözés nélkül. Azonban a Biome-BGCMuSo-val kapott eredmények nem mutatnak olyan mértékű csökkenő tendenciát az öntözött kukorica esetén, mint a 4M modell eredményei (30. és 37. ábra). Ha kizárólag a 2014-2100 időszakot tekintjük, sem az öntözés nélküli, sem az öntözött scenárió nem mutat szignifikáns várható változást ( $p < 0,1$  szint mellett sem).

Ha azonban összehasonlítjuk az I30-as scenárióval kapott jövőbeli termésátlagokat az öntözés nélküli referencia-időszakkal – mint azt már a 37. ábra alapján sejtettük – jelentős különbségeket találunk (38. ábra, felső sor). A multi-modell alapján a várható változás mértéke 2021-2050-re  $0,92 \text{ t ha}^{-1}$ , 2071-2100-ra pedig  $0,58 \text{ t ha}^{-1}$  országos átlagban.



38. ábra. A kukorica termésátlagainak alakulása 2021-2050-re (balra) és 2071-2100-ra (jobbra) a Biome-BGCMuSo modell szerint az 1986-2013 referencia-időszakra végzett szimuláció eredményeihez képest. Az ábrák elkészítéséhez az I30-as öntözési az F3-as trágyázási szcenárió, valamint ezek együttes alkalmazását feltételező I30+F3 szcenárióát alkalmaztuk. Az eredmények a 10 klímamoddellel kapott szimulációk átlagát reprezentálják.

A trágyázás időpontjának és mennyiségének változtatását a 4M-mel teljesen azonos módon végeztük el a Biome-BGCMuSo esetén is (lásd 3.5.2 fejezet). Négy-négy szcenárióát futtattunk kukoricára és búzára. Az így kapott termésátlag-változásokat a referencia időszakhoz képest a 39. ábrán mutatjuk be. A műtrágya mennyiségének itt is nagyobb szerepe volt, mint a trágyázás időpontjának (az F1 és F2 elkülönül az F3 és F4-től mind a két gabonára, mind a két időszakban), bár a 4M modell eredményeinél az időpont itt egy kissé nagyobb hatással volt a termés mennyiségére a kukorica esetén.



39. ábra. Különböző trágyázási scenáriók hatása a Biome-BGCMuSo által modellezett kukorica (balra) és búza (jobbra) termésátlagokra a 2021-2050 és 2071-2100 időszakokra, a megszokott művelést alkalmazó szimulációk eredményéhez képest.

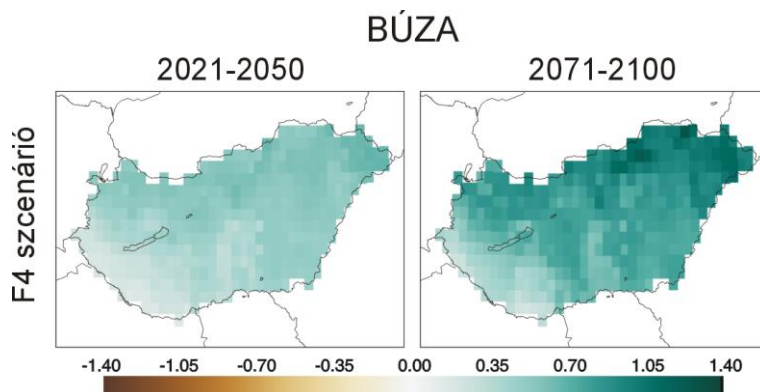
Ha összevetjük a 32. és 39. ábra bal oldalán páronként az F1 és F2 valamint az F3 és F4 oszlopait, láthatjuk, hogy a Biome-BGCMuSo esetén nagyobb a különbség a párok tagjai között. A kukorica esetén itt is az F3-as trágyázási scenárió adta a legnagyobb termésátlag-növekedést, így a továbbiakban ezt mutatjuk be részletesebben.

A 38. ábra középső sorában láthatjuk a két jövőbeli időszakra várható változásokat. Országos átlagban a várható csökkenés mértéke a trágyázás nélküli esethez képest (35. ábra első sora) megközelítőleg a felére csökkent (0,51-ről 0,25 t ha<sup>-1</sup>-ra 2021-2050-ben és 0,61-ről 0,31 t ha<sup>-1</sup>-ra 2071-2100-ban).

16. táblázat. A 2021-2050 és 2071-2100 időszakokra várható országos termésátlag változások 10 klímamodell eredmény alapján, három különböző művelési scenárió (I30, F3, I30+F3) feltételezve a referencia-időszakhoz képest kukoricára vonatkozóan.

Klímamodell (GCM-RCM)	Várható változás a referencia-időszakhoz képest [t ha <sup>-1</sup> ]					
	Kukorica – I30		Kukorica – F3		Kukorica – I30+F3	
	2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
ALADIN-ARPEGE	0,26	-0,03	-0,44	-0,70	0,72	0,41
HIRHAM5-ECHAM5	0,96	0,74	0,12	-0,04	1,78	1,54
CLM-HadCM3Q0	0,95	0,62	-1,29	-1,02	1,62	1,34
HadRM3Q0-HadCM3Q0	0,73	-0,24	-0,96	-1,32	1,32	0,19
HIRHAM5-ARPEGE	1,01	0,80	-0,36	-0,37	1,87	1,70
RCA-HadCM3Q0	1,03	0,74	0,66	-0,09	1,87	1,55
RCA-ECHAM5	1,23	0,51	-0,38	-0,56	2,13	1,28
RegCM3-ECHAM5	1,08	1,02	-0,35	-0,22	1,97	1,93
RACMO2-ECHAM5	0,85	0,70	-0,18	0,53	1,45	1,42
REMO-ECHAM5	1,16	0,96	0,72	0,71	2,01	1,86
<b>Multi-modell átlag</b>	<b>0,92</b>	<b>0,58</b>	<b>-0,25</b>	<b>-0,31</b>	<b>1,67</b>	<b>1,32</b>
<b>Modellek szórása</b>	<b>0,28</b>	<b>0,41</b>	<b>0,63</b>	<b>0,63</b>	<b>0,42</b>	<b>0,58</b>

A kombinált scenárió estén (I30+F3), amikor a műtrágya mennyiségét is megnöveltük, és öntözést is alkalmaztunk, a közeljövőre 1,7 t ha<sup>-1</sup>-ral, a távoli jövőre pedig 1,3 t ha<sup>-1</sup>-ral kaptunk magasabb kukoricatermést az öntözés nélküli, megszokott trágyázási módot feltételező esethez képest (38. ábra alsó sora) a Biome-BGCMuSo eredményei alapján. A 16. táblázatban láthatjuk a 10 klímamodell-eredménnyel kapott kukorica termésátlagokat különböző művelési scenáriókra.



40. ábra. A búza termésátlagainak alakulása 2021-2050-re (balra) és 2071-2100-ra (jobbra) a Biome-BGCMuSo modell szerint az 1986-2013 referencia időszakra végzett szimuláció eredményeihez képest, az F4-es trágyázási scenárió feltételezve. Az értékek 10 klímamoddellel kapott szimulációk átlagát reprezentálják.

A búzára vonatkozóan az F4-es trágyázási scenárió mutatta a legnagyobb termésátlag-növekedést a Biome-BGCMuSo modell szimulációi során (40. ábra, jobb oldal). 2021-2050-re 0,42 t ha<sup>-1</sup>-ral, 2071-2100-ra 0,69 t ha<sup>-1</sup>-ral növekedhet a búza termésátlaga országos szinten a referencia-időszakhoz (és a megszokott műveléshez) képest.

A 10 klímamodell alapján készült modellfutások eredményei a 17. táblázatban láthatók, ahol egy növelt (F4) és egy csökkentett mennyiségű (F1) trágyázást feltételező scenárióra vonatkozó várható változásokat mutatunk be. A műtrágya mennyiségének a csökkentése nagyobb hatással volt a termésátlagokra a Biome-BGCMuSo modell alapján, mint a 4M modell esetén. A F1 scenárió feltételezve csekély mértékű csökkenés várható a referenciaeredményekhez képest (17. táblázat).

17. táblázat. **2021-2050-re és 2071-2100-ra várható országos termésátlag-változások 10 klímamodell-eredmény alapján két különböző művelési scenáriót (F1, F4) feltételezve a referencia-időszakhoz képest, búzára vonatkozóan.**

Klímamodell (GCM-RCM)	Várható változás a referencia-időszakhoz képest [t ha <sup>-1</sup> ]			
	Búza - F1		Búza - F4	
	2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
ALADIN-ARPEGE	0,00	-0,02	0,71	0,81
HIRHAM5-ECHAM5	-0,12	0,07	0,51	0,92
CLM-HadCM3Q0	0,04	0,05	0,44	0,74
HadRM3Q0-HadCM3Q0	0,17	0,12	0,70	0,84
HIRHAM5-ARPEGE	-0,15	-0,29	0,43	0,53
RCA-HadCM3Q0	-0,29	-0,08	0,40	0,77
RCA-ECHAM5	-0,25	-0,08	0,23	0,65
REGCM3-ECHAM5	-0,19	-0,08	0,46	0,75
RACMO2-ECHAM5	-0,29	-0,07	0,37	0,84
REMO-ECHAM5	-0,29	-0,09	0,34	0,72
<b>Multi-modell átlag</b>	<b>-0,14</b>	<b>-0,05</b>	<b>0,46</b>	<b>0,76</b>
<b>Modellek szórása</b>	<b>0,16</b>	<b>0,11</b>	<b>0,15</b>	<b>0,11</b>

#### 4.6. Hazai mezőgazdasági szénmérleg eredmények

A Biome-BGCMuSo modellel lehetőség van a mezőgazdasági művelés alatt álló területek különböző szénmérleg-komponenseinek a szimulációjára is (Somogyi et al., 2010). Országos léptékű szénmérleg-szimuláció a Biome-BGCMuSo-val mezőgazdasági növényekre vonatkozóan eddig még nem történt (az előzmények kapcsán lásd Grosz et al., 2010). Ebben a fejezetben áttekintjük, milyen várható változásokra számíthatunk az GPP, Reco és NEE tekintetében kukorica és őszi búza esetében.

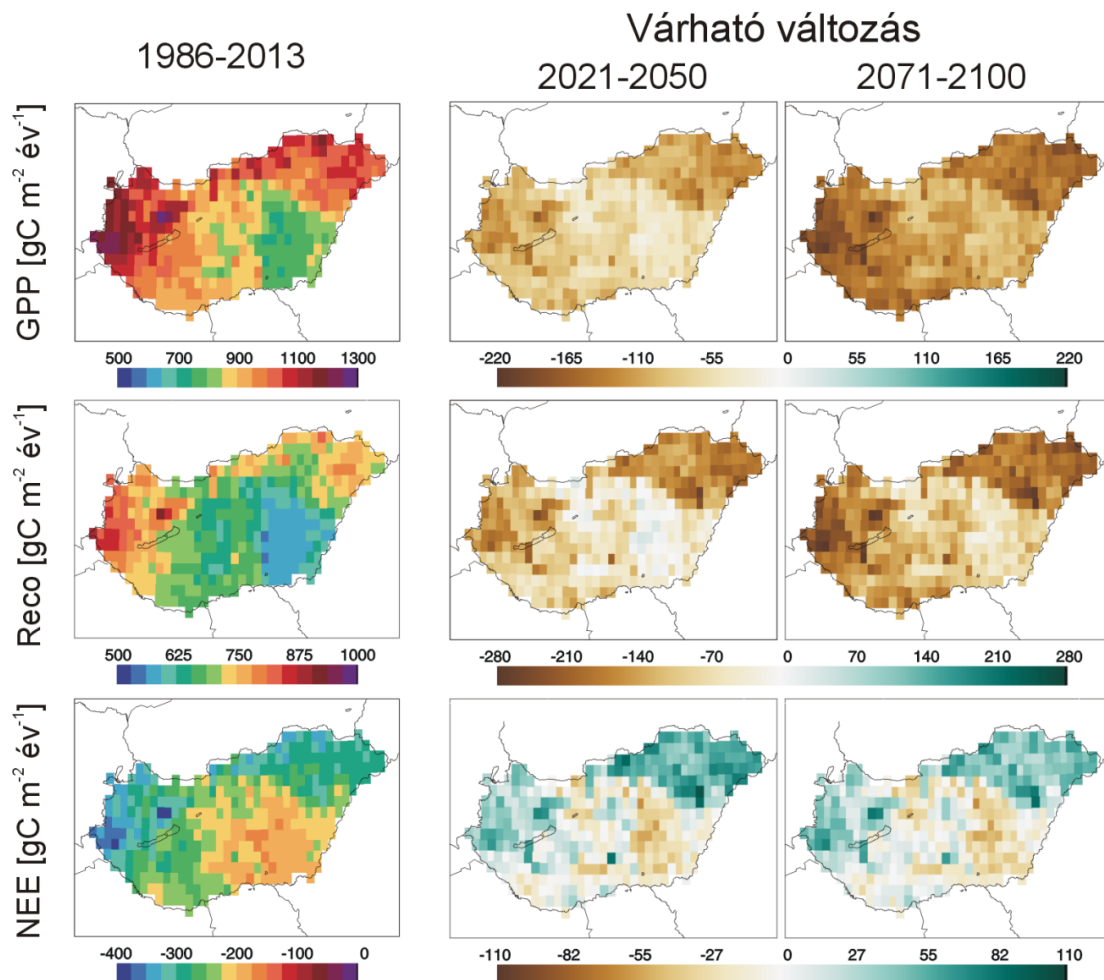
##### 4.6.1. Kukorica

A különböző szénfluxusokat először a kukoricára vonatkozóan mutatjuk be. A 41. ábra első két sorában a két ellentétes előjelű nagy fluxus, a GPP és a Reco, azaz a szénfelvétel és a teljes respiráció látható. A harmadik sorban e kettő egyenlegét, a nettó szén-dioxid forgalmat ábrázoltuk (szén egyenértékben kifejezve), amely akkor negatív, ha az ökológiai rendszer szenet vesz fel a légkörből.

Ha az egyes szénfluxusok területi eloszlását tekintjük a kukoricára vonatkozóan, látható, hogy a legalacsonyabb GPP és Reco értékek főként az Alföldön található. Magasabb értékek az ország nyugati, észak-nyugati és észak-keleti részein fordulnak elő.

A látható mintázat valószínűsíthetően a talajtextúra és a csapadék éves illetve éven belüli eloszlásának együttes hatására alakul ki.

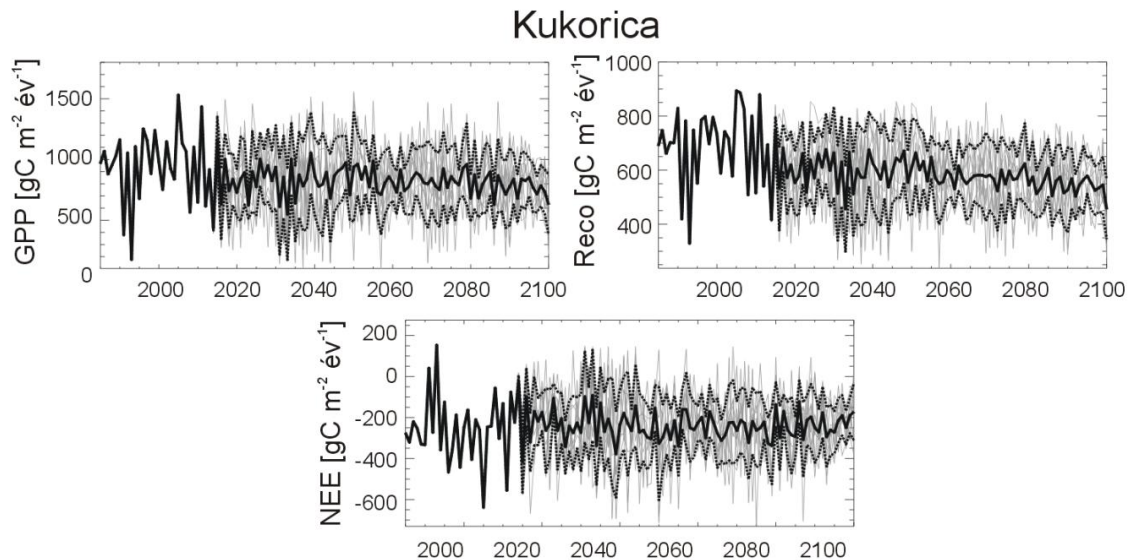
A talajtextúra hatását korábban Ács és munkatársai (2007) is vizsgálták a talaj párolgásának modellezése során, mely esetünkben a búzára vonatkozóan látszik egyértelműen (4.6.2. fejezet). A GPP országos átlaga a Biome-BGCMuSo szimulációi alapján az 1986-2013 időszakra kukorica esetén  $953 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$ . A Reco értéke átlagosan  $695 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$ , így az NEE  $-258 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$  értéket vesz fel a referencia időszakban. Láthatjuk, hogy az ország észak-nyugati és észak-keleti területein a GPP magasabb értékeket vesz fel a referencia időszakban, melyhez nem társul olyan nagymértékű respiráció, így ezeken a területeken a legnagyobb a szénfelvétel, azaz az NEE nagy negatív értékeket vesz fel.



41. ábra. A szénmérleg komponenseinek (GPP, Reco és NEE) a Biome-BGCMuSo modellel szimulált értékei az 1986-2013 időszakra és a jövőben várható változásai kukoricára. Az értékek a 10 klímamoddellel kapott eredmények átlagát reprezentálják.

A várható változásokat tekintve a különböző klímamodell-eredményekkel meghajtott szimulációk szórása igen nagy. Országos átlagban 2021-2050-ra  $115 \pm 106 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$ , 2071-2100 pedig  $160 \pm 100 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$  GPP csökkenést mutatnak az eredmények. A respirációt tekintve átlagban kisebb mértékű és kisebb szórású csökkenés várható (2021-2050-ra  $93 \pm 58 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$ , 2071-2100-ra  $142 \pm 59 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$ ). Mivel a GPP nagyobb mértékben csökken, mint a Reco, így az NEE kismértékű növekedésére számíthatunk, szintén nagy szórással (2021-2050-re  $22 \pm 48 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$ , 2071-2100-ra  $18 \pm 42 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$ ). Ez azt jelenti, hogy a jövőben a szénfelvétel mértéke csökkenhet, azaz több szén-dioxid marad a légkörben (41. ábra).

A 42. ábrán láthatjuk a szénfluxusok idősorát a teljes 1986-2100 időszakra. A korábbiakhoz hasonlóan a szürke vonalak itt is a 10 klímamodell-eredménnyel meghajtott futásokat, a vastag fekete vonal ezek átlagát, a pontozott vonalak pedig ezek szórását mutatják. Az NEE-t leszámítva minden szénáram várható változása szignifikáns ( $p < 0,01$ ), évtizedenként  $15 \text{ gC m}^{-2}$  csökkenésre számíthatunk a GPP és  $14 \text{ gC m}^{-2}$  csökkenésre a Reco esetén.

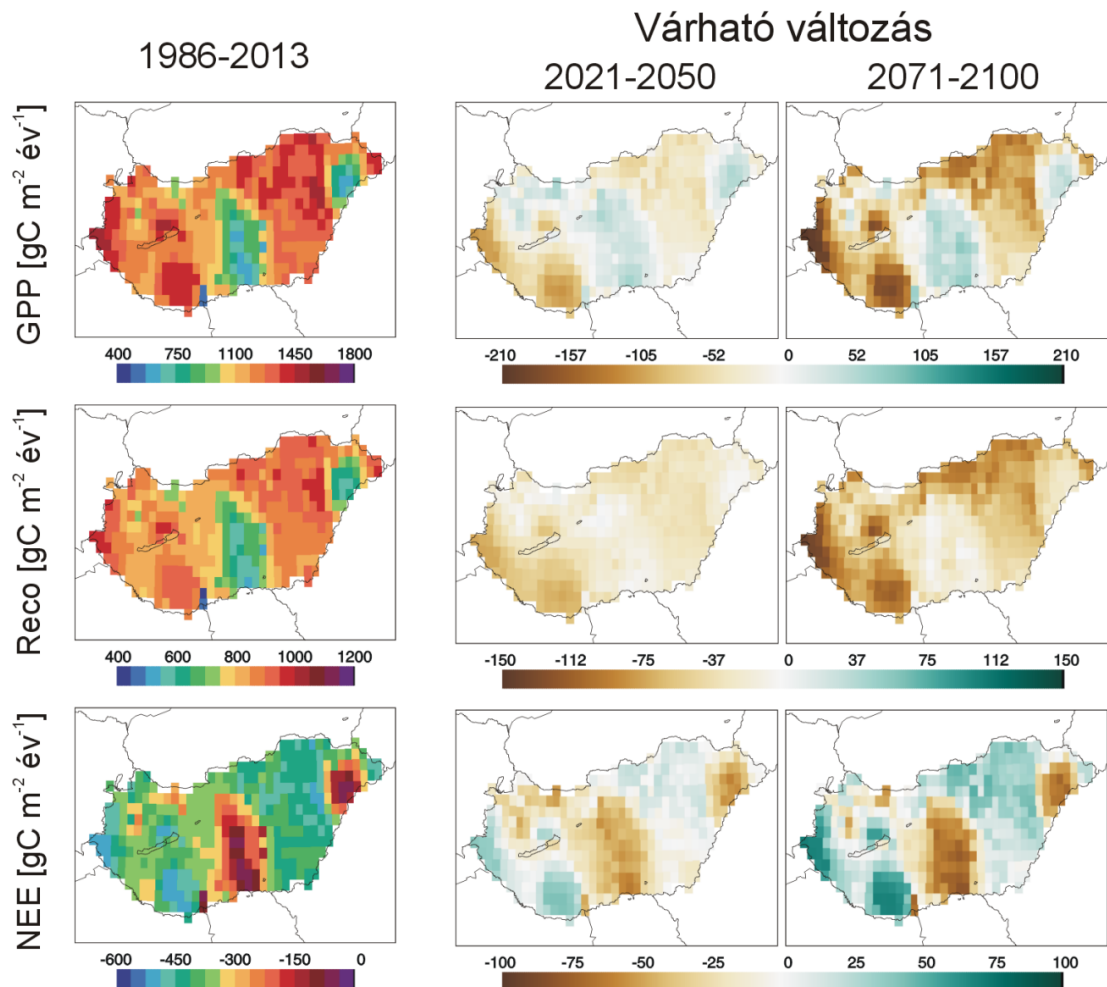


42. ábra. A Biome-BGCMuSo modellel szimulált szénfluxusok kukoricára, az 1986-2100 időszakra. A jövőre vonatkozóan a 10 klímamodell alapján kapott eredményeket láthatjuk szürke vonalakkal. Vastag fekete vonallal jelöltük a 10 modell átlagát (multi-modell átlag), pontozott vonalakkal a 10 modell szórásával növelt illetve csökkentett átlagot.



## 4.6.2. Búza

A referencia-időszakban a szénfluxusok búza felett magasabb értékeket vesznek fel, mint a kukorica felett (vessük össze a 41. és 43. ábrák bal oldalán lévő térképekhez tartozó skálát). Ha az egyes szénfluxusok területi eloszlását tekintjük búzára vonatkozóan, a jellegzetes mintázat követi a talajtextúra eloszlását (43. ábra, bal oldali térképek), míg a kukorica esetén láthattuk, hogy valószínűleg a csapadék eloszlása módosítja a képet. A legalacsonyabb GPP értékek a homokos Nyírségben, Felső- és Alsó Kiskunságban, a Szigetköz déli részén és a Tapolcai-medencében találhatóak. A vályogos és agyagos vályogos területeken láthatjuk a legmagasabb GPP értékeket. Ilyen például a Hortobágy északi része, a Mátra, a Mecsek térsége, Bakony keleti része és hazánk nyugati határvidéke. A respiráció hasonló területi eloszlást mutat.



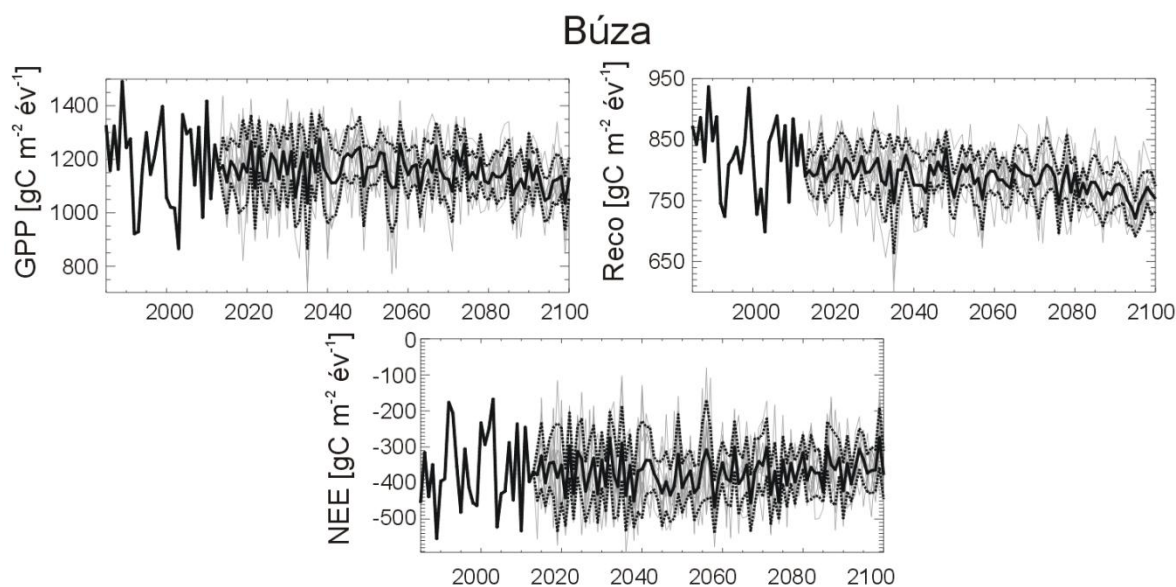
43. ábra. A szénmérleg komponenseinek (GPP, Reco és NEE) a Biome-BGCMuSo modellel szimulált értékei az 1986-2013 időszakra és a jövőben várható változásai búzára. Az értékek a 10 klímamoddellel kapott eredmények átlagát reprezentálják.



Korábbi tanulmányok során szintén hasonló mintázat jelent meg Ács és Breuer (2006) munkájában, ahol a talajrespirációt modellezték országos szinten. A GPP országos átlaga a Biome-BGCMuSo szimulációi alapján az 1986-2013 időszakra a búza esetén  $1187 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$ . A Reco átlagos értéke  $826 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$ , így az NEE  $-362 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$ -nek adódik.

A jövőre vonatkozó futtatások eredményei országos átlagban azonban kisebb várható változást mutatnak búza esetén, mint azt a kukoricánál láthattuk (43. ábra). A GPP várhatóan kisebb mértékben csökken (2021-2050-re  $15 \pm 33 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$ -el; 2071-2100-ra  $54 \pm 32 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$ -el), mint a Reco, amelynek  $29 \pm 18$  és  $56 \pm 18 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$  csökkenésére számíthatunk. Ha a területi eloszlást tekintjük, látható, hogy a GPP várható változása nagy területi változékonyságot mutat (43. ábra). Hazánk középső és keleti területein a GPP növekedése várható, ugyanott a Reco csupán kisebb mértékben csökken, mint máshol, így az NEE térképén is megjelenik ez a terület, mint szénmegkötés növekedés (nagyobb negatív értékek).

Az országos átlagok teljes idősorait a 44. ábrán láthatjuk. A teljes időszakra számított szignifikanciavizsgálat során az NEE-t leszámítva minden szénáram várható változása szignifikánsnak bizonyult (a kukoricához hasonlóan,  $p < 0,01$ ). A csökkenő trend mértéke a GPP esetén  $6,1 \text{ gC m}^{-2}$ , a Reco esetén pedig  $6,2 \text{ gC m}^{-2}$ .



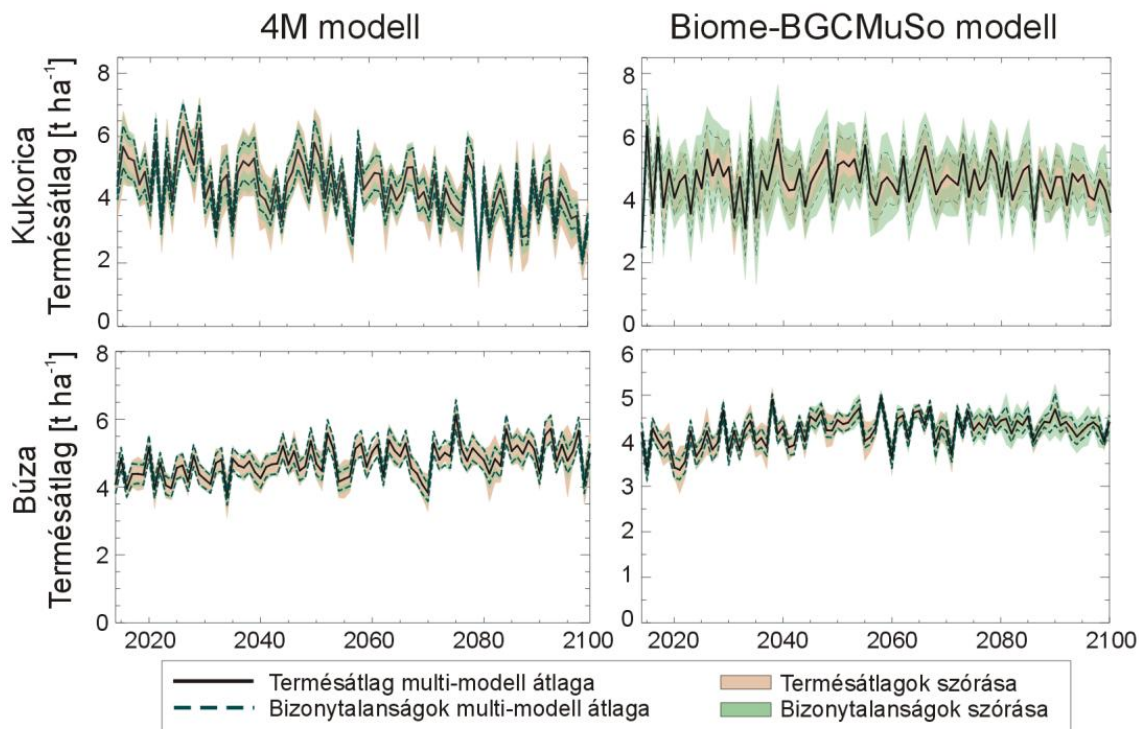
44. ábra. A Biome-BGCMuSo modellel szimulált szénfluxusok búzára, az 1986-2100 időszakra. A jövőre vonatkozóan a 10 klímamodell alapján kapott eredményeket láthatjuk szürke vonalakkal. Vastag fekete vonallal jelöltük a 10 modell átlagát (multi-modell átlag), pontozott vonalakkal a 10 modell szórásával növelt illetve csökkentett átlagot.

## 4.7. Bizonytalanság

Minden mérési adatnak és minden modelleredménynek megvan a maga bizonytalansága (Hollinger and Richardson, 2005; Richardson et al., 2012). A doktori értekezésemben bemutatott összetett modellezési tanulmány során a szimulációk bizonytalansága több különböző forrásból tevődik össze. A bemenő adatok bizonytalansága, a modellek alapegyenleteiben szereplő közelítésekből (vagyis a modellstruktúrából) adódó hibák, valamint a modellparaméterek bizonytalansága mind-mind befolyásolják az eredmény bizonytalanságát. A hibalehetőségek számszerűsítése minden esetben növeli egy tanulmány értékét, így ebben a fejezetben két különböző forrásból származó bizonytalanságra igyekszünk számszerű becslést adni (Beven and Binley, 1992; Prihodko et al., 2008; Keenan et al., 2011).

Az egyik bizonytalanság a jövőbeli meteorológiai viszonyokat meghatározó klímamodell-eredményekből származik. Jelen dolgozatban 10 különböző klímamodell-eredmény használatával számszerűsítjük a jövőbeli termésmennyiség meteorológiai viszonyok bizonytalanságából adódó hibáját. Minden szimulációt úgy végeztünk el, hogy mind a 10 klímamodell-eredményt felhasználtuk, és a multi-modell átlagon kívül vizsgáltuk a klímaprojekciók által kiváltott különbségeket, azaz az eredmények szórását.

A másik bizonytalanság, amit számszerűsítettünk, a modellkalibráció során optimalizált paraméterek értékének bizonytalanságából fakad. A kalibrációra használt GLUE módszer alkalmazásával van lehetőség a modelleredmények paraméterértékek megválasztásából adódó bizonytalanságának becslésére (Beven et al., 2000; Prihodko et al., 2008; Beven and Binley, 2014). Ez a gyakorlatban úgy zajlik, hogy a módszer során a kalibrált paraméterértéken túl további (esetünkben kettő; Prihodko et al., 2008) paraméteregyüttesekkel végzünk futtatásokat, melyekkel felül- és alulbecsüljük a termésátlagokat (bővebben a 3.7.1-es fejezetben tárgyaltuk). E kettő különbsége adja a paraméterértékekből származó bizonytalanságot. Ezt szintén mind a 10 klímamodell-eredmény alapján meghatároztuk, melynek szintén számszerűsíthető a multi-klímamodell átlaga és szórása.



45. ábra. A 4M és a Biome-BGCMuSo modellek búza és kukorica országos termésátlag-eredményeinek multi-modell átlaga és becsült bizonytalansága megszokott művelés (BAU) mellett.

A 45. ábrán láthatjuk a 4M és a Biome-BGCMuSo modellek termésátlag eredményeit és annak bizonytalanságát változatlan művelési mód mellett, mindkét gabonanövényre. A multi-modell átlag (fekete folytonos vonal) körül barna színezéssel láthatjuk a klímamodel-eredmények megválasztásából származó szórást ( $\pm$ szórás fele). Zöld folytonos vonalakkal jelöltük a paraméterértékek megválasztásából származó bizonytalanságot a multi-modell átlag körül, melyet a felül- és alulbecslő futások különbségeként képeztünk (45. ábra). Mivel ismét 10 klímamodel-eredménnyel hajtottuk meg a futásokat, így azok átlagát jelzik a zöld folytonos vonalak, illetve azok szórását a zöld folytonos vonalak körül zöld színezéssel jelöltük ( $\pm$  bizonytalanságok szórásának a fele). A 18. táblázatban számszerűen összefoglaltuk a bizonytalanságok átlagát a 2014-2100 időszakra átlagolva. Mindkét modellről elmondható, hogy a kukoricára vonatkozóan nagyobb bizonytalansággal rendelkeznek a modelleredmények, mint búzára (45. ábra, 18. táblázat). Továbbá a klímamodel-eredmények által adott bizonytalanság minden esetben nagyobb, mint a paraméterértékekből adódó bizonytalanság. A 4M és a Biome-BGCMuSo modellek a bizonytalanságok nagyságrendjét tekintve hasonló eredményeket adnak az egyes gabonákra vonatkozóan (18. táblázat).

18. táblázat. A termésátlag-szimulációk különböző forrásokból származó bizonytalanságai a 2014-2100 időszak átlagára vonatkozóan.

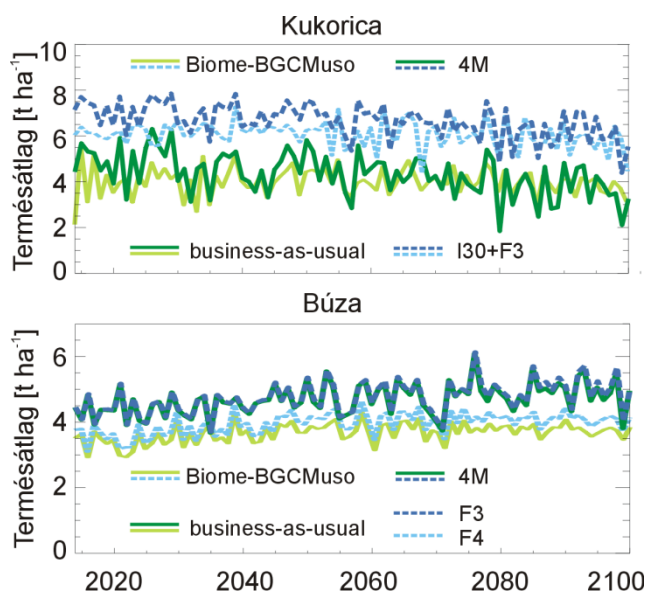
2014-2100 időszak átlaga	4M		Biome-BGCMuSo	
	kukorica	búza	kukorica	búza
Klíma-modell megválasztásából adódó szórás (t ha <sup>-1</sup> )	1,73	0,78	1,47	0,48
Paraméterérték megválasztásából adódó bizonytalanság (multi-modell átlag) (t ha <sup>-1</sup> )	0,95	0,64	1,43	0,36
Paraméterérték megválasztásából adódó bizonytalanság szórása (multi-modell szórása) (t ha <sup>-1</sup> )	0,48	0,15	0,91	0,18

## 5. Modelleredmények összevetése/szintézis

A két eltérő logikájú modell, a 4M és a Biome-BGCMuSo modellek eredményeit részletesen tárgyaltuk a 4.5 és 4.6 fejezetekben. Munkám egyik legfontosabb kérdése, hogy összeegyeztethető-e a két modell projekciója? Más szavakkal, a különböző modellstuktúrákból adódó bizonytalanságok ellenére nyerhetünk-e konzisztens, robosztus becslést a termésmennyiség jövőbeli alakulása kapcsán?

Az egyszerűség kedvéért itt csak a multi-modell átlaggal foglalkozunk.

A 46. ábrán együtt ábrázoltuk a két modellel kapott jövőbeli szimulációk eredményeinek országos átlagát a megszokott művelési mód mellett, valamint azzal az alternatív scenárióval, mely az általunk kipróbáltak közül a legnagyobb termésátlag növekedést érte el (kukorica esetén mindkét modellre az I30+F3, búza esetén a 4M-re az F3, a Biome-BGCMuSo-ra az F4). Kukorica esetén láthatjuk, hogy a két modell által becsült idősor közelebb áll egymáshoz, mint a búza esetén (46. ábra). Gyakran az évek közötti eltérésekben is megegyeznek. Búza esetén a 4M magasabb termésátlagokat becsül és nagyobb évek közötti változékonyságot mutat, mint a Biome-BGCMuSo.



46. ábra. A 4M (sötét színek) és a Biome-BGCMuSo (világos színek) modellek termésátlagra vonatkozó eredményeinek összehasonlítása. A zöld folytonos vonalak mindkét gabonanövény esetén a megszokott művelést (BAU), míg a kék szaggatott vonalak valamilyen alternatív művelési scenáriót alkalmazó futást reprezentálnak. Kukoricára az I30+F3 scenáriót, búzára a 4M esetén az F3-as, míg a Biome-BGCMuSo esetén az F4 scenáriót mutatjuk be (amelyek a legnagyobb termésnövekedést mutatták).

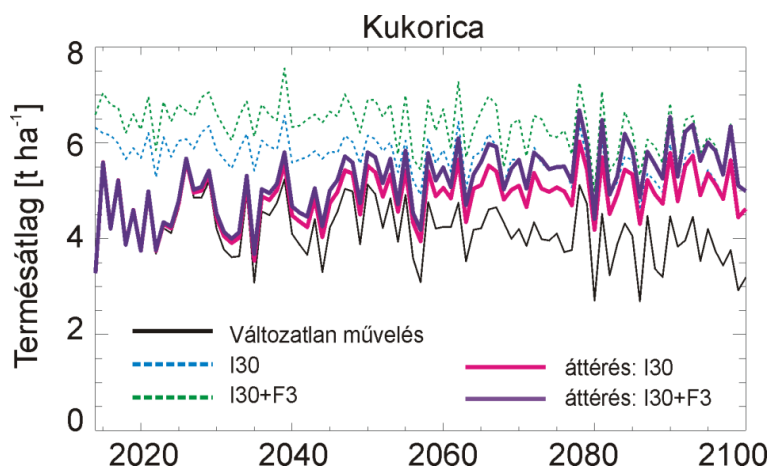
A 19. táblázatban összefoglaltuk a megszokott művelési mód alkalmazása mellett várható változásokat mindkét gabonára, mindkét modellre. Első megközelítésben elmondhatjuk, hogy mindkét modell azonos irányú várható változásokat jelzett előre, a kukoricára csökkenő tendenciát, míg a búzára növekvőt, tehát a fejezet elején feltett kérdésre a válasz, miszerint konzisztens becslést adott-e a két modell, igen.

19. táblázat. A 4M és a Biome-BGCMuSo modellek által becsült termésátlag-változások kukoricára és búzára a megszokott (BAU) művelési mód alkalmazása mellett.

Változatlan művelés	4M	Biome-BGCMuSo
Kukorica		
2021-2050	-0,35±0,82 t ha <sup>-1</sup>	-0,51±0,49 t ha <sup>-1</sup>
2071-2100	-1,31±0,82 t ha <sup>-1</sup>	-0,61±0,47 t ha <sup>-1</sup>
évtizedes trend	-0,15 t ha <sup>-1</sup>	-0,06 t ha <sup>-1</sup>
szignifikáns? (p<0,001)	igen	nem
Búza		
2021-2050	0,21±0,23 t ha <sup>-1</sup>	0,19±0,15 t ha <sup>-1</sup>
2071-2100	0,66±0,38 t ha <sup>-1</sup>	0,37±0,11 t ha <sup>-1</sup>
évtizedes trend	0,07 t ha <sup>-1</sup>	0,05 t ha <sup>-1</sup>
szignifikáns? (p<0,001)	igen	igen

Láthatjuk azonban, hogy míg a búza esetén a várható változások mértéke nagyságrendileg hasonló (2021-2050-re közel azonos), addig a kukorica esetén nagyobb a különbség (19. táblázat). A 4M modell szerint mindkét gabonára a változás mértéke a távoli jövőre vonatkozóan nagyobb, mint a közeljövőre. A kukorica esetén a 2021-2050-re várható változás megnégyszereződik a század végére. A Biome-BGCMuSo nagyobb csökkenést prognosztizál a közeli jövőre, de annak mértéke alig növekszik a század végére. A teljes 1986-2100 időszakot tekintve a várható változás mértéke nem szignifikáns (p<0,001), míg a 4M szignifikáns változásokat mutat. A búza esetén mindkét modell a termésátlag növekedésének fokozódását mutatja. A trendek nagyságrendileg hasonlóak, és mindkét esetben szignifikáns a várható változás (19. táblázat).

A 4M és a Biome-BGCMuSo modellekkel kapott multi-modell projekciók átlaga alapján a kukorica becsült termésátlag-csökkenés az 1986-2013 időszakhoz képest 2021-2050-re 0,43±0,58 t ha<sup>-1</sup>, 2071-2100-ra 0,96±0,5 t ha<sup>-1</sup> (megszokott művelési mód mellett). Búza esetén 0,20±0,12 t ha<sup>-1</sup> növekedésre számíthatunk a közeljövőben és 0,51±0,19 t ha<sup>-1</sup> növekedésre a távoli jövőben.



47. ábra. A 4M és Biome-BGCMuSo multi-modell átlag termésbecslés eredményeinek az átlaga kukoricára vonatkozóan, változatlan művelés (fekete vonal) mellett, az I30 (kék szaggatott vonal), valamint az I30+F3 (zöld szaggatott vonal) alternatív művelési scenáriókkal. Lila és rózsaszínűek azok az esetek, amikor a változatlan művelésről fokozatos áttérést feltételezünk az említett alternatív művelési scenáriókra.

Végezetül kukoricára vonatkozóan vizsgáltuk az I30-as és az I30+F3-as scenárióra való fokozatos áttérés lehetőségét. A 47. ábrán a multi-növénymodell és multi-klimamodel (a dolgozatban eddig simán multi-modell) eredményeket láthatjuk a változatlan művelés, az I30-as és az I30+F3-as scenáriók esetén. Továbbá feltüntettük a fokozatos áttéréssel elérhető termésátlagokat a két alternatív scenárió esetén. Utóbbi kiszámításához 2020-ig a változatlan művelési mód eredményeit, majd 2100-ig az alternatív scenáriókkal kapott eredményeket vettük figyelembe egyre növekvő súllyal. Itt azt feltételeztük, hogy évről évre fokozatosan az ország egyre nagyobb részén térnek át az gazdák az említett művelési módokra.

Mindkét scenárióra történő fokozatos áttérés esetén szignifikáns ( $p < 0,001$ ) termésátlag növekedés érhető el, melynek mértéke évtizedenként  $0,09 \text{ t ha}^{-1}$  az I30-as és  $1,7 \text{ t ha}^{-1}$  az I30+F3-as scenárió esetén a 2014-2100 időszakra vonatkozóan (47. ábra).

Kiemelendő, hogy jelen tanulmány során csak korlátozott mértékben tudtuk változtatni a művelési módokat, és a különböző beállításokkal csupán a modellek és a jövőbeli termésmennyiség érzékenységét vizsgáltuk. Nem vettük figyelembe az egyes változtatások környezeti és gazdasági hatásait, melyek mind a műtrágyázás mennyiségének növelése, mind az öntözőrendszerek kiépítése esetén igen jelentős lehet.

## 6. Összefoglalás

Doktori munkám keretében a kukorica és az őszi búza termésmennyiségét és szénmérlegét modelleztük hazánk területére. Elsődleges célunk az volt, hogy több éghajlati modell, illetve két növénynövekedést szimuláló modell alapján, az ensemble technika felhasználásával robosztus becsléseket adjunk a jövőbeli termésátlagok és szénmérleg komponensek lehetséges alakulására 2100-ig bezárólag. A szimulációk elvégzéséhez két eltérő logikájú modellt használtunk, a mezőgazdasági 4M modellt, és a biogeokémiai Biome-BGCMuSo modellt. Utóbbival lehetőség nyílt nemcsak a mezőgazdasági produktivitás, hanem a szénmérleg becslése is.

A modellek használatához szükséges meteorológiai adatok nem álltak rendelkezésre a munka megkezdésekor. Ezért doktori munkám részeként létrehoztuk, és a tágabb kutatóközösség számára hozzáférhetővé tettük a FORESEE adatbázist, amely napi léptékű meteorológiai mezőket tartalmaz Közép-Európára  $1/6 \times 1/6$  fokos rácsfelbontással az 1951-2100 időszakra vonatkozóan. A múltbeli időszak megfigyeléseken alapuló adatbázisok kombinációjából állt elő (a napi léptékű E-OBS és a havi léptékű CRU TS 1.2). A jövőre vonatkozóan 10 különböző klímamodell-eredmény szisztematikus hibáit korrigáltuk, melyek az ENSEMBLES projekt keretében készültek. A csapadékadatok esetén nem csak mennyiségi, hanem gyakorisági korrekciót is végeztünk, ami tudomásunk szerint Magyarországon előzmény nélküli. Az adatbázis létrehozásának részletekbe menő lépéseit publikáltuk (Dobor et al., 2015), továbbá létrehoztunk egy honlapot (<http://nimbus.elte.hu/FORESEE/>), és az adatokat szabadon elérhetővé tettük. Laikusok számára létrehoztunk egy felhasználóbarát térképes lekérő felületet, ahol egy vagy több rácspontra kérhetünk le idősorokat.

A mezőgazdasági modellek számára a meteorológiai adatokon kívül a másik legfontosabb bemenő információ a mezőgazdasági beavatkozások időzítése (vetés, trágyázás, aratás és szántás), ami az éghajlatváltozás következtében a napjainkban megszokott időpontokhoz képest a jövőben megváltozhat. Munkánk során a vetés időpontját emeltük ki ezek közül, és olyan időjárásfüggő módszereket dolgoztunk ki, melyek tükrözik a gazdák gyakorlatban alkalmazott módszereit. A vetés időpontjának időjárásfüggő becslését hazánkban korábban nem vizsgálták, így nem álltak rendelkezésre megbízható, validált módszerek. Összesen 20 vetési időpont becslő módszert teszteltünk (irodalmi és saját fejlesztésű módszereket is), melyeket a jelenkorra egy vetési időpont



megfigyelési adatbázissal validáltunk. A részletes tanulmányt szakfolyóiratban közzeltük (Dobor et al., 2016). A legjobbnak talált módszereket alkalmaztuk a további modellszimulációk során.

A 4M és a Biome-BGCMuSo modellek által használt növény-parametrizációkat az első szimulációs tesztek után GLUE módszerrel (Beven and Binley, 1992, 2014; Beven and Freer, 2001) kalibráltuk termésátlag feljegyzések felhasználásával (3.7.1 fejezet).

A kalibráció után a modelleredményeket a KSH megyei szintű termésátlag-feljegyzéseivel és a hegyhátsági eddy-kovariancia mérésekkel validáltuk. A 4M modell az 1986-2013 időszak átlagában a megfigyelések változékonyságának 62%-át tudta megmagyarázni ( $0,12 \text{ t ha}^{-1}$  átlagos szisztematikus hibával) a kukorica, és 49%-át ( $0,06 \text{ t ha}^{-1}$  átlagos szisztematikus hibával) az őszi búza esetén. A Biome-BGCMuSo eredményei a megfigyelések változékonyságának 10%-át magyarázták kukoricára, és 50%-át búzára. A szisztematikus hiba ez esetben  $-0,47 \text{ t ha}^{-1}$  volt kukorica esetén, és  $-0,73 \text{ t ha}^{-1}$  búzára.

Fontos megjegyezni, hogy a megfigyelt termésátlagokat létrehozó körülményeket nem volt lehetőségünk teljes mértékben reprodukálni a modellekkel. A modellezés során az adott megyére eső összes rácspontra kukoricát vagy búzát feltételeztünk, mivel nem állt rendelkezésre kellő információ a vetett gabonák térbeli elhelyezkedéséről. Továbbá nem állnak rendelkezésre feljegyzések az alkalmazott mezőgazdasági művelés módjáról sem, ami jelenősen befolyásolja a termés mennyiségét, és így nagy térbeli különbségek is előfordulhatnak. A szimulációk során a Magyar Tudományos Akadémia Agrártudományi Kutatóintézet munkatársai által javasoltak szerint állítottuk be a művelési módokat, melyek tükrözik az országos átlagot. Fontos megjegyezni azt is, hogy a modellek csupán  $1/6 \times 1/6$  fokos felbontásban képesek bármilyen térbeli változatosságot figyelembe venni. Egy rácsnégyzeten belül homogén módon jelent meg az adott területre jellemző átlagos meteorológia, talajtextúra és domborzat, ami szintén okozhat eltéréseket. A modellekkel nem volt lehetőség különböző búza és kukorica fajták elkülönítésére sem. Ezen különbségek jelentős eltéréseket okozhatnak a mért és modellezett eredmények között, még egy tökéletes modell esetén is. A modellek számos további, valóságban fellépő hatást nem tudnak kezelni, és számos egyszerűsítés, azaz a modell egyenleteiből származó bizonytalanság és hiba lép fel, mint minden modell esetén (pl. fotoszintézist leíró egyenletek, növényen belüli allokáció leírása, szárazság és hőstressz egyszerűsített figyelembevétele).

Az eredmények rámutattak, hogy a Biome-BGCMuSo a kukorica termésátlagainak évek között változékonyságát kevésbé tudta leírni, mint a 4M modell, bár az átlagos hiba a tizedére csökkent a kalibráció hatására. Ennek oka valószínűleg nem a növényi parametrizáció megválasztásában keresendő, hanem a modell struktúrájában. Az eredmények fényében arra a következtetésre jutottunk, hogy érdemes lenne a 4M modellhez hasonlóan fenofázistól függő allokációt implementálni a Biome-BGCMuSo modellben. Jelenleg ugyanis a modell szerint a növény a tenyészidőszakban azonos arányban osztja szét a szenet és nitrogént a tározók között (kivéve, hogy a termés allokációja egy adott GDD után kapcsolódik be a folyamatokba), ami túlzott egyszerűsítés a mezőgazdasági kultúrnövények esetén, ahol a levélből is tud szén illetve nitrogén áthelyeződni a szemnövekedés időszakában. A Biome-BGCMuSo modell esetén a szénmérleg pontbeli validációja során a kukoricára és búzára kapott eredmények átlagát vetettük össze a hegyhátsági vegyes-mezőgazdasági terület eddy-kovariancia méréseivel (azzal a durva feltételezéssel élve, hogy fele-fele arányban fedi kukorica és búza a mérés forrásterületét, Barcza et al., 2009b). Teljes egyezés ez esetben sem várható el, de az eredmények azt mutatták, hogy a szimulációk eredménye a kalibráció hatására javult.

A szimulációkat mindkét modellel az 1986-2100 időszakra végeztük el hazánk teljes területére, oly módon, hogy minden rácspontra ( $1/6 \times 1/6$  fokos felbontás mellett) vagy búzát, vagy kukoricát feltételeztünk. Az eredmények bizonytalanságának becslése érdekében minden modellfutást elvégeztünk mind a 10 klímamodell-eredménnyel. A hazánkban megszokott trágyázási módok mellett különböző alternatív scenáriók hatását is vizsgáltuk a termésátlagokra vonatkozóan. Négy-négy trágyázási scenáriót vezettünk be búzára és kukoricára. Utóbbi esetén három öntözési scenáriót is teszteltünk. A 10 különböző klímamodell-eredményt feltételező futás átlagának (multi-modell átlag; itt multi-klímamodell átlag) trendjét, a trend szignifikanciaszintjét, valamint két jövőbeli időszakra várható változását vizsgáltuk (2021-2050 és 2071-2100), utóbbit térképes formában. A várható változások kiszámítása során minden esetben az adott modell által szimulált jövőbeli értékeket a múltbeli szimulációkkal vetettük össze (nem a megfigyelésekkel, a szisztematikus modellhibák miatt).

A munka egyik legfontosabb eredménye, hogy a két modell konzisztens eredményeket adott a két szimulált mezőgazdasági kultúrnövény termésmennyiségének várható változásaira. A megszokott művelési mód alkalmazása mellett mind a két modell a kukorica termésátlagainak csökkenését prognosztizálta a jövőre vonatkozóan, azonban a

csökkenés mértékében jelentős eltérés mutatkozott. A 4M modell 2071-2100-ra  $1,31 \pm 0,89$  t ha<sup>-1</sup> termésnövekedést becsül országos átlagban, míg a Biome-BGCMuSo esetén ez az érték csupán  $0,61 \pm 0,47$  t ha<sup>-1</sup> az 1986-2013 időszakhoz viszonyítva (multi-modell átlag  $\pm$  szórás). Ha a két modell kukoricára vonatkozó eredményeit páronként összehasonlítjuk az egyes alternatív művelési scenáriók esetén, megfigyelhetjük, hogy a Biome-BGCMuSo minden esetben kisebb mértékű csökkenő tendenciát mutat a 4M modellhez képest. Arra a következtetésre jutottunk, hogy ennek az okát szintén a modellek közötti strukturális különbségekben kell keresni. A Biome-BGCMuSo modell több, komplexebb folyamatot vesz figyelembe, melyek közül az egyik a sztómányitottság változása (Hidy et al., 2016b). A CO<sub>2</sub> koncentráció emelkedésének hatására a modell-növény sztómái kevésbé nyílnak ki (Franks et al., 2013), így a kisebb transzspiráció miatt a kukoricára ható szárazságstressz csökkenhet, melynek következtében a termésátlagok nem csökkennek oly mértékben az éghajlatváltozás hatására, mint a 4M modell esetén, ahol ennek a hatásnak a figyelembevételére nincs lehetőség. Emellett a Biome-BGCMuSo a 4M-mel ellentétben nem veszi figyelembe az esetleges hőstressz hatását, ami korlátozhatja a növényi fejlődést. Mivel a valóságban mind a hőstressz, mind a sztómányitottság változása felléphet, melyek ellentétes irányú hatással vannak a növények fejlődésére, így a multi-növény modell átlag jobb közelítést adhat a várható változásokra. Ezen hipotézis megerősítéséhez további vizsgálatokra van szükség.

A búza és a kukorica esetén ellentétes irányú várható változásokat láthatunk mindkét modell szerint. A CO<sub>2</sub> koncentráció növekedése a C<sub>3</sub>-as növények fotoszintézisének intenzitását nagyobb mértékben növeli, mint a C<sub>4</sub>-es növényekét (Ainsworth and Rogers, 2007). Ezt a hatást mindkét modell képest leírni, és ez a modelleredményekben is megmutatkozik. A 4M modell szerint  $0,66 \pm 0,38$  t ha<sup>-1</sup>, a Biome-BGCMuSo modell szerint pedig  $0,37 \pm 0,11$  t ha<sup>-1</sup> növekedésre számíthatunk 2071-2100-ra az 1986-2013 időszakhoz viszonyítva.

Az alternatív művelési scenáriók alapján kapott modelleredmények szerint a 4M nagyobb érzékenységet mutatott a művelési mód megváltoztatására, mint a Biome-BGCMuSo, mind a műtrágya mennyiségének növelésére, mind az öntözés bevezetésére. Elmondhatjuk továbbá, hogy kukorica esetén a műtrágyázás fokozásával sokkal kisebb mértékű termésátlag-növekedést érhetünk el, mint öntözéssel. A különböző öntözési scenáriókkal kapott eredmények között (alkalmanként 20, 30 és 40 mm öntözővíz használata) csekély különbség mutatkozott. Ennek az oka, hogy az összesen

előntözött víz mennyiségében sem mutatkozott jelentős különbség: a kisebb vízmennyiség mellett többször, míg a nagyobb mennyiség mellett kevesebbszer volt szükség beavatkozásra. Ilyen értelemben az öntözésre való érzékenységet részletesebben is érdemes lenne vizsgálni a jövőben. Megfigyelhető, hogy a változatlan művelés során megállapított trendek kisebb mértékben ugyan, de az öntözött esetben is fennállnak, ami a nyári szárazságon kívül más esetleges stresszhatásra is felhívja a figyelmet.

A kukorica esetén a jövőbeni termésátlag-csökkenés trendje öntözőrendszerek kialakításával mérsékelhető. A mai termésátlagoknál magasabb értékeket is elérhetünk, mely esetben a csökkenő trend ellenére a század végére sem csökken a termés az 1986-2013 időszak átlaga alá. Fontos megjegyezni, hogy a gazdasági hatékonyság, környezetvédelem, illetve befektetés-megtérülés problémaköre jelen tanulmány kérdéskörén kívül esik, későbbi tanulmányokban azonban érdemes az öntözőrendszerek kiépítésének gazdasági vonzatait is vizsgálni megfelelő szakemberek bevonásával. A modellek szerint a műtrágyázás mennyiségének növelése mérsékli ugyan a várható csökkenő trendet, azonban nincs akkora hatással a termés mennyiségére, mint az öntözés. A műtrágyázás során a helyi adottságok, növényi tápanyagigények, valamint a környezet védelme jelentős szempontok, melyeket jelen tanulmány során nem vettünk figyelembe. A búzára vonatkozó modelleredmények termésátlag-növekedést mutattak, melynek mértéke az alkalmazott műtrágya mennyiségének növelésével kis mértékben tovább fokozható. Azonban mindkét modell szerint a búzára így elérhető termésátlag-növekmény (a változatlan műveléshez képest) sokkal kisebb mértékű, mint kukorica esetén. A 4M és a Biome-BGCMuSo konzisztens eredményt mutatnak a becsült termésátlag-változások irányát illetően, mindamelllett a 4M nagyobb mértékű változásokat prognosztizál.

A változatlan művelés mellett kapott teljes multi-multi-modell (multi-klimamodell és multi-növénymodell) átlag alapján, kukorica esetén 2021-2050-ra  $0,43 \text{ t ha}^{-1}$ , 2071-2100-ra pedig  $0,96 \text{ t ha}^{-1}$  termésű csökkenésre számíthatunk országos átlagban az 1986-2013-as időszakhoz viszonyítva. A búza termésátlagai várhatóan  $0,2 \text{ t ha}^{-1}$ -ral növekednek a közeli jövőre, és  $0,51 \text{ t ha}^{-1}$ -ral a távoli jövőre.

A Biome-BGCMuSo modellel a mezőgazdasági termésmennyiségen túl a hazai szénmérleg vertikális áramait, a GPP-t és a Reco-t valamint a két áram eredőjét, az NEE-t is becsültük. A térbeli mintázat tekintetében a búza esetén a talajtextúra hatása figyelhető meg, míg kukorica esetén az éves csapadékösszeg eloszlásának a mintázata is felfedezhető. Az 1986-2013 időszak és a hazai rácspontok átlagában a GPP  $953 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$  kukoricára

és  $1187 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$  búzára. A Reco értéke átlagosan  $695 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$  kukoricára és  $826 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$  búzára. Így egy kukoricával vetett egy négyzetméteres terület egy évben átlagosan 258 g szenet vesz fel a légkörből, ha csak a vertikális áramokat tekintjük. A búza esetén ez az érték 362 g. Ez a szénmennyiség a továbbiakban elszállításra kerülhet és/vagy a talajba visszaforgatható. Az elszállított szénmennyiség például élelmiszer formájában vagy állati takarmányban jelenhet meg, és az elfogyasztásuk után vagy a helyszínen hagyott szén esetén bomlási folyamatok során előbb vagy utóbb visszakerül a légkörbe. Jelen munka során a teljes szénciklust nem vizsgáltuk, csak annak vertikális áramait.

A jövőre vonatkozóan a modell a GPP és Reco csökkenését becsli kukoricára, megközelítőleg az egész ország területére mindkét jövőbeni időszakra. A búza esetén viszont nagyobb területi változékonyságot láthatunk a GPP-re a várható változások tekintetében. A két fluxus eredőjeként kapott NEE esetén egyik gabonára sem várhatunk szignifikáns változást országos átlagban, de a búza esetén nagy térbeli különbségek lehetnek. Ez azt jelenti, hogy a légkörből évente felvett szén-dioxid mennyisége nem mutat szignifikáns várható változást a jövőben, legalábbis jelen modellezési tanulmány szerint.

A doktori munka során kapott eredmények összhangban vannak a szakirodalomban fellelhető tanulmányokkal, miszerint a Pannon térségben a kukoricára termésátlag-csökkenés, míg a búzára termésátlag-növekedés várható a jövőben (Olesen et al., 2011; Eitzinger et al., 2012; Fodor et al., 2014).

A két modellel végzett szimulációk megmutatták, hogy mindkét modellnek vannak nyilvánvaló erősségei és gyengeségei. A jövőbeli modellfejlesztések során a két modellt mindenképpen érdemes együtt fejleszteni. Terveink között szerepel a Biome-BGCMuSo modell továbbfejlesztése a 4M-ben használt, fenológiai fázisokon alapuló allokáció logika adaptálásával, melynek hatására a modell használhatósága mezőgazdasági kultúrnövények esetén jelentősen javulhat.

## Köszönetnyilvánítás

Elsősorban köszönettel tartozom témavezetőimnek, Barcza Zoltánnak és Havasi Ágnesnek. Köszönöm Hidy Dórának és Fodor Nándornak a Biome-BGCMuSo és a 4M modell használatában nyújtott gyakorlati segítségét és szakmai tanácsait. Köszönöm Krasser Dórának és Ittész Péternek, hogy segítettek a demogriden indított Monte Carlo futásokkal kapcsolatos gondjaink megoldásában. Köszönöm Horváth Ferencnek a közös vácrátóti szakmai találkozók és feladatok megszervezését, ahol egy igazi kutatócsoportban érezheti magát az ember. Köszönöm Tomáš Hlásnyak a sok építő jellegű kritikáját, mellyel magasabbra emelte a publikált munkák szakmai színvonalát. Hálás vagyok a FORESEE adatbázis összes felhasználójának a közös kutatómunkákért, és hogy évről évre motiváltak az adatbázis fejlesztésében, fenntartásában. Köszönöm Miklós Erikának és Kelemen Fanninak az országhatárokon átívelő támogatását, a családom és barátaim biztatását.

Köszönöm továbbá az OTKA (K104816) és BioVeL (Biodiversity Virtual e-Laboratory Project, FP7-INFRASTRUCTURES-2011-2, 283359) projektek anyagi és szakmai támogatását. Lehetővé tették, hogy nyári iskolákon, workshopokon és konferenciákon vegyek részt, melyek szélesítették a tudásomat, kialakították szakmai nézeteimet, és számos motivációt és új kapcsolatokat, barátságokat adtak.

A dolgozatban felhasznált E-OBS adatbázist és a klímamodell-eredményeket az ENSEMBLES projekt keretében hozták létre, amelyet az EU FP6 program támogatott. Köszönettel tartozunk a Kelet-Angliai Egyetem Éghajlati Kutatóegységének (Climatic Research Unit, CRU) a havi léptékű rácsponti adatbázisának létrehozásáért (CRU TS 1.2). Köszönöm továbbá a Központi Statisztikai Hivatal munkatársainak szíves segítségét, valamint az MTA SZTAKI-nak, hogy rendelkezésemre bocsátotta az EDGeS@home desktop grid rendszer számítási kapacitását a Monte Carlo szimulációk elvégzésére.

## Irodalomjegyzék

- Ács, F., 2008. A talaj-növény-légkör rendszer meteorológiai alkalmazású modellezése. ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, pp. 249.
- Ács, F., Breuer, H., 2006. Modelling of soil respiration in Hungary. *Agrokémia és Talajt.* **55**:59–68.
- Ács, F., Breuer, H., Szász, G., 2007. A tényleges párolgás és a talaj vízkészlet becslése tenyészidőszakban. *Agrokémia és Talajt.* **56**:217–236.
- Ainsworth, E.A., Beier, C., Calfapietra, C., Ceulemans, R., Durand-Tardif, M., Farquhar, G.D., Godbold, D.L., Hendrey, G.R., Hickler, T., Kaduk, J., Karnosky, D.F., Kimball, B.A., Körner, C., Koornneef, M., Lafarge, T., Leakey, A.D.B., Lewin, K.F., Long, S.P., Manderscheid, R., Mcneil, D.L., Mies, T.A., Miglietta, F., Morgan, J.A., Nagy, J., Norby, R.J., Norton, R.M., Percy, K.E., Rogers, A., Soussana, J.-F., Stütt, M., Weigel, H.-J., White, J.W., 2008. Next generation of elevated [CO<sub>2</sub>] experiments with crops: a critical investment for feeding the future world. *Plant, Cell Environ.* **31**:1317–1324. doi:10.1111/j.1365-3040.2008.01841.x
- Ainsworth, E.A., Rogers, A., 2007. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO<sub>2</sub>]: mechanisms and environmental interactions. *Plant, Cell Environ.* **30**:258–270. doi:10.1111/j.1365-3040.2007.01641.x
- Anda, A., 1989. A sztómaellenállás kapcsolata néhány környezeti tényezővel és alkalmazása transzspiráció számítására. *Növénytermelés* **38**:89–297.
- Anda, A., 2005. A klímaváltozás hazai mezőgazdasági következményei. *AGRO-21 füzetek, Klímaváltozás-hatások-válaszok* **41**:18–28.
- Andrejko, S.S., Kuperman, F.M., 1961. A kukorica élettana. Mezőgazdasági kiadó, Budapest, pp. 272.
- Árendás, T., Láng, L., Bónis, P., Bedő, Z., 2003. Őszi búzafajták vetésidő reakciójának összehasonlító vizsgálata. *Növénytermelés* **52**:21–31.
- Asseng, S., Ewert, F., Rozenzweig, C., Jones, J.W., Hatfield, J.L., Ruane, A.C., Boote, K.J., Thorburn, P.J., Rötter, R.P., Cammarano, D., Brisson, N., Basso, B., Martre, P., Aggarwal, P.K., Angulo, C., Bertuzzi, P., Biernath, C., Challinor, A.J., Doltra, J., Gayler, S., Goldberg, R., Grant, R., Heng, L., Hooker, J., Hunt, L.A., Ingwersen, J., Izaurralde, R.C., Kersebaum, K.C., Müller, C., Kumar, S.N., Nendel, C., O’Leary, G., Olesen, J.E., Osborne, T.M., Palosuo, T., Priesack, E., Ripoche, D., Semenov, M.A., Shcherbak, I., Steduto, P., Stöckle, C., Stratonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tao, F., Travasso, M., Waha, K., Wallach, D., White, J.W., Williams, J.R., Wolf, J., 2013. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. *Nat. Clim. Chang.* **3**:627–632. doi:10.1038/ncliante1916
- Atkin, O.K., Atkinson, L.J., Fisher, R.A., Campbell, C.D., Zaragoza-Castells, J., Pitchford, J.W., Woodward, F.I., Hurry, V., 2008. Using temperature-dependent changes in leaf scaling relationships to quantitatively account for thermal acclimation of respiration in a coupled global climate-vegetation model. *Glob. Chang. Biol.* **14**:2709–2726. doi:10.1111/j.1365-2486.2008.01664.x
- Barcza, Z., Haszpra, L., Somogyi, Z., Hidy, D., Lovas, K., Churkina, G., Horváth, L., 2009a. Estimation of the biospheric carbon dioxide balance of Hungary using the BIOME-BGC model. *Időjárás - Q. J. Hungarian Meteorol. Serv.* **113**:203–219.
- Barcza, Z., Kern, A., Haszpra, L., Kljun, N., 2009b. Spatial representativeness of tall tower eddy covariance measurements using remote sensing and footprint analysis. *Agric. For. Meteorol.* **149**:795–807. doi:10.1016/j.agrformet.2008.10.021
- Barnabás, B., Jäger, K., Fehér, A., 2008. The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant, Cell Environ.* **31**:11–38. doi:10.1111/j.1365-3040.2007.01727.x
- Bartholy, J., Pongrácz, R., 2010. Analysis of precipitation conditions for the Carpathian Basin based on extreme indices in the 20th century and climate simulations for 2050 and 2100. *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C* **35**:43–51. doi:10.1016/j.pce.2010.03.011
- Bartholy, J., Pongrácz, R., Gelybó, G., 2007. Regional climate change expected in Hungary for 2071–2100. *Appl. Ecol. Environ. Res.* **5**:1–17.
- Bassu, S., Brisson, N., Durand, J.-L., Boote, K., Lizaso, J., Jones, J.W., Rosenzweig, C., Ruane, A.C., Adam,

- M., Baron, C., Basso, B., Biernath, C., Boogaard, H., Conijn, S., Corbeels, M., Deryng, D., De Sanctis, G., Gayler, S., Grassini, P., Hatfield, J., Hoek, S., Izaurrealde, C., Jongschaap, R., Kemanian, A.R., Kersebaum, K.C., Kim, S.H., Kumar, N.S., Makowski, D., Müller, C., Nendel, C., Priesack, E., Pravia, M.V., Sau, F., Shcherbak, I., Tao, F., Teixeira, E., Timlin, D., Waha, K., 2014. How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors? *Glob. Chang. Biol.* **20**:2301–2320. doi:10.1111/gcb.12520
- Beniston, M., Stephenson, D.B., Christensen, O.B., Ferro, C. a. T., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylhä, K., Koffi, B., Palutikof, J., Schöll, R., Semmler, T., Woth, K., 2007. Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Clim. Change* **81**:71–95. doi:10.1007/s10584-006-9226-z
- Bettarini, I., Vaccari, F.P., Miglietta, F., 1998. Elevated CO<sub>2</sub> concentrations and stomatal density: observations from 17 plant species growing in a CO<sub>2</sub> spring in central Italy. *Glob. Chang. Biol.* **4**:17–22. doi:10.1046/j.1365-2486.1998.00098.x
- Beven, K., 2006. A manifesto for the equifinality thesis. *J. Hydrol.* **320**:18–36. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.07.007
- Beven, K., Binley, A., 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrol. Process.* **6**:279–298.
- Beven, K., Binley, A., 2014. GLUE: 20 years on. *Hydrol. Process.* **28**:5897–5918. doi:10.1002/hyp.10082
- Beven, K., Freer, J., 2001. Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. *J. Hydrol.* **249**:11–29. doi:10.1016/S0022-1694(01)00421-8
- Beven, K., Freer, J., Hankin, B., Schulz, K., 2000. The use of generalised likelihood measures for uncertainty estimation in high-order models of environmental systems. In: *Nonlinear and Nonstationary Signal Processing* (eds.: Fitzgerald, W.J., Smith, R.L., Walden, A.T., Young, P.C.).
- Birch, C.J., Hammer, G.L., Rickert, K.G., 1998. Temperature and photoperiod sensitivity of development in five cultivars of maize (*Zea mays L.*) from emergence to tassel initiation. *F. Crop. Res.* **55**:93–107. doi:10.1016/S0378-4290(97)00062-2
- Birkás, M., 1993. Talajművelés. In: *Földműveléstan* (ed.: Nyíri, L.). Mezőgazdasági kiadó, Budapest, pp. 96–191.
- Birkás, M., 2009. A klasszikus talajművelési elvárások és a klímakár csökkentés kényszere. *Növénytermelés* **58**:123–134.
- Birkás, M., Dexter, A., Kalmár, T., Bottlik, L., 2006. Soil quality - soil condition - production stability. *Cereal Res. Commun.* **34**:135–138. doi:10.1556/CRC.34.2006.1.34
- Birkás, M., Jolánkai, M., 2008. A növénytermesztés és a klímaváltozás összefüggései. Összefoglaló megállapítások, következtetések, javaslatok. In: *Klímaváltozás: Környezet - Kockázat - Társadalom* (eds.: Harnos, Z., Csete, L.). Szaktudás Kiadó Ház, Budapest, pp. 131–150.
- Birkás, M., Jolánkai, M., Kisić, I., Stipešević, B., 2008. Soil tillage needs a radical change for sustainability. *Agric. Conspec. Sci.* **73**:131–136.
- Birkás, M., Jolánkai, M., Mesic, M., Bottlik, L., 2012. Soil quality and land use in Hungary. In: *Impact of Tillage and Fertilization on Probable Climate Threats in Hungary and Croatia, Soil Vulnerability and Protection* (eds.: Birkas, M., Mesic, M.). Szent István Egyetem, Gödöllő, pp. 9–23.
- Birkás, M., Kende, Z., Pósa, B., 2015. A környezetkímélő talajművelés szerepe a klímakár-enyhítésben. In: *Környezetkímélő Talajművelési Rendszerek Magyarországon* (ed.: Madarász, B.). MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Földrajztudományi Intézet, Budapest, pp. 32–38.
- Birkás, M., Stipešević, B., Sallai, A., Pósa, B., Dezsény, Z., 2013. Soil reactions on climate extremes - Preserving and mitigating solutions. In: *6th International Scientific/professional Conferene, Agriculture in Nature and Environment Protection* (eds.: Jug, I., Durdevic, B.). Glas Slavonije, pp. 13–23.
- Bondeau, A., Smith, P.C., Zaehle, S., Schaphoff, S., Lucht, W., Cramer, W., Gerten, D., Lotze-Campen, H., Müller, C., Reichstein, M., Smith, B., 2007. Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. *Glob. Chang. Biol.* **13**:679–706. doi:10.1111/j.1365-



- Boote, K.J., Jones, J.W., Pickering, N.B., 1995. Potential uses and limitation of crop models. *Agron. J.* **88**:704–716. doi:10.2134/agronj1996.00021962008800050005x
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussi re, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudill re, J.P., H nault, C., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.* **18**:309–332. doi:10.1016/S1161-0301(02)00110-7
- Brown, M.E., Funk, C.C., 2008. Food security under climate change. *Science* **319**:580–581. doi:10.1126/science.1154102
- Calanca, P., Semenov, M.A., 2013. Local-scale climate scenarios for impact studies and risk assessments: integration of early 21st century ENSEMBLES projections into the ELPIS database. *Theor. Appl. Climatol.* **113**:445–455. doi:10.1007/s00704-012-0799-3
- Cattivelli, L., Rizza, F., Badeck, F.-W., Mazzucotelli, E., Mastrangelo, A.M., Francia, E., Mar , C., Tondelli, A., Stanca, A.M., 2008. Drought tolerance improvement in crop plants: an integrated view from breeding to genomics. *F. Crop. Res.* **105**:1–14. doi:10.1016/j.fcr.2007.07.004
- Chapin, F.S., Woodwell, G.M., Randerson, J.T., Rastetter, E.B., Lovett, G.M., Baldocchi, D.D., Clark, D.A., Harmon, M.E., Schimel, D.S., Valentini, R., Wirth, C., Aber, J.D., Cole, J.J., Goulden, M.L., Harden, J.W., Heimann, M., Howarth, R.W., Matson, P.A., McGuire, A.D., Melillo, J.M., Mooney, H.A., Neff, J.C., Houghton, R.A., Pace, M.L., Ryan, M.G., Running, S.W., Sala, O.E., Schlesinger, W.H., Schulze, E.D., 2006. Reconciling carbon-cycle concepts, terminology, and methods. *Ecosystems* **9**:1041–1050. doi:10.1007/s10021-005-0105-7
- Christensen, J.H., Boberg, F., Christensen, O.B., Lucas-Picher, P., 2008. On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation. *Geophys. Res. Lett.* **35**. doi:10.1029/2008GL035694
- Christensen, J.H., Carter, T.R., Rummukainen, M., Amanatidis, G., 2007. Evaluating the performance and utility of regional climate models: The PRUDENCE project. *Clim. Change* **81**:1–6. doi:10.1007/s10584-006-9211-6
- Churkina, G., Zaehle, S., Hughes, J., Viovy, N., Chen, Y., Jung, M., Heumann, B.W., Ramankutty, N., Heimann, M., Jones, C., 2010. Interactions between nitrogen deposition, land cover conversion, and climate change determine the contemporary carbon balance of Europe. *Biogeosciences* **7**:2749–2764. doi:10.5194/bg-7-2749-2010
- Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C., Qu r , C. Le, Myneni, R.B., Piao, S., Thornton, P., 2013. Carbon and other biogeochemical cycles. In: *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds.: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., pp. 465–570. doi:10.1017/CBO9781107415324.015
- Clark, D.A., 2004. Sources or sinks? The responses of tropical forests to current and future climate and atmospheric composition. *Philos. Trans. R. Soc. London. Ser. B* **359**:477–491. doi:10.1098/rstb.2003.1426
- Clark, D.B., Mercado, L.M., Sitch, S., Jones, C.D., Gedney, N., Best, M.J., Pryor, M., Rooney, G.G., Essery, R.L.H., Blyth, E., Boucher, O., Harding, R.J., Huntingford, C., Cox, P.M., 2011. The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description. Part 2: Carbon fluxes and vegetation dynamics. *Geosci. Model Dev.* **4**:677–699. doi:10.5194/gmd-4-701-2011
- Coffman, F.A., 1923. The minimum temperature of germination of seeds. *J. Am. Soc. Agron.* 257–270.
- Cramer, W., Kicklighter, D.W., Bondeau, A., Moore III, B., Churkina, G., Nemry, B., Ruimy, A., Schloss, A.L., 1999. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results. *Glob. Chang. Biol.* **5**:1–15. doi:10.1046/j.1365-2486.1999.00009.x
- Cross, H.Z., Zuber, M.S., 1972. Prediction of flowering dates in maize based on different methods of estimating thermal units. *Agron. J.* **64**:351–355. doi:10.2134/agronj1972.00021962006400030029x

- Davidson, E.A., Janssens, I.A., 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* **440**:165–173. doi:10.1038/nature04514
- De Noblet-Ducoudré, N., Gervois, S., Ciais, P., Viovy, N., Brisson, N., Seguin, B., Perrier, A., 2004. Coupling the Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer Scheme ORCHIDEE to the agronomy model STICS to study the influence of croplands on the European carbon and water budgets. *Agronomie* **24**:397–407. doi:10.1051/agro:2004038
- De Pury, D.G.G., Farquhar, G.D., 1997. Simple scaling of photosynthesis from leaves to canopies without the errors of big-leaf models. *Plant, Cell Environ.* **20**:537–557. doi:10.1111/j.1365-3040.1997.tb00466.x
- Dentener, F., Drevet, J., Lamarque, J.F., Bey, I., Eickhout, B., Fiore, A.M., Hauglustaine, D., Horowitz, L.W., Krol, M., Kulshrestha, U.C., Lawrence, M., Galy-Lacaux, C., Rast, S., Shindell, D., Stevenson, D., Van Noije, T., Atherton, C., Bell, N., Bergman, D., Butler, T., Cofala, J., Collins, B., Doherty, R., Ellingsen, K., Galloway, J., Gauss, M., Montanaro, V., Müller, J.F., Pitari, G., Rodriguez, J., Sanderson, M., Solmon, F., Strahan, S., Schultz, M., Sudo, K., Szopa, S., Wild, O., 2006. Nitrogen and sulfur deposition on regional and global scales: A multimodel evaluation. *Global Biogeochem. Cycles* **20**:GB4003. doi:10.1029/2005GB002672
- Déqué, M., 2007. Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Glob. Planet. Change* **57**:16–26. doi:10.1016/j.gloplacha.2006.11.030
- Di Vittorio, A. V., Anderson, R.S., White, J.D., Miller, N.L., Running, S.W., 2010. Development and optimization of an Agro-BGC ecosystem model for C4 perennial grasses. *Ecol. Modell.* **221**:2038–2053. doi:10.1016/j.ecolmodel.2010.05.013
- Dióssy, L., 2011. Az éghajlatváltozás hatásának szimulációja kukoricán. Doktori disszertáció, Pannon Egyetem, Keszthely, pp. 122.
- Dióssy, L., Anda, A., 2009. Consequences of climate change on some maize characteristics in Hungary. *Időjárás* **113**:145–156.
- Dobor, L., Barcza, Z., Hlásny, T., Árendás, T., Spitkó, T., Fodor, N., 2016. Crop planting date matters: Estimation methods and effect on future yields. *Agric. For. Meteorol.* **223**:103–115. doi:10.1016/j.agrformet.2016.03.023
- 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. *Geosci. Data J.* **2**:1–11. doi:10.1002/gdj3.22
- Dosio, A., Paruolo, P., 2011. Bias correction of the ENSEMBLES high-resolution climate change projections for use by impact models: evaluation on the present climate. *J. Geophys. Res.* **116**:D16106. doi:10.1029/2011JD015934
- Drake, B.G., González-Meler, M.A., Long, S.P., 1997. More efficient plants: a consequence of rising atmospheric CO<sub>2</sub>? *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* **48**:609–639. doi:10.1146/annurev.arplant.48.1.609
- Drewniak, B., Song, J., Prell, J., Kotamarthi, V.R., Jacob, R., 2013. Modeling agriculture in the Community Land Model. *Geosci. Model Dev.* **6**:495–515. doi:10.5194/gmd-6-495-2013
- Duan, Q., Ajami, N.K., Gao, X., Sorooshian, S., 2007. Multi-model ensemble hydrologic prediction using Bayesian model averaging. *Adv. Water Resour.* **30**:1371–1386. doi:10.1016/j.advwatres.2006.11.014
- Eitzinger, J., Trnka, M., Semerádová, D., Thaler, S., Svobodová, E., Hlavinka, P., Šiška, B., Takáč, J., Malatinská, L., Nováková, M., Dubrovský, M., Žalud, Z., 2012. Regional climate change impacts on agricultural crop production in Central and Eastern Europe – hotspots, regional differences and common trends. *J. Agric. Sci.* **151**:787–812. doi:10.1017/S0021859612000767
- Elliott, J., Müller, C., Deryng, D., Chryssanthacopoulos, J., Boote, K.J., Büchner, M., Foster, I., Glotter, M., Heinke, J., Iizumi, T., Izaurralde, R.C., Mueller, N.D., Ray, D.K., Rosenzweig, C., Ruane, A.C., Sheffield, J., 2015. The Global Gridded Crop Model intercomparison: data and modeling protocols for Phase 1 (v1.0). *Geosci. Model Dev. Discuss.* **7**:4383–4427. doi:10.5194/gmdd-7-4383-2014
- Emanuel, W.R., Shugart, H.H., Stevenson, M.P., 1985. Climatic change and the broad-scale distribution of

- terrestrial ecosystem complexes. *Clim. Change* **7**:29–43. doi:10.1007/BF00139439
- Erdélyi, É., 2008. Az őszi búza termesztetőségi feltételei az éghajlatváltozás függvényében. Doktori disszertáció, Budapesti Corvinus Egyetem, Budapest, pp. 107.
- Etheridge, D.M., Steele, L.P., Langenfelds, R.L., Francey, R.J., Barnola, J.M., Morgan, V.I., 1996. Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO<sub>2</sub> over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn. *J. Geophys. Res.* **101**:4115–4128. doi:10.1029/95JD03410
- FAO, 2002. The state of food insecurity in the World 2001. Food and Agriculture Organization, Rome, pp. 59.
- FAO, 2009. FAO's Director-General on How to Feed the World in 2050. *Popul. Dev. Rev.* **35**:837–839.
- FAO, 2015. The state of food insecurity in the World 2015. Food and Agriculture Organization, Rome, pp. 56.
- Farkas, C., Birkás, M., Várallyay, G., 2009. Soil tillage systems to reduce the harmful effect of extreme weather and hydrological situations. *Biologia (Bratisl.)* **64**:624–628. doi:10.2478/s11756-009-0079-6
- Farkas, C., Gelybó, G., Bakacsi, Z., Horel, Á., Hagyó, A., Dobor, L., Kása, I., Tóth, E., 2014. Impact of expected climate change on soil water regime under different vegetation conditions. *Biologia (Bratisl.)* **69**:1510–1519. doi:10.2478/s11756-014-0463-8
- Farquhar, G.D., Von Caemmerer, S., Berry, J.A., 1980. A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species. *Planta* **149**:78–90.
- Field, C.B., Jackson, R.B., Mooney, H.A., 1995. Stomatal responses to increased CO<sub>2</sub> implications from the plant to the global scale. *Plant, Cell Environ.* doi:10.1111/j.1365-3040.1995.tb00630.x
- Fisher, J.B., Huntzinger, D.N., Schwalm, C.R., Sitch, S., 2014. Modeling the terrestrial biosphere. *Annu. Rev. Environ. Resour.* **39**:91–123. doi:10.1146/annurev-environ-012913-093456
- Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S.C., Collins, W., Cox, P., Driouech, F., Emori, S., Eyring, V., Forest, C., Gleckler, P., Guilyardi, E., Jakob, C., Kattsov, V., Reason, C., Rummukainen, M., 2013. Evaluation of climate models. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds.: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 741–866.
- Flexas, J., Carriquí, M., Coopman, R.E., Gago, J., Galmés, J., Martorell, S., Morales, F., Diaz-Espejo, A., 2014. Stomatal and mesophyll conductances to CO<sub>2</sub> in different plant groups: underrated factors for predicting leaf photosynthesis responses to climate change? *Plant Sci.* **226**:41–48. doi:10.1016/j.plantsci.2014.06.011
- Fodor, N., 2006. 4M – Software for modelling and analysing cropping systems. *J. Univers. Comput. Sci.* **12**:1196–1207.
- Fodor, N., 2012. 4Mx talaj-növény modell: alkalmazások, lehetőségek és kihívások. *Agrárinformatika* **3**:50–60.
- Fodor, N., Kovács, G.J., 2003. Sensitivity of 4M maize model to the inaccuracy of weather and soil input data. *Appl. Ecol. Environ. Res.* **1**:75–85.
- Fodor, N., Máthéné Gáspár, G., Kovács, G.J., 2008. A 4M tápanyagmodell adatigénye és gyakorlati felhasználása. *Agrokémia és Talajt.* **57**:191–204. doi:10.1556/Agrokem.57.2008.1.15
- Fodor, N., Pásztor, L., 2010. The agro-ecological potential of Hungary and its prospective development due to climate change. *Appl. Ecol. Environ. Res.* **8**:177–190.
- Fodor, N., Pásztor, L., Németh, T., 2014. Coupling the 4M crop model with national geo-databases for assessing the effects of climate change on agro-ecological characteristics of Hungary. *Int. J. Digit. Earth* **7**:391–410. doi:10.1080/17538947.2012.689998
- Foley, J.A., Ramankutty, N., Brauman, K.A., Cassidy, E.S., Gerber, J.S., Johnston, M., Mueller, N.D., O'Connell, C., Ray, D.K., West, P.C., Balzer, C., Bennett, E.M., Carpenter, S.R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., Tilman, D., Zaks, D.P.M., 2011. Solutions for a

cultivated planet. *Nature* **478**:337–342. doi:10.1038/nature10452

- Frank, D., Reichstein, M., Bahn, M., Thonicke, K., Frank, D., Mahecha, M.D., Smith, P., van der Velde, M., Vicca, S., Babst, F., Beer, C., Buchmann, N., Canadell, J.G., Ciais, P., Cramer, W., Ibrom, A., Miglietta, F., Poulter, B., Rammig, A., Seneviratne, S.I., Walz, A., Wattenbach, M., Zavala, M.A., Zscheischler, J., 2015. Effects of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: concepts, processes and potential future impacts. *Glob. Chang. Biol.* **21**:2861–2880. doi:10.1111/gcb.12916
- Franks, P.J., Adams, M.A., Amthor, J.S., Barbour, M.M., Berry, J.A., Ellsworth, D.S., Farquhar, G.D., Ghannoum, O., Lloyd, J., McDowell, N., Norby, R.J., Tissue, D.T., Von Caemmerer, S., 2013. Sensitivity of plants to changing atmospheric CO<sub>2</sub> concentration: from the geological past to the next century. *New Phytol.* **197**:1077–1094. doi:10.1111/nph.12104
- Friedlingstein, P., Dufresne, J.-L., Cox, P.M., Rayner, P.J., 2003. How positive is the feedback between climate change and the carbon cycle? *Tellus B* **55**:692–700. doi:10.1034/j.1600-0889.2003.01461.x
- Friedlingstein, P., Houghton, R.A., Marland, G., Hackler, J., Boden, T.A., Conway, T.J., Canadell, J.G., Raupach, M.R., Ciais, P., Le Quéré, C., 2010. Update on CO<sub>2</sub> emissions. *Nat. Geosci.* **3**:811–812. doi:10.1038/ngeo1022
- Friedlingstein, P., Prentice, I.C., 2010. Carbon–climate feedbacks: a review of model and observation based estimates. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* **2**:251–257. doi:10.1016/j.cosust.2010.06.002
- Galvánek, D., Barcza, Z., Janišová, M., Dobor, L., Hlásny, T., Hidy, D., Šibík, J., 2013. Report on grasslands and wetlands vulnerability to climate change-induced threats; including expected changes in species composition, effect on grasslands productivity. pp. 186.
- Garcia, R.L., Long, S.P., Wall, G.W., Osborne, C.P., Kimball, B.A., Nie, G.Y., Pinter, P.J., Lamorte, R.L., Wechsung, F., 1998. Photosynthesis and conductance of spring-wheat leaves: field response to continuous free-air atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment. *Plant, Cell Environ.* **21**:659–669. doi:10.1046/j.1365-3040.1998.00320.x
- Gelybó, G., 2014. Mezőgazdasági területek produktivitásának becslése műholdas és felszíni mérések alapján. Doktori disszertáció, ELTE, Budapest, pp. 124.
- Gervois, S., De Noblet-Ducoudré, N., Viovy, N., Ciais, P., Brisson, N., Seguin, B., Perrier, A., 2004. Including croplands in a global biosphere model: methodology and evaluation at specific sites. *Earth Interact.* **8**:1–25. doi:10.1175/1087-3562(2004)8<1:ICIAGB>2.0.CO;2
- Godfray, H.C.J., Beddington, J.R., Crute, I.E., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J.F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S.M., Toulmin, C., 2010. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science* **327**:812–818. doi:10.1126/science.1185383
- Golinkoff, J., 2010. Biome BGC version 4.2: Theoretical Framework of Biome-BGC. pp. 1-71.
- Grosz, B., Gelybó, G., Churkina, G., Haszpra, L., Hidy, D., Horváth, L., Kern, A., Kljun, N., Machon, A., Pásztor, L., Barcza, Z., 2010. Modeling of biosphere-atmosphere exchange of greenhouse gases - Arable lands. In: *Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective* (ed.: Haszpra, L.). Springer, pp. 263–293.
- Gutowski, W.J., Decker, S.G., Donavon, R.A., Pan, Z., Arritt, R.W., Takle, E.S., 2003. Temporal-spatial scales of observed and simulated precipitation in central U.S. climate. *J. Clim.* **16**:3841–3847. doi:10.1175/1520-0442(2003)016<3841:TSSOAS>2.0.CO;2
- Hansen, J.W., Challinor, A., Ines, A., Wheeler, T., Moron, V., 2006. Translating climate forecasts into agricultural terms: advances and challenges. *Clim. Res.* **33**:27–41. doi:10.3354/cr033027
- Harnos, N., 2000. A klímaváltozás búzatermesztésre való várható hatásainak elemzése szimulációs modellekkel. *Növénytermelés* **49**:41–55.
- Harnos, N., 2002. A klímaváltozás várható hatási kalászos gabonafélék produkciobiológiájára: kísérleti és modellezési megközelítés. Doktori disszertáció, Szent István Egyetem, Gödöllő, pp. 103.
- Harnos, N., Erdélyi, É., Árendás, T., 2010. Importance of long-term experiments in studying the effects of climate change. *Acta Agron. Hungarica* **58**:83–88. doi:10.1556/AAgr.58.2010.Suppl.1.12
- Harnos, N., Tuba, Z., Szente, K., 2002. Modelling net photosynthetic rate of winter wheat in elevated air CO<sub>2</sub> concentrations. *Photosynthetica* **40**:293–300.

- Haszpra, L., Barcza, Z., Davis, K.J., Tarczay, K., 2005. Long-term tall tower carbon dioxide flux monitoring over an area of mixed vegetation. *Agric. For. Meteorol.* **132**:58–77. doi:10.1016/j.agrformet.2005.07.002
- Haylock, M.R., Hofstra, N., Klein Tank, A.M.G., Klok, E.J., Jones, P.D., New, M., 2008. A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006. *J. Geophys. Res.* **113**:D20119. doi:10.1029/2008JD010201
- Hidy, D., Barcza, Z., Haszpra, L., Churkina, G., Pintér, K., Nagy, Z., 2012. Development of the Biome-BGC model for simulation of managed herbaceous ecosystems. *Ecol. Modell.* **226**:99–119. doi:10.1016/j.ecolmodel.2011.11.008
- Hidy, D., Barcza, Z., Marjanović, H., Ostrogović Sever, M.Z., Dobor, L., Gelybó, G., Fodor, N., Pintér, K., Churkina, G., Running, S.W., Thornton, P.E., Bellocchi, G., Haszpra, L., Horváth, F., Suyker, A., Verma, S., Nagy, Z., 2016a. Terrestrial Ecosystem Process Model Biome-BGC MuSo: Summary of improvements and new modeling possibilities. *Geosci. Model Dev. Discuss.*, doi:10.5194/gmd-2016-93, in review.
- Hidy, D., Barcza, Z., Thornton, P.E., Running, S.W., 2016b. User's Guide for Biome-BGCMuSo 4.0. pp. 69. [http://nimbus.elte.hu/bbgc/files/Manual\\_BBGC\\_MuSo\\_v4.0.pdf](http://nimbus.elte.hu/bbgc/files/Manual_BBGC_MuSo_v4.0.pdf)
- Hlásny, T., Mátyás, C., Seidl, R., Kulla, L., Merganičová, K., Trombik, J., Dobor, L., Barcza, Z., Konópka, B., 2014. Climate change increases the drought risk in Central European forests: What are the options for adaptation? *For. J.* **60**:5–18. doi:10.2478/forj-2014-0001
- Hlásny, T., Trombik, J., Dobor, L., Barcza, Z., Barka, I., 2016. Future climate of the Carpathians: climate change hot-spots and implications for ecosystems. *Reg. Environ. Chang.* **16**:1495–1506. doi:10.1007/s10113-015-0890-2
- Hollinger, D.Y., Richardson, A.D., 2005. Uncertainty in eddy covariance measurements and its application to physiological models. *Tree Physiol.* **25**:873–885. doi:10.1093/treephys/25.7.873
- Holzworth, D.P., Huth, N.I., DeVoil, P.G., Zurcher, E.J., Herrmann, N.I., McLean, G., Chenu, K., van Oosterom, E.J., Snow, V., Murphy, C., Moore, A.D., Brown, H., Whish, J.P.M., Verrall, S., Fainges, J., Bell, L.W., Peake, A.S., Poulton, P.L., Hochman, Z., Thorburn, P.J., Gaydon, D.S., Dalgliesh, N.P., Rodriguez, D., Cox, H., Chapman, S., Doherty, A., Teixeira, E., Sharp, J., Cichota, R., Vogeler, I., Li, F.Y., Wang, E., Hammer, G.L., Robertson, M.J., Dimes, J.P., Whitbread, A.M., Hunt, J., van Rees, H., McClelland, T., Carberry, P.S., Hargreaves, J.N.G., MacLeod, N., McDonald, C., Harsdorf, J., Wedgwood, S., Keating, B.A., 2014. APSIM – Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. *Environ. Model. Softw.* **62**:327–350. doi:10.1016/j.envsoft.2014.07.009
- Horemans, J.A., Bosela, M., Dobor, L., Barna, M., Bahyl, J., Deckmyn, G., Fabrika, M., Sedmak, R., Ceulemans, R., 2016. Variance decomposition of stem biomass increment predictions for European beech: contribution of selected sources of uncertainty. *For. Ecol. Manage.* **361**:46–55. doi:10.1016/j.foreco.2015.10.048
- Horváth, F., Ittész, P., Ittész, D., Barcza, Z., Dobor, L., Hidy, D., Marosi, A., Hardisty, A., 2014. Supporting environmental modelling with Taverna workflows, web services and desktop grid technology. In: Proceedings of the 7th International Congress on Environmental Modelling and Software (eds.: Ames, D.P., Quinn, N.W.T., Rizzoli, A.E.). San Diego, California, USA, pp. 423–430.
- Huzsvai, L., Rátonyi, T., Nagy, J., Megyes, A., 2003. A talajkímélő művelés hatása a talaj fizikai tulajdonságaira és a szervesanyag-körforgalmára. *Acta Agrar.* **12**:42–45.
- Ines, A.V.M., Hansen, J.W., 2006. Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies. *Agric. For. Meteorol.* **138**:44–53. doi:10.1016/j.agrformet.2006.03.009
- Jarvis, A., Reuter, H.I., Nelson, A., Guevara, E., 2008. Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database: <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- Jarvis, P.G., 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Phys. Chem. Earth, Parts B* **273**:593–610. doi:10.1098/rstb.1976.0035
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijssman, A.J., Ritchie, J.T., 2003. The DSSAT cropping system model, *European Journal of Agronomy*. pp. 235–265. doi:10.1016/S1161-0301(02)00107-7

- Jones, P.W., 1999. First- and second-order conservative remapping schemes for grids in spherical coordinates. *Mon. Weather Rev.* **127**:2204–2210. doi:10.1175/1520-0493(1999)127<2204:FASOCR>2.0.CO;2
- Junge, C.E., Schidlowski, M., Eichmann, R., Pietrek, H., 1975. Model calculations for the terrestrial carbon cycle: carbon isotope geochemistry and evolution of photosynthetic oxygen. *J. Geophys. Res.* **80**:4542–4552. doi:10.1029/JC080i033p04542
- Kattge, J., Knorr, W., 2007. Temperature acclimation in a biochemical model of photosynthesis: a reanalysis of data from 36 species. *Plant, Cell Environ.* **30**:1176–1190. doi:10.1111/j.1365-3040.2007.01690.x
- Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N.G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J.P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K.L., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R.L., Freebairn, D.M., Smith, C.J., 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *Eur. J. Agron.* **18**:267–288. doi:10.1016/S1161-0301(02)00108-9
- Keeling, C.D., Whorf, T.P., 2005. Atmospheric CO<sub>2</sub> records from sites in the SIO air sampling network. In: Trends: A Compendium of Data on Global Change . Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA.
- Keenan, T.F., Carbone, M.S., Reichstein, M., Richardson, A.D., 2011. The model-data fusion pitfall: assuming certainty in an uncertain world. *Oecologia* **167**:587–597. doi:10.1007/s00442-011-2106-x
- Kimball, B., Kobayashi, K., Bindi, M., 2002. Responses of agricultural crops to free-air CO<sub>2</sub> enrichment. *Adv. Agron.* **77**:293–368.
- King, A.W., DeAngelis, D.L., Post, W.M., 1987. The seasonal exchange of carbon dioxide between the atmosphere and the terrestrial biosphere: Extrapolation from site-specific models to regional models. Oak Ridge, TN, USA, pp. 273.
- King, A.W., O'Neill, R. V., DeAngelis, D.L., 1989. Using ecosystem models to predict regional CO<sub>2</sub> exchange between the atmosphere and the terrestrial biosphere. *Global Biogeochem. Cycles* **3**:337–361.
- Kiniry, J.R., Major, D.J., Izaurralde, R.C., Williams, J.R., Gassman, P.W., Morrison, M., Bergentine, R., Zentner, R.P., 1995. EPIC model parameters for cereal, oilseed, and forage crops in the northern Great-Plains Region. *Can. J. Plant Sci.* **75**:679–688. doi:10.4141/cjps95-114
- Kirschbaum, M.U.F., 2003. Can trees buy time? An assessment of the role of vegetation sinks as part of the global carbon cycle. *Clim. Change* **58**:47–71. doi:10.1023/A:1023447504860
- Klok, E.J., Klein Tank, A.M.G., 2008. Updated and extended European dataset of daily climate observations. *Int. J. Climatol.* **29**:1182–1191. doi:10.1002/joc.1779
- Kocsis, T., 2008. Az éghajlatváltozás dekétálása és hatásainak modellezése Keszthelyen. Doktori disszertáció, Pannon Egyetem, Keszthely, pp. 135.
- Kovács, G.J., Fodor, N., 2005. A klímaváltozás hatásának becslése a tápanyagforgalomra. In: A Magyar Mezőgazdaság Elemforgalma 1901 És 2003 Között (eds.: Kovács, G.J., Csathó, P.). MTA Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézet, Budapest, p. 261.
- Krinner, G., Viovy, N., De Noblet-Ducoudré, N., Ogée, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S., Prentice, I.C., 2005. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochem. Cycles* **19**:1–33. doi:10.1029/2003GB002199
- La Scala, N., Bolonhezi, D., Pereira, G., 2006. Short-term soil CO<sub>2</sub> emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in Southern Brazil. *Soil Tillage Res* **91**:244–248.
- Lal, R., 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* **304**:1623–1628. doi:10.1126/science.1097396
- Láng, I., Csete, L., Jolánkai, M., 2007. A globális klímaváltozás: hazai hatások és válaszok. A VAHAVA jelentés. Szaktudás Kiadó Ház, Budapest.
- Le Quéré, C., Moriarty, R., Andrew, R.M., Peters, G.P., Ciais, P., Friedlingstein, P., Jones, S.D., Sitch, S., Tans, P., Arneeth, A., Boden, T.A., Bopp, L., Bozec, Y., Canadell, J.G., Chini, L.P., Chevallier, F., Cosca, C.E., Harris, I., Hoppema, M., Houghton, R.A., House, J.I., Jain, A.K., Johannessen, T., Kato, E., Keeling, R.F., Kitidis, V., Klein Goldewijk, K., Koven, C., Landa, C.S., Landschützer, P., Lenton,

- A., Lima, I.D., Marland, G., Mathis, J.T., Metzl, N., Nojiri, Y., Olsen, A., Ono, T., Peng, S., Peters, W., Pfeil, B., Poulter, B., Raupach, M.R., Regnier, P., Rödenbeck, C., Saito, S., Salisbury, J.E., Schuster, U., Schwinger, J., Séférian, R., Segsneider, J., Steinhoff, T., Stocker, B.D., Sutton, A.J., Takahashi, T., Tilbrook, B., Van der Werf, G.R., Viovy, N., Wang, Y.-P., Wanninkhof, R., Wiltshire, A., Zeng, N., 2015. Global carbon budget 2014. *Earth Syst. Sci. Data* **7**:47–85. doi:10.5194/essd-7-47-2015
- Le Quéré, C., Raupach, M.R., Canadell, J.G., Marland, G., Bopp, L., Ciais, P., Conway, T.J., Doney, S.C., Feely, R.A., Foster, P., Friedlingstein, P., Gurney, K., Houghton, R.A., House, J.I., Huntingford, C., Levy, P.E., Lomas, M.R., Majkut, J., Metzl, N., Ometto, J.P., Peters, G.P., Prentice, I.C., Randerson, J.T., Running, S.W., Sarmiento, J.L., Schuster, U., Sitch, S., Takahashi, T., Viovy, N., van der Werf, G.R., Woodward, F.I., 2009. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nat. Geosci.* **2**:831–836. doi:10.1038/ngeo689
- Leakey, A.D.B., Ainsworth, E. a, Bernacchi, C.J., Rogers, A., Long, S.P., Ort, D.R., 2009. Elevated CO<sub>2</sub> effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. *J. Exp. Bot.* **60**:2859–76. doi:10.1093/jxb/erp096
- Lobell, D.B., Burke, M.B., Tebaldi, C., Mastrandrea, M.D., Falcon, W.P., Naylor, R.L., 2008. Prioritizing climate change adaptation need for food security in 2030. *Science* **319**:607–610. doi:10.1126/science.1152339
- Lobell, D.B., Field, C.B., 2007. Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environ. Res. Lett.* **2**:014002. doi:10.1088/1748-9326/2/1/014002
- Lobell, D.B., Schlenker, W., Costa-Roberts, J., 2011. Climate trends and global crop production since 1980. *Science* **333**:616–620. doi:10.1126/science.1204531
- Lokupitiya, E., Denning, S., Paustian, K., Baker, I., Schaefer, K., Verma, S., Meyers, T., Bernacchi, C.J., Suyker, A., Fischer, M., 2009. Incorporation of crop phenology in Simple Biosphere Model (SiBcrop) to improve land-atmosphere carbon exchanges from croplands. *Biogeosciences* **6**:969–986. doi:10.5194/bg-6-969-2009
- Loomis, R.S., Rabbinge, R., Ng, E., 1979. Explanatory models in crop physiology. *Annu. Rev. Plant Physiol.* **30**:339–367. doi:10.1146/annurev.pp.30.060179.002011
- Ma, S., Churkina, G., Wieland, R., Gessler, A., 2011. Optimization and evaluation of the ANTHRO-BGC model for winter crops in Europe. *Ecol. Modell.* **222**:3662–3679. doi:10.1016/j.ecolmodel.2011.08.025
- Maraun, D., 2012. Nonstationarities of regional climate model biases in European seasonal mean temperature and precipitation sums. *Geophys. Res. Lett.* **39**:L06706. doi:10.1029/2012GL051210
- Marton, C.L., Spitzkó, T. (eds.), 2013. 60 years of hungarian hybrid maize. Pannonian Plant Biotechnology Association, Martonvásár, pp. 136.
- Martre, P., Wallach, D., Asseng, S., Ewert, F., Jones, J.W., Rötter, R.P., Boote, K.J., Ruane, A.C., Thornburn, P.J., Cammarano, D., Hatfield, J.L., Rosenzweig, C., Aggarwal, P.K., Angulo, C., Basso, B., Bertuzzi, P., Biernath, C., Brisson, N., Challinor, A.J., Doltra, J., Gayler, S., Goldberg, R., Grant, R.F., Heng, L., Hooker, J., Hunt, L.A., Ingwersen, J., Izaurralde, R.C., Kersebaum, K.C., Müller, C., Kumar, S.N., Nendel, C., O’Leary, G., Olesen, J.E., Osborne, T.M., Palosuo, T., Priesack, E., Ripoche, D., Semenov, M.A., Shcherbak, I., Steduto, P., Stöckle, C.O., Stratonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tao, F., Travasso, M., Waha, K., White, J.W., Wolf, J., 2015. Multimodel ensembles of wheat growth: many models are better than one. *Glob. Chang. Biol.* **21**:911–925. doi:10.1111/gcb.12768
- McMaster, G.S., Wilhelm, W.W., 1997. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agric. For. Meteorol.* **87**:291–300. doi:10.1016/S0168-1923(97)00027-0
- Mearns, L.O., Schneider, S.H., Thompson, S.L., McDaniel, L.R., 1990. Analysis of climate variability in general circulation models: comparison with observations and changes in variability in 2xCO<sub>2</sub> experiments. *J. Geophys. Res.* **95**:20469–20490.
- Medlyn, B.E., Barton, C.V.M., Broadmeadow, M.S.J., Ceulemans, R., De Angelis, P., Forstreuter, M., Freeman, M., Jackson, S.B., Kellomäki, S., Laitat, E., Rey, A., Roberntz, P., Sigurdsson, B.D., Strassemeier, J., Wang, K., Curtis, P.S., Jarvis, P.G., 2001. Stomatal conductance of forest species after long-term exposure to elevated CO<sub>2</sub> concentration: a synthesis. *New Phytol.* **149**:247–264. doi:10.1046/j.1469-8137.2001.00028.x
- Medlyn, B.E., Zaehle, S., De Kauwe, M.G., Walker, A.P., Dietze, M.C., Hanson, P.J., Hickler, T., Jain, A.K.,

- Luo, Y., Parton, W., Prentice, I.C., Thornton, P.E., Wang, S., Wang, Y.-P., Weng, E., Iversen, C.M., McCarthy, H.R., Warren, J.M., Oren, R., Norby, R.J., 2015. Using ecosystem experiments to improve vegetation models. *Nat. Clim. Chang.* **5**:528–534. doi:10.1038/nclimate2621
- Mickelbart, M.V., Hasegawa, P.M., Bailey-Serres, J., 2015. Genetic mechanisms of abiotic stress tolerance that translate to crop yield stability. *Nat. Rev. Genet.* **16**:237–251. doi:10.1038/nrg3901
- Miedema, P., 1982. The effects of low temperature on *Zea mays*. *Adv. Agron.* **35**:92–128.
- Mitchell, T.D., Carter, T.R., Jones, P.D., Hulme, M., New, M., 2004. A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901-2000) and 16 scenarios (2001-2100) (No. 55).
- Mo, X., Beven, K., 2004. Multi-objective parameter conditioning of a three-source wheat canopy model. *Agric. For. Meteorol.* **122**:39–63. doi:10.1016/j.agrformet.2003.09.009
- Montanari, A., 2005. Large sample behaviors of the generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) in assessing the uncertainty of rainfall-runoff simulations. *Water Resour. Res.* **41**:1–13. doi:10.1029/2004WR003826
- Monteith, J., 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystem. *J. Appl. Ecol.* **9**:747–766.
- Monteith, J., 1977. Climate and efficiency of crop production in Britain. *Philos. Trans. R. Soc. Lonton. Ser. B, Biol. Sci.* **281**:277–294.
- Mueller, N.D., Gerber, J.S., Johnston, M., Ray, D.K., Ramankutty, N., Foley, J.A., 2012. Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature* **490**:254–257. doi:10.1038/nature11420
- Nagy, J., 2007. Kukoricatermesztés. Akadémiai Kiadó, Budapest, pp. 394.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., Vries, B. de, Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T.Y., Kram, T., Rovere, E.L. La, Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H.-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., Rooijen, S. van, Victor, N., Dadi, Z., 2000. Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 599.
- Nelson, J.A., Morgan, J.A., LeCain, D.R., Mosier, A.R., Milchunas, D.G., Parton, B.A., 2004. Elevated CO<sub>2</sub> increases soil moisture and enhances plant water relations in a long-term field study in semi-arid shortgrass steppe of Colorado. *Plant Soil* **259**:169–179. doi:10.1023/B:PLSO.0000020957.83641.62
- NÉS, 2013. Második Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia 2014-2025, kitekintéssel 2050-re. pp. 198.
- Nikulin, G., Kjellström, E., Hansson, U., Strandberg, G., Ullerstig, A., 2011. Evaluation and future projections of temperature, precipitation and wind extremes over Europe in an ensemble of regional climate simulations. *Tellus A* **63**:41–55. doi:10.1111/j.1600-0870.2010.00466.x
- Nix, H.A., 1980. Strategies for crop research. *Proc. Agron. Soc. New Zeal.* **10**:107–110.
- Nkoa, R., 2014. Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: A review. *Agron. Sustain. Dev.* **34**:473–492. doi:10.1007/s13593-013-0196-z
- Nowak, R.S., Ellsworth, D.S., Smith, S.D., 2004. Functional responses of plants to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> - do photosynthetic and productivity data from FACE experiments support early predictions? *New Phytol.* **162**:253–280. doi:10.1111/j.1469-8137.2004.01033.x
- Olesen, J.E., Bindi, M., 2002. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *Eur. J. Agron.* **16**:239–262. doi:10.1016/S1161-0301(02)00004-7
- Olesen, J.E., Trnka, M., Kersebaum, K.C., Skjelvåg, A.O., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., Rossi, F., Kozyra, J., Micale, F., 2011. Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *Eur. J. Agron.* **34**:96–112. doi:10.1016/j.eja.2010.11.003
- Oleson, K.W., Niu, G.Y., Yang, Z.L., Lawrence, D.M., Thornton, P.E., Lawrence, P.J., Stöckli, R., Dickinson, R.E., Bonan, G.B., Levis, S., Dai, A., Qian, T., 2008. Improvements to the Community Land Model and their impact on the hydrological cycle. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* **113**:G01021. doi:10.1029/2007JG000563
- Pan, B., Bai, Y.M., Leibovitch, S., Smith, D.L., 1999. Plant-growth-promoting rhizobacteria and kinetin as



- ways to promote corn growth and yield in a short-growing-season area. *Eur. J. Agron.* **11**:179–186. doi:10.1016/S1161-0301(99)00029-5
- Parry, M., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Fischer, G., Livermore, M., 1999. Climate change and world food security: A new assessment. *Glob. Environ. Chang.* **9**:S51–S67. doi:10.1016/S0959-3780(99)00018-7
- Parry, M., 2000. Assessment of potential effects and adaptations for climate change in Europe. The Europe ACACIA Project. Norwich, UK.
- Parton, W.J., Schimel, D.S., Cole, C. V., Ojima, D.S., 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **51**:1173–1179. doi:10.2136/sssaj1987.03615995005100050015x
- Penuelas, J., Filella, I., 2001. Responses to a warming world. *Science* **294**:793–794. doi:10.1126/science.1066860
- Pepó, P., Sárvári, M., 2011. Gabonanövények termesztése. Debreceni Egyetem, Nyugat-magyarországi Egyetem, Pannon Egyetem, Debrecen, pp. 86.
- Piani, C., Haerter, J.O., Coppola, E., 2009. Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theor. Appl. Climatol.* **99**:187–192. doi:10.1007/s00704-009-0134-9
- Piao, S., Sitch, S., Ciais, P., Friedlingstein, P., Peylin, P., Wang, X., Ahlström, A., Anav, A., Canadell, J.G., Cong, N., Huntingford, C., Jung, M., Levis, S., Levy, P.E., Li, J., Lin, X., Lomas, M.R., Lu, M., Luo, Y., Ma, Y., Myneni, R.B., Poulter, B., Sun, Z., Wang, T., Viovy, N., Zaehle, S., Zeng, N., 2013. Evaluation of terrestrial carbon cycle models for their response to climate variability and to CO<sub>2</sub> trends. *Glob. Chang. Biol.* **19**:2117–2132. doi:10.1111/gcb.12187
- Pongratz, J., Reick, C., Raddatz, T., Claussen, M., 2008. A reconstruction of global agricultural areas and land cover for the last millennium. *Global Biogeochem. Cycles* **22**:GB3018. doi:10.1029/2007GB003153
- Powlson, D.S., Stirling, C.M., Jat, M.L., Gerard, B.G., Palm, C.A., Sanchez, P.A., Cassman, K.G., 2014. Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. *Nat. Clim. Chang.* **4**:678–683. doi:10.1038/nclimate2292
- Powlson, D.S., Stirling, C.M., Jat, M.L., Gerard, B.G., Palm, C.A., Sanchez, P.A., Cassman, K.G., 2015. Reply to “No-till agriculture and climate change mitigation.” *Nat. Clim. Chang.* **5**:489–489. doi:10.1038/nclimate2654
- Prihodko, L., Denning, A.S., Hanan, N.P., Baker, I., Davis, K., 2008. Sensitivity, uncertainty and time dependence of parameters in a complex land surface model. *Agric. For. Meteorol.* **148**:268–287. doi:10.1016/j.agrformet.2007.08.006
- Ramankutty, N., Delire, C., Snyder, P., 2006. Feedbacks between agriculture and climate: an illustration of the potential unintended consequences of human land use activities. *Glob. Planet. Change* **54**:79–93. doi:10.1016/j.gloplacha.2005.10.005
- Ramankutty, N., Foley, J.A., Norman, J., McSweeney, K., 2002. The global distribution of cultivable lands: current patterns and sensitivity to possible climate change. *Glob. Ecol. Biogeogr.* **11**:377–392. doi:10.1046/j.1466-822x.2002.00294.x
- Reichstein, M., Bahn, M., Ciais, P., Frank, D., Mahecha, M.D., Seneviratne, S.I., Zscheischler, J., Beer, C., Buchmann, N., Frank, D.C., Papale, D., Rammig, A., Smith, P., Thonicke, K., Van der Velde, M., Vicca, S., Walz, A., Wattenbach, M., 2013. Climate extremes and the carbon cycle. *Nature* **500**:287–295. doi:10.1038/nature12350
- Richardson, A.D., Aubinet, M., Hollinger, D., Ibrom, A., Lasslop, G., Reichstein, M., 2012. Uncertainty quantification. In: Eddy Covariance – A Practical Guide to Measurement and Data Analysis (eds.: Aubinet, M., Vesala, T., Papale, D.). Springer, Dordrecht, pp. 173–209.
- Ritchie, J.T., 1998. Soil water balance and plant water stress. In: Understanding Options for Agricultural Production (eds.: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K.). Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, pp. 41–54.
- Ritchie, J.T., Otter, S., 1985. Description and performance of CERES-Wheat: a user-oriented wheat yield model. In: ARS Wheat Yield Project, ARS-38. National Technology Information Service, Springfield,

VA, pp. 159–175.

- Ritchie, J.T., Singh, U., Godwin, D.C., Bowen, W.T., 1998. Cereal growth, development and yield. In: Understanding Options for Agricultural Production (eds.: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K.). Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, pp. 79–98.
- Ritchie, J.T., Singh, U., Godwin, D.C., Humpries, J., 1994. CERES cereal generic model FORTRAN source code.
- Rodhe, H., Dentener, F., Schulz, M., 2002. The global distribution of acidifying wet deposition. *Environ. Sci. Technol.* **36**:4382–4388. doi:10.1021/es020057g
- Rogers, A., Medlyn, B.E., Dukes, J.S., 2014. Improving representation of photosynthesis in Earth System Models. *New Phytol.* **204**:12–14. doi:10.1111/nph.12972
- Rosegrant, M.W., Cline, S.A., 2003. Global food security: challenges and policies. *Science* **302**:1917–1919. doi:10.1126/science.1092958
- Rosenzweig, C., Iglesias, A., Yang, X.B., Epstein, P.R., Chivian, E., 2001. Climate change and extreme weather events; Impications for food production, plant diseases, and pests. *Glob. Chang. Hum. Heal.* **2**:90–104. doi:10.1023/A:1015086831467
- Rotz, C.A., Harrigan, T.M., 2005. Predicting suitable days for field machinery operations in a whole farm simulation. *Appl. Eng. Agric.* **21**:563–571. doi:10.13031/2013.16706
- Rötter, R.P., Palosuo, T., Kersebaum, K.C., Angulo, C., Bindi, M., Ewert, F., Ferrise, R., Hlavinka, P., Moriondo, M., Nendel, C., Olesen, J.E., Patil, R.H., Ruget, F., Takáč, J., Trnka, M., 2012. Simulation of spring barley yield in different climatic zones of Northern and Central Europe: a comparison of nine crop models. *F. Crop. Res.* **133**:23–36. doi:10.1016/j.fcr.2012.03.016
- Running, S.W., Hunt, E.R., 1993. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models. In: Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe (eds.: Ehleringer, J.R., Field, C.B.). Academic Press, New York, pp. 141–158.
- Ruzsányi, L., 1996. Az aszály hatása és enyhítésének lehetőségei a növénytermesztésben. In: Éghajlat, Időjárás, Aszály (eds.: Cselótei, G., Harnos, Z.). Akaprint, Budapest, pp. 5–66.
- Sacks, W.J., Deryng, D., Foley, J.A., Ramankutty, N., 2010. Crop planting dates: an analysis of global patterns. *Glob. Ecol. Biogeogr.* **19**:607–620. doi:10.1111/j.1466-8238.2010.00551.x
- Sándor, R., 2014. A talaj-növény-légkör rendszer modellezésének léptékfüggő problémái. Doktori disszertáció, Szegedi Tudományegyetem, Szeged, pp. 141.
- Sándor, R., Barcza, Z., Hidy, D., Lellei-Kovács, E., Ma, S., Bellocchi, G., 2016. Modelling of grassland fluxes in Europe: Evaluation of two biogeochemical models. *Agric. Ecosyst. Environ.* **215**:1–19. doi:10.1016/j.agee.2015.09.001
- Sárdi, K., 2011. Tápanyaggazdálkodás. Debreceni Egyetem, Nyugat-Magyarországi Egyetem, Pannon Egyetem, pp. 88.
- Sarmiento, J.L., Gloor, M., Gruber, N., Beaulieu, C., Jacobson, A.R., Fletcher, S.E.M., Pacala, S., Rodgers, K., 2010. Trends and regional distributions of land and ocean carbon sinks. *Biogeosciences* **7**:2351–2367. doi:10.5194/bg-7-2351-2010
- Sárvári, M., Futó, Z., 2001. Összefüggés a kukoricahibridek vetésideje, produkciója és a betakarításkori nedvességtartalma között csernozjom talajon. *Acta Agrar.* **1**:32–41.
- Schimel, D., Stephens, B.B., Fisher, J.B., 2015. Effect of increasing CO<sub>2</sub> on the terrestrial carbon cycle. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **112**:436–441. doi:10.1073/pnas.1407302112
- Schmid, H.P., 1994. Source areas for scal ars and scalar fluxes. *Boundary-Layer Meteorol.* **67**:293–318.
- Schmid, H.P., Oke, T.R., 1990. A model to estimate the source area contributing to turbulent exchange in the surface layer over patchy terra. *Q. Jorunal R. Meteorol. Soc.* **116**:965–988.
- Schmidhuber, J., Tubiello, F.N., 2007. Global food security under climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **104**:19703–19708. doi:10.1073/pnas.0701976104
- Scurlock, J.M.O., Hall, D.O., 1998. The global carbon sink: a grassland perspective. *Glob. Chang. Biol.*

4:229–233. doi:10.1046/j.1365-2486.1998.00151.x

- Šimůnek, J., Huang, K., van Genuchten, M.T., 1998. The HYDRUS code for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media.
- Sinclair, T.R., Seligman, N.G., 1996. Crop modeling: from infancy to maturity. *J. Agron.* **88**:698–704. doi:10.2134/agronj1996.00021962008800050004x
- Sitch, S., Smith, B., Prentice, I.C., Arneth, A., Bondeau, A., Cramer, W., Kaplan, J.O., Levis, S., Lucht, W., Sykes, M.T., Thonicke, K., Venevsky, S., 2003. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Glob. Chang. Biol.* **9**:161–185. doi:10.1046/j.1365-2486.2003.00569.x
- Smith, J., Smith, P., Wattenbach, M., Zaehle, S., Hiederer, R., Jones, R.J.A., Montanarella, L., Rounsevell, M.D.A., Reginster, I., Ewert, F., 2005. Projected changes in mineral soil carbon of European croplands and grasslands, 1990–2080. *Glob. Chang. Biol.* **11**:2141–2152. doi:10.1111/j.1365-2486.2005.01075.x
- Smith, N.G., Dukes, J.S., 2012. Plant respiration and photosynthesis in global-scale models: incorporating acclimation to temperature and CO<sub>2</sub>. *Glob. Chang. Biol.* **19**:45–63. doi:10.1111/j.1365-2486.2012.02797.x
- Smith, P.C., De Noblet-Ducoudré, N., Ciais, P., Peylin, P., Viovy, N., Meurdesoif, Y., Bondeau, A., 2010. European-wide simulations of croplands using an improved terrestrial biosphere model: phenology and productivity. *J. Geophys. Res.* **115**:1–14. doi:10.1029/2008JG000800
- Somogyi, Z., Hidy, D., Gelybó, G., Barcza, Z., Churkina, G., Haszpra, L., Horváth, L., Machon, A., Grosz, B., 2010. Modeling of biosphere-atmosphere exchange of greenhouse gases - Models and their adaptation. In: Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective (ed.: Haszpra, L.). Springer, pp. 263–293. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- Spitkó, T., Nagy, Z., Zsubori, Z.T., Halmos, G., Bányai, J., Marton, C.L., 2014. Effect of drought on yield components of maize hybrids (*Zea mays L.*). *Maydica* **59**:161–169.
- Spitters, C.J.T., 1990. Crop growth models: their usefulness and limitations. *Acta Hort.* **267**:349–386. doi:10.17660/ActaHortic.1990.267.42
- Stedinger, J.R., Vogel, R.M., Lee, S.U., Batchelder, R., 2008. Appraisal of the generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) method. *Water Resour. Res.* **44**:1–17. doi:10.1029/2008WR006822
- Stehfest, E., Heistermann, M., Priess, J.A., Ojima, D.S., Alcamo, J., 2007. Simulation of global crop production with the ecosystem model DayCent. *Ecol. Modell.* **209**:203–219. doi:10.1016/j.ecolmodel.2007.06.028
- Stockle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *Eur. J. Agron.* **18**:289–307. doi:10.1016/S1161-0301(02)00109-0
- Szabó, P., 2008. Comparison of precipitation and temperature fields in different data sets used for evaluating Regional Climate Models at the Hungarian Meteorological Service. Budapest, pp. 10.
- 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, G., Mihic, D., Antolovic, I., Mihajlovic, V., Nejedlik, P., Stastny, P., Mikulova, K., Nabyvanets, I., Skyryk, O., Krakovskaya, S., Vogt, J., Antofie, T., Spinoni, J., 2013. Climate of the Greater Carpathian Region. Final Technical Report.
- Szász, G., 2013. Agrometeorological research and its results in Hungary (1870–2010). *IDŐJÁRÁS - Q. J. Hungarian Meteorol. Serv.* **117**:315–358.
- Tambo, J.A., Abdoulaye, T., 2012. Climate change and agricultural technology adoption: the case of drought tolerant maize in rural Nigeria. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.* **17**:277–292. doi:10.1007/s11027-011-9325-7
- Tebaldi, C., Knutti, R., 2007. The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Philos. Trans. Ser. A* **365**:2053–2075. doi:10.1098/rsta.2007.2076
- Thiemeßl, M.J., Gobiet, A., Heinrich, G., 2012. Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal. *Clim. Change* **112**:449–468. doi:10.1007/s10584-011-0224-4

- Thornton, P.E., 2000. User's Guide for Biome-BGC, Version 4.1.1.
- Thornton, P.E., Rosenbloom, N.A., 2005. Ecosystem model spin-up: estimating steady state conditions in a coupled terrestrial carbon and nitrogen cycle model. *Ecol. Modell.* **189**:25–48. doi:10.1016/j.ecolmodel.2005.04.008
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., Befort, B.L., 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **108**:20260–20264. doi:10.1073/pnas.1116437108
- Tjoelker, M.G., Oleksyn, J., Reich, P.B., 2001. Modelling respiration of vegetation: evidence for a general temperature-dependent  $Q_{10}$ . *Glob. Chang. Biol.* **7**:223–230.
- Torriani, D.S., Calanca, P., Schmid, S., Beniston, M., Fuhrer, J., 2007. Potential effects of changes in mean climate and climate variability on the yield of winter and spring crops in Switzerland. *Clim. Res.* **34**:59–69. doi:10.3354/cr034059
- Tóth, E., Barcza, Z., Birkás, M., Gelybó, G., Zsembeli, J., Bottlik, L., Davis, K.J., Haszpra, L., Kern, A., Kljun, N., Koós, S., Kovács, G., Stingli, A., Farkas, C., 2010. Measurements and estimations of biosphere-atmosphere exchange of greenhouse gases - Arable lands. In: Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective (ed.: Haszpra, L.). Dordrecht - Heidelberg - London - New York, pp. 157–197. doi:10.1007/978-90-481-9950-1
- Vágvölgyi, S., Varga, C., 2011. Növénytermesztés. Nyíregyházi Főiskola, Nyíregyháza, pp. 51.
- Van den Hoof, C., Hanert, E., Vidale, P.L., 2011. Simulating dynamic crop growth with an adapted land surface model - JULES-SUCROS: model development and validation. *Agric. For. Meteorol.* **151**:137–153. doi:10.1016/j.agrformet.2010.09.011
- Van der Linden, P., Mitchell, J.F.B., 2009. ENSEMBLES: Climate Change and Its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project, Office. pp. 160.
- Van Dingenen, R., Dentener, F.J., Raes, F., Krol, M.C., Emberson, L., Cofala, J., 2009. The global impact of ozone on agricultural crop yields under current and future air quality legislation. *Atmos. Environ.* **43**:604–618. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.10.033
- Vanuytrecht, E., Raes, D., Willems, P., 2015. Regional and global climate projections increase mid-century yield variability and crop productivity in Belgium. *Reg. Environ. Chang.* **16**:659–672. doi:10.1007/s10113-015-0773-6
- Várallyai, G., Szabó, J., Pásztor, L., Michéli, E., 1994. SOTER (Soil and Terrain Digital Database) 1:500000 and its application in Hungary. *Agrokémia és Talajt.* **43**:87–108.
- Veisz, O., Bencze, S., 2008. A klímaváltozás hatásai a kalászosok biomassza-produkciójára, termésére és betegségeire. In: Klímaváltozás: Környezet - Kockázat - Társadalom (eds.: Harnos, Z., Csete, L.). Szaktudás Kiadó Ház, Budapest, pp. 167–200.
- Vermes, L., 1995. Az esetleges éghajlatváltozás és a mezőgazdaság. *Hidrológiai közlöny* **75**:101–105.
- Vermeulen, S.J., Aggarwal, P.K., Ainslie, A., Angelone, C., Campbell, B.M., Challinor, A.J., Hansen, J.W., Ingram, J.S.I., Jarvis, A., Kristjanson, P., Lau, C., Nelson, G.C., Thornton, P.K., Wollenberg, E., 2012. Options for support to agriculture and food security under climate change. *Environ. Sci. Policy* **15**:136–144. doi:10.1016/j.envsci.2011.09.003
- Von Caemmerer, S., Evans, J.R., 2010. Enhancing C3 photosynthesis. *Plant Physiol.* **154**:589–592. doi:10.1104/pp.110.160952
- Waha, K., van Bussel, L.G.J., Bondeau, A., 2012. Climate-driven simulation of global crop. *Glob. Ecol. Biogeogr.* **21**:247–259. doi:10.1111/j.1466-8238.2011.00678.x
- Waongo, M., Laux, P., Kunstmann, H., 2015. Adaptation to climate change: The impacts of optimized planting dates on attainable maize yields under rainfed conditions in Burkina Faso. *Agric. For. Meteorol.* **205**:23–39. doi:10.1016/j.agrformet.2015.02.006
- White, R.H., Toumi, R., 2013. The limitations of bias correcting regional climate model inputs. *Geophys. Res. Lett.* **40**:2907–2912. doi:10.1002/grl.50612
- Williams, J.R., 1991. Runoff and water erosion. In: Agronomy Monograph Nr. 31 (eds.: Hanks, R.J., Ritchie, J.T.). American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, pp. 439–455.

- Wolf, J., Ouattara, K., Supit, I., 2015. Sowing rules for estimating rainfed yield potential of sorghum and maize in Burkina Faso. *Agric. For. Meteorol.* **214-215**:208–218. doi:10.1016/j.agrformet.2015.08.262
- Woodrow, I.E., Berry, J.A., 1988. Photosynthetic CO<sub>2</sub> fixation in C<sub>3</sub> plants. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* **39**:533–594.
- Wullschleger, S.D., 1993. Biochemical limitations to carbon assimilation in C<sub>3</sub> plants - A retrospective analysis of the A/Ci curves from 109 species. *J. Exp. Bot.* **44**:907–920. doi:10.1093/jxb/44.5.907
- Wullschleger, S.D., Gunderson, C.A., Hanson, P.J., Wilson, K.B., Norby, R.J., 2002. Sensitivity of stomatal and canopy conductance to elevated CO<sub>2</sub> concentration - interacting variables and perspectives of scale. *New Phytol.* **153**:485–496. doi:10.1046/j.0028-646X.2001.00333.x
- Zhu, Y., 2005. Ensemble forecast: a new approach to uncertainty and predictability. *Adv. Atmos. Sci.* **22**:781–788. doi:10.1007/BF02918678
- Zsembeli, J., Szűcs, L., Tuba, G., Czimbalmos, R., 2015. Nedvességtakarékos talajművelési rendszer fejlesztése Karcagon. In: *Környezetkímélő Talajművelési Rendszerek Magyarországon* (ed.: Madarász, B.). MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Földrajztudományi Intézet, Budapest, pp. 122–132.

## I. Melléklet. A 4M modell növény- és talajparametrizációja.

1. táblázat. A 4M modellben alkalmazott növényi paraméterek.

Paraméterek	Kukorica	Őszi búza
<b>Induló gyökértömeg (kg növény<sup>-1</sup>)</b>	0,00002	0,00002
<b>Induló szártömeg (kg növény<sup>-1</sup>)</b>	0,00002	0,00002
<b>Induló levéltömeg (kg növény<sup>-1</sup>)</b>	0,00002	0,00002
<b>Induló levélfelület (m<sup>2</sup> növény<sup>-1</sup>)</b>	0,0001	0,00005
<b>Maximális magasság (cm)</b>	200	100
<b>Relatív magasság (STW/a)<sup>b</sup></b> STW: szártömeg (kg növény <sup>-1</sup> )	a=0,05 b=0,5	a=0,0007 b=0,5
<b>Max. gyökerezési mélység (cm)</b>	170	150
<b>Relatív gyökerezési mélység (RTW/a)<sup>b</sup></b> RTW: gyökértömeg (kg növény <sup>-1</sup> )	a=0,04 b=0,5	a=0,0007 b=0,5
<b>Gyökérzet mélységtől való függése</b> $e^{b(a-RD\%)}$ RD%: gyökerezési mélység (%)	a=20 b=0,06	a=18 b=0,06
<b>Bázishőmérséklet (°C)</b>	8	0
<b>Fotoszintézis függése a nap nappali szakaszának hosszától</b> $1-a*(16-DL)$ DL: nappalhossz (óra)	a=0,075	a=0,075
<b>Megtermékenyülés sikertelensége (%)</b> $a*TSTR$ TSTR: hőstressz (0-1)	a=30	a=30
<b>Megtermékenyülésre vonatkozó hőmérsékleti stressz</b> trap(Tmx) trap: trapézfüggvény <sup>2</sup> Tmx: napi max. hőmérséklet (°C)	a=35 b=40 c=99 d=99	a=35 b=40 c=99 d=99

<sup>22</sup> A trapézfüggvényben megadott négy érték között a függvény viselkedése más és más. Az 'a' értéknél kisebb esetben a függvény értéke 0, az 'a' és 'b' értékek között a függvény lineárisan növekszik 0 és 1 között. A 'b' és 'c' értékek között a függvény értéke mindenhol 1, majd 'c' és 'd' között lecsökken 0-ra, és 'd' felett 0 marad. Abban az esetben ha 'c' és 'd' megegyeznek, akkor a csökkenés 1-ről közvetlenül 0-ra történik.

<p><b>Átépülés szárból termésbe</b>  <math>a*(STW-b*YDW)</math>  STW: szártömeg (kg növény<sup>-1</sup>)  YDW: terméstartalom (kg növény<sup>-1</sup>)</p>	<p>a=0,005  b=0,5</p>	<p>a=0,005  b=0,5</p>
<p><b>Átépülés levélből termésbe</b>  <math>a*(LFW-b*YDW)</math>  LFW: levéltömeg (kg növény<sup>-1</sup>)  YDW: terméstartalom (kg növény<sup>-1</sup>)</p>	<p>a=0,005  b=0,5</p>	<p>a=0,005  b=0,5</p>

2. táblázat. Fotoszintézissel kapcsolatos növényi paraméterek a 4M modellben.

Paraméterek	Kukorica	Őszi búza
<p><b>Potenciális fotoszintézis</b>  ((kg száraz anyag) m<sup>-2</sup> nap<sup>-1</sup>)  <math>a*R(1-e^{-b*LAI})</math>  R: globálsugárzás (MJ m<sup>-2</sup> nap<sup>-1</sup>)  LAI: levélfelület index (m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>)</p>	<p>a=0,0027  b=0,63</p>	<p>a=0,0022  b=0,63</p>
<p><b>CO<sub>2</sub> hatás</b>  <math>a+b*CO_2</math>  CO<sub>2</sub>: légköri széndioxid koncentráció (ppm)</p>	<p>a=0,9079  b=0,0003</p>	<p>a=0,7957  b=0,0007</p>
<p><b>Hőmérsékleti stressz</b>  trap(wT)  trap: trapézfüggvény<sup>3</sup>  wT: súlyozott napi középhőmérséklet (°C)</p>	<p>a=5  b=15  c=30  d=40</p>	<p>a=-2  b=15  c=23  d=38</p>
<p><b>Vízstressz</b>  <math>a-b*WDEF^c</math>  WDEF: vízhiány index ( )</p>	<p>a=1  b=1  c=1</p>	<p>a=1  b=1  c=1</p>
<p><b>Nitrogénstressz</b>  <math>a-b*NDEF^c</math>  NDEF: nitrogénhiány index ( )</p>	<p>a=1  b=1  c=1</p>	<p>a=1  b=1  c=0,5</p>

<sup>3</sup> A trapézfüggvényben megadott négy érték között a függvény viselkedése más és más. Az 'a' értéknél kisebb esetben a függvény értéke 0, az 'a' és 'b' értékek között a függvény lineárisan növekszik 0 és 1 között. A 'b' és 'c' értékek között a függvény értéke mindenhol 1, majd 'c' és 'd' között lecsökken 0-ra, és 'd' felett 0 marad. Abban az esetben ha 'c' és 'd' megegyeznek, akkor a csökkenés 1-ről közvetlenül 0-ra történik.

3. táblázat. Levél elhalással kapcsolatos növényi paraméterek a 4M modellben.

Paraméterek	Kukorica	Őszi búza
<b>Levél elhalás</b> $GDD \cdot (1 + a \cdot TSTR + b \cdot WSTR + c \cdot NSTR)$ GDD: hőmérsékleti összeg (°C) TSTR: hőstressz (0-1) WSTR: vízstressz (0-1) NSTR: nitrogénstressz (0-1)	a=1 b=0,4 c=0,2	a=0,2 b=0,2 c=0,2
<b>Hőstressz</b> $trap(T_{mx})$ trap: trapézfüggvény <sup>4</sup> Tmx: napi max. hőmérséklet (°C)	a=35 b=40 c=99 d=99	a=35 b=40 c=99 d=99
<b>Vízstressz</b> $WDEF^a$ WDEF: vízhiány index ( )	a=2	a=1
<b>Nitrogénstressz</b> $NDEF^a$ NDEF: nitrogénhiány index ( )	a=2	a=1

<sup>4</sup> A trapézfüggvényben megadott négy érték között a függvény viselkedése más és más. Az 'a' értéknél kisebb esetben a függvény értéke 0, az 'a' és 'b' értékek között a függvény lineárisan növekszik 0 és 1 között. A 'b' és 'c' értékek között a függvény értéke mindenhol 1, majd 'c' és 'd' között lecsökken 0-ra, és 'd' felett 0 marad. Abban az esetben ha 'c' és 'd' megegyeznek, akkor a csökkenés 1-ről közvetlenül 0-ra történik.



4. táblázat. Kukoricára és búzára vonatkozó allokációval kapcsolatos növényi paraméterek a 4M modellben.

	Allokáció (elosztás, %)			
Fenológiai fázisok neve	Gyökérbe	Szárba	Levélbe	Termésbe
<b>Növény</b>	<b>Kukorica</b>			
<b>Csírázás</b>	0	0	0	0
<b>Kelés</b>	0	0	0	0
<b>Levélnövekedés felfutó szakasza</b>	30	5	65	0
<b>Levélnövekedés lineáris szakasza</b>	25	50	25	0
<b>Virágzás</b>	20	75	5	0
<b>Szertelítődés</b>	10	25	5	60
<b>Növény</b>	<b>Őszi búza</b>			
<b>Csírázás</b>	0	0	0	0
<b>Kelés</b>	0	0	0	0
<b>Bokrosodás</b>	30	0	70	0
<b>Szárbaindulás</b>	25	54	21	0
<b>Kalászolás</b>	15	80	5	0
<b>Virágzás</b>	10	80	5	5
<b>Szertelítődés</b>	5	5	0	90

5. táblázat. A 4M talajparametrizációja különböző talajtextúrákra vonatkozóan.

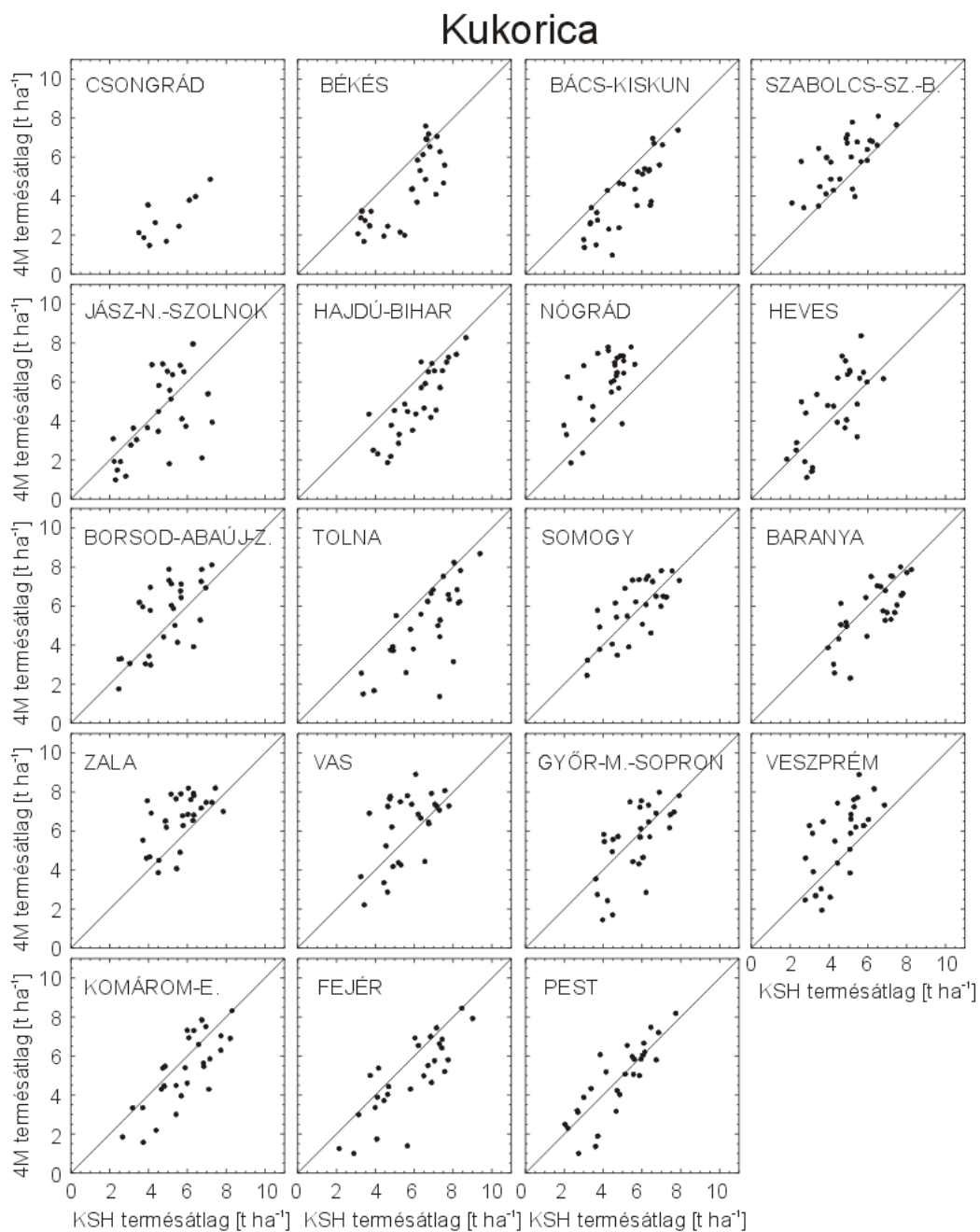
Talaj paraméterek	Agyagos vályog	Agyag	Vályogos homok	Vályog	Homokos agyagos vályog	Homokos agyag	Homokos vályog	Homok	Iszapos agyagos vályog	Iszapos agyag	Iszapos vályog	Iszap
Lefolyási görbeparaméter (Runoff curve number, RCN; Williams, 1991) (0-100)	64	72	52	56	62	68	54	50	66	70	58	60
Minimális talajvíz tartalom ( $m^3 m^{-3}$ )	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
A talaj térfogattömege ( $g cm^{-3}$ )	1,46	1,38	1,58	1,54	1,48	1,42	1,56	1,6	1,44	1,4	1,52	1,5
Maximális vízkapacitás ( $m^3 m^{-3}$ )	0,505	0,525	0,42	0,46	0,5	0,515	0,44	0,4	0,51	0,52	0,48	0,49
Szabadföldi vízkapacitás ( $m^3 m^{-3}$ )	0,405	0,46	0,19	0,31	0,39	0,435	0,25	0,155	0,42	0,445	0,36	0,38
Hervadáspon ( $m^3 m^{-3}$ )	0,22	0,29	0,05	0,13	0,205	0,26	0,09	0,03	0,24	0,275	0,17	0,19
Telítési vízvezető képesség ( $cm nap^{-1}$ )	20	5	100	25	25	20	50	125	15	10	20	20
Függvény paraméter (Kr(Se))	1,05	0,45	3	2	1,2	0,75	2,5	3,5	0,9	0,6	1,5	1,35

## II. Melléklet. A 4M és Biome-BGCMuSo modellek összehasonlítása

1. táblázat. A 4M és a Biome-BGCMuSo modellek közötti eltérések és hasonlóságok.

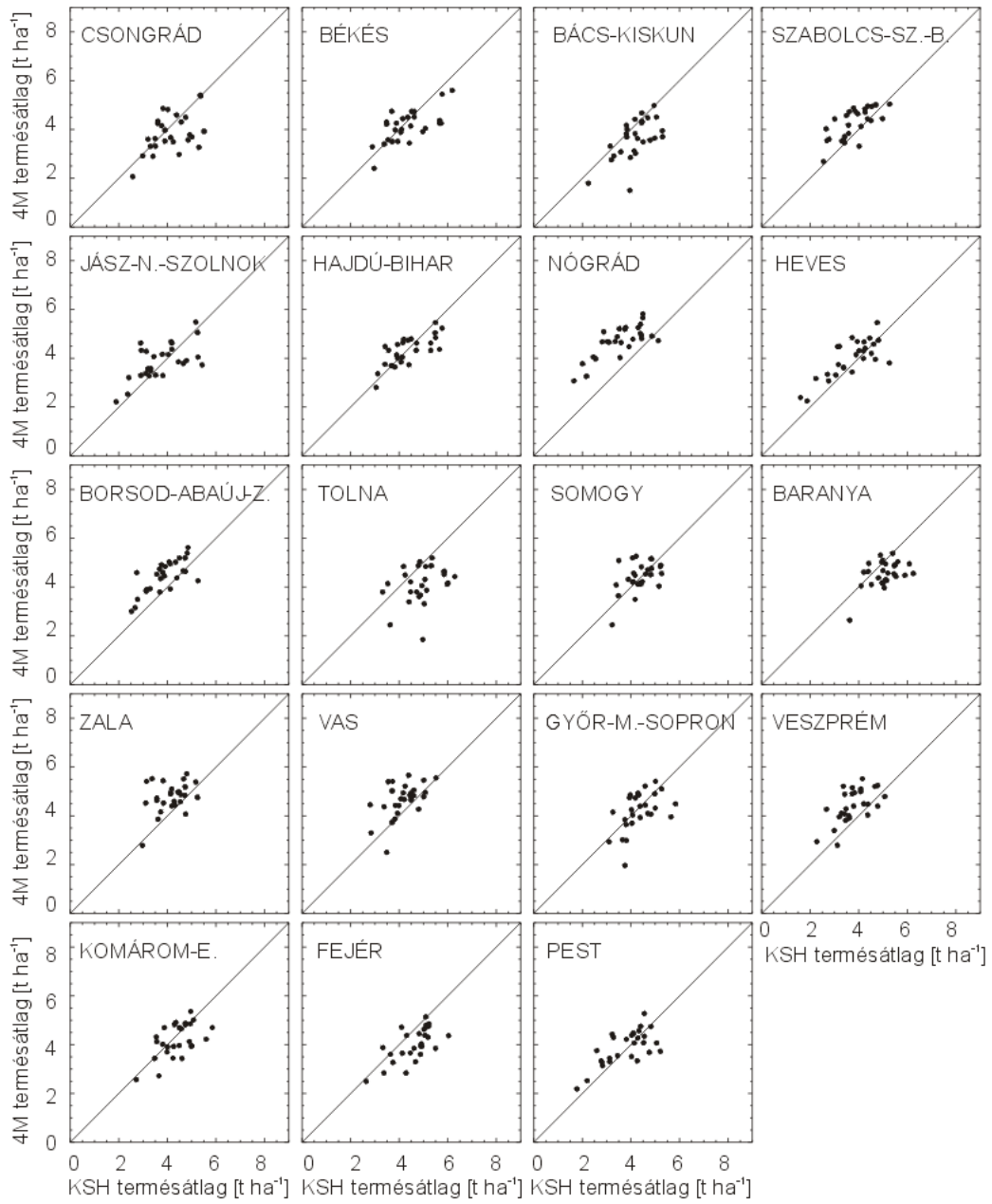
Összehasonlítási szempont	4M	Biome-BGCMuSo
Modellezhető ökológiai rendszerek	Mezőgazdasági kultúrnövények	Természetes és művelés alá volt ökológiai rendszerek egyaránt (erdők, gyepek, kultúrnövények, stb.)
Fotoszintézis leírására, a szénmegkötés számszerűsítésére alkalmazott módszer	Fényhasznosulási egyenlet (Monteith, 1972, 1977)	Farquhar féle modell (Farquhar et al., 1980), részletes enzimkinetikai leírással (Woodrow and Berry, 1988; Di Vittorio et al., 2010).
A tározók, amelyek között elosztásra kerül a fotoszintézis során megkötött szén, és a rendelkezésre álló nitrogén	<ul style="list-style-type: none"> <li>• gyökér</li> <li>• szár</li> <li>• levél</li> <li>• termés</li> </ul>	
Fenológia	Különböző fenológiai fázisok különülnek el, amelyek a hőmérsékleti összeg (GDD) alapján kerülnek időzítésre. A fázisok száma, és időtartama változtatható.	Legfeljebb három fázist képes megkülönböztetni, melyek időzítése a GDD megadásával lehetséges. Az alapértelmezett fázisban nem történik termésallokáció. Adott GDD után bekapcsolható a termés allokációja, valamint a genetikailag programozott sejthalál.
Allokáció	Fenofázisonként eltérő elosztási arányokat alkalmaz.	A gyökérbe, szárba és levélbe történő allokáció egész évben állandó, csak akkor módosul, amikor adott GDD után a termésbe történő allokáció elindul.
Művelési beállítások	Dátummal megadandó: <ul style="list-style-type: none"> <li>• vetés</li> <li>• trágyázás</li> <li>• aratás</li> </ul> Automatikus vagy dátummal: <ul style="list-style-type: none"> <li>• öntözés: alkalmankénti összeg adható meg, a modell egy szárazsági index alapján dönt az öntözés időzítéséről.</li> </ul>	Dátummal megadandó: <ul style="list-style-type: none"> <li>• szántás</li> <li>• vetés</li> <li>• trágyázás</li> <li>• aratás</li> <li>• öntözés</li> </ul> Egyéb erdő-gyep ökológiai rendszerek művelés lehetőségei: szálalás, legeltetés, kaszálás
Szimuláció felépítése	Van lehetőség évente más mezőgazdasági kultúrnövény vetésére, vetésforgó alkalmazására (jelen munkában ezt nem modelleztük)	A modell felfutási szakaszában (spin-up) feltételezett növényzet eltérhet a normál futás során vetett növénytől, azonban a normál szimuláció közben nincs lehetőség vetésforgó alkalmazására.
Szénmérleg szimulációja	Bizonyos szénáramokat származtat, de az alkalmazott módszer egyszerűsége miatt jelen munkában ezt nem vizsgáltuk.	A teljes talaj-növény-légkör rendszer biogeokémiai ciklusát szimulálja. Fotoszintézist, respirációt, talaj szerves anyag, felhalmozódását, avarképződést, a talaj humusztartalmát, növényi részek bomlását, stb.
Figyelembe vett tápanyagok	nitrogén, foszfor, kálium	nitrogén

### III. Melléklet. A 4M modell megyei szintű validációja.



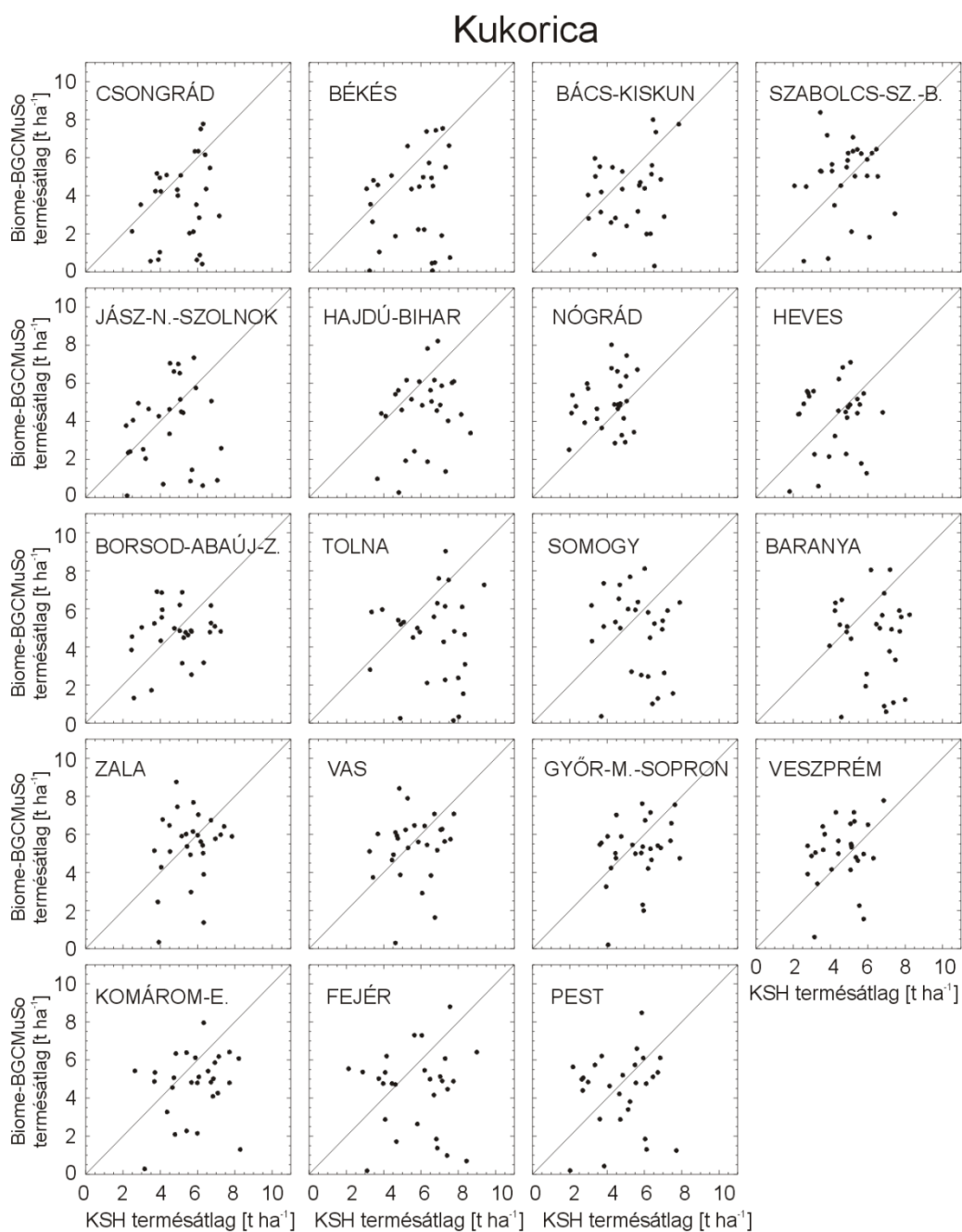
**M1. ábra. A kalibrált parametrizációval futtatott 4M modell eredményeinek validációja megyei szinten kukoricára. Az összehasonlítási alapot a KSH megyei szintű termésátlag feljegyzései alkották az 1986-2013 időszakra.**

## Őszi búza



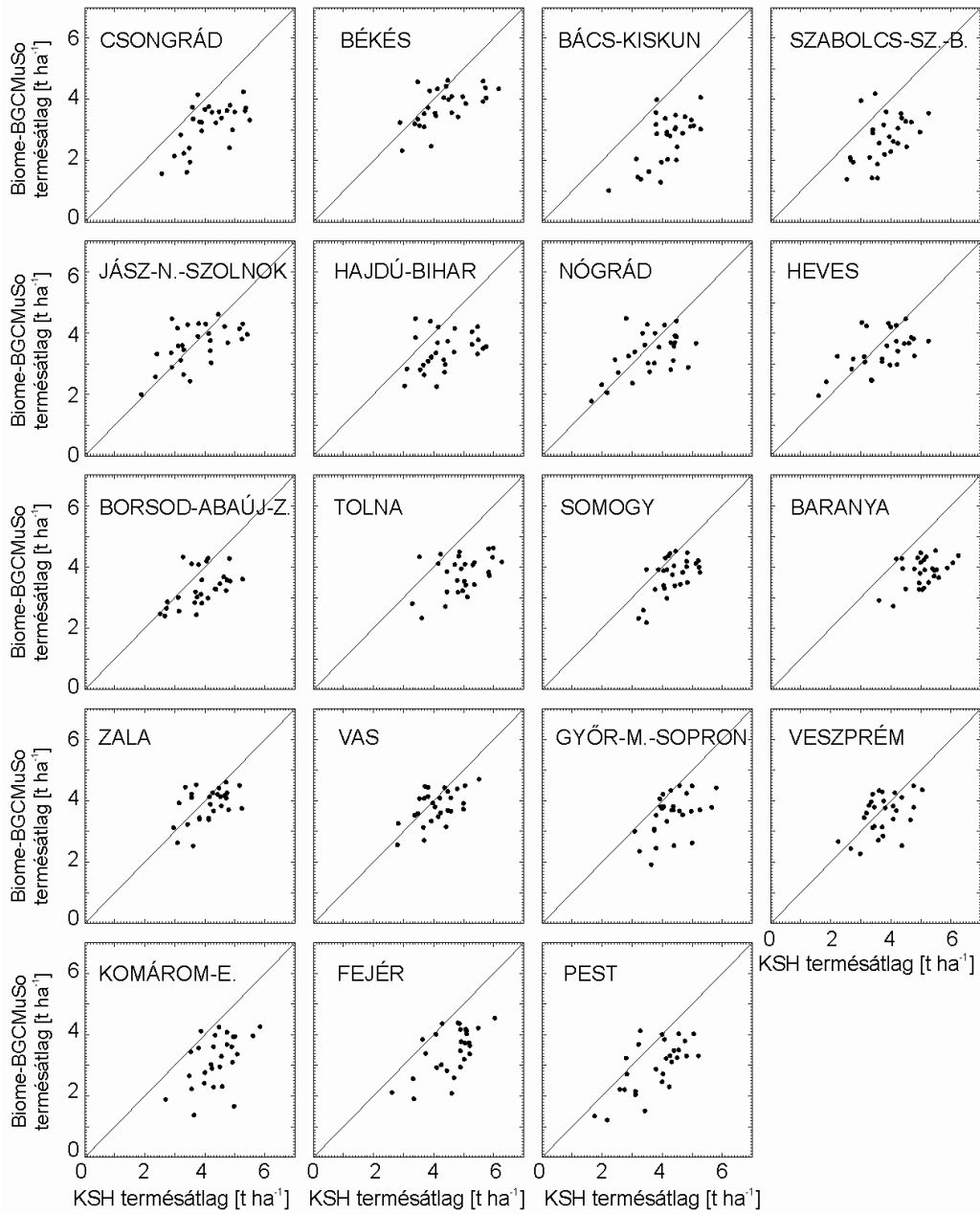
**M2. ábra A kalibrált parametrizációval futtatott 4M modell eredményeinek validációja megyei szinten búzára. Az összehasonlítási alapot a KSH megyei szintű termésátlag feljegyzései alkották az 1986-2013 időszakra.**

## IV. Melléklet. A Biome-BGCMuSo modell megyei szintű validációja.



**M3. ábra.** A kalibrált parametrizációval futtatott Biome-BGCMuSo modell eredményeinek validációja megyei szinten kukoricára. Az összehasonlítási alapot a KSH megyei szintű termésátlag feljegyzései alkották az 1986-2013 időszakra.

## Őszi búza



**M4. ábra. A kalibrált parametrizációval futtatott Biome-BGCMuSo modell eredményeinek validációja megyei szinten búzára. Az összehasonlítási alapot a KSH megyei szintű termésátlag feljegyzései alkották az 1986-2013 időszakra.**

# Az éghajlatváltozás lehetséges hatásai a mezőgazdasági szénmérlegre és produktivitásra Magyarországon

*Dobor Laura*

Témavezetők: *dr. Barcza Zoltán, dr. Havasi Ágnes*

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék

Az éghajlatváltozás jelentős hatással lehet az élelmezésbiztonságra a jövőben, mivel a gabonanövények termésátlagai szoros összefüggésben állnak a fennálló meteorológiai viszonyokkal. Doktori munkám során az éghajlatváltozás hatásait vizsgáltam a két legjelentősebb hazai gabonanövényre (az őszi búzára és a kukoricára) modellszimulációk segítségével. A termésátlagok jövőbeli alakulása a hazai élelmiszertermelés szempontjából, míg a szénmérleg a hazai mezőgazdaság szénkörforgásában betöltött szerepe szempontjából fontos.

A kutatás során az volt a célunk, hogy több klímamodell-eredmény és két növénymodell felhasználásával egy ún. multi-modell ensemble szimulációs rendszert alkossunk, amellyel robosztus projekciók adhatók a jövőbeli várható változásokra, azok bizonytalanságának becslésével együtt. A termésátlag-szimulációkat a 4M mezőgazdasági, és a Biome-BGCMuSo biogeokémiai modellel végeztük el 2100-ig bezárólag. Utóbbi modellel lehetőségünk volt a szénmérleg becslésére is. A modellek bemenő meteorológiai adatigényének kielégítésére létrehoztunk egy új klimatológiai adatbázist, a FORESEE-t, amely napi léptékű meteorológiai adatokat tartalmaz az 1951-2100 időszakokra. A FORESEE a múltra megfigyeléseket, míg a jövőre tíz regionális klímamodell-eredményt tartalmaz, melyeken eloszlásfüggvény-illesztéssel alapuló hibakorrektívumot végeztünk. Az adatbázist szabadon hozzáférhetővé tettük.

A modellek további bemenő adata közül a vetés időpontjára vonatkozóan időjárástól és talajállapottól függő módszereket dolgoztunk ki, melyeket megfigyelésekkel validáltunk. Ezen felül különböző alternatív scenáriók (trágyázás, öntözés) hatását is vizsgáltuk a jövőbeli termésátlag-szimulációkra. A növénymodelleket a Központi Statisztikai Hivatal megyei szintű termésátlag-feljegyzéseivel és a hegyhátsági (Vas megye) eddy-kovariancia mérésekkel kalibráltuk illetve validáltuk.

A két különböző logikájú modell, a 4M és a Biome-BGCMuSo előjelüket tekintve azonos várható változásokat becsült a jövőre vonatkozóan. A két növénymodell és a tíz bemenő regionális klímamodell-eredmény átlagát tekintve 2021-2050-re kukorica esetén  $0,43 \text{ t ha}^{-1}$  termésátlag csökkenés, búza esetén  $0,2 \text{ t ha}^{-1}$  növekedés várható országos átlagban az 1986-2013-as időszakhoz viszonyítva. 2071-2100-ra  $0,96 \text{ t ha}^{-1}$  terméscsökkenésre számíthatunk a kukorica, valamint  $0,51 \text{ t ha}^{-1}$  növekedésre a búza esetén. A Biome-BGCMuSo modell kisebb csökkenő tendenciát becsül, mint a 4M modell a kukorica esetén. A modelleredmények szerint az alternatív művelési módok tekintetében a kukorica esetén öntözéssel magasabb termésátlagok érhetők el, mint a műtrágyázás fokozásával. A búza esetén a műtrágyázás mennyiségének és időpontjának változtatása kisebb hatással volt a termésátlagokra, mint a kukorica esetén. A Biome-BGCMuSo modell eredményei alapján megállapítható, hogy nem várható szignifikáns változás az ország mezőgazdasági szénmérlegét tekintve.

Az eredmények fényében érdemes lenne a modelleket a jövőben együtt fejleszteni, és ötvözni az egyes modellek előnyeit.



# Possible impacts of climate change on the productivity and carbon balance of Hungarian croplands

*Laura Dobor*

Supervisors: *dr. Zoltán Barcza, dr. Ágnes Havasi*

Department of Meteorology, Institute of Geography and Earth Sciences, Eötvös Loránd University

Food security could be seriously affected by climate change, since crop yields are strongly related to the actual meteorological conditions. In my research the main aim was to estimate the possible effects of climate change on the production of the two major crop types of Hungary (winter wheat and maize) using a modeling exercise. The importance of future yields are related to the food production of the country, while the carbon balance of croplands has a major role in the determination of the Hungarian overall carbon balance.

Our main aim was to create a multi-model ensemble simulation system by using several climate projections for the future, and two vegetation models in order to give robust estimation and uncertainty for the expected changes until 2100. The 4M crop model and the Biome-BGCMuSo biogeochemical model were used for the yield simulations. Carbon fluxes were simulated by Biome-BGCMuSo. In order to provide the needed input meteorological data to the models, a new gridded climatological dataset (FORESEE) was created, which contains meteorological data for the period 1951-2100. FORESEE contains observation based data for the past, and 10 regional climate model (RCM) results for the future, which were bias corrected by using a cumulative density function fitting method. The database is freely available for the scientific community.

The planting date of crops is one of the necessary model inputs related to crop management, which was not studied with sufficient depth before. As an added value to the modeling exercise, novel, climate and soil status dependent planting date estimation methods were created and validated with observations. Different alternative management scenarios (fertilizing, irrigation) were used to test their effects on crop yield. The models were validated and calibrated with the observation retrieved from the Hungarian Central Statistical Office and the eddy-covariance measurement performed at Hegyhátsál, Vas County.

The two models with substantially different logic gave similar results for the future considering the sign of the expected changes. In terms of the two vegetation models and the 10 RCM results, yield loss was projected for maize ( $0.43 \text{ t ha}^{-1}$ ), while yield increase was forecasted for winter wheat ( $0.2 \text{ t ha}^{-1}$ ) for 2021-2050 relative to the period 1986-2013 on a country average. For 2071-2100, a decrease of  $0.96 \text{ t ha}^{-1}$  is expected for maize and an increase of  $0.51 \text{ t ha}^{-1}$  for winter wheat. In the case of maize, Biome-BGCMuSo projected smaller decrease for the future than the 4M model. Results using alternative management scenarios project considerably larger yield for maize if irrigation was scheduled, and the increase was higher than the effect of more intensive fertilization. Considering the projected yield, the effect of increased fertilization was greater in case of maize than in case of winter wheat. Biome-BGCMuSo estimated no significant future change in the overall carbon balance of the Hungarian croplands for maize and winter wheat on a country average.

Joint development of the 4M crop and Biome-BGCMuSo biogeochemical models are recommended in the future in order to combine the advantages of the models.

## <sup>38</sup>ADATLAP

### a doktori értekezés nyilvánosságra hozatalához

#### I. A doktori értekezés adatai

A szerző neve: Dobor Laura

MTMT-azonosító: 10032710

A doktori értekezés címe és alcíme: Az éghajlatváltozás lehetséges hatásai a mezőgazdasági szénmérlegre és produktivitásra Magyarországon

DOI-azonosító<sup>39</sup>: 10.15476/ELTE.2016.055

A doktori iskola neve: Környezettudományi Doktori Iskola

A doktori iskolán belüli doktori program neve: Környezeti földtudomány

A témavezető neve és tudományos fokozata:

1: dr. habil Barcza Zoltán

2: dr. Havasi Ágnes

A témavezető munkahelye:

1: ELTE TTK Meteorológiai Tanszék

2: ELTE TTK Alkalmazott Analízis és Számításmatematikai Tanszék

#### II. Nyilatkozatok

A doktori értekezés szerzőjeként<sup>40</sup>

a) hozzájárulok, hogy a doktori fokozat megszerzését követően a doktori értekezésem és a tézisek nyilvánosságra kerüljenek az ELTE Digitális Intézményi Tudástárban. Felhatalmazom a Természettudományi Kar Dékáni Hivatalának Doktori, Habilitációs és Nemzetközi Ügyek Csoportja ügyintézőjét, hogy az értekezést és a téziseket feltöltse az ELTE Digitális Intézményi Tudástárba, és ennek során kitöltse a feltöltéshez szükséges nyilatkozatokat.

b) kérem, hogy a mellékelt kérelemben részletezett szabadalmi, illetőleg oltalmi bejelentés közzétételéig a doktori értekezést ne bocsássák nyilvánosságra az Egyetemi Könyvtárban és az ELTE Digitális Intézményi Tudástárban;<sup>41</sup>

c) kérem, hogy a nemzetbiztonsági okból minősített adatot tartalmazó doktori értekezést a minősítés (*datum*)-ig tartó időtartama alatt ne bocsássák nyilvánosságra az Egyetemi Könyvtárban és az ELTE Digitális Intézményi Tudástárban;<sup>42</sup>

d) kérem, hogy a mű kiadására vonatkozó mellékelt kiadó szerződésre tekintettel a doktori értekezést a könyv megjelenéséig ne bocsássák nyilvánosságra az Egyetemi Könyvtárban, és az ELTE Digitális Intézményi Tudástárban csak a könyv bibliográfiai adatait tegyék közzé. Ha a könyv a fokozatszerzést követően egy évig nem jelenik meg, hozzájárulok, hogy a doktori értekezésem és a tézisek nyilvánosságra kerüljenek az Egyetemi Könyvtárban és az ELTE Digitális Intézményi Tudástárban.<sup>43</sup>

2. A doktori értekezés szerzőjeként kijelentem, hogy

a) az ELTE Digitális Intézményi Tudástárba feltöltendő doktori értekezés és a tézisek saját eredeti, önálló szellemi munkám és legjobb tudomásom szerint nem sértem vele senki szerzői jogait;

b) a doktori értekezés és a tézisek nyomtatott változatai és az elektronikus adathordozón benyújtott tartalmak (szöveg és ábrák) mindenben megegyeznek.

3. A doktori értekezés szerzőjeként hozzájárulok a doktori értekezés és a tézisek szövegének plágiumkereső adatbázisba helyezéséhez és plágiumellenőrző vizsgálatok lefuttatásához.

Kelt: Budapest, 2016.06.08.

  
.....  
a doktori értekezés szerzőjének aláírása

<sup>38</sup> Beiktatta az Egyetemi Doktori Szabályzat módosításáról szóló CXXXIX/2014. (VI. 30.) Szen. sz. határozat. Hatályos: 2014. VII.1. napjától.

<sup>39</sup> A kari hivatal ügyintézője tölti ki.

<sup>40</sup> A megfelelő szöveg aláhúzendő.

<sup>41</sup> A doktori értekezés benyújtásával egyidejűleg be kell adni a tudományos doktori tanácshoz a szabadalmi, illetőleg oltalmi bejelentést tanúsító okiratot és a nyilvánosságra hozatal elhalasztása iránti kérelmet.

<sup>42</sup> A doktori értekezés benyújtásával egyidejűleg be kell nyújtani a minősített adatra vonatkozó közokiratot.

<sup>43</sup> A doktori értekezés benyújtásával egyidejűleg be kell nyújtani a mű kiadásáról szóló kiadói szerződést.