

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

A Biome-BGC MuSo modell meteorológiai adatokra való érzékenységeinek vizsgálata

BSc szakdolgozat



Készítette: Cséke Dóra Csilla
Földtudományi BSc, Meteorológia szakirány

Témavezető: dr. habil. Barcza Zoltán
ELTE Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2015

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Alapfogalmak.....	5
2.1. A szénmérleg-komponensek bemutatása.....	5
2.2. Biogeokémiai modellek	6
3. Szakirodalmi áttekintés.....	8
4. Felhasznált adatok és módszerek	12
4.1. A Biome-BGC modell	12
4.1.1. A Biome-BGC MuSo modell	13
4.1.2. BioVeL infrastruktúra, BBGCDB, BioVeL portal	14
4.2. A szimuláció helyszínének bemutatása	15
4.3. Meteorológiai adatok forrása	16
4.4. Modellezési stratégia	18
5. Eredmények	20
5.1. A becsült változók érzékenysége a meteorológiai adatsor változására	20
5.1.1. Talajnedvesség a 0-10 cm-es rétegben	21
5.1.2. Evapotranszpiráció	23
5.1.3. GPP	25
5.1.4. NPP	27
5.1.5. R_{eco}	29
5.1.6. NEE.....	31
5.2. A hibák összevetése a mérés hibájával	33
6. Összefoglalás	34
7. Köszönetnyilvánítás.....	35
8. Irodalomjegyzék	36

1. Bevezetés

A globális éghajlatváltozás korunk egyik legjelentősebb környezeti problémája. Azonban nemcsak meteorológiai kérdéssel állunk szemben, hiszen az éghajlat megváltozása hatással van többek között a mezőgazdaságra, a biodiverzitásra, az iparra, a turizmusra és a politikára is. Éppen ezért az éghajlatváltozással kapcsolatos kutatások rendkívül fontosak.

Kutatások szerint az éghajlatváltozás fő okozója az ún. üvegházhatású gázok légköri koncentrációjának növekedése (*IPCC, 2007*). Az üvegházhatású gázok közül az éghajlatváltozásban a legnagyobb szerepet a szén-dioxidnak (CO_2) tulajdonítják, hiszen az a legfontosabb olyan gáz, amelynek légköri mennyiségét az emberi tevékenység – elsősorban a fosszilis tüzelőanyagok elégetése által - közvetlenül befolyásolja. Míg az 1750-es években, az ipari forradalom előtt a CO_2 légköri koncentrációja kb. 290 ppm (parts per million, azaz milliomod térfogatrés) körül mozgott, addig 2011-re elérte a 390 ppm-es értéket, és mára megközelítettük, illetve időszakosan már túl is léptük a 400 ppm értéket (*Ciais et al., 2013*).

A légköri szén-dioxid mennyiségét a bioszféra nagyban befolyásolja. Az éghajlat és a különböző ökoszisztémák szénmérlege közti kapcsolat meghatározása a klímakutatásban alapvető fontosságú, hiszen az befolyásolja a légkör jövőbeli szén-dioxid szintjét, ami értelemszerűen befolyásolja az éghajlatot. A folyamat kétirányú, hiszen az éghajlat megváltozása hatással van az ökoszisztémák szénkeréjére (*Yi et al., 2010*). Erre a kapcsolatra vonatkozó kutatások azonban egyelőre hiányosak (*Ciais et al., 2013*)

Az éghajlat és a szénforgalom közti kapcsolat jobb megismeréséhez elengedhetetlen az ökoszisztémák szénforgalmának számszerű ismerete. Az erre vonatkozó mérések azonban csak kis térbeli skálán (200-2000 m) hajthatók végre (*Mekonnen et al., 2016*). A szénforgalmat jellemző, fluxus jellegű mennyiségek regionális és globális skálán történő becslésére alkalmasak az ún. *biogeokémiai modellek*, amelyeket a növényzet, a talaj és a légkör közti energia- és anyagáramok modellezésére fejlesztettek ki. Ezen biogeokémiai modellek megbízhatóságát az alapján ítéljük meg, hogy mennyire pontosan becsülik meg ezeket a fluxusokat. A modellek pontosságát a valóságban lezajló folyamatokat leíró algoritmusok hitelessége, valamint a modell bemenő adatainak minősége határozza meg. A biogeokémiai modellek egyik

legfontosabb bemeneti adatsora meteorológiai változókat tartalmaz. Ezekről a meteorológiai változókról sok esetben nincsenek konkrét méréseink, azoknak csak becsült értékei állnak rendelkezésünkre (*Jung et al.*, 2007).

Szakedolgozatom célja a biogeokémiai modelleket meghajtó meteorológiai változók becsléséhez kapcsolódó bizonytalanságok számszerűsítése. Ehhez az egyesült államokbeli Montanai Egyetemen kifejlesztett Biome-BGC biogeokémiai modell hazai kutatók által továbbfejlesztett változatát, a Biome-BGC MuSo-t használtam (*Hidy et al.*, 2012; *Sándor et al.*, 2016), amit egy adott helyszínen (Hegyhátsál, Vas megye) futattam különböző forrásból származó meteorológiai adatsorok felhasználásával.

A szakdolgozatban bemutatom a szénmérleg meghatározására használt alapfogalmakat, majd kitérek a biogeokémiai modellek sajátosságaira. Ezután bemutatok néhány olyan tanulmányt, amely a meteorológiai adatokra való érzékenységet vizsgálja, majd áttekintem a felhasznált adatokat és modellt, továbbá az eredmények kapcsán becsülöm a meteorológiai adatforrások különbözősége által okozott bizonytalanságok nagyságrendjét. A szakdolgozatot rövid összefoglalással és kitekintéssel zárom.

2. Alapfogalmak

2.1. A szénmérleg-komponensek bemutatása

A talaj-növény-légkör rendszeren belül a szénforgalom számszerű leírására a kutatók fluxus jellegű mennyiségeket vezettek be (*Chapin et al.*, 2006; *Kertész*, 2010). Megjegyezzük, hogy a szénmérleg teljes leírásához tározókat is definiálnak, de a dolgozatban ezzel nem foglalkozunk.

A *bruttó elsődleges termék* (**G**ross **P**rimary **P**roduction; **GPP**) az a szénmennyiség, amelyet a növényzet szén-dioxid formájában egységnyi idő alatt egységnyi területen felvesz, majd fotoszintézis során szerves anyaggá alakít.

A felvett szénmennyiség egy része a növények légzése során (*autotróf respiráció*; R_{auto}) távozik a rendszerből. Így a nettó elsődleges termék (**N**et **P**rimary **P**roduction; **NPP**), ami a növény nettó szénmérlege a következő alakot ölti:

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

Ha az autotróf respiráció mellett figyelembe vesszük a *heterotróf respirációt* (R_{hetero}), vagyis az egyéb CO_2 -kibocsátókat (a talaj szervesanyag-tartalmának bomlásakor a baktériumok, gombák és egyéb lebontók által felszabadított CO_2) is, akkor egy sokkal könnyebben mérhető paramétert kapunk. Ez a *nettó ökoszisztéma szén-dioxid csere* (**N**et **E**cosystem **E**xchange; **NEE**), amely egy ökológiai rendszer által összesen leadott és felvett szén mennyiségének különbsége (a laterális szénmozgás itt nincs figyelembe véve). Mivel az **NEE** eredeti definíciója a légkör szemszögéből vizsgálta a folyamatokat, ezért pozitív előjelű, ha az ökoszisztéma CO_2 -t bocsát ki (vagyis CO_2 kerül a légkörbe) és negatív előjelű, ha CO_2 -t vesz fel (vagyis a légkörből CO_2 kerül ki). Ezek alapján a **NEE** a következő összefüggéssel írható le:

$$\text{NEE} = R_{\text{auto}} + R_{\text{hetero}} - \text{GPP} \quad (2)$$

Ha definiáljuk a *teljes ökoszisztéma légzést* (**T**otal **E**cosystem **R**espiration; R_{eco}), mint az autotróf és a heterotróf respiráció összegét:

$$R_{eco} = R_{auto} + R_{hetero} \quad (3)$$

akkor az NEE-re kapott új összefüggés következő alakot ölti:

$$NEE = R_{eco} - GPP \quad (4)$$

A fentiek mellett használatos még a *nettó ökoszisztéma termék* (Net Ecosystem Production; NEP), amely közelíthető az ökológiai rendszer által összesen leadott és felvett szén mennyiségének különbségével (Kertész, 2010):

$$NEP = GPP - R_{eco} = -NEE \quad (5)$$

2.2. Biogeokémiai modellek

A biogeokémiai modellek a talaj-növény-légkör rendszer ökológiai és éghajlattani vonatkozású modellezésében használatosak (Friedlingstein et al., 2006; Hidy et al., 2006, 2012; Ciais et al., 2013). Céljuk a növényzet, a talaj és a légkör közti energia- és anyagáramok modellezése az éghajlati körülmények, a talajminőség, a tápanyag- és vízellátottság alapján.

Egyes modellek a természetes vegetációra specializálódtak, mások a mezőgazdasági vagy erdészeti területekre.

A biogeokémiai modellek felhasználhatók a környezeti hatásoknak (pl. éghajlatváltozás) a növényzet fejlődésére és az ehhez kapcsolódó folyamatokra (pl. talaj széntartalmának változása, vízmérleg) gyakorolt hatásának szimulálására, de alkalmasak a lehetséges természetes vegetáció szimulálására is (pl. a múltbeli növénytakaró rekonstruálása, jelenlegi antropogén hatások kiszűrése).

A korszerű biogeokémiai modellek szimulálják a 2.1. fejezetben bemutatott anyagáramokat, és tipikusan órás vagy napi időlépcsőt használnak. A korszerűbb modellek képesek a nitrogén-ciklus figyelembevételére is, illetve adott esetben egyéb limitáló tápanyagok mérlegét is magukban foglalhatják (pl. foszfor, kálium).

Jelenleg a korszerűbb modellek képesek leírni az emberi beavatkozás (erdőgazdálkodás, gyepek legeltetése, kaszálása, mezőgazdasági technikák) hatását is a szén- illetve vízmérleg vonatkozásában. A modellek alkalmazhatók egy adott földrajzi

hely folyamatainak leírására, de általában kontinentális vagy globális skálán is használhatóak.

3. Szakirodalmi áttekintés

Az elmúlt években több olyan tanulmány is született, amelyben a meteorológiai adatok jelentőségét vizsgálták az ökológiai modellezés vonatkozásában. Az alábbiakban néhány ilyen tanulmányt ismertetünk.

Fodor és Kovács (2004) egy mezőgazdasági modell meteorológiai adatokra való érzékenységét vizsgálta. A mezőgazdasági modellek legfőbb célja a terméshozam és a produkció becslése. *Fodor és Kovács* (2004) munkájukhoz a 4M nevű mezőgazdasági modellt használták és az 1968-1987 közötti 20 éves időszakot vizsgálták. A szimulált mennyiségek a terméshozam és a biomassa voltak. A referencia meteorológiai adatsor egy Budapesthez közeli meteorológiai állomásról származott, amiről feltették, hogy nincsen benne mérési hiba. Ezen kívül 26 darab adatsort állítottak össze úgy, hogy a referencia adatsor komponenseit bizonyos mesterségesen generált hibával módosították. A módosított adatsorokkal szimulált eredményeket a referencia futás eredményeivel hasonlították össze. A vizsgálat során azt találták, hogy a szimulált terméshozam érzékenyebb volt a meteorológiai paraméterek hibáira, mint a biomassa. Emellett a szimulált terméshozam jelentősen pontatlanabb volt az alacsony terméshozamú években, mint a magas terméshozamúakban. A kutatók rámutattak, hogy voltak olyan évek, amikor a számolt terméshozam hibáinak átlaga 10% körüli volt és volt olyan hibakombináció is, amely 20%-os hibát okozott a terméshozamban a referencia adatsorhoz képest. A 20 éves átlagos eltérést tekintve volt olyan hibakombináció, amely több mint 10%-os hibát okozott a modellszámításban. Ezek olyan kombinációk voltak, amelyekben a globálsugárzást felül-, míg a hőmérsékletet és a csapadékot alulbecsülték. A globálsugárzás és a csapadék egyidejű alul- vagy felülbecslése ezzel szemben kis hibát okozott a modellszámításokban.

Hicke (2005) a CASA biogeokémiai modell kapcsán vizsgálta a különböző globálsugárzás adatsorok hatását a szimulált NPP vonatkozásában. A vizsgált globálsugárzás adatsorok két forrásból, a **National Centers for Environmental Prediction (NCEP)** reanalízis adatbázisból, és a **Goddard Institute for Space Studies (GISS)** adatbázisból származtak. A szerző felszíni mérések alapján azt találta, hogy a GISS adatbázis pontosabban becsüli a felszíni globálsugárzást. Bár az NPP globális átlaga közel azonos volt a két adatsor alapján, regionálisan nagyobb eltérés volt tapasztalható a két globálsugárzás adatsorral kapott NPP értékek közt. A relatív eltérés a

két adatsor közt bizonyos földrajzi helyeken elérte az 5-30%-ot is. Az NPP időbeli változásában is okozott különbséget a két eltérő adatsor használata.

Zhao et al. (2006) a **The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)** meteorológiai adatsorokra való érzékenységet vizsgálta. A MODIS a NASA műholdjairól ellenőrzi a földi bioszférát. A MODIS információit felhasználva becsülhetők a globális GPP heti és éves összegei 1 km-es felbontásban. Ehhez a becsüléshez szükség van napi meteorológiai adatokra. A kutatók három reanalízis adatbázis eredményeit hasonlították össze a GPP és az NPP becsülésének meteorológiai adatsorokra való érzékenységének vizsgálata érdekében. Ezek az adatbázisok a következők voltak: **NASA Data Assimilation Office (DAO)**, **ECMWF (ERA-40)** és **National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR)**. Ezen adatbázisok esetén a globális GPP és NPP MODIS-eredményei jelentős különbséget mutattak (>20 PgC/év). Az NCEP adta a legmagasabb becslést, az ECMWF pedig a legalacsonyabbat, a DAO eredményei e két érték között voltak. Regionálisan vizsgálva a GPP és az NPP értékeit a legnagyobb eltérés a három adatsor között a trópusi területeken fordult elő.

Jung et al. (2007) a GPP modellezésének bizonytalanságait vizsgálta Európa területén. Először három különböző bioszféra modellt, a **Biome-BGC-t**, az **LPJ-t (Lund-Potsdam-Jena Dynamic Global Model)** és az **ORCHIDEE-t (Organizing Carbon and Hydrology In Dynamic Ecosystems)** futtatták úgy, hogy a bemenő adatokat nem változtatták. Ezután egy modellt futtattak (Biome-BGC) két különböző meteorológiai adatsorral, az **ECMWF-el (European Centre for Medium-Range Weather Forecast)** és a **REMO-val (Regional Model)**, három különböző felszínborítottság adatbázissal, a **GLC2000-rel (Global Land Cover)**, **MODIS-szal (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)** és a **SYNMAP-pal (Synergetic Land Cover Product)**, továbbá a felszínborítottság három különböző térbeli felbontásával. A munkához meghatároztak egy referencia futást és ehhez hasonlították a többi szimulációt. Az adatok módosítása során egyszerre csak egy komponensen változtattak, vagyis vagy csak a modellt, vagy csak a meteorológiai adatsort, vagy csak a felszínborítottság adatokat, vagy csak a térbeli felbontást változtatták meg. A kutatás eredménye szerint a meghajtó meteorológiai paraméterek változása jóval nagyobb mértékben befolyásolta a szimuláció eredményét, mint a felszínborítottság vagy a térbeli felbontás. Az Európa egész területére számolt teljes GPP az ECMWF adatsorának felhasználásával 20%-kal magasabb volt, mint a REMO adatsorával készült szimuláció esetén. A meteorológiai

adatsor változása elsősorban a számolt GPP éves menetében okozott eltéréseket, ennek oka feltehetően az, hogy az ECMWF és a REMO adatsor sugárzási adatai között csak gyenge korreláció figyelhető meg majdnem egész Európára vonatkozóan.

Jin et al. (2015) a **V**egetation **P**hotosynthesis **M**odel (VPM) GPP szimulációjának meteorológiai adatokra való érzékenységét vizsgálták. A meteorológiai adatok a **N**orth **A**merica **R**egional **R**eanalysis (NARR) adatbázisból származtak. Először az adatbázisban szereplő hőmérséklet- és globálisugárzási adatok pontosságát becsülték, úgy, hogy az adatsort 37 állomás méréseivel hasonlították össze. Ezután hét, a szénforgalmat mérő helyszínre a VPM futtatásával becsülték a GPP értékeit 8 napos időintervallumban, majd a szimulált GPP értékeket a helyszínen mért értékekkel hasonlították össze. Az eredmények rámutattak, hogy a NARR adatbázisból származó hőmérsékletadatok összhangban álltak a mérési adatokkal, a globálisugárzás adatok azonban pozitív szisztematikus hibával terhelt értékeket vettek föl (a szisztematikus hiba mérőszámra részletesen a 4.4. fejezetben térünk ki). Emiatt egy korrekciót alkalmaztak, ami jelentősen csökkentette a sugárzási adatok relatív hibáját. A mért, az adatbázisbeli, és a korrigált adatbázisbeli meteorológiai adatok felhasználásával szimulált GPP jól követte a mért GPP menetét, bár különböző mértékben szisztematikus hibával terheltek voltak.

Mekonnen et al. (2016) cikkükben a szimulált NEP meteorológiai- és talajadatokra vonatkozó érzékenységét vizsgálták, melyhez az EcoSys ökoszisztéma modellt használták. A modellt hat különböző éghajlatú észak-amerikai helyszínre futtatták két olyan évre, amelyek időjárása valamelyik meteorológiai változó szempontjából számottevő eltérést mutatott. Ezen helyszínek mindegyikén elérhetők voltak meteorológiai és NEP mérések. Ezen kívül két rácsponti adatbázis, a NARR meteorológiai és az UNASM (Unified North America Soil Map) talajadatait használták fel. Minden helyszínre négyféleképpen futtatták a modellt. Az első futás során – amit s-szimulációnak neveztek - a mérésekből származó meteorológiai- és talajadatokat használták, a második futásnál (r-szimuláció) mért meteorológiai és az UNASM adatbázisbeli talajadatokat használtak, a harmadiknál (n-szimuláció) a talajadatokat származtak mérésekből, a meteorológiai adatok a NARR adatbázisból. A negyedik futás (p-szimuláció) során mind a meteorológiai, mind a talajadatokat a NARR, illetve az UNASM adatbázisból származtak. A vizsgálat során az egyes helyszínekre vonatkozó szimulációk eredményeit hasonlították össze a helyszínen mért NEP értékekkel.

Az eredmények szerint az első helyszínen a négyféle szimuláció eredményei egymáshoz közel voltak és a mérési értékekkel is jól korreláltak ($R > 0,8$) mind a hűvösebb, mind a melegebb időjárású vizsgált évben. A második helyen szintén egy hűvösebb és egy melegebb év NEP értékeit hasonlították össze. A p-szimulációval modellezett NEP értékek közelebb voltak a mért értékekhez, mint az n-szimuláció NEP értékei. A harmadik helyen egy jelentős észak-amerikai aszály első és harmadik évében vizsgálták a NEP értékeit. A NARR vagy az UNASM adatbázisbeli adatok felhasználása esetén a modellezett NEP érték messzebb volt mért értéktől, mint amikor mérési adatokat használtak a modellezéshez. Az s-szimuláció esetén a korrelációs együttható mindkét évben magasabb volt, mint n- és a p-szimuláció esetén. A negyedik helyszínen ugyanazon aszály első és második évét hasonlították össze a NEP értékének alakulása szempontjából. Az n- és s-szimuláció között alacsonyabb volt a korreláció, mint a p- és s-szimuláció között. Ez mutatja, hogy a NARR-beli és a mért meteorológiai adatok különbsége jobban befolyásolta a modellezett NEP értékeit, mint az UNASM-beli és a mért talajadatok különbsége. Az ötödik helyen egy hűvösebb és egy melegebb évet hasonlították össze. Itt az s- és n-szimuláció eredményei mindkét évben közelebb voltak a mért NEP értékekhez, mint a p- és az r-szimuláció eredményei, vagyis itt UNASM input volt leginkább felelős a NEP értékek közti különbségekért. A hatodik helyszín egy kukoricaföld volt, itt ugyanarra az évre végezték el a szimulációt először az öntözés figyelembevételével, majd anélkül. Az eredmények rámutattak, hogy az n-szimulációból származó NEP értékek közelebb voltak a mért értékekhez, mint a p-szimulációból származó értékek, vagyis a különbségek elsősorban az UNASM bemenő adatoknak tulajdoníthatók.

A tanulmányok mutatják, hogy a meteorológiai adatok megválasztása jellemzően nagy hatással van a szimulációk eredményeire.

4. Felhasznált adatok és módszerek

Munkám során a Biome-BGC MuSo modellt használtam (3.0.8-as verzió). Az alábbiakban bemutatom a modell elődjét, a közismert Biome-BGC modellt, majd a Biome-BGC MuSo modell újdonságait. Ezután bemutatom a felhasznált adatokat.

4.1. A Biome-BGC modell

A Biome-BGC (a „biome” angol szó ökológiai szempontból hasonló életközösségeket jelent, míg a BGC a „BioGeochemical Cycles”, vagyis a „biogeokémiai folyamatok” rövidítése) egy széles körben használt biogeokémiai modell, amely különféle ökológiai rendszerek szén-, nitrogén-, és vízfluxusait (illetve ezen anyagok tározását is) szimulálja. Bár a modell nitrogén- és vízforgalmat is explicit kezel, elsősorban mégis az ökológiai rendszer szénforgalmára jellemző mennyiségek számítására használják (*Thornton, 2000; Hidy et al., 2006*). A modellt az egyesült államokbeli Montanai Egyetem kutatói fejlesztették ki az 1990-es évek elején.

A modellnek két futási fázisa van. Az első az úgynevezett spinup mód, amely akkor használatos, ha a modell használatához szükséges kezdeti feltételek értékeiről a vizsgált területre vonatkozóan nem állnak rendelkezésre megfelelő adatok (*Thornton, 2000; Hidy et al., 2006*). A spinup futás során a modell a már ismert adatok és hosszú távú meteorológiai adatsor felhasználásával szimulálja a hiányzó környezeti és növényélettani paraméterek egyensúlyi értékeit (elsősorban a talajban tárolt szén és nitrogén mennyiségét). Az ily módon generált szén- és nitrogén-összetételre vonatkozó adatokat a második, úgynevezett normál futási fázis használja fel az ökoszisztéma modellezéséhez. A spinup mód használata a munkám során elkerülhetetlen volt.

A modell futtatásához három bemenő fájlra van szükség, amelyek a következők: modellbeállításokat megadó fájl (INI fájl), az ökofiziológiai paramétereket tartalmazó fájl (EPC fájl) és a meteorológiai adatfájl (*Thornton, 2000*).

A kezdeti értékeket megadó fájl általános információt ad a szimulációról, tartalmazza a szimulált terület fizikai jellemzőit, a szimuláció időkeretét, az egyéb szükséges bemenő fájlok neveit, a kimenő fájlok neveit és a bennük tárolandó változók listáját.

Az EPC fájl a terület vegetációjának ökofiziológiai leírását tartalmazza. Ez a fájl írja le az adott ökológiai rendszer növényi tulajdonságait, és alapvető módon befolyásolja az eredményeket.

A meteorológiai adatfájl a hőmérséklet (napi minimum, napi maximum és nappali átlag), a csapadékmennyiség, a nappali vízgőztelítettség hiány (VPD), a nappali globálisugárzás (GR) és a nappalok hosszának (napkeltétől napnyugtáig) napi értékeit tartalmazza a szimulált területre vonatkozóan. A meteorológiai adatfájlok összeállíthatók mérésekből, ha az összes szükséges paraméterről rendelkezésre állnak mért adatok az adott területről. Ha azonban csak a hőmérsékletről és a csapadékról vannak méréseink, akkor a meteorológiai adatfájlt az MT-CLIM nevű program segítségével hozhatjuk létre, amely napi minimum- és maximum hőmérséklet, illetve csapadékadatokból generálja a meteorológiai adatfájllhoz szükséges további adatokat. Az MT-CLIM kimeneti fájlja éppen megfelel a Biome-BGC bemenő fájljának. Az MT-CLIM tekinthető a Biome-BGC preprocesszorának is, mivel a modell használói nagyban támaszkodnak a szimulált meteorológiai adatsorokra. Ez természetesen azt jelenti, hogy pl. a fotoszintézis szempontjából meghatározó globálisugárzás valójában modellezett érték lesz, ami bizonytalanságot jelent az eredmények szempontjából.

4.1.1. A Biome-BGC MuSo modell

Az elmúlt években számos kutató használta és módosította az eredeti Biome-BGC modellt (*Churkina et al.*, 2003; *Vetter et al.*, 2008; *Trusilova et al.*, 2009). Hazai kutatók a modellt azzal a céllal fejlesztették tovább, hogy alkalmas legyen a művelés alatt álló növények szén- és vízháztartásának szimulálására is (*Hidy et al.*, 2012). A módosítások a modell strukturális fejlesztését jelentették: az elavult egyrétegű talajmodult leváltotta egy többretegű talajmodul, a hosszú ideig fennálló szárazság miatti növényi irreverzibilis elszáradást is beépítették a modellbe, valamint fejlesztették a modell fenológiát. Emellett az emberi beavatkozást is figyelembe vették (például kaszálás, legeltetés szimulálása). *Hidy et al.* (2012) publikációja után további modulokat dolgoztak ki a szántóföldi gazdálkodás éves változásának (szántás, vetés, betakarítás, trágyázás) szimulálására. Az erdőirtás, mint lehetséges emberi beavatkozás, valamint a dinamikus (évente változó) növényi pusztulás leírásának lehetősége is bekerült a modellbe, hogy a valósághoz közelebb álló szimulációt kapjunk az erdők fejlődéséről.

A legújabb modellváltozatban külön tározókat definiáltak a termény részére (elsősorban a szántóföldi szimulációk fejlesztése érdekében). Az így fejlesztett modell neve Biome-BGC MuSo, ahol a MuSo rövidítés a többrétegű talaj (**multilayer soil**) modulra utal.

Munkám során a Biome-BGC MuSo v3.0.8 verziójával dolgoztam, amely a MuSo v1.0, v1.1, v1.3, v2.0, v2.1, v2.2 és v3.0 verziók korszerűsített változata (*Hidy and Barcza*, 2014). A MuSo v3.0.8 további fejlesztéseket tartalmaz, a korábbi verziókban észlelt hibák kijavításra kerültek benne, valamint egy ellenőrzés is belekerült annak kiküszöbölésére, hogy az INI fájlban vagy a meteorológiai adatfájlban rögzített lehetetlen adatokkal fusson a modell.

4.1.2. BioVeL infrastruktúra, BBGCDB, BioVeL portal

Az eredeti Biome-BGC modell olyan beállításokat igényel, amelyek vezérlése igen bonyolult, ezért a felhasználóktól hosszú tanulási folyamatot követel meg. Ennek kiküszöbölésére, illetve a modell szélesebb körű alkalmazásának támogatására hazai kutatók egy webes felületet fejlesztettek ki (*Horváth et al.*, 2014). Ez a **Biome-BGC Projects Database and Management System** (BBGCDB; <http://ecos.okologia.mta.hu/bbgcdb>), amely egy webes adatbázis és adatkezelő felület. A BBGCDB a BioVeL (Biodiversity Virtual e-Laboratory; <http://www.biovel.eu>) projekt keretében jött létre a Magyar Tudományos Akadémia Ökológiai és Botanikai Kutatóintézetének és az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékének együttműködésének eredményeként. A BBGCDB a BioVeL portállal együtt használható (<http://portal.biovel.eu>), és a felhasználók a portálon keresztül irányítják és működtetik a kifejlesztett modelleket.

A modellszimuláció végrehajtása az ún. *workflow* (munkafolyamat) technológián alapul. A workflow technológia a komplex, elosztott számítások irányításának fontos eszköze (*Horváth et al.*, 2014). Ennek lényege, hogy dokumentumok, információk és feladatok cserélődnek ki a felhasználók között, így a modell elosztott erőforrások használatával működik (anélkül, hogy a felhasználó tudatában lenne a felhasznált infrastruktúra fizikai helyével). A workflow-k és az elosztott erőforrások használatának fő előnye, hogy a legtöbb számolási folyamat közvetve (nem a felhasználó számítógépén) megy végbe, így a szimuláció végrehajtásához elegendő egy webes

böngésző, és nem szükséges további szoftverek telepítése. Fontos szempont, hogy a workflow-k alapevle az analízisek egyszerű megismételhetősége és ellenőrizhetősége.

A Biome-BGC MuSo használata során elsőként a BBGCDB-n keresztül a modellszimuláció előkészítése történik, ahol a modell számára szükséges bemeneti fájlok kezelhetők. Ekkor történik a spinup és a normál futáshoz szükséges meteorológiai adatfájlok, illetve az ökofiziológiai paramétereket tartalmazó fájl feltöltése, valamint a spinup és a normál INI beállítások elkészítése. Ha az összes bemenő adat elkészült, a BioVeL portálon keresztül indítható a szimuláció. Közvetlenül a BBGCDB-n keresztül nincs lehetőség a modell futtatására, de a szimuláció eredményei ott jelennek meg, illetve onnan tölthetők le.

4.2. A szimuláció helyszínének bemutatása

Munkám során a meteorológiai adatokra való érzékenységet egy gyepfelszín szénmérlegének modellezése kapcsán mutatom be. A modellezett gyep kiválasztását segítette, hogy a Biome-BGC modell fejlesztése közben nagyban támaszkodtak a hegyhátsági mérőállomás adataira. Emiatt az alábbiakban röviden bemutatom a modellezés helyszínét, kitérve az ott folyó mérőprogramra.

A hegyhátsági mérőtorony Magyarország nyugati részén, Vas megyében található (é.sz. 46,95°, k.h. 16,65°) 248 m-es tengerszint feletti magasságban (<http://nimbus.elte.hu/hhs/>).

A mérések itt 1994 szeptemberében kezdődtek. Elsőként a légköri szén-dioxid keverési arányának profiljára vonatkozó mérések indultak meg, melynek keretében a torony négy szintjén (10, 48, 82 és 115 m-es felszín feletti magasságban) mérik a szén-dioxid keverési arányát, valamint a hőmérsékletet, a légnedvességet és a szélprofil. 1997-ben az NEE meghatározására új műszert telepítettek 82 m-es magasságba. Ez a műszer az ún. eddy-kovariancia mérés technikát alkalmazza. Az eddy-kovariancia technika lényege, hogy a felszín és a légkör közötti függőleges kicserélődés turbulens örvények segítségével zajlik, így vertikális szélsősebesség és a szén-dioxid-koncentráció nagy pontosságú mérésével származtatható az NEE (*Barcza et al., 2003; Pintér et al., 2007*). 1999-ben még egy ilyen mérőberendezést telepítettek a torony udvarára, 3 m-es magasságba. Ez a műszeregység a torony kertjében lévő gyep NEE-jét méri. 2001-ben

műszaki meghibásodás miatt a 3 m-es mérések abbamaradtak, majd 2006-ban újraindultak.

2001 óta repülőgépes méréseket is végeztek a torony fölött, amelynek célja a keverési arány vertikális mérésének a planetáris határreteg tetejéig való kiterjesztése. 2006-ban gáz kromatográfus mérések indultak meg a metán, a szén-monoxid, a széndioxid, a dinitrogén-oxid és a kén-hexafluorid légköri keverési arányának meghatározására. 2015-től a dinitrogén-oxid (N₂O) fluxusának mérésére alkalmas műszeregyüttessel gyarapodott az állomás.

4.3. Meteorológiai adatok forrása

A Biome-BGC MuSo modell használata során nem volt célunk a modell kalibrálása a mérési adatok alapján (ez már megtörtént korábban). Itt kizárólag az eredmények meteorológiai adatoktól való függését vizsgáljuk. A modellt a hegyhátsáli kaszált gyeper szénmérlegének szimulálására használtuk.

Munkám során hatszor futtattam a Biome-BGC MuSo modellt. Az összes futtatás a hegyhátsáli mérőhelyre, az 1997-2012 közötti 16 éves időintervallumra vonatkozott, de a szimulációkhoz különböző forrásokból származó meteorológiai adatsorokat használtam fel.

Mivel Hegyhátsálon nincsenek állandó, szabványos meteorológiai mérések, ezért az első, referenciaként használt meteorológiai adatsor alapadatai, vagyis a napi minimum- és maximumhőmérséklet, illetve csapadékmennyiség a közeli rábagyarmati meteorológiai állomás méréseiből származnak, kiegészítve a toronynál mért globálsugárzás és a vízgőztelítettség hiány értékeivel. Ez utóbbi adatok műszerhiba és más okok miatt bizonyos időszakokban nem állnak rendelkezésre. Ezen esetekben az MT-CLIM becslést használtam ezeken a napokon. Mivel ilyen időszak viszonylag kevés volt, ezért ezt az adatsort úgy tekintettük, mint a lehető legjobb, mérésen alapuló adatsor.

A második adatsor elkészítéséhez a referencia adatsorból a napi maximum- és minimumhőmérséklet, illetve csapadékösszegeken kívül minden egyéb mérési adatot töröltem, majd az MT-CLIM-mel számoltam ki azok értékeit. Ilyen értelemben ez az adatsor csak a globálsugárzás és a vízgőztelítettség hiány értékeiben tér el a referencia adatsortól, oly módon, hogy ezen adatok modellezett értékek.

A harmadik meteorológiai adatsor az ERA-Interim adatbázisból származik. Az ERA-Interim az ECMWF által létrehozott globális reanalízis adatbázis, amely 1979-től tartalmaz folyamatosan frissülő meteorológiai adatokat (*Dee et al., 2011*). A reanalízisek lényege, hogy a rendelkezésre álló mérések és a numerikus modellek előrejelzéseinek kombinálásával adnak számszerű leírást a közelmúlt éghajlatáról, egységes módszertan alapján. Meteorológiai adatsoromban a napi minimum- és maximumhőmérséklet, valamint csapadékmennyiség adatok a reanalízisből származnak, a globálsugárzás és a vízgőztelítettség hiány értékeit az MT-CLIM-mel számoltam ki.

A negyedik adatsorban a FORESEE rácsponti adatbázis meteorológiai adatait használtam. A FORESEE adatbázis (Open Database **F**or Climate Change-Related Impact Studies in Central **E**urope) egy nyilvános meteorológiai adatbázis, amely a klímaváltozáshoz kapcsolódó hatásvizsgálatok készítésének elősegítésére fejlesztettek ki hazai kutatók (*Dobor et al., 2015*). Az adatbázis az 1951-2100 közötti időszakot öleli fel és Közép-Európa területére vonatkozó megfigyelt, illetve regionális klímamodellek (**R**egional Climate **M**odel; RCM) segítségével szimulált, majd utólag hibakorrigált napi maximum- és minimumhőmérséklet-, valamint csapadékadatokat tartalmaz. A FORESEE 1951-től 2014-ig megfigyeléseken alapuló meteorológiai adatokat tartalmaz, 2015-től 2100-ig 10 különböző RCM eredményeit foglalja magában. Meteorológiai adatsoromban, ahogy az ERA-Interim esetében, itt is a napi minimum- és maximumhőmérséklet, valamint csapadékmennyiség adatok származnak az adatbázisból, és a globálsugárzás, illetve a vízgőztelítettség hiány értékeit az MT-CLIM-mel becsültem.

Az ötödik meteorológiai adatsor a CARPATCLIM adatbázis adataiból származik. A CARPATCLIM adatbázis egy nemzetközi együttműködés eredménye, amelynek célja a Kárpátok éghajlatának vizsgálata egységes módszerekkel, valamint tér- és időbeli felbontással (*Szalai et al., 2013*). Az ötödik adatsorban az MT-CLIM által számolt értékeket - ahol lehetett - hegyhátsági mérési adatokra cseréltük.

4.4. Modellezési stratégia

Munkám során elsőként a referencia adatsorral futattam a Biome-BGC MuSo modellt, majd a többi szimuláció eredményét a referencia futás eredményeivel hasonlítottam össze. A referencia futás természetesen nem a valóság, hanem csak egy modellszimuláció, ezért nem lehet "jónak" tekinteni. Azért tekintettük mégis ezt referenciának, mert arra voltunk kíváncsiak, hogy az adott modellstruktúra mellett az alternatív meteorológiai adatok használata milyen változást okoz az eredményekben. Ennek a változásnak a számszerűsítéséhez mindenképpen referenciára van szükségünk, ami a mi esetünkben az ideális meteorológiai adatokkal való munka. A munkában eltekintettünk a parametrizáció vagy a modellstruktúra bizonytalanságaitól.

A referencia és az alternatív futás eltérésének számszerűsítéséhez különböző statisztikákat használtam. Az alábbiakban ezeket a statisztikákat mutatom be röviden. A bemutatott mennyiségek hibastatisztikák, ami a mi esetünkben azt jelenti, hogy a nem ideális meteorológiai adatok használata milyen hibát okoz a referencia adatsorhoz képest.

Az R^2 a Pearson-féle *korrelációs együttható négyzete*, amely a megmagyarázott variancia mérőszámaként is értelmezhető. Ennek alakja:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (6)$$

ahol y_i és x_i a vizsgált, illetve a referencia adatsor i -edik tagja, \bar{y} és \bar{x} ezen adatsorok átlagai, n az adatsorok elemszáma. Az R^2 értéke arról ad információt, hogy milyen két adatsor összefüggősége. Értéke 0 és 1 között változhat, az adatsorok tökéletes egyezése esetén értéke 1.

A *szisztematikus hiba* (*bias*, ami *Mean Error*-ként is ismert) két adatsorbeli értékpárok különbségeinek átlaga:

$$bias = \frac{1}{n} \sum (y_i - x_i), \quad (7)$$

A bias $-\infty$ és $+\infty$ közötti értékeket vehet föl. Az adatsorok tökéletes egyezésekor 0-át vesz fel. A bias mérőszám gyengéje, hogy a vizsgált adatsorban az azonos nagyságú, de

ellentétes előjelű hibák kioltják egymást, így akár nagy hibák esetén is közel lehet 0-hoz a bias értéke, ha azok ellenkező előjelűek.

Ennek kiküszöbölésére használható az *átlagos abszolút hiba* (**Mean Absolute Error**; MAE), amely az abszolút értelemben vett eltérések átlagát adja meg:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |y_i - x_i|. \quad (8)$$

Ennek értéke 0-tól $+\infty$ -ig terjedhet, az adatsorok egyezése esetén értéke 0. Ezen mérőszám gyengéje, hogy az eltérés irányát nem veszi figyelembe.

Gyakran használt hibastatisztika az *átlagos négyzetes hiba négyzetgyöke* (**Root Mean Squared Error**, RMSE), amelynek alakja a következő:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_i - x_i)^2}. \quad (9)$$

Az RMSE szintén 0 és $+\infty$ közötti értékeket vehet föl és az adatsorok tökéletes egyezésekor 0-át vesz fel. Hátránya, hogy a négyzetre emelés miatt a MAE-nél sokkal érzékenyebb a nagy hibákra, illetve, hogy az eltérés irányát nem veszi figyelembe.

A meteorológiai adatokra való érzékenységet ezen hibastatisztikák segítségével számszerűsítjük kiemelve, hogy mindegyik hibastatisztika más jellegű információt szolgáltat.

5. Eredmények

A Biome-BGC MuSo modellel becsült változókat az 1. táblázat mutatja be. Ezeknek a változóknak a napi értékeit szimulálta a modell az 1997-2012 időszakra.

1. táblázat: A Biome-BGC MuSo modellel becsült változók.

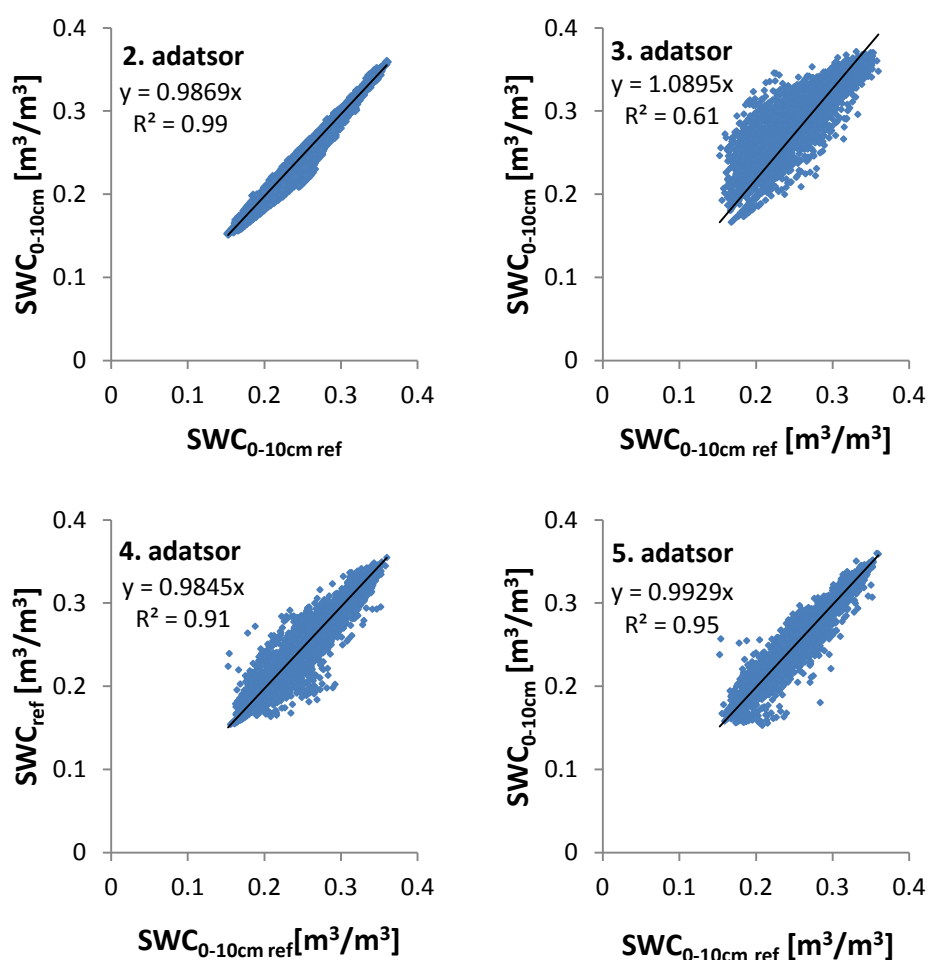
Megnevezés	Jelölés	Mértékegység
Talajnedvesség a 0-10 cm-es rétegben	SWC_{0-10cm}	m^3/m^3
Evapotranszpiráció	ET	$kgH_2O/m^2/nap$
Bruttó elsődleges termék	GPP	$gC/m^2/nap$
Nettó elsődleges termék	NPP	$gC/m^2/nap$
Teljes ökoszisztéma légzés	R_{eco}	$gC/m^2/nap$
Nettó ökoszisztéma szén-dioxid csere	NEE	$gC/m^2/nap$

5.1. A becsült változók érzékenysége a meteorológiai adatsor változására

A következőkben bemutatjuk, hogy a modell által becsült változók napi értékeit hogyan befolyásolta a meteorológiai adatok változása. Ennek keretében azt vizsgáljuk, hogy a különböző meteorológiai adatsorok esetén hogyan alakultak a különféle hibastatisztikák referencia adatsorhoz viszonyított értékei.

5.1.1. Talajnedvesség a 0-10 cm-es rétegben

A különböző meteorológiai adatforrásokkal kapott talajnedvesség becslésének a referencia futás eredményeivel való összevetését mutatja az 1. ábra. A becslés hibáit a 2. táblázat foglalja össze.



1. ábra: A 0-10 cm-es talajrétegbeli talajnedvesség becslésének összevetése a referencia futás eredményeivel a különböző meteorológiai adatsorok esetén

2. táblázat: Az SWC_{0-10cm} becslésének hibái a különböző meteorológiai adatsorok esetén

	2. adatsor	3. adatsor	4. adatsor	5. adatsor
BIAS [m ³ /m ³]	-0,0038	0,0277	-0,0039	-0,0019
MAE [m ³ /m ³]	0,0046	0,0287	0,0104	0,0069
RMSE [m ³ /m ³]	0,0067	0,0353	0,0145	0,0107
R ²	0,99	0,61	0,91	0,95

A szisztematikus hibát tekintve a CarpatClim adatbázisból származó meteorológiai adatsorral kapott talajnedvesség-adatok térnek el legkevésbé a referencia futás értékeitől. A harmadik adatsort (ERA-Interim) kiugróan magas bias érték jellemzi és míg a többi adatsor esetén alulbecslés, addig a harmadik esetén felülbecslés történt.

Az átlagos abszolút hiba szempontjából a második adatsor eredményei vannak a legközelebb a referencia futás eredményeihez. Itt szintén az ERA-Interim-ből származó adatsor teljesített a leggyengébben a talajnedvesség becslésében.

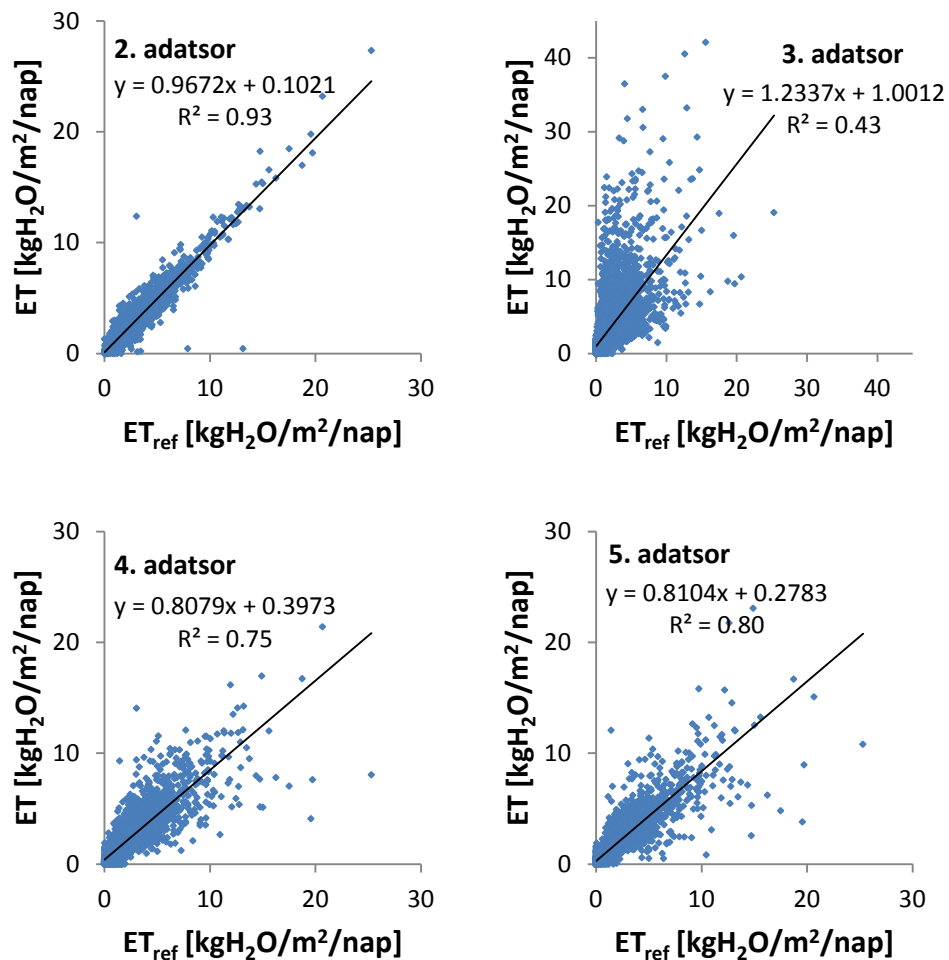
Az RMSE a talajnedvesség esetén szintén a második adatsorral történő futás esetén vette fel a legkisebb értéket. Az ERA-Interim adatsor esetén az RMSE is kiemelkedően magas értéket vett föl a többi adatsorhoz képest, több mint ötször annyi volt, mint a második meteorológiai adatsor esetén.

A harmadik meteorológiai adatsoron kívül mind a négy adatsor eredményei jól korreláltak a referencia futás eredményeivel ($R^2 > 0,9$), ezek közül is a legpontosabb illeszkedést a második adatsorral való futtatás érte el. Az R^2 értéke a harmadik adatsor esetén 0,6 volt.

A talajnedvességet tekintve tehát az összes vizsgált hibastatisztika esetén a harmadik, ERA-Interimből származó meteorológiai adatsor bizonyult a legkevésbé megbízhatónak, a legpontosabb pedig a legtöbb esetben a második adatsor volt.

5.1.2. Evapotranszpiráció

A különböző meteorológiai adatsorokkal történő futtatás során kapott evapotranszpiráció becslésének a referencia futás eredményeivel való összevetését mutatja a 2. ábra. A modelleredmények hibáit a 3. táblázat mutatja be.



2. ábra: Az evapotranszpiráció becslésének összevetése a referencia futás eredményeivel a különböző meteorológiai adatsorok esetén

3. táblázat: Az evapotranszpiráció becslésének hibái a különböző meteorológiai adatsorok esetén

	2. adatsor	3. adatsor	4. adatsor	5. adatsor
BIAS [kgH ₂ O/m ² /nap]	0,0413	1,4346	0,0409	-0,0734
MAE [kgH ₂ O/m ² /nap]	0,3033	1,7083	0,5473	0,3871
RMSE [kgH ₂ O/m ² /nap]	0,5338	3,2342	1,0111	0,9138
R ²	0,93	0,43	0,75	0,80

Szisztematikus hiba szempontjából az evapotranszspirációt a referencia adatsor eredményeihez viszonyítva a negyedik, FORESEE-ből származó adatsorral történő futtatás becsülte a legpontosabban, ehhez nagyon közeli értékű szisztematikus hibát okozott a második adatsorral történő futtatás is. A harmadik adatsorral történő modellszimuláció eredményeinek szisztematikus hibája itt is kiemelkedően magas, 25-ször magasabb, mint a többi futtatás szisztematikus hibájának abszolút értékének átlaga.

Az átlagos abszolút hiba szintén a második adatsor esetén vette fel a legkisebb értéket az evapotranszspiráció becslésekor. Az ötödik meteorológiai adatsor esetén is ehhez közeli értéket vett fel a MAE. A harmadik adatsor esetén értéke 6-szor akkora volt, mint a másodiknál.

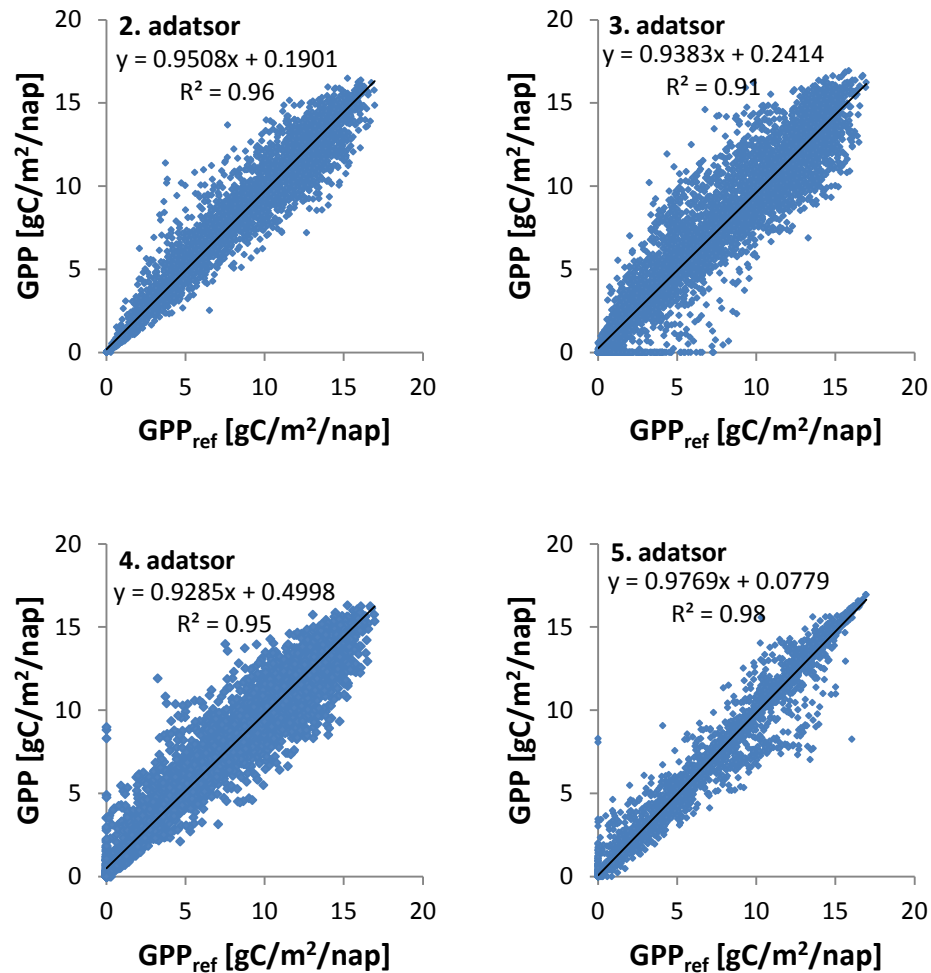
Az RMSE értéke szintén a második meteorológiai adatsor esetén volt a legkisebb a maga $0,5338 \text{ kgH}_2\text{O/m}^2/\text{nap}$ -os értékével. A harmadik adatsorral való futtatás során az RMSE kiugróan magas, $3,2342 \text{ kgH}_2\text{O/m}^2/\text{nap}$ értéket vett fel.

R^2 szempontjából is a második adatsorral történő szimuláció bizonyult a legpontosabbnak, 0,9 fölötti értékkel. A legkevésbé pontos eredmény a harmadik adatsor esetén született, 0,43-as értékkel.

Az evapotranszspiráció becslésében a legtöbb hibastatisztikát tekintve a második adatsor volt a legpontosabb. A legpontatlanabb szimulációt minden vizsgált statisztika szempontjából a harmadik adatsor okozta.

5.1.3. GPP

A GPP becslésének a referencia futás eredményeivel való összevetését mutatja a 3. ábra. A becslés hibáit a 4. táblázat foglalja össze.



3. ábra: A GPP becslésének összevetése a referencia futás eredményeivel a különböző meteorológiai adatsorok esetén

4. táblázat: A GPP becslésének hibái a különböző meteorológiai adatsorok esetén

	2. adatsor	3. adatsor	4. adatsor	5. adatsor
BIAS [gC/m ² /nap]	-0,1078	-0,1326	0,0663	-0,0620
MAE [gC/m ² /nap]	0,5543	1,0263	0,7523	0,3424
RMSE [gC/m ² /nap]	0,9793	1,5639	1,2074	0,7314
R ²	0,96	0,91	0,95	0,98

A szisztematikus hibát tekintve a CarpatClim-ből származó meteorológiai adatsor használatával volt a futtatás eredménye a legközelebb, az ERA-Interim-es adatsor használatával a legtávolabb a referencia futástól. Az eltérés irányát is figyelembe véve azonban a FORESEE adatbázisból származó meteorológiai adatsor az egyetlen, amelynek használata pozitív szisztematikus hibát eredményezett (felülbecslés).

A GPP becslésének átlagos abszolút hibája a CarpatClim-ből származó adatsor esetén vette fel a legkisebb, az ERA-Interim esetén a legnagyobb értéket, ami több mint a háromszorosa volt a CarpatClim adataival való szimuláció MAE értékének.

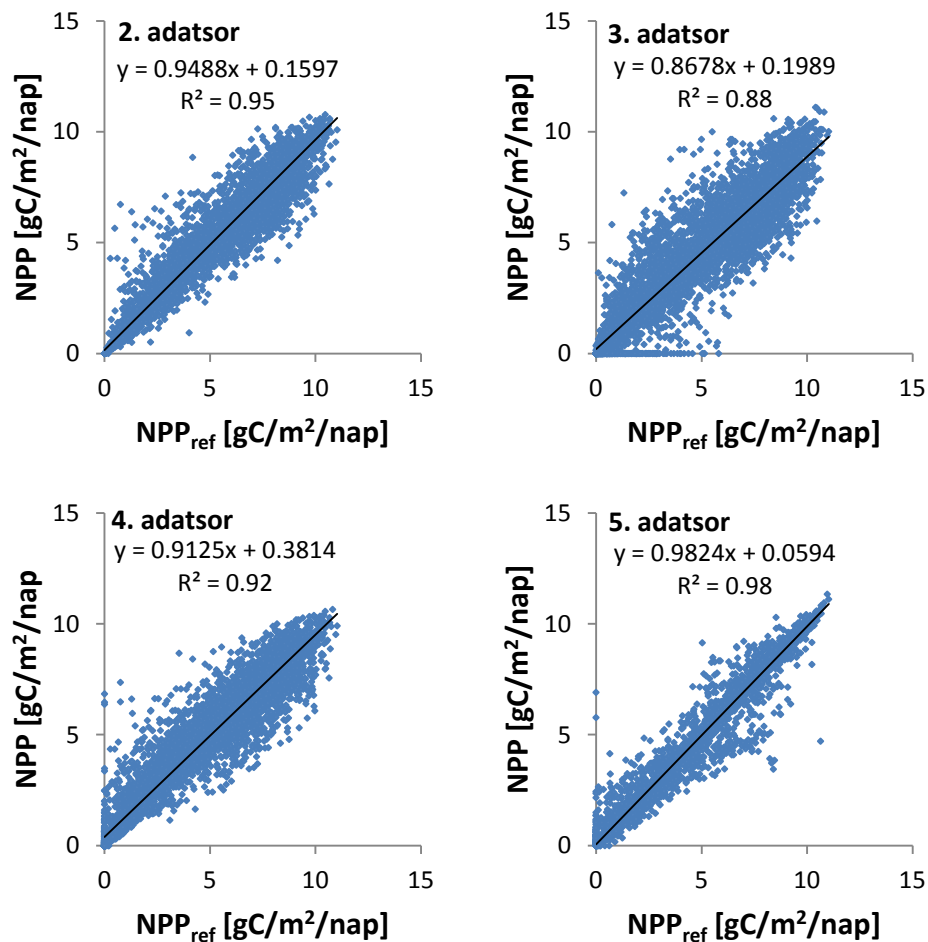
Az RMSE szintén a két CarpatClim-es adatsor esetén vette fel a legkisebb, az ERA-Interim esetén a legnagyobb értéket. Az ERA-Interim esetén körülbelül 2-szer akkora volt az értéke, mint a CarpatClim esetén.

A GPP becslése az R^2 -et tekintve a CarpatClim-ből származó meteorológiai adatsorok esetén volt a legközelebb a referencia futás eredményeihez. Bár legkevésbé az ERA-Interim-es futtatás eredményei korreláltak a referencia futás eredményeivel, azonban, az R^2 értéke még ebben az esetben is 0,9 fölött volt.

A GPP becslésében minden vizsgált hibastatisztika szempontjából a CarpatClim-ből származó meteorológiai adatsor futtatási eredményei voltak a legpontosabbak, az ERA-Interim-ből származó adatsorok eredményei a legpontatlanabbak a referencia futáshoz képest. A GPP becslésekor azonban kisebbek voltak a különbségek az egyes hibastatisztikák felvett értékei között a különböző meteorológiai adatsorok esetén, mint a talajnedvesség vagy az evapotranszpiráció becslésekor.

5.1.4. NPP

A különböző meteorológiai adatsorokkal történő futtatás során kapott NPP becslésének a referencia futás eredményeivel való összevetését mutatja a 4. ábra. A modelleredmények hibáit az 5. táblázat mutatja be.



4. ábra: Az NPP becslésének összevetése a referencia futás eredményeivel a különböző meteorológiai adatsorok esetén

5. táblázat: Az NPP becslésének hibái a különböző meteorológiai adatsorok esetén

	2. adatsor	3. adatsor	4. adatsor	5. adatsor
BIAS [gC/m ² /nap]	-0,0357	-0,3056	0,0476	-0,0078
MAE [gC/m ² /nap]	0,4137	0,7791	0,5568	0,2377
RMSE [gC/m ² /nap]	0,7384	1,1735	0,8981	0,5167
R ²	0,95	0,88	0,92	0,98

A szisztematikus hibát tekintve az NPP esetén a CarpatClim-ből származó meteorológiai adatsor futtatási eredményei voltak a legpontosabbak a referencia adatsor eredményeihez képest, az ERA-Interim-es adatsor eredményei pedig a legpontatlanabbak. Az eltérés irányát is figyelembe véve egyedül a FORESEE esetén történt felülbecslés, a többi adatsor eredménye alulbecsülte a referencia adatsor eredményeit.

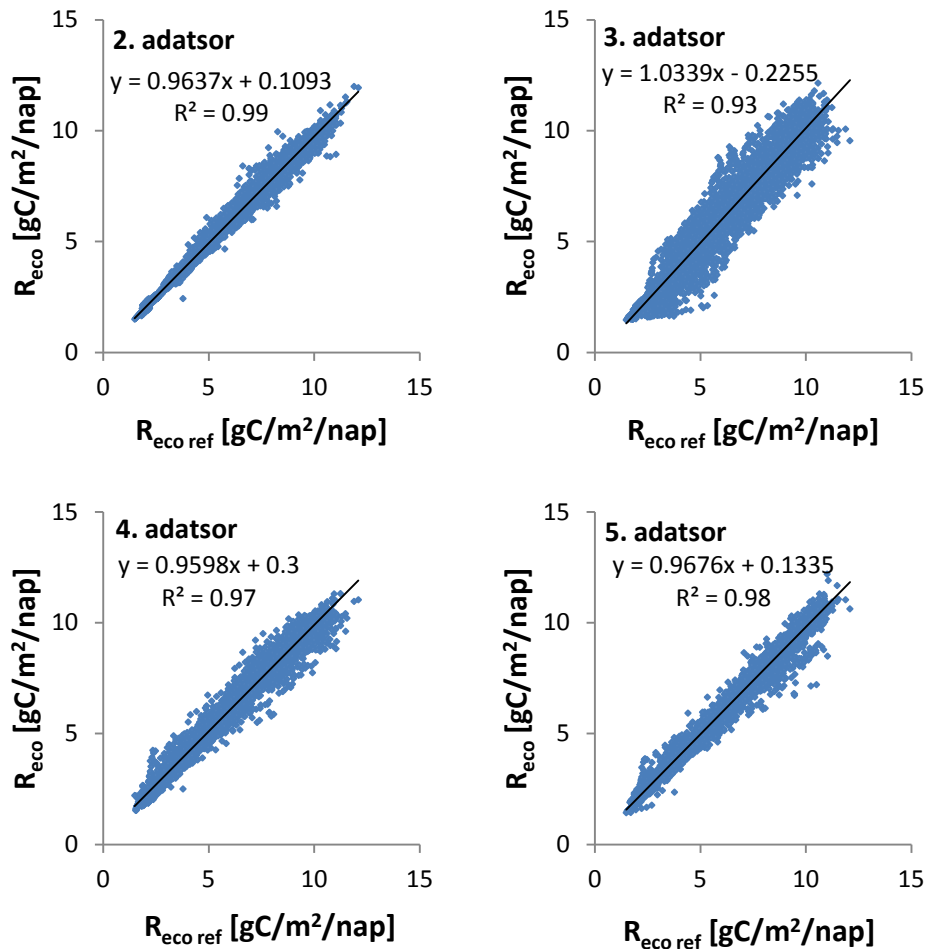
A CarpatClim adatbázisból származó meteorológiai adatsorral történő futtatás eredménye mind a MAE, mind az RMSE szempontjából a legpontosabbnak bizonyult a referencia adatsor eredményéhez képest, míg az ERA-Interim eredménye a legpontatlanabbnak.

A referencia adatsor eredményével a CarpatClim-ből származó adatsor eredménye korrelált a legjobban. A leggyengébb korreláció az ERA-Interim adatbázis használatával fordult elő, azonban megmagyarázott variancia értéke ebben az esetben is magas, 88% volt.

Az NPP-szimulációk eredményei minden vizsgált hibastatisztika esetén a CarpatClim adatbázisbeli adatok felhasználásával voltak a legközelebb, az ERA-Interim-ből származó meteorológiai adatok esetén a legtávolabb a referencia futás eredményeitől.

5.1.5. R_{eco}

Az R_{eco} becslésének a referencia futás eredményeivel való összevetését mutatja az 5. ábra. A becslés hibáit a 6. táblázat foglalja össze.



5. ábra: Az R_{eco} becslésének összevetése a referencia futás eredményeivel a különböző meteorológiai adatsorok esetén

6. táblázat: Az R_{eco} becslésének hibái a különböző meteorológiai adatsorok esetén

	2. adatsor	3. adatsor	4. adatsor	5. adatsor
BIAS [$\text{gC}/\text{m}^2/\text{nap}$]	-0,1048	-0,0259	0,0629	-0,0572
MAE [$\text{gC}/\text{m}^2/\text{nap}$]	0,1916	0,5618	0,2983	0,2213
RMSE [$\text{gC}/\text{m}^2/\text{nap}$]	0,2861	0,7374	0,4180	0,3465
R^2	0,99	0,93	0,97	0,98

Az R_{eco} szimulációja a szisztematikus hibát tekintve az ERA-Interim esetén volt a legközelebb a referencia futáshoz, a legtávolabb a második meteorológiai adatsor esetén. Az eltérés iránya a FORESEE adatbázis esetén eltér a többi adatbázistól, hiszen ugyanúgy mint a GPP és az NPP esetén, itt is felülbecsülte a referencia futás eredményeit, míg a többi adatsor esetén alulbecsülte.

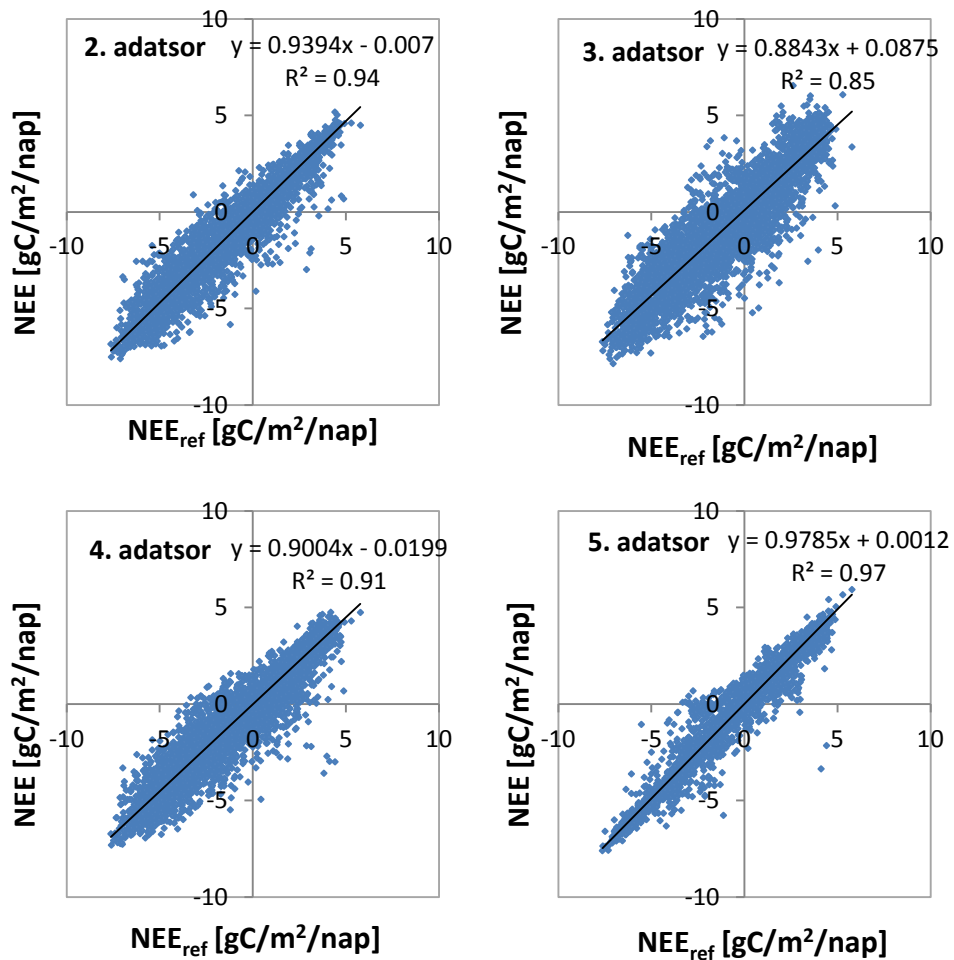
Az átlagos abszolút hiba és az RMSE szempontjából is a második adatsorral történő futtatás adta a legkisebb, az ERA-Interim-mel történő futtatás a legnagyobb értéket.

A R^2 értéke mind a négy alternatív adatsorral történő szimuláció esetén 0,93 fölött volt, a legkisebb egyezést az ERA-Interim adatsorral történő, a legnagyobb egyezést a második adatsorral történő futtatás okozza ($R^2=0,99$).

Az R_{eco} becslésében a legtöbb vizsgált hibastatisztika szempontjából a második meteorológiai adatsor futtatási eredményei voltak a legpontosabbak, az ERA-Interim-ből származó adatsor eredményei a legpontatlanabbak a referencia futáshoz képest. Érdeemes megjegyezni, hogy itt az egyik vizsgált hibastatisztika, a szisztematikus hiba szempontjából az ERA-Interim-es adatsor eredményei voltak a legpontosabbak.

5.1.6. NEE

A különböző meteorológiai adatforrásokkal kapott NEE becslésének a referencia futás eredményeivel való összevetését mutatja a 6. ábra. A becslés hibáit a 7. táblázat foglalja össze.



6. ábra: Az NEE becslésének összevetése a referencia futás eredményeivel a különböző meteorológiai adatsorok esetén

7. táblázat: Az NEE becslésének hibái a különböző meteorológiai adatsorok esetén

	2. adatsor	3. adatsor	4. adatsor	5. adatsor
BIAS [gC/m ² /nap]	0,0030	0,1068	-0,0034	0,0048
MAE [gC/m ² /nap]	0,4385	0,8135	0,5950	0,2842
RMSE [gC/m ² /nap]	0,7461	1,1556	0,9077	0,5159
R ²	0,94	0,85	0,91	0,97

A szisztematikus hiba szempontjából az NEE-t a referencia adatsor eredményeihez viszonyítva a második adatsorral történő futtatás becsülte a legpontosabban, abszolút értékét tekintve ehhez nagyon közeli értékű szisztematikus hibát okozott a FORESEE-ből származó adatsorral történő futtatás is. A harmadik adatsorral történő modellszimuláció eredményeinek szisztematikus hibája csaknem tízszer magasabb, mint a többi futtatás szisztematikus hibájának abszolút értékének átlaga. Az eltérés irányát tekintve a FORESEE-ből származó adatsor az egyetlen, amelyik alulbecsülte a referencia futás eredményeit.

Az átlagos abszolút hiba szintén és az RMSE is CarpatClim-ből származó adatsor esetén vette fel a legkisebb, az ERA-Interim-ből származó a legnagyobb értéket.

R^2 szempontjából is a CarpatClim-es adatsorral történő szimuláció bizonyult a legpontosabbnak, 0,97-es értékkel. A legkevésbé pontos eredmény a harmadik adatsor esetén született, azonban az megmagyarázott variancia értéke itt is 85% volt.

Az NEE becslésében a legtöbb hibastatisztikát tekintve a CarpatClim-es adatsor volt a legpontosabb. A legpontatlanabb szimulációt minden vizsgált statisztika szempontjából a harmadik adatsor okozta.

5.2. A hibák összevetése a mérés hibájával

A gyepek felett végzett hegyhátsági eddy-kovariancia mérések eredményei, valamint *Richardson et al.* (2006) módszere alapján rendelkezésre állnak a hegyhátsági mérések lehetséges véletlenszerű hibái (nem publikált adatok). A különböző meteorológiai adatok használatából fakadó hiba ezért összevethető a mérés véletlenszerű hibájával. Itt a különböző meteorológiai változóktól függő mérési hibák átlagát vetem össze az általam számolt MAE értékekkel.

A véletlenszerű hibára vonatkozó számítások alapján a mérési hiba értéke sok év átlagában GPP esetén $0,4 \text{ gC/m}^2/\text{nap}$, R_{eco} esetén $0,5 \text{ gC/m}^2/\text{nap}$, NEE esetén $0,6 \text{ gC/m}^2/\text{nap}$ körül alakul.

A GPP vonatkozásában a különböző meteorológiai adatsorok használatából eredő átlagos abszolút hiba három meteorológiai adatsor esetén is átlépte ezt az értéket: a 2. adatsor esetén kis mértékben, a FORESEE esetében pedig jócskán meghaladta a MAE a $0,4 \text{ gC/m}^2/\text{nap}$ értéket, az ERA-Interim esetén pedig az általam számolt MAE értéke a mérési hibának több mint kétszerese volt.

Az R_{eco} esetén a különböző meteorológiai adatsorok használatából eredő MAE csak az ERA-Interim használatával lépte túl a mérési hiba értékét, és akkor is csupán $0,06 \text{ gC/m}^2/\text{nap}$ értékkel.

NEE vonatkozásában az általam számolt MAE értékek közül egyedül az ERA-Interim adatbázissal történő modellfuttatásból származó MAE haladta meg egyértelműen a mérési hiba értékét, hiszen értéke $0,81 \text{ gC/m}^2/\text{nap}$ volt, de a FORESEE esetén is megközelítette ezt az értéket a MAE ($0,59 \text{ gC/m}^2/\text{nap}$).

Tehát ezt a három változót tekintve az ERA-Interim-ből származó meteorológiai adatsor esetén a modellfuttatás eredményének átlagos abszolút hibája mindig a mérési hiba fölött volt. Emellett a GPP és az NEE a FORESEE adatbázis adataival is megközelítették vagy túllépték a szimuláció MAE értékei a mérési hibákat. Az eredmények rámutatnak arra, hogy a meteorológiai adatsor nem megfelelő megválasztása a mérési hibánál nagyobb bizonytalanságot eredményezhet, ami a modelleredményeket használó kutató számára téves információt nyújthat a mérési adatokkal való összevetés esetén.

6. Összefoglalás

Szaktervezetomban a Biome-BGC MuSo biogeokémiai modell futtatása során fellépő, a meteorológiai változók becsléséből származó bizonytalanságokat vizsgáltam.

A talaj-növény-légkör rendszer szénforgalmához és a biogeokémiai modellezéshez kapcsolódó alapfogalmak tisztázása, valamint a szakirodalmi áttekintés után bemutattam a felhasznált biogeokémiai modellt, a Biome-BGC MuSo-t és a helyszínt, amelyre a vizsgálatokat végeztem. Ezután a modellezés bizonytalanságainak számszerűsítése következett.

A munkám alapján megállapítható, hogy a Biome-BGC MuSo modellt nem célszerű az ERA-Interim adatbázis adataival futtatni, hiszen az R_{eco} -szimuláció szisztematikus hibájának kivételével az összes vizsgált modelleredmény és hibastatisztika esetén az ERA-Interim-ből származó meteorológiai adatsorral történő futtatás bizonyult a legpontatlanabbnak. A 0-10 cm-es talajrétegbeli talajnedvesség, az evapotranszpiráció és a teljes ökoszisztéma légzés szimulálásában a legpontosabb eredményt az az adatsor adta, amelyben helyi méréseket használtunk úgy, hogy a hiányzó meteorológiai adatokat az MT-CLIM modellel becsültük. A GPP, NPP és NEE legpontosabb szimulációját a CarpatClim adatbázis adatainak használatával értük el.

Manapság egyre több meteorológiai adatokat tartalmazó adatbázis áll a kutatók rendelkezésére. Éppen ezért rendkívül fontos annak meghatározása, hogy egy adott kutatás szempontjából melyik meteorológiai adatbázis használatával kapjuk a legpontosabb eredményt.

A jövőben célravezető lenne a modellek meteorológiai meghajtókra való érzékenységének vizsgálatát más meteorológiai adatbázisok és modellek esetére is kiterjeszteni.

7. Köszönetnyilvánítás

A dolgozat keretében végzett kutatásokat az OTKA K104816 számú projekt támogatta.

Köszönöm témavezetőmnek, dr. habil. Barcza Zoltánnak, hogy áldozatos munkájával segítette szakdolgozatom elkészítését. Köszönöm a felém irányuló bizalmat, a sok szakmai segítséget, türelmet és biztatást.

Köszönöm családomnak és barátaimnak, hogy támogattak szakdolgozatom megírásában.

8. Irodalomjegyzék

- Barcza, Z., Haszpra, L., Kondo, H., Saigusa, N., Yamamoto, S., Bartholy, J., 2003: Carbon exchange of grass in Hungary. *Tellus*, 55B, 187–196.
- Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C., Le Quéré, C., Myneni, R.B., Piao S., Thornton, P., 2013. Carbon and other biogeochemical cycles. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 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
- Churkina, G., Tenhunen, J., Thornton, P., Falge, E.M., Elbers, J.A., Erhard, M., Grünwald, T., Kowalski, A.S., Rannik, Ü., Sprinz, D., 2003: Analyzing the ecosystem carbon dynamics of four European coniferous forests using a biogeochemistry model. *Ecosystems*, 6, 168-184.
- Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balsameda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hólm, E.V., Isaksen L., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N., Vitart, F., 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137, 553-597.
- Dobor, L., Barcza, Z., Hlásny, T., Havasi, Á., Horváth, F., Ittész, P., Bartholy, J., 2015: Bridging the gap between climate models and impact studies: the FORESEE Database. *Geoscience Data Journal*, 2, 1-11. doi:10.1002/gdj3.22
- Fodor, N., Kovács, G.J., 2004: Sensitivity of crop models to the inaccuracy of meteorological observations. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30, 53–57.
- Friedlingstein, P., Cox, P., Betts, R., Bopp, L., von Bloh, W., Brovkin, V., Cadule, P., Doney, S., Eby, M., Fung, I., Bala, G., John, J., Jones, C., Joos, F., Kato, T., Kawamiya, M., Knorr, W., Lindsay, K., Matthews, H.D., Raddatz, T., Rayner, P., Reick, C., Roeckner, E., Schnitzler, K.-G., Schnur, R., Strassmann, K., Weaver, A.J., Yoshikawa, C., Zeng, N., 2006: Climate-carbon cycle feedback analysis: results from the C⁴MIP model intercomparison. *Journal of Climate*, 19, 3337-3353.
- Hicke, J.A., 2005: NCEP and GISS solar radiation data sets available for ecosystem modeling: description, differences, and impacts on net primary production. *Global Biogeochemical Cycles*, 19, GB2006, doi:10.1029/2004GB002391.
- Hidy, D., Barcza, Z., Haszpra, L., Churkina, G., 2006: Gyepék szén-dioxid forgalmának modellezése. *Légkör*, 51, 33-36.
- 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, *Ecological Modelling*, 226, 99-119.
- Hidy, D., Barcza, Z., 2014: User's Guide for Biome-BGC MuSo v3.0. Available online: http://nimbus.elte.hu/bbgc/files/Manual_BBGC_MuSo_v3.0_FINAL.pdf

- 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: Ames, D.P., Quinn, N.W.T., Rizzoli, A.E. (Eds.), *Proceedings of the 7th International Congress on Environmental Modelling and Software*, June 15-19, San Diego, California, USA. <http://www.iemss.org/society/index.php/iemss-2014-proceedings> ISBN: 978-88-9035-744-2
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., Miller, H. L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Jin, C., Xiao, X., Wagle, P., Griffis, T., Dong, J., Wu, Ch., Qin, Y., Cook, D.R., 2015: Effects of in-situ and reanalysis climate data on estimation of cropland gross primary production using the Vegetation Photosynthesis Model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 213, 240–250.
- Jung, M., Vetter, M., Herold, M., Churkina, G., Reichstein, M., Zaehle, S., Ciais, P., Viovy, N., Bondeau, A., Chen, Y., Trusilova, K., Feser, F., Heimann, M., 2007: Uncertainties of modeling gross primary productivity over Europe: A systematic study on the effects of using different drivers and terrestrial biosphere models. *Global Biogeochemical Cycles*, 21, GB4021, doi:10.1029/2006GB002915, 2007
- Kertész, Sz., 2010: *CarboEurope modelladatok elemzése Magyarország területére. Diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (témavezető: dr. Barcza Zoltán). 53 pp.*
- Mekonnen, Z.A., Grant, R.F., Schwalm, C., 2016: Sensitivity of modeled NEP to climate forcing and soil at site and regional scales: Implications for upscaling ecosystem models. *Ecological Modelling*, 320, 241-257.
- Pintér, K., Nagy, Z., Barcza, Z., Balogh, J., Czóbel, Sz., Fóti, Sz., Weidinger, T., Tuba, Z., 2007: Az ökoszisztéma-léptékű fotoszintetikus CO₂-asszimiláció és légzés sajátosságai mérsékelt övi gyepekben. *Magyar Tudomány*, 168, 1280-1287.
- Richardson, A.D., Hollinger, D.Y., Burba, G.G., Davis, K.J., Flanagan, L.B., Katul, G.G., William Munger, J., Ricciuto, D.M., Stoy, P.C., Suyker, A.E., Verma, S.B., Wofsy, S.C., 2006. A multi-site analysis of random error in tower-based measurements of carbon and energy fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology* 136, 1–18. doi:10.1016/j.agrformet.2006.01.007
- 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. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 215, 1-19.
- Szalai, S., Auer, I., Hiebl, J., Milkovich, J., Radim, T., Stepanek, P., Zahradnicek, P., Bihari, Z., Lakatos, M., Szentimrey, T., Limanowka, D., Kilar, P., Cheval, S., Deak, Gy., Mihic, D., Antolovic, I., Mihajlovic, V., Nejedlik, P., Stastny, P., Mikulova, K., Nabyvanets, I., Skyryk, O., Krakovskaya, S., Vogt, J., Antofie, T., Spinoni, J., 2013: *Climate of the Greater Carpathian Region. Final Technical Report.* www.carpatclim-eu.org.
- Thornton, P. E., 2000: *User's Guide for Biome-BGC, Version 4.1.1.* Available online: ftp://daac.ornl.gov/data/model_archive/BIOME_BGC/biome_bgc_4.1.1/comp/bgc_users_guide_411.pdf
- Trusilova, K., Trembath, J., Churkina, G., 2009: Parameter estimation and validation of the terrestrial ecosystem model Biome-BGC using eddy-covariance flux measurements. *Max Planck Institute für Biogeochemie, Technical Reports*, 16, 1-60.
- Vetter, M., Churkina, G., Jung, M., Reichstein, M., Zaehle, S., Bondeau, A., Chen, Y., Ciais, P., Feser, F., Freibauer, A., Geyer, R., Jones, C., Papale, D., Tenhunen, J., Tomelleri, E., Trusilova, K., Viovy, N., and Heimann, M., 2008: Analyzing the causes and spatial pattern of the European 2003 carbon flux anomaly using seven models. *Biogeosciences*, 5, 561-583.

- Yi, C., Ricciuto, D., Li, R., Wolbeck, J., Xu, X., Nilsson, M., Aires, L., Albertson, J.D., Ammann, C., Arain, M.A., de Araujo, A.C., Aubinet, M., Aurela, M., Barcza, Z., Barr, A., Berbigier, P., Beringer, J., Bernhofer, C., Black, A.T., Bolstad, P.V., Bosveld, F.C., Broadmeadow, M.S.J., Buchmann, N., Burns, S.P., Cellier, P., Chen, J., Chen, J., Ciais, P., Clement, R., Cook, B.D., Curtis, P.S., Dail, D.B., Dellwik, E., Delpierre, N., Desai, A.R., Dore, S., Dragoni, D., Drake, B.G., Dufrene, E., Dunn, A., Elbers, J., Eugster, W., Falk, M., Feigenwinter, C., Flanagan, L.B., Foken, T., Frank, J., Fuhrer, J., Gianelle, D., Goldstein, A., Goulden, M., Granier, A., Grünwald, T., Gu, L., Guo, H., Hammerle, A., Han, S., Hanan, N.P., Haszpra, L., Heinesch, B., Helfter, C., Hendriks, D., Hutley, L.B., Ibrom, A., Jacobs, C., Johansson, T., Jongen, M., Katul, G., Kiely, G., Klumpp, K., Knohl, A., Kolb, T., Kutsch, W.L., Lafleu, P., Laurila, T., Leuning, R., Lindroth, A., Liu, H., Loubet, B., Manca, G., Marek, M., Margolis, H.A., Martin, T.A., Massman, W.J., Matamala, R., Matteucci, G., McCaughey, H., Merbold, L., Meyers, T., Migliavacca, M., Miglietta, F., Misson, L., Molder, M., Moncrieff, J., Monson, R.K., Montagnani, L., Montes-Helu, M., Moors, E., Moureaux, C., Mukelabai, M.M., Munger, J.W., Myklebust, M., Nagy, Z., Noormets, A., Oechel, W., Oren, R., Gpallardy, S., Tha Paw U, K., Pereira, J.S., Pilegaard, K., Pinter, K., Pio, C., Pita, G., Powell, T.L., Rambal, S., Randerson, J.T., Von Randow, C., Rebmann, C., Rinne, J., Rossi, F., Roulet, N., Ryel, R.J., Sagerfors, J., Saigusa, N., Sanz, M.J., Mugnozza, G.-S., Schmid, H.P., Seufert, G., Siqueira, M., Soussana, J.-F., Starr, G., Sutton, M.A., Tenhunen, J., Tuba, Z., Tuovinen, J.-P., Valentini, R., Vogel, C.S., Wang, J., Wang, S., Wang, W., Welp, L.R., Wen, X., Wharton, S., Wilkinson, M., Williams, C.A., Wohlfahrt, G., Yamamoto, S., Yu, G., Zampedri, R., Zhao, B., Zhao, X., 2010. Climate control of terrestrial carbon exchange across biomes and continents. *Environmental Research Letters* 5, 034007. doi: 10.1088/1748-9326/5/3/034007
- Zhao, M., Running, S.W., Nemani R.R., 2006: Sensitivity of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) terrestrial primary production to the accuracy of meteorological reanalyses. *Journal of Geophysical Research*, 111, G01002, doi:10.1029/2004JG000004.