



# **Agroökológiai rendszerek szén- és vízháztartásának modellezése**

Doktori (Ph.D.) értekezés tézisei

**HIDY DÓRA**

Gödöllő, 2010.

## A doktori iskola

**megnevezése:** Biológia Tudományi Doktori Iskola

**tudományága:** Biológiai tudomány

**vezetője:** PROF. DR. BAKONYI GÁBOR, DSC  
Intézetvezető egyetemi tanár  
SZIE, Mezőgazdaság- és Környezettudományi Kar  
Állattani Alapok Intézet

**A témavezetők:** DR. NAGY ZOLTÁN PHD  
Egyetemi docens  
SZIE, Mezőgazdaság- és Környezettudományi Kar  
Növénytani és Ökofiziológiai Intézet

DR. HASZPRA LÁSZLÓ PHD, DSC  
Vezető főtanácsos  
Országos Meteorológiai Szolgálat

DR. BARCZA ZOLTÁN PHD  
Adjunktus  
ELTE, Természettudományi Kar  
Meteorológiai Tanszék

-----  
Az iskolavezető jóváhagyása

-----  
A témavezetők jóváhagyása

## ELŐZMÉNYEK ÉS CÉLKITŰZÉSEK

Mára már bizonyossá vált, hogy az emberi tevékenység megváltoztatta a légkör összetételét s részben ennek eredményeképpen a Föld éghajlata is megváltozott (IPCC, 2007). Az energiatermelésnek, az iparnak, a mezőgazdaságnak és a közlekedésnek a légkör összetételére gyakorolt hatásai ma már egyértelműen jelentkezők, például az *üvegházhatású gázok* keverési arányának emelkedésében, valamint a légkörben jelenlévő változatos méretű és kémiai összetételű szilárd részecskék, az *aeroszol részecskék*, illetve a *szálló por* mennyiségének növekedésében. A légkör összetevőinek bármilyen irányú mennyiségi változása felboríthatja a Föld-légkör rendszer energia-eloszlását és globális hőmérsékletváltozást idézhet elő (FRIEDLINGSTEIN ET AL. 2005).

A keverési arányokat és a felmelegítési potenciálokat együttesen figyelembe véve megállapítható, hogy a szén-dioxid a legfontosabb antropogén üvegházhatású gáz (IPCC, 2007). A talaj-növény-légkör rendszer érzékeny szénmegkötő- és tároló: az éghajlat megváltozására (csapadék, hőmérséklet, besugárzás, stb.) a rendszer szénforgalma viszonylag gyorsan és jelentősen megváltozhat, ami az üvegházhatáson keresztül visszahat magára az éghajlatra. Amíg az elmúlt tízezer évben a bioszféra által leadott és felvett szén mennyisége kiegyenlített volt, addig az utóbbi két-három évtizedben a bioszféra nettó szénfelvevővé vált (CIAIS ET AL. 1995; VETTER ET AL. 2005). Ez mérsékli a növekvő antropogén szén-dioxid-kibocsátással együtt járó hőmérséklet-emelkedést, azaz az éghajlatváltozást. Nem tudjuk azonban egyelőre biztosan, hogy e labilis széntározó a hőmérséklet további emelkedésével nem válik-e nettó szénforrássá esetleg már a közeljövőben is. Amíg nem ismerjük a bioszféra viselkedését, addig nem tudjuk megbízhatóan előrejelezni a szén-dioxid (CO<sub>2</sub>) légköri keverési arányának változását, és ezen keresztül az éghajlatváltozást. Ehhez először az talaj-növény-légkör rendszer szintjén bekövetkező szénforgalom változás lehetséges okait kell meghatároznunk (CIAIS ET AL. 1995). A szénforgalom egyes alkotói azonban még nem ismertek kellő mértékben.

Az ökológia (környezettudomány) fontos feladata a talaj-növény-légkör rendszer fizikai, kémiai és biológiai folyamatainak minél részletesebb leírása, a fennálló kölcsönhatások, kapcsolatok számszerűsítése. Ehhez a mérések mellett a legmegfelelőbb eszközként a folyamatok matematikai leírásán alapuló számítógépes ökológiai modellek szolgálnak, melyek a bonyolult, valóságos rendszert elméletileg és szemléletileg leképezik. A széles körben alkalmazott ökológiai modellek a talaj-növény-légkör rendszer víz- és tápanyagforgalommal összefüggő folyamatait valószínűségi, illetve fizikai, kémiai, ökofiziológiai összefüggésekre épülő transzportegyenletekkel írják le, melyek adott kezdeti értékről induló megoldása adja a modellezett rendszer válaszát. A globális éghajlatváltozás várható hatásainak előrejelzése ösztönözte a modell-módszer fejlesztését a talaj-növény-légkör rendszer folyamatainak megismerése érdekében (RAJKAI ET AL. 2004).

A mezőgazdasági- és a gyepterületek – a nagy szénfelvevőként számon tartott erdők mellett – fontos szerepet játszanak bioszféra-légkör közötti szénforgalomban. A füves ökológiai rendszerek szén-dioxid cseréjéről, szén-megkötéséről viszonylag keveset tudunk, jóllehet szerepük a globális szénforgalomban jelentős (SOUSSANA ET AL. 2007). Az EU-25<sup>1</sup> területének körülbelül 17%-a (0,76·10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>-t) gyepterület, körülbelül 24%-a (1,08·10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>) mezőgazdasági terület.

---

<sup>1</sup> Ausztria, Belgium, Ciprus, Csehország, Dánia, Egyesült Királyság, Észtország, Finnország, Franciaország, Görögország, Hollandia, Írország, Lettország, Litvánia, Lengyelország, Luxemburg, Magyarország, Málta, Németország, Olaszország, Portugália, Szlovákia, Szlovénia, Spanyolország, Svédország

A legtöbb európai gyepterületet művelik, leginkább takarmányozási céllal: vagy közvetlenül legelőként, vagy kaszálóként hasznosítják. A művelés típusa, intenzitása, gyakorisága jelentősen befolyásolja az üvegházgázok forgalmát, azaz fontos szerepet játszik a gyepek, illetve a mezőgazdasági területek szén- és vízháztartásának alakulásában (CIAIS ET AL. 2009).

Számos nemzetközi kutatás irányult a szén-dioxid bioszférikus egyenlegének, forgalmának mérésére és modellezésére (FLUXNET, GreenGrass, Carbomont, CarboEurope-IP, ICOS). A globális klímaváltozás hatásainak vizsgálata hazánkban is fontos. A szántóföldi növénykultúrák területi kiterjedése hazánkban rendkívül nagy, az ország mezőgazdasági területének mintegy 77%-ra terjed ki (RAJKAI ET AL. 2004). Magyarország leíró éghajlati szempontból nagyobb részét a szemiarid<sup>2</sup>, illetve szubhumid<sup>3</sup> klímazónába sorolható. Az elhúzódó száraz időszakok okozta vízhiány már napjainkban is fontos korlátozó tényezője a növényi szénfelvételnek s ezen keresztül a növénytermesztésnek. Ez ösztönözte, hogy kutatásom témájaként az agroökológiai rendszerek szén- és vízháztartásának vizsgálatát válasszam.

Jelen dolgozatban a magyarországi agroökológiai rendszerek szén- és vízháztartásának modellezési lehetőségeit, a modellezés során felmerülő problémákat és azok megoldásait, a modellezés korlátait és előnyeit, illetve a modellek használatával elért eredményeket tárgyalom, illetve mutatom be. A modell-módszer lehetőséget nyújt az ökológiai rendszerek időbeli dinamikájának, a különböző hatásokkal szembeni érzékenységének vizsgálatára. Ez elengedhetetlen a különböző emberi tevékenységek hatására bekövetkezett, vagy várhatóan bekövetkező környezeti hatások feltérképezéséhez, előrejelzéséhez, befolyásolási lehetőségeinek megállapításához.

## A munka célkitűzései

A munkám célja a magyarországi agroökológiai rendszerek szén- és vízháztartásának (fotoszintézis, respiráció,  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  arány időbeli menete) megismerése, a környezeti viszonyok és a növényi szénforgalom közti kapcsolat sokoldalú feltérképezése volt az alábbi módszertani fejlesztések megvalósításával:

- a Montanai Egyetemen kifejlesztett folyamatorientált ökológiai modell, a Biome-BGC adaptációja,
- a természetközeli ökológiai rendszerekre specializált Biome-BGC modell továbbfejlesztése, a természetközeli és művelt területek szén- és vízháztartásának szimulációja,
- egy Bayes-beclsésen és lineáris regresszió alapuló kalibrációs program kifejlesztése az általam használt sokparaméteres számítógépes modellek kalibrálására és érzékenység-elemzésére,
- a CarbonISO modell kifejlesztése, mely órás szén- és vízgőzárám, illetve meteorológiai adatok felhasználásával számolja a légköri szén-dioxid  $^{13}\text{C}$  izotópjának relatív előfordulási arányát,
- három magyarországi, eltérő környezeti feltételekkel rendelkező gyepterületi mérőhely szén- és vízháztartásának vizsgálata a Biome-BGC és a CarbonISO modellekkel.

---

<sup>2</sup> a csapadék és a potenciális evapotranspiráció hányadosa a 0,2 és 0,5 közötti értéktartományba esik

<sup>3</sup> a csapadék és a potenciális evapotranspiráció hányadosa a 0,2 és 0,75 közötti értéktartományba esik

## ANYAG ÉS MÓDSZER

### Mérési helyek, mért adatok

A modellezési feladat két legfontosabb lépése a bemeneti adatbázis felépítése és a modellezett eredmény validálása. A validálás során a modell által szimulált adatokat összevetjük a vonatkozó mért adatokkal. Jelen kutatást a hegyhátsági, a bugaci és a szurdokpüspöki mérőállomások adatainak felhasználásával végeztem. Az állomások klimatikus viszonyai (átlaghőmérséklet, csapadékösszeg) eltérők, ezen kívül a helyspecifikus jellemzőkben is különböznek (talajtípus, főbb gyeptípus, művelési mód). A következőkben röviden bemutatom a három hazai mérőállomást, ahol örvény-kovariancia elven mérik az ökológiai rendszerek nettó szénkicserélődését (NEE), a látens hőáramot (LE), illetve becslik az ökológiai rendszer bruttó szénfelvételét (GPP), illetve teljes respirációját (TER).

Magyarországon, Hegyhátsálon 1997-ben telepítették az első örvény-kovariancia elven működő mérőrendszert, ami az ottani vegyes felszíntípus (mezőgazdasági terület és erdő) szén- és energiaháztartását méri. A mérések 82 méteres magasságban, óránként zajlanak. 1998-ban a 3 m-es felszín feletti magasságban is kiépült egy folyamatosan működő, örvény-kovariancia módszert alkalmazó mérőrendszer. A 3 m-es magasságban lévő rendszer a közvetlenül alatta elterülő, közel természetes gyepterület CO<sub>2</sub>-cseréjét méri. A gyepterület évente kétszer kaszálják és a levágott részt takarmánnyként hasznosítják (BARCZA ET AL. 2003). A hegyhátsági mérőhely ezen kívül a NOAA ESRL (National Oceanic and Atmospheric Administration Earth System Research Laboratory) levegőminta-gyűjtési hálózatába tartozik. A palackos mintavétel 96 méteres magasságban történik. A nagy mintavételi magasságnak köszönhetően a mérések nagy térbeli reprezentativitással rendelkeznek. Az állomás környékén a talaj típusa vályog mechanikai összetételű barna erdőtalaj, melynek homoktartalma 57%, az agyagtartalma 27%. A térségben a sokéves (1961-1990) átlaghőmérséklet 8,9 °C, a sokéves csapadékösszeg 750 mm.

A Bugaci mérőrendszert 2002 júliusában telepítették a Greengrass program keretében az Alföldre; azóta is folyamatosan működik. A 4 m-es magasságban lévő mérőtorony a Kiskunsági Nemzeti Parkban, Bugacpusztaháza település közelében található homokpusztagyepen helyezkedik el. A torony szomszédságában egy szürkemarha-telep található. A területen folyó alacsony intenzitású (extenzív) legeltetés körülbelül 20 éve folyamatos. Az állomás környezetében a talaj csernozjom típusú, homok mechanikai összetételű talaj, melynek átlagos homok tartalma 90% felett van, agyagtartalma 3%. A térségben a sokéves átlaghőmérséklet (1995 és 2004 között) 11°C, míg a sokéves csapadék összeg 550 mm (TUBA ET AL. 2004).

A harmadik mérőhely a Mátra hegységben, Szurdokpüspöki közelében található, itt a mérőtoronyt 2003-ban telepítették 3 m-es magasságban. A talajtípus jelentősen eltér az előzőktől: vulkanikus kőzetben található köves barna erdőtalaj, melynek az agyagtartalma az előző két állomásra jellemző értéknél jóval magasabb (46%). A környéken a sokéves átlaghőmérséklet 8°C, míg a sokéves csapadék összeg 650 mm (TUBA ET AL. 2004).

### A Biome-BGC modell leírása

A Biome-BGC többféle ökológiai rendszer működésének szimulálására alkalmas, kis térszkálájú modell. A modell hipotézisrendszerének fontos jellemzője, hogy a vizsgált terület

horizontális mérete nem korlátozott, de feltételezzük, hogy a szimulált ökológiai rendszer homogén. A modell csak vertikális irányban kezel anyagáramokat, így a számítások gyakorlatilag egydimenziósak (RUNNING ET AL. 1993).

A Biome-BGC szimulálja a három legfontosabb vegyület, a szén-, a nitrogén- és a víz áramlását, biogeokémiai ciklusát. A Biome-BGC modell három fő részre bontja az ökológiai rendszert: növény, talaj és elhalt növényi anyag. A gyepek esetében a növényi biomassa további két részre osztható: levélzet és finom gyökérszövet. A növényi szerveket (levélzet, szár, gyökér) a modell funkciójuk szerint három csoportba osztja: aktuális, transzfer és raktár tározó. A Biome-BGC szimulálja az ökológiai rendszer szén-, víz- és nitrogénforgalmát. A modell szerkezete tehát tározókból és az azok közötti áramokból áll, melyeket a meteorológiai és az ökofiziológiai bemeneti adatok felhasználásával a modell napi léptékben számít (RUNNING ET AL. 1987; RUNNING AND COUGHLAN, 1988).

A Biome-BGC modellnek két futási fázisa van. A spinup (ún. felfutási) módban a modell hosszú távú meteorológiai adatsorok felhasználásával szimulálja a modellezett ökológiai rendszer fejlődését, s generálja annak kezdeti nitrogén- és széntározóit. A generált kezdeti tározókat a második, ún. normál futási fázisban használja fel a modellezett ökológiai rendszer napi léptékű működésének modellezéséhez. A normál futási fázis során a modell az előre megadott évekre szimulálja a modellezett gyepek szén- és a vízháztartását jellemző legfontosabb paramétereit. A hiányzó bemeneti adatokat (vízgőztelítettségi hiány nappali átlagos értéke; VDP) részben a Biome-BGC bemeneti adatainak előkészítésére kifejlesztett időjárás-szimulátorral, az MTCLIM segítségével generáltam, részben a földrajzi tulajdonságok és éghajlati jellemzők ismeretében a havi adatokból virtuális napi adatokat generáló C2W időjárás-generátor felhasználásával állítottam elő (BÜRGER, 1997)

A Biome-BGC futtatásához három különböző típusú adatfájl kell megadni. A meteorológiai fájl az időjárási adatokat tartalmazza (nappali átlagos hőmérséklet, napi minimum és maximum hőmérséklet, nappali átlagos vízgőztelítettségi hiány, nappali rövidhullámú sugárzásösszeg, napi csapadékösszeg, a nappal hossza). A kezdetiértékfájl a modellfuttatás beállításait és a szimulált terület fizikai jellemzőit (földrajzi szélesség, tengerszint feletti magasság) tartalmazza. Az ökofiziológiai paraméter fájlban állíthatók be az életforma-változók (WHITE ET AL. 2000).

## Modellkalibráció

Az ökológiai kutatásban széles körben használnak folyamatorientált biogeokémiai modelleket. Ezeknek nagy előnye, hogy a vizsgált rendszer működését fizikai törvényeken alapuló matematikai egyenletekkel írják le. Hátrányuk, hogy nagy a használatukhoz szükséges paraméterek száma. Ezért egyre szélesebb körben terjed a nem vagy nehezen mérhető paraméterértékek meghatározását szolgáló kalibráció alkalmazása. Kalibrációval a kalibrálandó modellparaméterek értékén kívül esetenként paraméterek bizonytalansága, megbízhatósági intervalluma becsülhető (KENNEDY AND O'HAGAN ET AL. 2001).

A Bayes-féle kalibráció egy hatékony és egyre szélesebb körben terjedő módszer a kalibrálandó modellparaméterek értékeinek becsülésére. A módszer alapja, hogy a modell által számolt kimeneti adatokat a bemeneti adatok függvényének tekinti, a modell matematikai algoritmusát „fekete dobozként” kezeli. Azaz a modell kimeneti adatok vonatkozó mérésektől (referenciaadat) való eltérésére, illetve a hiba eloszlására fektet hangsúlyt (VAN OIJEN ET AL. 2005).

A Bayes-becslésen alapuló modellkalibráció során a modellparaméterekre vonatkozó *a priori* információt (a szakirodalomban fellelhető mért adatok közül a maximális, illetve a

minimális értékből származtatott paraméterérték-eloszlást) kombináljuk a modell kimeneti adatainak és a referenciaadatoknak az összehasonlításából származó ún. modellinformációval. A modellinformáció az adott paraméter-beállítással kapott modellszimuláció „jósága”. A „modelljóság” metrikájának megválasztása függ a kimeneti adat karakterisztikájától, illetve a probléma típusától. A két független forrásból származó információt kombinálva számolható a vizsgált paraméterek *a posteriori* eloszlása. Az *a posteriori* eloszlások maximumához tartozó paraméterértékeket optimálisak tekintjük. Az optimális paraméterértékek beállításával a modellszimuláció a lehető „legjobb” (HOLLINGER ÉS RICHARDSON, 2005).

Több paraméter együttes beállításához szükséges, hogy a paraméterek lehetséges értékeinek minél több kombinációját vizsgáljuk. A számításigény csökkentése érdekében véletlenszerűen változtatjuk az egyes paraméterek értékeit a hozzájuk tartozó, előre meghatározott intervallumon belül. Ehhez véletlen bolyongást definiálunk a paramétertérben. A módszer egyik legnagyobb előnye, hogy a kalibrálandó, azaz a véletlen számokkal módosított paraméterértékeket minden iterációs lépésben együtt változtatjuk, azaz egyetlen paraméterértéket sem tartunk állandó értéken. Így olyan likelihood értékeket fogadunk el, melyek az összes vizsgált paraméter szempontjából a legjobbnak bizonyultak. A modellinformáció olyan formában áll rendelkezésre, hogy minden vizsgált paraméterre annak lehetséges, szakirodalmi kutatás alapján meghatározott minimuma és maximuma között megjegyezzük azon paraméterértékeket, melyekhez tartozó likelihood értéket elfogadtuk a Metropolis-algoritmus alkalmazása során (MOSEGAARD AND TARANTOLA, 1995).

Az utolsó lépés az *a priori* információ és a modellinformáció kombinálása: az *a priori* eloszlásfüggvény és a likelihood függvény konvolúciójával kapjuk az *a posteriori* eloszlásfüggvényt, melynek maximumához tartozó paraméterértéket optimálisnak tekintjük. Az eljárás nagy előnye, hogy miközben alkalmazásával pontosíthatjuk szimulációnkat, a kalibráció során a kalibrálandó modellparaméterek bizonytalanságáról is információt kapunk (RAUPACH ET AL. 2005).

# EREDMÉNYEK

## Módszertani eredmények

### *A Biome-BGC modell fenológiai folyamatokat szimuláló moduljának fejlesztése*

A növények fenológiai állapota jelentősen befolyásolja az ökológiai rendszer és a légkör közötti szén- és vízforgalmat. A vegetációs periódus az aktív növényi működés, az intenzív szénfelvétel (és ezzel párhuzamosan a párologtatás) időszaka. A vegetációs periódus kezdetének és végének napja megadható ökofiziológiai paraméterként a Biome-BGC modellben. Abban az esetben, ha több éves futtatást végzünk és fontos szempont, hogy a szimuláció során ne legyen állandó a vegetációs periódus kezdetének és végének napja, akkor használhatjuk a modell fenológiai modulját. Azonban a Biome-BGC-t alapvetően erdőre fejlesztették, ezért a gyepre vonatkozó szimulált fenológiai állapotok jelentősen eltérnek a hazai mérésekből becsültektől.

Széles körben elterjedt az ún. vegetációs periódus index használata, mely egyszerre vizsgál több környezeti változót, hogy együttesen mikor érik el azt a kritikus értéket, amikor megkezdődik, illetve befejeződik a vegetációs periódus. A módszer minden mennyiséghez használ két-két határértéket, melyeken belül a növény fenológiai állapota változik az inaktív állapot és a nem-limitált állapot között és az adott mennyiségekből számolt részindexeket összeszorozza (DORKA, 2005).

Az általam definiált vegetációs index figyelembe veszi a minimum hőmérsékletet, a vízgőztelítettségi hiányt, a nappal hosszát és a 10 napos hőösszeget 5°C bázishőmérséklettel. Felteszem, hogy amely napon az index értéke nagyobb, mint egy (paraméterként megadható) küszöbérték, a vegetációs periódus, azaz a napi szintű szénfelvétel időszaka megkezdődik. A nyár vége után, amely napon a paraméter értéke kisebb, mint egy másik (szintén paraméterként megadható) küszöbérték, felteszem, hogy a vegetációs periódus véget ér.

### *A Biome-BGC modell vízháztartás elemeit szimuláló moduljának fejlesztése*

A Biome-BGC-t alapvetően szénforgalom szimulálására specializálták, a modell vízforgalom modellje egyszerű. A lehulló csapadék egy részét felfogja a levélzet, a maradék a talajba (a talaj víztározójába) kerül. A modell figyelembe vesz ún. *kifolyást*: ha akkora mennyiségű csapadék jut a talajba, hogy a talaj víztartalma a telítési érték fölé emelkedik, a többletcsapadék kifolyik a talajból. Kiegészítettem a talajnedvesség-modult az *elfolyást* és *mélybe szivárgást* szimuláló modullal. Az *elfolyás* azt jelenti, hogyha egyszerre túl nagy mennyiségű csapadék esik, a talaj nem képes az egészet magába szívni (akkor sem, ha nem válik telítetté), a leesett csapadék egy része elfolyik, mielőtt még bekerülne a talajba. A *mélybe szivárgás* szimulációja során felteszem, hogyha egy nagyobb csapadék után a talaj víztartalma meghaladja a szabadföldi vízkapacitásnak megfelelő értéket, akkor pár nap elteltével a többlet-víz lecsorog a mélybe, azaz a rendszer számára elveszik. Az *elfolyás* és a *mélybe szivárgás* szimulációjához empirikus képleteket használtam (CAMPBELL AND DIAZ, 1988).

### *A talajkiszáradás növényi működésre gyakorolt hatásának modellezése*

A Biome-BGC modell (hasonlóan a legtöbb folyamatorientált biogeokémiai modellhez) korlátozó tényezők figyelembevételével számolja a fotoszintetikus folyamatok modellezéséhez elengedhetetlen sztóma-vezetőképességet. A legfontosabb korlátozó tényező

a talaj nedvességtartalma: ha csapadékhiány miatt csökken a talaj nedvessége, csökken a sztómák vezetőképessége s azon keresztül a szénfelvétel. Azonban ahogy megszűnik a stresszhatás (bármilyen mértékű és időtartamú is volt), a sztómák újra teljesen kinyílnak, a szénfelvétel a stressz előtt értékre ugrik, a növény „visszaáll az eredeti állapotba”. Azaz a Biome-BGC modell nem képes a talajkiszáradás okozta hervadás modellezésére (a növény egy részének, vagy egészének a talajkiszáradás okozta pusztulása). Az ebből eredő hiba kiküszöbölésére beépítettem egy kiszáradás modult, mely szimulálja a talajkiszáradás növényélettani hatását. Ha a talajvíz-potenciál a kritikus érték alá csökken, elkezdem számolni, hogy hány napja van kitéve az ökológiai rendszer a csapadékhiányból eredő vízstressznek. Ennek függvényében számolok egy kiszáradási tényezőt, mely meghatározza, hogy a növényi anyag (a levél és a finom gyökérszövet szén- és nitrogéntartalma) mekkora hányada pusztul el és kerül az elhalt növényi anyag tározókba az adott szimulációs napon.

### *A művelési modulok beépítése*

A Biome-BGC modellt természetközeli ökoszisztémák működésének modellezésére fejlesztették ki, azonban szükség van a művelés alá vont területeken élő vegetáció szénháztartásának megismerésére, szimulációjára is. A széleskörűbb használhatóság érdekében a Biome-BGC modell forráskódját kiegészítettem kaszálási, legeltetési (művelt gyepek), illetve vetési, aratási, szántási és trágyázási modullal (mezőgazdasági területek). Mivel a Biome-BGC-t munkám során a gyepek működésének szimulációjára használtam, a kaszálás és a legeltetés modulokat validáltam is; ám a mezőgazdasági területekre vonatkozó művelési módok szimulációját még csupán előkészítettem a modulok modellben való beépítésével. Annak érdekében, hogy modellezni tudjam a művelési módok ökológiai rendszer működésére gyakorolt hatását, szükség van a tározók, illetve a tározók és a környezet közötti új áramok definiálására.

A kaszálás, a legeltetés és az aratás legfontosabb hatása a felszín feletti biomasz mennyiségének csökkenése (SOUSSANA ET AL. 2007). A csökkentés módja függ a gazdálkodási módtól. A kaszálás hatása kétféleképpen definiálható a modellben: vagy a kaszálás előtti és utáni napra jellemző levélfelületi index hányadosával, vagy a kaszálás utáni napra vonatkozó levélfelületi index alapján adható meg. A legeltetés hatása az egy napon elfogyasztott szárazanyag-tartalom és a legelési nyomás alapján számolható. Ezek alapján minden legeltetési napon ugyanakkora, az állatok táplálkozásából eredő szénvesztéséget feltételezek. A legeltetés során figyelembe kell még venni az állati ürülékből a rendszerbe visszajutó anyagmennyiségeket, mely a naponta elfogyasztott összes szárazanyag-tartalom függvénye. Az aratás szimulációja során felteszem, hogy az aratás után csupán növényi csonkok maradnak a területen. A növényi csonkok levélfelületi indexét állandónak veszem s ebből számíthatók az anyagmennyiség-csökkenések.

A műtrágyázás szimulációja során első megközelítésként a folyamat csak azon hatását vettem figyelembe, mely növeli a növények számára hozzáférhető nitrogén mennyiségét. A műtrágyában levő anyagok nem kerülnek be azonnal a rendszer körforgásába; ezt a késleltetett hatást egy ún. lebomlási együtthatóval fejezem ki. A lebomlási együttható meghatározza, hogy a műtrágya rendszerbe kerülése utáni adott napon a műtrágya hány százaléka épül be a rendszerbe, azaz a modell mineralizált nitrogén tartályába. A mineralizált nitrogén mennyisége befolyásolja mind a dekompozíciós folyamatokat, mind a növény növekedési folyamatait. Ha a mineralizált nitrogén mennyisége nem fedezi a növény nitrogén szükségleteit, akkor CO<sub>2</sub>-asszimiláció redukálódik (nitrogénlimitáció).

A szántás szimulációja során az összes felszíni feletti és felszín alatti biomasszát eltávolítom. A tározókból eltávolított növényi anyagmennyiséget (szén, nitrogén) a talaj megfelelő tározóiba juttatom.

A vetés szimulációjának időpontja megadható. A vetés szimulációjához szükséges tudni az elvetett mag szénttartalmát. Ennek megfelelően növelem a levélzet és a gyökér transzfer széntározóit. Az ökofiziológiai paraméterek fájljában megadott szén-nitrogén arányoknak megfelelően (más-más érték a levélzetre, illetve a gyökérre) egyúttal megnövelem a nitrogén transzfer tározókat. Mivel a gyepek esetében kétféle transzfer tározó van (levélzet és gyökér), első közelítésként feltettem, hogy a mag fele „fordítódik” levélképzésre és a fele gyökérképzésre (de ez az arány a kezdetiértékeket megadó fájlban állítható).

#### *A CarbonISO modell kifejlesztése*

Hegyhátsálon heti rendszerességgel végeznek a légköri  $^{13}\text{CO}_2$  relatív előfordulási arányára vonatkozó méréseket. Ez a hasznos ám költséges mérés információt szolgáltat a különböző forrásokból származó  $\text{CO}_2$  eredetéről, illetve a vegetáció állapotáról. Ennek érdekében kifejlesztettem egy modellt, mely alkalmas órás léptékben (többek között) a légköri  $^{13}\text{CO}_2$  relatív előfordulási arányának szimulációjára.

A saját fejlesztésű CarbonISO modell alaptézise, hogy szén- és vízáramokból – meteorológiai mérések segítségével – következtetni lehet az  $^{13}\text{CO}_2$  relatív előfordulási arány alakulására. A modell bemeneti adatbázisát a Hegyhátsálon, 82 méteren elhelyezkedő mérőrendszer adataiból állítottam elő. A modell igényel meteorológia adatokat (hőmérséklet, talajszinti nyomás, vígőz telítési hiány), illetve szén-és vízgőzáram adatokat (GPP, TER, LE). A modelleredményeket a hegyhátsáli, 96 méteren elhelyezkedő palackos mérőrendszer által mért  $^{13}\text{CO}_2$  relatív előfordulási aránnyal, illetve a légköri  $\text{CO}_2$  keverési aránnyal validáltam, illetve kalibráltam (HIDY ET AL. 2009).

A modell időbeli felbontása órás, térbeli felbontása a függőleges irányban méteres (a vizsgált légoszlopot h db  $1\text{m}^3$  térfogatú dobozra osztom föl, melynek szén-dioxid keverési arányát és  $^{13}\text{CO}_2$  relatív előfordulási arányát minden szimulációs órában számolom). A modell vizsgálati tartományát (5000 m magas, egységnyi alapterületű légoszlop) három részre osztom. A legalsó a teljesen átkevert határréteg alatti térrész, amelyben felteszem, hogy a jelenlevő anyagok eloszlása egyenletes, keverési arányuk állandó. A második a maradékréteg, melynek magasságáról felteszem, hogy megegyezik az előző szimulációs nap naplemente előtti (konvektív határréteg összeomlása előtti) határréteg magasságával. A harmadik, legfelső térrész a szabad troposzféra. A modell csak vertikális irányban kezel anyagáramokat, így a számítások gyakorlatilag egydimenziósak. A mért adatokkal való összevethetőség érdekében a szimulált órás adatokból a délutáni órákra (12-17 óra) vonatkozó átlagot számolok mind a  $\text{CO}_2$  keverési arányára, mind a  $^{13}\text{CO}_2$  relatív előfordulási arányára (u.i. az izotópos mintavételek a délutáni órákban történtek) (HIDY ET AL. 2009).

#### *A saját fejlesztésű kalibrációs módszer megvalósítása*

Az Biome-BGC és CarbonISO modellek kalibrálásához kifejlesztettem egy, a Bayes-féle becslésen alapuló  $nxm$ -lépéses kalibrációs programot ( $n$  a kalibrálandó paraméterek száma, mely megadja az iterációs fordulók számát,  $m$ : egy iterációs fordulón belüli lépések száma). *A priori* eloszlás gyanánt egyenletes eloszlást definiálok a paraméterterén. A modellhibát a modellezett és a mért adatok eltéréséből számolt négyzetes hibák átlagának négyzetgyökével jellemeztem. A kalibrálandó modell típusától függően különböző fajtájú és számú referenciaadat használható az adott modell kalibrálásához (Biome-BGC: bruttó elsődleges produkció, az ökológiai rendszer respirációja, látens hőáram; CarbonISO:  $\text{CO}_2$  keverési aránya). Annak érdekében, hogy a különböző referenciaadatokra vonatkozó hibák (és ezen keresztül a modelljóság, az ún. likelihood értékek) összehasonlíthatók legyenek, a hibákat normálni szükséges. Normáló tényezőül az adott mennyiségre vonatkozó mérési

adatok intervallumának szélességét, azaz a legnagyobb és legkisebb értéknek különbségét választottam. A jelen munkában a likelihood a szimuláció hibájának a (mért és a szimulált adatsorok) korrelációnégyzetével súlyozott függvénye. Az adott futtatás likelihood értéke az egyes tagokra (a különböző referenciaadatokra) vonatkozó rész-likelihood értékek szorzata. Így ha bármelyik rész-likelihood alacsony értéket vesz föl, hatással van a futtatás jóságát egészében jellemző végső likelihoodra.

Első lépésként az összes kalibrálandó paramétert értékét változtatom véletlenszerűen az *a priori* intervallumban és nagyszámú futtatást végzek. A futtatások kiértékeléseképp likelihood értékeket, majd azokból a modellinformációra vonatkozó valószínűségi függvényt számolok. Ha túl sok az egyszerre kalibrált paraméter, akkor a referenciaadatokból a kalibráció során kinyert egy paraméterre jutó információmennyiség túl kicsi. Ennek eredményeképp többféle paraméteregyüttes is optimálisnak adódhat. Ennek elkerülésére több iterációs fordulót végzek. Az első iterációs forduló után ( $n$  db iterációs lépés) kiválasztom azt a paramétert, mely a legnagyobb változékonyságot okozta a kimeneti adatokban. Ehhez ún. *érzékenységi analízisre* van szükség, melyet többváltozós lineáris regresszióval oldottam meg. A következő iterációs fordulóban már csak  $n-1$  paramétert kalibrálok.

## Szimulációs eredmények

### *A továbbfejlesztett és kalibrált Biome-BGC eredményeinek validálása*

A kalibráció és a továbbfejlesztés eredményeképpen a Biome-BGC szimulációja javult mindhárom vizsgált állomásra vonatkozóan. A modell jóságát jellemezhetjük a korreláció négyzetével ( $R^2$ ), és az (előző fejezetben definiált) relatív hibával (RE). A modellszimuláció fejlesztése leginkább a kimeneti és a referenciaadatok összefüggését erősítette ( $R^2$ ), míg kalibráció a relatív hibákat csökkentette. Nem csak a kalibrációs évekre vonatkozóan javult a szimuláció, hanem a validációs évekre vonatkozóan is, ami fontos indikátora a kalibráció sikerességének. A modellfejlesztés és a kalibráció eredményeképp a  $R^2$  0,65-0,80 között, RE 15-20% között mozog mindhárom állomásra, mindkét szimulációs évre vonatkozóan (2007-2008). Ezen kívül a kalibráció után a paraméterek *a posteriori* intervalluma az 40-70%-a a kalibráció előtti *a priori* intervallumoknak. Azaz a paraméterek becslésének bizonytalansága csökkent.

### *A helyspecifikus körülmények növényi működésre gyakorolt hatása*

Az eltérő helyi klíma, talaj- és gyeptípus eredményeképpen a három mérőhely ökológiai rendszerének szén- és vízháztartása eltérő. Vizsgáltam a három gyepterület működésének jellegzetességeit a sokéves futtatások napi szimulált átlagain keresztül. Hegyhátsálra 1997 és 2008 között, Bugacra 2002 és 2008 között, Szurdokpüspökire 2003 és 2008 között állnak rendelkezésre a megfelelő bemeneti adatok.

A nyári időszakban Hegyhátsálra vonatkozóan a legnagyobb a szénfelvétel, annak ellenére, hogy a kaszálás hatására tapasztalható egy drasztikus visszaesés a kaszálási napokon. Ez az optimális hővezetésű és víztartású, vályog mechanikai összetételű talajnak, illetve a magas éves csapadékösszegnek köszönhető.

A bugaci alacsony hőkapacitású, jó vízvezető-képességű, homok mechanikai összetételű talaj könnyen kiszárad és gyorsan felmelegszik. Ennek eredményeképp Bugacon indul meg a leghamarabb a vegetációs periódus és ezzel együtt a szénfelvétel, ám a nyárvégi időszakban a talaj kiszáradásának hatására jelentős csökkenés figyelhető meg a szénfelvételben.

A nagy agyagtartalomnak köszönhetően Szurdokpüspöki esetében a legkisebb a szénfelvétel mértéke, mivel itt a legkevesebb a növény számára felvehető talajnedvesség mennyisége, hiába közepes a csapadékelletottság. Szurdokpüspöki esetében is megfigyelhető a szénfelvétel nyárvégi mérséklődése, ám kevésbé drasztikus, mint Bugac esetében.

Minél több szén-dioxidot épít be az ökológiai rendszer, annál többet lélegez ki; ennek eredményeképpen Hegyhátsálon a legnagyobb a respiráció, Szurdokpüspökin a legkisebb.

Az ökológiai rendszer nettó szénfelvétele a TER és a GPP különbsége (ha a respiráció nagyobb, mint a szénfelvétel, akkor értelemszerűen az ökológiai rendszer nettó szénforrás és fordítva). Hegyhátsálon és Szurdokpüspökin a vegetációs periódusban a sokéves GPP napi átlaga nagyobb, mint a sokéves TER napi átlaga, ami azt jelenti, hogy az inaktív perióduson kívül az ökológiai rendszer nettó szénelnyelő. Ezzel ellentétben a száraz, legeltetett, homokos talajon élő bugaci gyepek sokéves GPP-jének napi átlaga a vegetációs periódus közepén (körülbelül az év 180. és 220. napja között) alacsonyabbá válik, mint a respiráció. Ez azzal magyarázható, hogy jellemzően a július-augusztusi hónapokban a bugaci talaj kiszárad, a talajnedvesség a minimálisan szükséges szint alá csökken. Ám a késő augusztusi esőknek köszönhetően a kiszáradás után a gyepek újraélednek egy második szénfelvételi időszakot eredményezve. Fontos és jól ismert jelenség Bugacon a nyár közepi kiszáradás és a nyárvégi, a második szénfelvételi időszak.

#### *A legeltetés és a kaszálás hatása a széntározókra*

Annak érdekében, hogy vizsgálni tudjam a kaszálás és a legeltetés hosszú távú hatását, lefuttattam a modellt az 1971-2008-as időszakokra. Összehasonlítottam a természetközeli, a kaszált és a legeltetett gyepek szénáramainak és széntározóinak hosszú távú változásait. Az NEE éves összegei alacsonyabb értéket vesznek föl a kaszált gyepek esetében, mint a háborítatlan gyepeknél, annak ellenére, hogy a kaszálás csökkenti a felszíni biomassza mennyiségét. Ez azzal magyarázható, hogy a levélfelületi index csökken a kaszálás hatására, aminek következtében csökken a felfogott víz mennyisége, így a csapadékból több jut le a talajba (növelve a felvehető talajnedvesség mennyiségét). Mivel a felvehető talajnedvesség a sztóma-vezetőképesség legfontosabb korlátozó tényezője, a nagyobb talajnedvesség-tartalom hatékonyabb szénfelvételt eredményez. A nettó biomassza-produkció (NBP) olyan nettó szénfelvétel, mely magában foglalja az emberi beavatkozás hatására bekövetkező szénmozgást (pozitív, ha az ökológiai rendszer szénelnyelő). Az NBP azonban kisebb a kaszált gyepek esetén, sőt a legtöbb évben negatív értéket vesz föl, ellentétben a háborítatlan gyepekkel. Ez azt jelenti, hogyha a szénmérleg számítása esetén figyelembe vesszük az emberi tevékenység során elszállított szén mennyiségét is, akkor az ökológiai rendszer nettó szénforrásként működik. Ezen kívül az ökológiai rendszer az évek nagy részében nettó szénelnyelő, ha nem kaszálják, ám nettó szénforrás, ha igen. A háborítatlan ökológiai rendszer esetén a talajszéntartalom fokozatosan nő, míg kaszált gyepek esetén fokozatosan csökken. Ez azzal magyarázható, hogy a kaszálás során elszállított szén mennyiségét nettó veszteség a füves ökológiai rendszer számára, ami a talaj széntartalmának csökkenésében jelenik meg.

A legeltetett gyepek hasonlóan viselkednek a háborítatlan gyepek viszonylatában, mint a kaszált gyepek, csak a különbségek kisebbek. Ez azzal magyarázható, hogy a legeltetés okozta szénvesztés kisebb: az alapbeállításokat használva a kaszálás eredményeképpen évente átlagosan négyszer-öttször annyi szén távozik a rendszerből, mint legeltetés esetén. Ugyanis az ökológiai rendszer nettó szénvesztését részben pótolja a legeltetés során az állati ürülékkel a talajba jutó szén mennyisége. Továbbá a nitrogén fontos tápanyagul szolgál a növényzet számára, ezért a talaj nitrogéntartalmának kismértékű növekedése elősegíti a fotoszintézist.

### *A CarbonISO modell validációja*

A CarbonISO modell órás léptékben szimulálja a szén-dioxid keverési arányát és a  $^{13}\text{CO}_2$  relatív előfordulási arányát szén- és vízáram, illetve meteorológiai adatok alapján. A modellt lefuttattam arra a 4 éves periódusra (2001-2004), amelyben rendelkezésre álltak a szükséges hegyhátsági mérési adatok a bemeneti adatbázis elkészítéséhez, illetve a szimuláció validációjához. Annak érdekében, hogy a heti mintavételű  $^{13}\text{CO}_2$  adatokat össze tudjam vetni a szimulált adatokkal, délutáni átlagokat számoltam (12-17 óra közötti periódusra), mivel az izotópos mérések mindig a délutáni időszakban történtek. A délutáni átlagok alapján vizsgáltam mind a  $^{13}\text{CO}_2$  relatív előfordulási arányát, mind a  $\text{CO}_2$  keverési arányának évszakos menetét.

A  $\text{CO}_2$  és a  $^{13}\text{CO}_2$ -ra vonatkozó szimuláció értelmezése során vizsgáltam az összefüggést a mért és a modellezett adatok között. Azt találtam, hogy a két legfontosabb, a  $\text{CO}_2$  keverési arány és  $^{13}\text{CO}_2$  relatív előfordulási arány szimulációját befolyásoló tényező a planetáris határreteg magassága, illetve a nettó ökológiai rendszer kicserélődése. A vegetációs periódusokban, mikor a vegetáció nettó szénelnyelő, a légköri  $\text{CO}_2$  keverési aránya alacsonyabb. Mivel a szénfelvételi folyamat diszkriminálja a nehezebb izotópot, a légkörben feldúsul a nagyobb tömegszámú  $^{13}\text{C}$  izotóp, emiatt  $^{13}\text{CO}_2$  relatív előfordulási aránya abszolút értékben kisebb lesz. Mindemellett az intenzívebb turbulens folyamatok következtében, a szabad troposzférikus levegő bekeveredése miatt a szabad troposzférikus értékekhez való közeledés a jellemző. Az inaktív időszakban az előbb vázolt helyzet fordítottja a jellemző.

A mért és szimulált adatokat összevetve látszik, hogy a modell eltalálja mind a mért adatok nagyságrendjét, mint az éves menetet ( $\text{CO}_2$  keverési arányra vonatkozóan:  $R^2 = 0,49$ , átlagos relatív hiba: 13%;  $^{13}\text{CO}_2$  relatív előfordulási arányra vonatkozóan:  $R^2 = 0,45$ , átlagos relatív hiba: 15%)

### *A fosszilis tüzelőanyag jelenlétének kimutatása CarbonISO modellel*

Vizsgáltam a mért és a szimulált  $^{13}\text{CO}_2$  relatív előfordulási arány különbségét. A fotoszintetikusan inaktív periódusokban a különbség mindig negatív volt (azaz a mérések szerint a levegő szegényebb volt  $^{13}\text{C}$ -ben, mint a modelleredmények szerint). A vegetációs periódusokra vonatkozóan a becslés hibájának előjele változó és értéke egy nagyságrenddel kisebb, mint az inaktív periódusban. Mivel a fosszilis tüzelőanyagból származó  $\text{CO}_2$  (jelen esetben földgáz, mivel Magyarországon az a legjelentősebb fűtőanyag) jóval szegényebb  $^{13}\text{C}$ -ben, mint a légköri  $\text{CO}_2$ , ezért a fosszilis tüzelőanyag elégetésének eredményeképp a légkörre vonatkozó relatív előfordulási arány csökken. A modell nem számol a fosszilis tüzelőanyag elégetésének hatásával, így télen a szimuláció várhatóan túlbecsli a légköri  $^{13}\text{CO}_2$  relatív előfordulási arányát.

A fosszilis tüzelőanyagból származó  $\text{CO}_2$  keverési arányának becsléséhez a COMET lagrange-i transzport modellt használtam. Összevetve az adott inaktív-, illetve aktív periódusokra vonatkozó COMET modellből származó  $\text{CO}_2$  értékeket és a CarbonISO  $^{13}\text{CO}_2$  arányra vonatkozó szimulációs hibáját, arra jutottam, hogy, minél nagyobb a légkörbe jutó, a fosszilis tüzelőanyagból származó  $\text{CO}_2$ , annál nagyobb lesz a CarbonISO modell szimulációs hibája. Ez megfelel a várakozásomnak, hogy mivel a CarbonISO modell nem számol a fosszilis tüzelőanyagból származó  $\text{CO}_2$  alacsony  $^{13}\text{C}$  tartalmával, azért ha az nagy mennyiségben van jelen, akkor a  $^{13}\text{CO}_2$  szimuláció szükségszerűen túlbecsli a mérési eredményeket. Ennek eredményeképp a CarbonISO modell  $^{13}\text{CO}_2$  relatív előfordulási arányára vonatkozó hibájából következtethetünk a fosszilis tüzelőanyagból származó légköri  $\text{CO}_2$  jelenlétére.

## ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. A Biome-BGC által használt bemeneti adatbázis felépítése, a modell adaptációja és a modell validálása a Hegyhátsálon, Bugacon és Szurdokpüspökin mért adatok segítségével.
2. A kaszálás, a legeltetés szimulációjának megvalósítása: művelési modulok beépítése az eredetileg háborítatlan ökológiai rendszerre kifejlesztett Biome-BGC modellbe, az eredmények verifikálása. A műtrágyázás, az aratás, a szántás és a vetés szimulációjának előkészítése: a művelési modulok beépítése már megtörtént, de az eredményeket még nem verifikáltam.
3. A talajvízháztartás elemeit, illetve a növény fenológiai folyamatait szimuláló modulok továbbfejlesztése a Biome-BGC modellben. A talajnedvesség-modul kiegészítése a lefolyás és a mélybe szivárgás folyamatával. A talajkiszáradás növényélettani hatásának szimulációja: ha a talajvíz-potenciál a sztómazáródáshoz tartozó érték alá csökken, a növény kiszáradásnak indul. A fenológiai folyamatokat szimuláló modul módosítása: a vegetációs periódus elejét és végét általam definiált vegetációs indexszel számolom, mely egyszerre veszi figyelembe, hogy a minimum hőmérséklet, a levegő vízgőztelítettségi hiánya, a nappal hossza és a 10 napos hőösszeg mikor éri el együttesen azt a kritikus értéket, amely után megkezdődik, illetve amely után befejeződik a vegetációs periódus. Ennek hatására reálissá vált a széndioxid-felvétel éves menetének szimulációja.
4. A légköri szén-dioxid  $^{13}\text{C}$  izotópjának relatív előfordulási arányának időbeli menetét órás léptékben szimuláló modell kifejlesztése (CarbonISO). A modell alkalmas arra, hogy meteorológiai adatok, továbbá szén-dioxid- és vízáram adatok alapján modellezze a  $^{13}\text{C}$  relatív előfordulási arányának napi és éves menetét a légkörben, illetve a növényi biomasszában.
5. Bayes-becslésen alapuló matematikai-statisztikai kalibrációs program kifejlesztése és alkalmazása a két felhasznált modell paramétereinek optimalizálására. A kalibráció eredményeképp mindkét modell szimulációja javult, azaz a modell kimeneti adatai erős összefüggést mutatnak a mért adatokkal, és kis eltérést mutatnak, azoktól.
6. Az eltérő környezeti feltételek (klíma, talajtípus), illetve az emberi beavatkozás hatásainak vizsgálata a Biome-BGC modell segítségével. Modelleredmények szerint a széndioxid-felvételt leginkább korlátozó tényező a felvehető talajnedvesség mennyisége, ennek eredményeképpen sokéves átlagban Szurdokpüspökin a legkisebb, Hegyhátsálon a legnagyobb a széndioxid-felvétel éves skálán. A legeltetés és a kaszálás hosszú távú hatását vizsgálva megállapítható, hogy az emberi beavatkozás hatására az eredetileg sokéves átlagban nettó szénnyelőként működő ökológiai rendszerek nettó szénforrássá válhatnak.
7. Az időjárási viszonyok az ökológiai rendszerre gyakorolt hatásának vizsgálata órás és napi léptékben a CarbonISO modell eredményei alapján. A  $\delta^{13}\text{C}$ -szimuláció hibájának időbeli eloszlásából következtethetünk a fosszilis tüzelőanyagból származó,  $^{13}\text{C}$ -ben szegény  $\text{CO}_2$  jelenlétére.

## KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Az adaptált Biome-BGC modell alkalmasnak bizonyult a magyarországi füves ökológiai rendszerek szén- és vízháztartásának modellezésére. A szimulációs hibák csökkentése érdekében elvégzett módosítások (a fenológiai folyamatokat szimuláló modul korrekciója, a talajnedvesség-modul kiegészítése) sikeresnek bizonyultak. Az eredetileg háborítatlan ökológiai rendszerre kifejlesztett Biome-BGC-be épített művelési modulok alkalmasnak bizonyultak a különböző emberi tevékenységek (kaszálás, legeltetés) hatásainak vizsgálatához. A modellt alkalmaztam a környezeti feltételek szén- és vízháztartásra gyakorolt hatásainak vizsgálatára. A modellezés során kimutattam, hogy a széndioxid-felvételt leginkább korlátozó tényező a felvehető talajnedvesség mennyisége, aminek következtében, sokéves átlagban, az agyag mechanikai összetételű talajon elhelyezkedő gyepek esetében a legkisebb, a vályog mechanikai összetételű talajon elhelyezkedő gyepek esetében a legnagyobb a széndioxid-felvétel éves skálán. A legeltetés és a kaszálás hosszú távú hatását vizsgálva megállapítható, hogy az emberi beavatkozás hatására az eredetileg sokéves átlagban nettó szénnyelőként működő ökológiai rendszerek nettó szénforrássá válhatnak, ha figyelembe vesszük a művelés során az ökológiai rendszerből kikerülő szén mennyiségét.

Fontos feladatnak tartom, hogy a továbbfejlesszem a kaszálás és a legeltetés modulokat, hogy ne csak a föld feletti biomassza eltávolítását, hanem a talaj bolygatásának hatását is vegyék figyelembe.

A továbbiakban célom a Biome-BGC modell továbbfejlesztése többretegű talajmodell kidolgozásával.

A modell a vegetációs perióduson kívül elhanyagolja a szénfelvételt. Célom e durva közelítés finomítása az inaktív periódus szénfelvételének és autotróf légzésének becslésével.

Fontos feladat a nitrogénforgalom számszerűsítésén, továbbfejlesztésén keresztül az egyéb üvegházgázok ( $N_2O$ ,  $CH_4$ ) fluxusainak modellezése.

Ezen kívül célom a Biome-BGC alkalmazása a mezőgazdasági területek szén- és vízháztartásának szimulációjára, ezen belül a beépített aratás, szántás, vetés és műtrágyázás modul működésének verifikációja.

A saját fejlesztésű CarbonISO modell szén-dioxid- és vízáram, illetve meteorológiai adatok segítségével számolja a növényi folyamatokra jellemző izotóp-diszkriminációt és ezen keresztül a  $^{13}C$  relatív előfordulási arányát a légköri szén-dioxidban és a növényi anyag széntartalmában. A modell eredményei jó egyezést mutatnak a mérési adatokkal, azaz lehetségessé vált a  $^{13}CO_2$  becslése ott, ahol rendelkezésre állnak szén-dioxid- és vízáram adatok. Megállapítottam, hogy  $^{13}C$  relatív előfordulási arányára vonatkozó szimulációs hiba időbeli eloszlásából következtethetünk a fosszilis tüzelőanyagból származó,  $^{13}C$ -ben jelentősen szegény  $CO_2$  jelenlétére.

A fent említett modellek kalibrációjára kifejlesztett, Bayes-becslésen alapuló matematikai-statisztikai alapokon nyugvó kalibrációs program alkalmasnak bizonyult mindkét modell ismeretlen értékű paramétereinek optimalizációjára. A kalibráció eredményeképp nem csupán a szimulációs hibák csökkentek, illetve a mért és a modellezett adatok közti összefüggés nőtt, hanem a paraméterek bizonytalansága is csökkent, mely az *a posteriori* intervallumok csökkenésével jellemezhető.

Távolabbi céljaim közé tartozik a Biome-BGC és a CarbonISO alkalmazása a gyepek és a mezőgazdasági területek megváltozó éghajlati viszonyok közötti viselkedésének előrejelzésére.

## IRODALOMJEGYZÉK

- Barcza, Z., Haszpra, L., Kondo, H., Saigusa, N., Yamamoto, S. and Bartholy, J. (2003). Carbon exchange of grass in Hungary. *Tellus B* 55, 187-196.
- Bürger, G. (1997). On the disaggregation of climatological means and anomalies. *Climate Research* 8, 183-194.
- Ciais, P., Tans, P. P., Trolier, M. J., White, W. C. and Francey, R. J. (1995). A Large Northern Hemisphere Terrestrial CO<sub>2</sub> Sink Indicated by the <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C Ratio of Atmospheric CO<sub>2</sub>. *Science* 269, 1098-1102.
- Ciais, P., Wattenbach, M., Vuichard, N., Smith, P., Piao, S.L., Don, A., Luyssaert, S., Janssens, I.A., Bondeau, A., Dechow, R., Leip, A., Smith, P.C., Beer, C., van der Werf, G.R., Gervois, S., Van Oost, K., Tomelleri, E., Freibauer, A., Schulze, E.D. and CarboEurope Synthesis Team (2010) The European Carbon Balance. Part 2: croplands. *Global Change Biology*, 16, 1409-1428.
- Dorka, D. (2005). Két hőösszeg-számítási módszer vizsgálata a kukoricatermesztésben. *Agrártudományi Közlemények* 16, 156-159.
- 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. J., Jones, C. J., Joos, F., Kato, T. K., 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. and Zeng, N. (2006). Climate-Carbon Cycle Feedback Analysis: Results from the C4MIP Model Intercomparison. *Journal of Climate* 19, 3338-3353.
- Haszpra, L., Barcza, Z., Davis, K. J. and Tarczay, K. (2005). Long-term tall tower carbon dioxide flux monitoring over an area of mixed vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology* 132, 58-77.
- Hidy, D., Haszpra, L., Barcza, Z., Vermeulen, A., Tuba, Z. and Nagy, Z. (2009). Modelling of carbon isotope discrimination by vegetation. *Photosynthetica* 47, 457-470.
- Hollinger, D. Y. and Richardson, A. D. (2005). Uncertainty in eddy covariance measurements and its application to physiological models. *Tree Physiology* 25, 873-885.
- IPCC (2007). The physical science basis – Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. New York, Cambridge University Press.
- Kennedy, M. and O'Hagan, A. (2001). Bayesian calibration of computer models. *Journal of the Royal Statistical Society* 63, 425-463.
- Mosegaard, K. and Tarantola, A. (1995). Monte Carlo sampling of solutions to inverse problems. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth* 100, 12431-12447.
- Rajkai, K., Szász, G. and Huzsvai, L. (2004). Agroökológiai modellek. Debrecen, Debreceni Egyetem.

- Raupach, M. R., Rayner, P. J., Barrett, D. J., Defries, R. S., Heimann, M., Jima, D. S. O., Quegan, S. and Schimmler, C. C. (2005). Model-data synthesis in terrestrial carbon observation: methods, data requirements and data uncertainty specifications. *Global Change Biology* 11, 378-397.
- Running, S. W., Nemani, R. R. and Hungerford, R. D. (1987). Extrapolation of synoptic meteorological data in mountainous terrain and its use for simulating forest evaporation and photosynthesis. *Canadian Journal of Forest Research* 17, 472-483
- Running, S. W. and Coughlan, J. C. (1988). A general model of forest ecosystem processes for regional applications I. Hydrological balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modelling* 42, 125-154.
- Running, S. W. and Gower, S. T. (1991). A general model of forest ecosystem processes for regional applications II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. *Tree Physiology* 9, 147-160.
- Running, S. W. and Hunt, E. R. J. (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. (ed.: Ehleringer, J. R., Field, C.B.) San Diego, Academic Press.
- Soussana, J. F., Allard, V., Pilegaard, K., Ambus, P., Amman, C., Campbell, C., Ceschia, E., Clifton-Brown, J., Czóbel, S., Domingues, R., Flechard, C., Fuhrer, J., Hensen, A., Horvath, L., Jones, M., Kasper, G., Martin, C., Nagy, Z., Neftel, A., Raschi, A., Baronti, S., Rees, R. M., Skiba, U., Stefani, P., Manca, G., Sutton, M., Tuba, Z. and Valentini, R. (2007). Full accounting of the greenhouse gas (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>) budget of nine European grassland sites. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 121 121–134.
- Tuba, Z., Nagy, Z., Czóbel, S., Balogh, J., Csintalan, Z., Fóti, S., Juhász, A., Péli, E., Sente, K., Nagy, J., Szerdahelyi, T. and Szirmai, O. (2004). Hazai gyeptársulások funkcionális ökológiai válaszai, C-körforgalma és üvegházhatású gázainak mérlege jelenlegi és jövőben várható éghajlati viszonyok, illetve eltérő használati módok mellett. "Agro-21" Füzetek 37, 111-123.
- Van Oijen, M., Rougier, J. and R., S. (2005). Bayesian calibration of process-based forest models: bridging the gap between models and data. *Tree Physiology* 25, 915-927.
- Vetter, M., Wirth, C., Böttcher, H., Churkina, G., Schulze, E. D., Wutzler, T. and Weber, G. (2005). Partitioning direct and indirect human-induced effects on carbon sequestration of managed coniferous forests using model simulations and forest inventories. *Global Change Biology* 11, 810-827.
- White, M. A., Thornton, P. E., Running, S. W. and Nemani, R. R. (2000). Parameterization and sensitivity analysis of the Biome-BGC terrestrial ecosystem model: net primary production controls. *Earth Interactions* 4, 1-85.

## TUDOMÁNYOS PUBLIKÁCIÓK A DISSZERTÁCIÓ TÉMÁJÁBAN

- Barcza, Z., Haszpra, L., Somogyi, Z., Hidy, D., Churkina, G., Horváth, L., Lovas, K., (2009). Estimation of the biospheric carbon dioxide balance of Hungary using the BIOME-BGC model. *Időjárás* 112.
- Barcza, Z., Haszpra, L. and Hidy, D. (2008). A felszín-légkör szénforgalom mérése mikrometeorológiai módszerrel. 32. Meteorológiai Tudományos Napok. Budapest, Országos Meteorológiai Szolgálat.
- Barcza, Z., Haszpra, L., Hidy, D., Churkina, G. and Horváth, L. (2008). Magyarország bioszférikus szén-dioxid mérlegének becslése. *Klíma-21 füzetek* 52, 83-91.
- Barcza, Z., Haszpra, L., Hidy, D., Iványi, Z., Kern, A., Kondo, H., Saigusa, N., Szabó, T., Tarczay, K. and Yamamoto, S. (2005). Carbon dioxide exchange monitoring and research programs at the Hungarian tall tower site. International Workshop on Advanced Flux Network and Flux Evaluation. Tsukuba, Japan, Workshop Organizing Committee.
- Barcza, Z., Haszpra, L., Tarczay, K., Hidy, D., Szabó, T., Kondo, H., Saigusa, N. and Yamamoto, S. (2004). Szén-dioxid mérleggel kapcsolatos kutatások Hegyhátsálon. (előadás/oral presentation). Magyar Meteorológiai Társaság Róna Zsigmond Ifjúsági Körének ülése. Budapest.
- Barcza, Z., Bondeau, A., Churkina, G., Ciais, P., Czóbel, S., Gelybó, G., Grosz, B., Haszpra, L., Hidy, D., Horváth, L., Machon, A., Pásztor, L., Somogyi, Z. and Van Oost, K. (2010). Modeling of biosphere-atmosphere exchange of greenhouse gases – Model based biospheric greenhouse gas balance of Hungary. In: Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective L. (ed.: Haszpra), Springer (in print).
- Bartholy, J., Pongrácz, R., Barcza, Z., Haszpra, L., Gelybó, G., Kern, A., Hidy, D., Torma, C., Hunyadi, A. and Kardos, P. (2006). A klímaváltozás regionális hatásai: a jelenlegi állapot és a várható tendenciák. *Földrajzi Közlemények* 55, 257-270.
- Haszpra, L., Barcza, Z. and Hidy, D. (2005). A légköri szén-dioxid és az éghajlat kölcsönhatása. (előadás/oral presentation) 31. Meteorológiai Tudományos Napok. Budapest.
- Haszpra, L., Barcza, Z. and Hidy, D. (2006). A légköri szén-dioxid és az éghajlat kölcsönhatása. 31. Meteorológiai Tudományos Napok 2005 Budapest, Országos Meteorológiai Szolgálat: 175-184.
- Haszpra, L., Barcza, Z., Hidy, D., Szabó, T. and Tarczay, K. (2005). Tall tower carbon budget monitoring and research programs in Hungary. Extended abstracts of the 7th International Carbon Dioxide Conference. Broomfield, Colorado, 481-482
- Haszpra, L., Barcza, Z., Hidy, D. and Szilágyi, I. (2009). Trends and temporal variations of major greenhouse gases at a rural site in Central Europe. *Atmospheric Environment* 43.

- Haszpra, L., Barcza, Z., Hidy, D. and Tarczay, K. (2007). Quarter century of atmospheric CO<sub>2</sub> monitoring and research in Hungary. *CarboEurope-IP Annual Meeting*, Poznan, Poland.
- Haszpra, L., Barcza, Z., Hidy, D. and Tarczay, K. (2007). Quarter century of atmospheric CO<sub>2</sub> monitoring and research in Hungary. *CarboEurope-IP Annual Meeting*. Poznan, Poland.
- Hidy, D. (2007). A bioszféra és a légkör közötti szén-dioxidcsere modellezése a BIOME-BGC modell segítségével. (előadás/oral presentation). *Carbon Pro konferencia (CARBON balance drafting and new resources management tools according to Kyoto PROtocol)*. Budapest.
- Hidy, D., Barcza, Z. and Haszpra, L. Magyarországi gyepek szén-dioxid háztartásának modellezése Biome BGC modellel. (előadás/oral presentation). *Meteorológiai Tudományos Napok*.
- Hidy, D., Barcza, Z., Haszpra, L. and Churkina, G. (2006). Gyepek szén-dioxid forgalmának modellezése. *Légkör 51*, 33-36.
- Hidy, D., Barcza, Z., Haszpra, L., Churkina, G. and Trusilova, K. (2007). Parameter estimation for grassland carbon cycle using nonlinear inversion of Biome-BGC. *Cereal Research Communications 35*, 453-456.
- Hidy, D., Haszpra, L., Barcza, Z., Churkina, G., Trusilova, K. and Tomelleri, E. (2006). Bayesian calibration of the Biome-BGC C3 grass submodel. *Geophysical Research Abstracts*. Vienna, Austria.
- Hidy, D., Haszpra, L., Barcza, Z., Vermeulen, A. and Nagy, Z. (2009). Modeling of carbon isotope discrimination by vegetation. *Photosynthetica 47*, 457-470.
- Hidy, D., Machon, A., Haszpra, L., Nagy, Z., Pintér, K., Churkina, G., Grosz, B., Horváth, L. and Barcza, Z. (2010). Modeling of biosphere-atmosphere exchange of greenhouse gases – Grasslands. In: *Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective L.* (ed: Haszpra, L.), Springer (in print).
- Somogyi, Z., Hidy, D., Gelybó, G., Barcza, Z., Churkina, G., Haszpra, L., Horváth, L., Machon, A. and Grosz, B. (2010). Modeling of biosphere-atmosphere exchange of greenhouse gases – Models and their adaptation. In: *Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective L.* (ed.: Haszpra, L.), Springer (in print).
- Tarczay, K., Hidy, D., Szabó, T., Haszpra, L. and Barcza, Z. (2005). New tools to study the biosphere/atmosphere CO<sub>2</sub> exchange in Hegyhátsál. *Geophysical Research Abstracts*. Vienna, Austria.