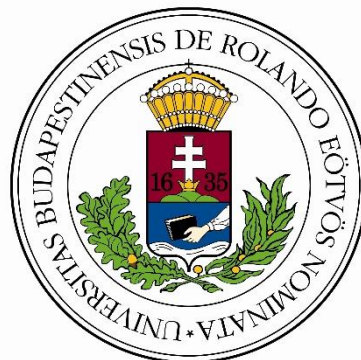


Ökoszisztémák CO₂-fluxusának klimatikus vizsgálata és modellezése FLUXNET-adatsorok alapján

**SZAKDOLGOZAT
FÖLDTUDOMÁNY ALAPSZAK
METEOROLÓGIA SZAKIRÁNY**



**Készítette: Nagy Domonkos
Témavezető: Dr. Pongrácz Rita**

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudomány Intézet
Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2018.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
1.1. Szén-dioxid a légkörben	3
1.2. A bioszféra	6
1.3. Sejtlégzés, fotoszintézis és fotorespiráció	6
2. A CO ₂ -fluxus mérése	9
2.1. FLUXNET	10
2.2. Eddy-kovariancia módszer	11
2.3. MÉRŐÁLLOMÁSOK ÉS MŰSZEREK	16
2.4. Footprint analízis	18
3. Modellezés	21
3.1. Light use efficiency modellek	23
3.2. Ökoszisztéma folyamatmodellek	26
3.3. Empirikus, távérzékelési modellek	29
3.4. Machine-learning algoritmusok	33
4. Éghajlati tényezők hatása	36
5. Összefoglalás	44
Köszönetnyilvánítás	44
Irodalomjegyzék	44

1. Bevezetés

Földünk egy rendkívül komplex rendszer, melyen Naprendszerünkben egyedülálló módon a víz mindhárom halmazállapotban, természetes körülmények között megtalálható, s ez tette lehetővé az élet létrejöttét nagyjából 3,2 milliárd évvel ezelőtt. Azóta a bolygó szilárd felszíni és felszínközeli szférái változatos és összefonódó folyamatokkal, egymással összhangban tartják fent az élethez szükséges feltételeket (Lovelock és Margulis, 1974). A víz mellett különböző elemek is folyamatos körforgásban vesznek részt, miközben fizikai és kémiai átalakulásokon mennek keresztül. A kétatomos nitrogénmolekula (N_2), a földi légkör leggyakoribb eleme, amely atomjai között a természetben ismert egyik legerősebb kötés alakult ki, mikrobiális reakciók folyamán elveszíti háromszoros kovalens kötését és ammónia (NH_3) formájában a talajba kerülve, majd onnan felszívódva az élet szerves részévé válik. A Föld szénelapú életformák otthona. Az összes földi eukarióta és a legtöbb prokarióta élőlény légzése során szén-dioxidot használ fel vagy bocsát ki. Megannyi esszenciális folyamat, megannyi ismert és ismeretlen változó és konstans, mely az egyenlet két oldala közötti egyensúlyt igyekszik fenntartani. A földi élőlények egytől-egyig kisebb-nagyobb hatással vannak ezekre a folyamatokra, azonban mind közül az ember alakította legnagyobb mértékben a környezetét, mindezt az elmúlt 400.000 évben. A tűz hasznosításától kezdve a föld megművelésén át a jégeső elhárításig számos találmány és tevékenység alakította ki az ember számára kedvezőbb életteret, sajnos gyakran figyelmen kívül hagyva a lehetséges káros következményeket.

1.1. Szén-dioxid a légkörben

A 18-19. század fordulóján lezajlott ipari forradalom óta az ember által a légkörbe juttatott szén-dioxid, metán és további szerves nyomgázok emberemlékezet óta nem tapasztalt változást hoztak a légkör összetételében. Antarktisi jégfuratok elemzése rámutatott, hogy az elmúlt 800.000 évben nem volt ilyen magas a szén-dioxid koncentráció (Luthi et al., 2008), és proxy-adatok sejtetik, hogy az elmúlt 500 millió évben csak néhány alkalommal emelkedett meg szignifikánsan a szén-dioxid koncentrációja (Folland et al. 2001). Ráadásul ezen időszakok némelyike egybe esik a földtörténet nagy kihalási eseményeivel, például a késő-permi-kihalással (nagyjából 250 millió éve), melyet a földtörténet legsúlyosabb biodiverzitási katasztrófájának tart a tudós társadalom. A nagy kihalás elnevezés is erre utal, mivel a fajok 84-95%-a elpusztult (Knoll et al., 1996). Másik hasonló eset, az ún. Ordovícium-Szilur kihalási esemény (450-440 millió éve) egyik fő kiváltó oka feltehetően a maitól 14-szer nagyobbra emelkedett CO_2 -koncentráció (Crowley és Baum, 1995).

Ugyanakkor az élet megjelenése előtt, az Archaikumban (körülbelül 3,3-2,3 milliárd éve) a fenti időszakokhoz viszonyítva még sokkal nagyobb mennyiségű szén-dioxid volt jelen az atmoszférában, a légkör mintegy 10%-a szén-dioxidból állt. Az őslégkörben a szén-dioxid jelenléte szükséges feltétel volt a fotoszintetizáló életformák kialakulásához [1- Az élet fejlődéstörténete elektronikus jegyzet]. A szén-dioxid egy fontos üvegházhatású gáz, vagyis olyan hullámhosszon képes elnyelni az elektromágneses sugárzást, ami (részben) egybeesik a Föld hőmérsékleti sugárzásának hullámhosszával. A CO₂ abszorpció maximuma nagyjából 15 μm-nél található. Ennek hatására a légkör csapdába tudja ejteni az egyébként a világűrbe diffundáló hőt. Hatásfoka alapján nem, azonban mennyisége alapján a víz mellett a második legjelentősebb üvegházgázként tartjuk számon a szén-dioxidot. Üvegházhatású gázok nélkül bolygónk átlaghőmérséklete mintegy 30 °C-kal lenne kevesebb, ami ellehetetlenítené az életet a Földön. Az üvegházhatású gázok hozzájárulását az üvegházhatáshoz a sugárzási kényszerrel számszerűsíthetjük. Egy adott mennyiségű üvegházhatású gáz sugárzási kényszere alatt azt a hőenergia-különbséget értjük, amely a gáz jelenléte miatt a bolygó energia-egyensúlyában megjelenik. Mértékegysége W/m². A vizgőzt leszámítva a üvegházgázok teljes sugárzási kényszere átlagosan 2,83 W/m², melyből a légköri szén-dioxid sugárzási kényszere átlagosan 1,82 W/m² (Myhre et al. 2013), tehát a légköri CO₂ a vizgőztől eltekintve a maradék üvegházhatás 64%-áért felelős. A szén-dioxid koncentráció emelkedésének jelentőségét mutatja, hogy 1994-ben ez az arány csak 45% volt. (Haszpra, 1996)

A CO₂ jól el van keveredve a légkör alsó rétegeiben, de területi eloszlása nem homogén. Jellemzően az északi félgömbön nagyobb mennyiségben van jelen, hiszen az antropogén emisszió itt sokkal intenzívebb, elsősorban a legnagyobb ipari területek jelenléte miatt. Az elégetett fosszilis anyagok a legmeghatározóbb forrása a légköri szén-dioxidnak [2- Carbon Tracker, 2016]. A két félgömb között az átkeveredés az Egyenlítőnél lévő összeáramlási zóna miatt csekély. A fent említett okok miatt figyelmesen kell megválasztani a CO₂-koncentráció éves átlag input adatait. Szükséges feltétel, hogy a mintavételezés a National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) vagy Earth System Research Laboratory (ESRL) hálózat olyan mérőállomásán történjen, amelyik óceáni határrétegben fekszik. Ezek legtöbbször távoli, tengerszinten elhelyezkedő állomások, ahol az uralkodó szél a szárazföld felől fúj. Így a minta elegendően nagy térfogatot reprezentál a légkörből. Olyan állomásokat, amelyek nagy tengerszint feletti magasságban, illetve antropogén források és nyelők közelében helyezkednek el, nem vesznek figyelembe az átlagoláskor. A szűrés után magmaradt 43 állomás hetente vett mintasorait külön-külön megvizsgálják (Conway et al. 1994; Troler et al. 1996). A hosszútávú

trend közelítése érdekében állomás-specifikusan meghatározott fokszámú polinomiális és harmonikus függvényeket illesztnek a mért értékekre (Thoning et al., 1989).

$$f_{STA}(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + \sum_{k=1}^4 [b_{2k-1}\sin(2\pi kt)] + b_{2k}\cos[(2\pi kt)] \quad (1)$$

Ahol a_0, a_1, a_2 a három polinomiális, $b_i (i = 1, \dots, 8)$ pedig az összesen nyolc harmonikus paramétert jelöli.

$$r_{STA}(t) = c_{STA}(t) - f_{STA}(t), \quad (2)$$

ahol c_{STA} a méréseket jelöli. Az r_{STA} függvény félérték-szélességét küszöbértéknek véve¹ szimmetrikusan simítjuk r_{STA} -t, 40 napos időintervallumon. Az így kapott

$$S_{STA}(t) = f_{STA}(t) + \{r_{STA}(t)\}_{40nap} \quad (3)$$

simított egyenletet értékeit súlyozottan átlagolják az állomás földrajzi szélessége szerint, majd interpolációs eljárással háromdimenziós (idő, szélesség, koncentráció) ábrát készítenek, melyből meghatározható (többek között) az éves átlagos CO₂ koncentráció (Masarie és Tans 1995).

A szén-dioxid koncentrációja a NOAA adatai alapján, 2016-ban átlagosan 402.8 ppm, egy évvel korábban 399.41 ppm, 2010-ben pedig átlagosan 388.56 ppm volt [3- NOAA]. Az emelkedő trend vitathatatlan (az összefüggése a globálisan emelkedő átlaghőmérséklettel szintén), azonban a szezonális változékonyságot megfigyelve észrevehető fluktuáció is (Keeling, 1960). Különböző mérőállomásokról, időben folytonos mérésekből származó CO₂-koncentráció idősorokat elemezve Charles D. Keelingnek feltűnt, hogy a téli félévben a szén-dioxid mennyisége megnő, majd nyáron lecsökken, az éves átlagértékek pedig emelkednek. Ezt az éves menetet és a kapcsolódó tendenciát Keeling-görbének nevezik.

Az éves szinten 5-6 ppm mértékű oszcilláció, májusi maximummal és októberi minimummal, részben a szárazföldi vegetációs ciklusnak tulajdonítható (Ciais et al. 1995, Keeling et al. 1996). A szén-dioxid egyik legjelentősebb nyelője (a világóceán mellett) a szárazföldi növényzet és az óceáni mikrobiális ökoszisztémák. A tenyészidőszakban (más szóval vegetációs periódusban) a növényzet általánosságban CO₂-t von el a környezetétől a fotoszintézis révén, így a légkörben kevesebb lesz. Majd ősszel amikor a növények lehullajtják a leveleiket a légkörben megnövekedik a szén-dioxid mennyisége. Amikor az északi félgömbön nyár van, akkor a délin tél, így a globális éves menet elsősorban az északi és a déli félgömb

¹ full width at half maximum (FWHM) módszerrel, low-pass filterrel a magas frekvenciájú jeleket gyengítve

eltérő növény-borítottságával magyarázható. A déli féltekén jóval kevesebb a szárazföld, így nyáron kisebb növényzettel kénytelen kompenzálni az északi félgömb telén hiányos nyelő folyamatokat, ezáltal kialakul a jellegzetes éves menet.

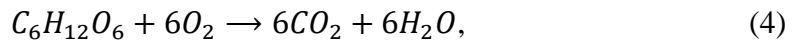
1.2.A bioszféra

A bioszféra nem csak szárazföldi növénytársulásokat foglalja magába. Beletartoznak a földben található mikroorganizmusok, a földfelszín felett élő állatok, így az ember élettere is (melyet antroposzféraként különíthetünk el), illetve a tengerek, óceánok lakói is. Ezáltal a felszíni geoszférák bizonyos részei hozzátartoznak, a hidroszféra, a troposzféra, a kéreg felső, termékeny része, a pedoszféra és a krioszféra is. Ökoszisztémának nevezzük az olyan biológiai rendszereket vagy csoportosulásokat, amelyek tagjai egymással kapcsolatban, egymás mellett élnek. Az ökoszisztémák létrejöttét, fennmaradását meghatározó tényezők között vannak biotikus (élő, szerves létformákkal összefüggő) és abiotikus (élettelen, pl. éghajlati) tényezők. A lokális ökoszisztémákat regionális ökorégiókba, azokat földrajzi ökozónákba sorolhatjuk, illetve ökológiai szempontból globális elterjedésű biomokba csoportosíthatjuk. Sok különféle osztályozási rendszert vezettek be a 20. században, azonban ezek között nagy mértékű a hasonlóság. Az osztályozások abiotikus hatásokként figyelembe vették a térségre hulló éves csapadék mennyiségét vagy annak éves eloszlását, az átlaghőmérsékletet vagy annak éves menetét, esetleg sugárzási összeget, illetve a biotikus tényezők közül a vegetáció (és a talaj) típusát. Az éghajlati tényezők alapvetően határozzák meg egy bizonyos ökoszisztéma viselkedését. Ezért nem meglepő, hogy a különböző biomok elterjedési mintázata nagy mértékben összevethető a klímabesorolásokkal akár például a Trewartha-féle, akár a Köppen-féle osztályozás szerint.

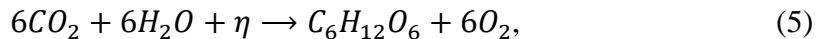
1.3.Sejtlégzés, fotoszintézis és fotorespiráció

Minden egyes élőlénynek a Földön szüksége van szénre, melyet kétféle - autotróf és heterotróf - módon tud megszerezni. A heterotróf élőlények (ilyen az összes állat- és gombafaj) táplálkozás útján végzik a szerves szén felvételét. Autotrófnak nevezünk egy organizmust, amikor a levegő szén-dioxid molekuláit képes más, bonyolultabb szerves anyagokká átalakítani. Így működik az összes növény és a legtöbb mikroorganizmus. A szerves anyaggá váló átalakítás történhet (a) kemoszintézissel - akkor kemotróf organizmusról beszélünk-, illetve (b) fotoszintézissel - melyet a fototróf szervezetek végeznek. Az előállított szerves anyag (glükóz formájában elraktározva) a szervezet a sejtjeinek táplálására fordítódik, melyet az életműködés során elégetve (biológiai oxidáció) újra kibocsát a környezetébe a sztomákon (gázcserenyílásokon) keresztül, CO₂ és víz formájában. Ezt a folytonos folyamatot sejtlégzésnek

vagy respirációnak nevezzük és a növény (élőlény) az összes élő sejtjét így építi fel és tartja fent.



A növény a fotoszintézis során képes a Nap sugárzási energiáját kémiai energiává konvertálni, eközben szén-dioxidból és vízből glükóz és oxigén keletkezik. A folyamat nettó egyenlete:



ahol η a (nap-) sugárzásból származó foton. A folyamathoz szükséges sugárzási energiát a növény ún. kloroplasztiszaiban található klorofill-a és klorofill-b pigmentek képesek elnyelni, az abszorpciójuk rendre 400-500 nm között (kék szín), illetve 600-700 nm (sárga-vörös) között jelentős. Ezért látjuk zöldnek a növényeket, mert a spektrum azon szeptében visszaverik a rájuk eső fényt. A fotoszintézist alapvetően két szakaszra lehet osztani, egy fényfüggő ún. fényszakaszra, és egy fénytől független ún. sötétszakaszra. A fényszakaszban a fényenergia felhasználásával a kloroplasztiszok oxidálják a vizet, és így oxigén, valamint nikotinamid-adenin-dinukleotid (NADPH) és adenzin-trifoszfát (ATP) keletkezik. A sötétszakaszban, a szén-dioxid redukciója történik szénhidrátokká, és ehhez a fényszakaszban termelődött NADPH és ATP használódik fel. A fényszakasz a kloroplasztiszok membránjaihoz kötött folyamat, míg a sötétszakasz a sztómában zajlik (Pálfia és Kristóf, 2013). Megjegyzendő, hogy a forró és száraz környezetben élő növények, alkalmazkodva az éghajlathoz, átalakították a metabolizmusukat és C3-as típusú fotoszintézis helyett C4-es vagy CAM-fotoszintézissel működnek, melyek ellenállóbbak a klimatikus viszonyokkal szemben.

A két szakaszon belül sok kémiai reakció és enzimikus folyamat által sokféle anyag keletkezik és kerül felhasználásra, ezért a fotoszintézis rendkívül érzékeny a környezeti hatásokra. Ha nem megfelelő mennyiségű víz áll rendelkezésre, vagy magas hőmérséklet miatt a vízvesztést megelőzendő a sztómák bezáródnak, az oxigén koncentrációja megnő a sejtekben, beindul a fénylégzés (fotorespiráció) folyamata, mely a már korábban fixált szén elvesztésével jár. Hasonlóképpen, a túl nagy mennyiségű sugárzás felboríthatja a O_2/CO_2 egyensúlyt így a beérkező sugárzást nem képes hasznosítani a növény, hanem a felgyülemlett oxigént glükóz lebontásával kénytelen kompenzálni. Ezáltal a növényzet a neki nem ideális éghajlati viszonyok mellett, csökkentett fotoszintézis esetén, a sejtlegzés és a beinduló fotorespiráció hatására kevésbé hatékony nyelője, bizonyos helyzetekben forrása is lehet a légköri szén-dioxidnak.

Ezen dolgozat céljai az alábbiakban összegezhetők:

- (1) betekintést nyújtani a bioszféra és az atmoszféra közötti CO₂-forgalom mérésének és modellezésének folyamataiba és problémáiba;
- (2) bemutatni a változó klimatikus tényezők által, a különböző földrajzi területeken elterülő, de hasonló éghajlati tulajdonságokkal rendelkező ökoszisztémák közötti hasonlóságokat és különbségeket;
- (3) egy átfogó képet alkotni Földünk egyik legmeghatározóbb körforgásáról.

2. A CO₂-fluxus mérése

A növényzet szén-dioxid fluxusának (áramának) mérése rendkívül bonyolult feladat. Ahhoz, hogy pontosan meg tudjuk határozni a tényleges, növénytest által a légkörből kivont CO₂ mennyiségét, illetve az emissziót, a sztómákra szerelt műszerekkel lehetne kellő pontossággal meghatározni, azonban ehhez szükséges technológia még nem áll rendelkezésre. Ráadásul a szén-dioxid az ökoszisztémán belül is körforgásban vesz részt. A növény által beépített szén egy része a talajra hullik (lombhullás), ahol különböző mikroorganizmusok használják fel, illetve a talaj raktározza el. A talajban élő szervezetek a légzésük révén CO₂-t emittálnak a talajba, ami később a légkörbe diffundál, illetve a szén-dioxid a talaj mélyebb rétegeibe szivároghatva meghatározó szerepet kap a talajvíz pH-jának kialakításában.

Mindezek tudatában sokkal célravezetőbb nem a vegetáció, hanem a teljes ökoszisztéma szén-dioxid forgalmáról beszélni és azt számszerűsíteni. Felmerül azonban egy másik probléma is, ami nehezíti a rálátásunkat a bioszféra globális CO₂ fluxusára, nevezetesen az a tény, hogy csak diszkrét pontokban, telepített mérőállomásokon történik a mérés. Ennek megfelelően a nagyobb térségekre vonatkozó információ nem nyerhető ki közvetlenül. Éppen ezért rendkívül fontos, hogy mindegyik műszer mérési szempontból a legkedvezőbb helyre legyen felállítva, így megfelelően reprezentálva az adott térséget. Például a higanyos léghőmérőt napfénytől és légnedvességtől a lehető legjobban el kell zárni és 2 m magasságban kell elhelyezni, vagy a csapadékmérő környezetében nem lehet magas objektum (fa, épület stb.), ami esetlegesen felfogná a csapadékot. Bonyolultabb követelményeket kell teljesíteni például az evapotranszpiráció mérésekor (Bartholy et. al. 2013). Ebben a fejezetben látni fogjuk, a szén-dioxid-áram méréséhez milyen feltételeknek kell teljesülnie. A mérések nagy része sajnos hibával terhelt, melyet azonban kellő körültekintéssel és precíziós műszerekkel, illetve megfelelő utómunkálatokkal elhanyagolható nagyságúvá tehetünk.

Az űrtechnológia fejlődésének köszönhetően különféle távérzékelési módszerek is rendelkezésünkre állnak, például a NASA² EOS³ programjában használt Terra és Aqua műholdja, melyekkel az egész bolygó felszínét folytonosan fel tudjuk térképezni, azonban ehhez megfelelő kalibráció (minderről bővebben a következő fejezetben lesz szó).

Következőkben a FLUXNET globális kiterjedésű mérőhálózatát és adatasszimilációs folyamatait mutatom be.

² National Aeronautics and Space Administration, Nemzeti Repülési és Űrhajózási Hivatal

³ Earth Observation System: a NASA távérzékelési programja, célja a Föld feltérképezése

2.1. FLUXNET

A FLUXNET az egész bolygóra kiterjedt mikrometeorológiai mérőtorony hálózat, ami folytonosan méri a légköri állapotváltozókat, melyek a különféle anyagáramlások meghatározására szolgálnak. Ilyen a szélesség és -irány, légköri vízgőz-, szén-dioxid- és egyéb nyomgáz-koncentráció. 914 állomás tartozik jelenleg a FLUXNET-hez, mind a hét kontinensen. Ezek közül van, amelyik folyamatosan szolgáltat adatokat és van, amelyik bizonyos időintervallumokban működik vagy működött. A teljes hálózat számos regionális hálózatból (pl.: AmeriFlux, CarboEurope, AsiaFlux, OzFlux, ChinaFlux) épül fel és nagyjából 50 egyéb, előbbiektől független állomásból. A legészakibb állomás a Spitzbergákon (79° É), a legdélibb pedig az Antarktiszon, a Graham-földön (63° D) található.

A mérőhálózatnak számos funkciója van. Elsősorban megkönnyíti a szén-, víz- és energiaáram adatok gyűjtését, archiválását és rendezését. Meteorológiai, növényzeti és talajminőségi adatokat szolgáltat a tudományos társadalomnak. Az egységes protokoll biztosítja a mért adatok összehasonlíthatóságát térbeli és időbeli skálán. Az adatok publikusan elérhetők, szabadon felhasználhatók, továbbá a FLUXNET rendszer megkönnyíti, hogy a projektben résztvevő szakemberek és külső érdeklődők közötti információ átadást. Az átfogó célja pedig a Terra és Aqua műholdon működő MODIS⁴ szenzor által szolgáltatott adatok (pl. NPP⁵, párolgás, energia elnyelés, reflektancia) számítási és modellezési módszereink validációja. A gyűjtött adatok segítségével tudjuk számszerűsíteni és összehasonlítani az éves szén-cseré dinamikáját, a bioszféra vízkörforgását, nyomgázok térbeli és időbeli eloszlását. Ezek mellett képesek vagyunk mennyiségileg meghatározni a biotikus és abiotikus faktorok szén-dioxidra és vízgőzre gyakorolt globális skálájú hatását. A FLUXNET keretében rendelkezésre bocsátott mérések felhasználásával pontosítani tudjuk a nyomgázok talaj-növény-légkör modelljeit (Baldocchi et al. 2001).

A FLUXNET története visszanyúlik az 1990-es évekre, amikor különféle nyomgáz-koncentráció felméréseket végeztek (pl. FIFE, HAPEX, BOREAS), melyek különböző térségekre (Kansas környéki préri, Afrika szavanna övezetei, Kanada boreális erdei) fókuszáltak. 1995-ben, a FLUXNET elődje, az ún. La Thuile program egyik munkaértekezletén felmerült az igény egy egységes és globális rendszer kiépítésére. Már ekkor is számos állomás működött a La Thuile programnak köszönhetően, azonban ezek nagy része magánkézben volt, főleg lokális kutatások érdekében, átfogó koordináció nélkül. A projekt maga 1997-ben indult, a

⁴ Moderate Resolution Imaging Spectrometer: közepes felbontású képkészítő műszer,

⁵ Net Primary Production: nettó primér produkció, a növények gázcsere-folyamatainak eredő mérőszáma

NASA hathatós támogatásával, annak érdekében, hogy a MODIS szenzorok által szolgáltatott adatok számára valós validációs lehetőséget biztosítsanak. Számos szemináriumot tartottak, ahol a résztvevő tudósok megosztották egymással a méréseiket és megfigyeléseiket, megalakultak a regionális hálózatok. 2007-től az amerikai NSF⁶ támogatta a törekvéseket, ennek keretében számos tudományos központ és laboratórium felállította a saját mérőtornyát, például a Kennedy Űrközpont Floridában, a Berkeley Egyetem Kaliforniában, a Fermilab Illinois-ban vagy az Oak Ridge-ben található Nemzeti Laboratórium Tennessee-ben, melyet végül a FLUXNET adatközpontjává alakítottak.

Már a FLUXNET megalakulása előtt is számos technika és módszer létezett a bioszféra és atmoszféra közötti CO₂ csere folyamatok tanulmányozására. Globális és kontinentális skálán a szénforrások és -nyelők mennyiségi meghatározása érdekében CO₂-, ¹³C- (13-as szénizotóp) és O₂-koncentráció és a szélmező felhasználásával légköri inverziós modelleket alkalmaztak (Tans et al. 1990; Ciais et al. 1995; Denning et al. 1996; Fan et al. 1998). Ez a módszer azonban különböző hibákat okozott a nyomgáz-mérőállomások ritkaságából adódóan és amiatt, hogy azok elhelyezkedése az óceáni határreteg mentén az adatok torzulásához vezetett. További problémát jelentettek a légköri transzport folyamat-modellek hiányosságai is (Tans et al. 1990; Denning et al. 1996; Fan et al. 1998). Regionális kiterjedésű repülőgépes eddy kovariancia alapú fluxussűrűség-méréseket végeztek (Crawford et al. 1996; Desjardins et al. 1984, 1997). Ezek ugyan jó pontossággal szolgáltatott információkat a szén- és vízáramok térbeli szerkezetéről, azonban nem eredményeztek megfelelően elemezhető idősorokat és a fiziológiai mechanizmusokba való betekintést sem könnyítették meg.

2.2. Eddy-kovariancia módszer

A felszíni mérőállomásokról származó adatokra eddy-kovariancia módszert alkalmazva lehetővé vált a bioszféra és a légkör közötti nettó víz- és szénfluxus közvetlen mérése (Baldocchi et al., 1988; Foken és Wichura, 1996; Aubinet et al. 2000). Hosszabb (napi, évszakos és éves) időskálákon képes volt mérni tömeg- és energiaáramot. További pozitívuma az eddy-kovariancia módszernek, hogy relatív nagy területekről tud mintát vételezni, a műszerrendszer magasságának függvényében akár 600-1000 méter átmérőjű is lehet a mért ökoszisztéma (Pintér et al., 2007). Mivel a FLUXNET egy globális és egységes mérőhálózáttá fejlődött ki, így az eddy-kovariancia módszer segítségével lehetőség nyílt az ökoszisztémák éghajlati változásokra

⁶ National Science Foundation: Nemzeti Tudományos Alap

adott válaszainak számszerűsítésére. Ez a módszer kiegészítheti a légminta-gyűjtő módszert, melynek kritériuma, hogy tengermenti környezetből kell a mintát venni (Tans et al., 1990).

Az eddy-kovariancia módszer egy mikrometeorológiai közelítés, mely statisztikus és folyadék-dinamikai alapokon nyugszik. A mezoskálájú felszínközeli légköri áramlások egytől-egyig felbonthatók számos, különböző méretű örvényre (angolul eddy). A magasabb rétegekben, az anyagáram túlnyomó részéért felelős örvények nagyobbak. Mivel a nagyobb örvények lassabban forognak, ezért az anyagszállítást végző légmozgások alacsony frekvenciájúak. Közel a felszínhez pedig kisebb örvények biztosítják az anyag áramlását. Ezek gyorsabban forognak, tehát a felszín közelében az anyagáramlás magas frekvenciájú örvények segítségével megy végbe. Szorosan összefügg az örvények mérete és életideje. A nagyobb örvények hosszabb ideig maradnak fenn, a kisebbek hamarabb halnak el. (Stull, 1988).

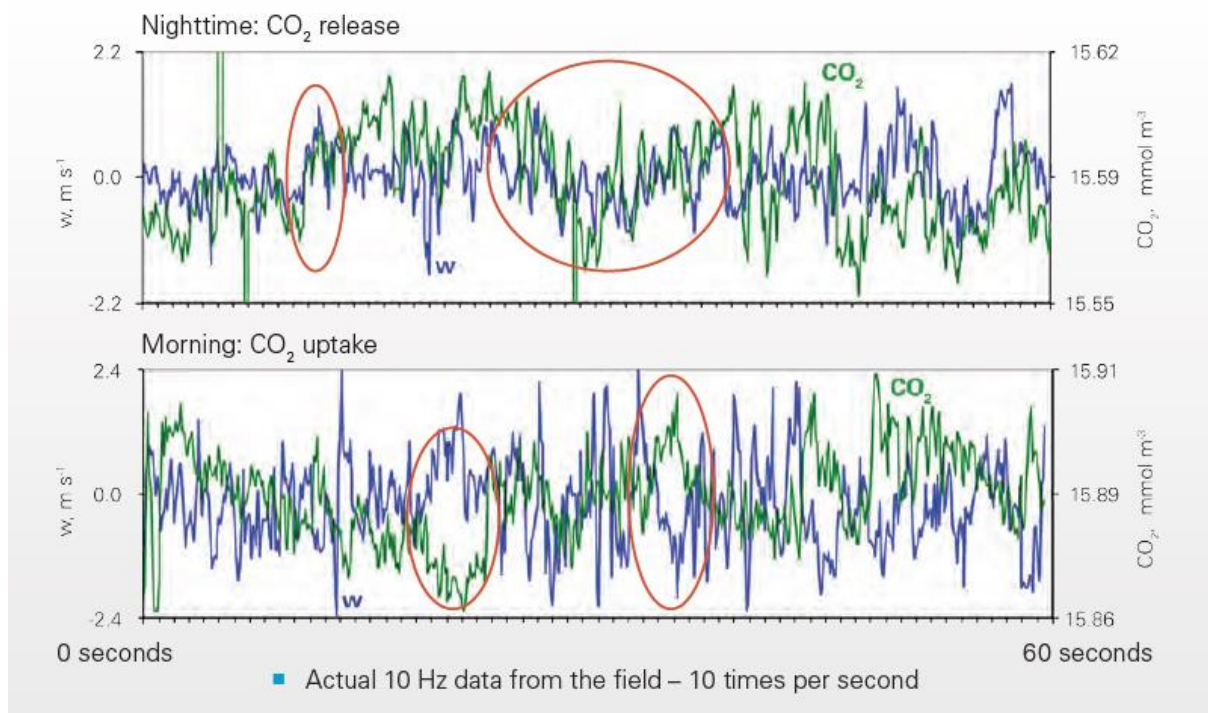
A növényzet életműködése közben környezetének leadhat vagy tőle elvehet különféle gáz molekulákat. Az anyag többletet (vagy hiányt) a különböző örvények elszállítják. Ez mérhető megfelelő érzékenységgű gázanalizátorral, illetve a gázmolekulák gyors mozgása szonikus anemométerrel (a műszerekről és azok installálásáról 2.3. és 2.4. alfejezetben lesz szó). Így, a mikroskálájú vertikális sebesség és a kérdéses gáz (lehet CO₂, H₂O, O₃ stb.) keverési arányának nagy frekvenciájú mérésével (10-20 Hz) meghatározható a műszer magassága által kijelölt, a földfelszínnel párhuzamos egységnyi felületen időegység alatt átáramló anyag mennyisége.

A vertikális sebesség w pozitív, ha feláramlás van, és negatív, ha lefelé irányul a mozgás. A számítások során a másodpercenként 10 vertikális sebesség és koncentráció mérés által formált két idősor kovarianciáját vizsgáljuk. A kovariancia az a mérték, ami megmutatja, hogy két adatsor (idősor) változásai mennyire hasonlítanak egymáshoz, vagyis amikor az egyik adatsor értéke bizonyos mértékben eltér az átlagtól, akkor a másik milyen mértékben változik, és a változás milyen természetű. Negatív kovariancia egymással ellentétes változásra utal, és minél kisebb abszolútértékben a kovariancia, annál kisebb a hasonlóság. Egy adatsor saját magával vett kovarianciája az adatsor szórásnégyzete. A kovariancia képlete az alábbi módon írható fel:

$$Cov(X, Y) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [(X_i) - \underline{X}](Y_i - \underline{Y}) \quad (6)$$

ahol N a mintavételek száma, X_i , Y_i az adatsorok i -edik eleme, \underline{X} , \underline{Y} pedig az adatsorok átlaga (ebben az esetben várható értéke is).

Az 1. ábrán két, egy perc hosszúságú szinkronizált vertikális sebesség és CO₂ moláris sűrűség mérési grafikonja látható. A felső részen egy éjszakai időszak szerepel. Ilyenkor a növényzet nem fotoszintetizál, így a respiráció révén szénvesztést szenved. Látható, hogy sok alkalommal, a felfelé mozgó levegő magasabb CO₂ tartamú. Bár a kovariancia nem túl erős a gyenge éjszakai fluxusok miatt, a pirossal jelölt időszakokban jól érzékelhető, mind a magas (bal oldali), mind az alacsony (jobb oldali) frekvenciájú örvények esetén. A kovariancia előjele pozitív és a szén-dioxid-áram a légkör felé mutat.



1. ábra Mikroskálájú vertikális sebesség (kék görbe, m/s) és CO₂ koncentráció (zöld görbe, mmol/m³) 1 perces időszora egy éjjeli (fent) és egy reggeli (lent) időszakból (Gurba, 2013)

Az 1. ábra második grafikonja egy reggeli időszakot mutat be. A felkelő nap sugarai miatt beindul a fotoszintézis, elnyomva a respirációt, így végeredményképpen a légkörből kikerül a CO₂. Itt is megfigyelhető a kovariancia a gyorsabb és lassabb örvények esetén, azonban itt sem túl erős. Ezesetben a CO₂ árama a légközből az ökoszisztéma felé mutat.

A mért turbulens áramlások vertikális w komponensének és a szén-dioxid sűrűségének szorzata megadja a pillanatnyi vertikális CO₂-áramsűrűséget:

$$F = w\rho_c, \quad (7)$$

ahol $[F]=\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, ρ_c pedig a CO₂ sűrűsége. F statisztikai analizéséből határozzuk meg a határfelületen átfolyó tömegek nettó különbségét. Kihasznlva, hogy a szén-dioxid keverési aránya

$$c = \frac{\rho_c}{\rho_a} \quad (8)$$

ahol ρ_a a levegő sűrűsége, (7)-et egy bizonyos időintervallumra átlagolva, (7) és (8)-ből megkapjuk

$$F = \underline{\rho_a w c} \quad (9)$$

Turbulens áramlatok tanulmányozása során a Reynolds felbontást (más néven Reynolds átlagot, Reynolds, 1895) alkalmazhatjuk, amely segítségével az áramlási egyenletet felírhatjuk a tagok átlaga (felülvonás) és a fluktuációi (vessző) produktumaként (10). Ezt követve a zárójeleket felbontjuk (11-12):

$$F = \underline{(\rho_a + \rho'_a)(w + w')(c + c')} \quad (10)$$

$$F = \underline{(\rho_a w c + \rho_a w c' + \rho_a w' c + \rho_a w' c' + \rho'_a w c + \rho'_a w c' + \rho'_a w' c + \rho'_a w' c')} \quad (11)$$

$$F = \underline{(\rho_a w c + \rho_a w' c' + w \rho'_a c' + \rho'_a w' c + \rho'_a w' c')} \quad (12)$$

További egyszerűsítések a hagyományos eddy-kovariancia egyenlet eléréséhez:

1. A levegősűrűség fluktuációját elhanyagoljuk ($\rho'_a \approx 0$), így a (12) egyenlet jobb oldalán a 3., 4. és 5. tag kiesik.
2. Abban az esetben, ha horizontálisan homogén felületnek tekintjük a földfelszínnel párhuzamos határfelületet (tehát homogénnek tekinthető a vegetáció, nincs jelentős domborzati változékonyság és nem számolunk a konvergens és divergens áramlatokkal) az átlagos vertikális anyagáramot is elhagyhatjuk ($w \approx 0$), ezáltal az első tag is kiesik.

A (12) egyenlet tehát a fenti egyszerűsítések után így néz ki:

$$F \approx \rho_a \underline{w' c'} \quad (13)$$

Az így kialakított, egyszerűsített eddy-kovariancia módszernek vannak gyengeségei. Csak akkor képes pontos információt produkálni, amikor a légköri állapotok kiegyensúlyozottak, különben jelentős szisztematikus hibát véhetünk azzal, ha elhanyagoljuk a levegősűrűség-változást, bizonyos időjárási helyzetekben pedig a vertikális sebességet is számba kell venni. Ez nagyban megnehezíti a számolást. Továbbá csak viszonylag sík területen alkalmazható, illetve olyan vegetáció esetén, amelynek a horizontális kiterjedése meghaladja a mérési magasság nagyjából százszorosát. Előbbi esetben a lejtő emelési hatása, utóbbi esetben

az érdes felszínű vegetáció által keltett turbulencia (és az ún. fluxus lábnyom lecsökkenése, lásd alább) vezet hibához. A torzulás elkerülése végett nem hanyagolhatjuk el a konvektív tagot sem.

Következésképpen, a módszer nem alkalmazható kellő pontossággal inhomogén növényzetű területeken, hegyvidéken vagy markáns határvonalat tartalmazó térségre (például tóparton). Amennyiben egy összetett vegetációt szeretnénk megvizsgálni vagy időben gyorsabban változó légköri állapotok esetén mérünk, figyelembe kell vennünk a légköri raktározást, fluxus divergenciát és advekciót. Az éjjel mért fluxus adatok bizonyos esetekben torzulhatnak, például amikor derült az ég, illetve a szelek gyengék és időszakosak. Ilyen estén a talaj képes felvenni a szén-dioxidban gazdag felszínközeli levegő egy részét. Ez elsősorban a talajmenti inverziós határreteg megjelenéséből következik. A hosszuhullámú kisugárzás miatt a felszín gyorsan lehűl, és kialakul az erős hőmérsékleti inverzió, melyet gyakran köd kísér, s ebből a kicsapódó vízgőz könnyen rátelepedik a műszerekre. A stabil inverziós rétegen keresztül gyengébb az anyagáramlás. Ilyen esetekben tehát a mérések alábecsülhetik az ökoszisztéma respirációját (Baldocchi, 2003; Burba, 2013). A reggeli átmeneti időszak során a megrekedt CO₂ kiszabadul az instabil rétegződés megjelenésével, így a reggeli órákban jelentős többletet mutathatnak a mérések. Amennyiben a mérési szint az inverziós rétegben helyezkedik el, lehetséges a mérések korrigálása, azonban ennek során óvatosan kell eljárni (Haszpra et al., 2005). Számos közelítést alkalmaznak az éjszakai hiányzó adatok pótlására, például:

- Bevett gyakorlat hosszútávú mérések esetében, hogy az éjszakai adatokat egyszerűen elvetik, majd különböző kitöltési technikával pótolják (pl. Reichstein et al., 2005)
- Advekció esetén azonban az ún. u^* korrekció alkalmazása szükséges (Haszpra et al., 2005)

A szisztematikus hibák (torzulások) nem triviálisak, akár a szén-dioxid fluxus több mint 100%-át is kitehetik. A körültekintően kialakított és megfelelően karbantartott mérőállomás bizonyos mértékben csökkentheti a hibaszázalékot (lásd későbbiekben), azonban a hibák egy részét az adatok feldolgozásánál kell redukálni. A korrekciók egy része állomás specifikus a fentebb említett okok miatt. Az adatfeldolgozás előtt spektrális analízist végeznek, hogy megvizsgálják azt, hogy a műszerek milyen jól reagálnak és mennyire vannak szinkronban egymással. Ezt a főspektrum és a mellékspektrum „jóságának” vizsgálatával történik (Haszpra et al., 2005). Ezt az analízist hívjuk frekvencia válasz korrekcióknak. A frekvencia válasz korrekciók kompenzálják a változatos turbulens anyagszállítás frekvenciáiból adódó fluxus veszteséget. Számos különálló korrekció tartozik ebbe a csoportba (többek között a gázmolekula útátlagolása, szenzor szétválasztás, érzékelő reakcióidő).

2.3. Mérőállomások és műszerek

Az állomások felállítására vonatkozó legtöbb követelmény szorosan kapcsolódik az eddy-kovariancia módszer levezetésében foglaltakhoz. Lényeges feltétel, hogy a mérőállomás megfelelően reprezentálja a vizsgálandó ökoszisztémát. A domborzati viszonyokat tekintve kívánatos a homogenitás és a tágabb sík környezet annak érdekében, hogy az előzetes feltevések, illetve az utólagos korrekciók helytállóak legyenek. Nem utolsósorban az áramellátottság és a megközelíthetőség is szempont. Olyan állomásokon, ahol magas a napsütéses órák száma, napelemeket telepítenek, így biztosítják a műszerek energiaszükségletét, máshol igyekeznek elektromos hálózatok közelébe telepíteni az állomást. A különböző környezeti hatások (például hó vagy porvihar) komoly befolyással lehetnek a mérés pontosságára. A legtöbb helyszínen szükséges havonta karbantartást végezni, de ajánlott gyakrabban (Gurba, 2013).

Megfontolást igényel a torony magassága, illetve a műszerek elhelyezése rajta. A legoptimálisabb az ún. állandó áramlási rétegben, mely a növényzet magasságának másfélszerese felett helyezkedik el. Felette, nagyjából 100 m magasságban kezdődik a keveredési réteg. Az ezen magasságban mért gázsűrűség nem az alatt fekvő ökoszisztémát jellemzi, hanem regionális tulajdonságokkal bír. Az állandó áramlási réteg alatt található a súrlódási réteg. A növények tetejének közelében csak néhány egyed domináns hatását tudjuk megvizsgálni, így a mintavételezési tér leszűkül.

Fontos tényező még a torony elhelyezése a telephelyen belül. Az uralkodó szélirány hátoldalán kell felállítani, így effektívebb lehet a térség mikrometeorológiai feltérképezése. Abban az esetben, ha nincs uralkodó szélirány, a tornyot érdemes a terület közepére állítani, így a lehető legnagyobb lefedettséget biztosít és hatékonyabbá válik a mérés. A területen belül a műszerek üzembe helyezésére legalkalmasabb pont megtalálásához a footprint (forrásterület) analízis nyújt segítséget (lásd: 2.4. alfejezet).

A telephely megfontolt kiválasztása és az optimális mérési magasság meghatározása után felállíthatjuk a műszerparkot. Az eddy-kovariancia mérőállomásoknak két elengedhetetlen kelléke van: szonikus anemométer, és gázanalizátor. Mindkét műszernek és az egész rendszernek gyorsnak kell lennie, hogy másodpercenként tízszer tudjon mintát venni, illetve azokat ez idő alatt feldolgozni. A gázanalizátor általában a szélmérő szintjétől kicsit lejjebb helyezkedik el. Horizontálisan a műszerek távolságát a lehető legkisebbre kell csökkenteni (15-

20 cm maximálisan). Ha azonban a gázanalizátor túl közel van az anemométerhez, eltérítheti a levegő természetes áramlását.

A háromdimenziós szonikus anemométerek a hangsebességet mérik a beérkezési idő és a portok közötti távolság felhasználásával. A hang terjedési sebessége nyugvó levegőben pontosan ismert, melyet a mozgó közeg módosít, s ezt méri a szonikus anemométer. A kapott hangsebesség különbségből kiszámolható az áramló közeg sebessége, ebből pedig meghatározható a vertikális komponens, amit a további számításokban szükséges alkalmazni. A légkör alsó rétegeiben a hangsebességet elsősorban a hőmérséklet és a légnedvesség befolyásolja. Ezt a két tényezőt, illetve a műszertest által eltérített áramlatok hatását az adatok feldolgozásakor számításba kell venni. A szonikus anemométerek rendkívül ellenállóak, kis energiaigényűek. Csapadék vagy fagy meghosszabbíthatja az úthosszt, amit mérnek a műszerek, ez hibához vezet. Fontos, hogy a műszer által érzékelt horizontális sík a lehető legközelebb legyen a vízszinteshez. Ezt a problémát transzformációval ki lehet küszöbölni az adatfeldolgozásnál. Olyan állomásokon, ahol a műszer jóval a felszín felett van, például a hegyhátsági állomás, a mért szélmezt a lokális uralkodó széliránnyal párhuzamos rotációvektorral transzformálják, így megeshet, hogy az x- és y-tengely által meghatározott sík nem párhuzamos a felszín síkjával (Haszpra et al., 2005).

A gázanalizátorok a levegő összetételét vizsgálva határozzák meg a különböző gázok sűrűségét. Többfajta létezik (pl. kémiai, elektromos), azonban csak az optikai gázanalizátorok egy része képes 10 Hz-es mérési frekvenciával mérni (ún. gyorsanalizátorok). Ezeket két csoportba oszthatjuk: szélessávú és keskenysávú. Utóbbi csoportba tartozó készülékek spektroszkópiás technikákat használnak fel a méréshez. A fényelnyelést mérik az elektromágneses spektrum egy vékony sávjában. Előre beállított hullámhossznál különböző gázok fluxusait tudjuk vele mérni. A szélessávú analizátorok a levegő molekulái által elnyelt fényt vizsgálják az elektromágneses spektrum egy szélesebb sávjában. A szén-dioxid (és vízgőz) mérésénél leggyakrabban ún. nem-szóródó infravörös (non-dispersive infrared, NDIR) analizátorokat használunk, mert ezek a készülékek kellően gyorsak, hogy az előbb említett gázok elnyelési sávjait megfelelő frekvenciával vizsgálják, azonban olcsóbbak, mint a spektroszkópián alapuló társaik. A mérések során használt CO₂ elnyelési sáv 4,26 μm körül található. A műszer kibocsátja az infravörös sugárzást, majd egy négy szűrőből álló forgó rendszeren áthalad a sugárzás, átengedve 4,26 μm-es sávot. Majd a következő forgásnál egy referencia sávot (3,95 μm körül) enged át a szűrő. A nem elnyelt sugárzást a műszer a befogó

lencsével összegyűjti a detektorba, a kibocsátott és a befogott sugárzás különbségéből számolja ki a sűrűséget.

A mérésekhez használt gázanalizátorok között, a kialakítás szempontjából létezik nyitott (open-path), zárt (closed-path) és üreges (enclosed). A nyitott típusú esetén a levegőt a légmozgás juttatja a mérési térfogatba, míg az utóbbi két típus esetén egy apró turbina hajtja bele a levegőt a csőbe, melyben az elemzés végbemegy. A zárt típusú műszer egy hosszú csövön keresztül pumpálja a gázt a mérés helyére, ami alacsonyabban, leggyakrabban a torony lábánál helyezkedik el. Ennek következménye az, hogy a csőben könnyen összekeveredhet a mérendő anyag, illetve időbeli csúszások léphetnek fel, akár több másodperces is. A külső időjárási tényezők a zárt műszer esetén elhanyagolhatóak, a nyitott analizátorok viszont folyamatosan ki vannak téve az időjárás hatásának. Összességében mindkét típusú mérés esetén számos tényezőt kell figyelembe venni az adatok feldolgozása során. A legkorszerűbb a három közül, az üreges típusú gázanalizátor, mely a másik két típus erősségeit hordozza. Egyrészt a zárt a mérőtérfogat, így nem kell az időjárási hatások miatt korrekciót végezni, másrészt a cső lerövidült, így csökkent a keveredési hatás. A műszerbe hőmérséklet- és nyomásszenzor van beépítve, azonban a turbina jelenléte könnyen zavart okozhat a szélmező feltérképezésében. Ennek az eszköznek is vannak hiányosságai, ennek ellenére jelentősen könnyebb a mért adatok feldolgozása a fluxusok meghatározásához.

2.4. Footprint analízis

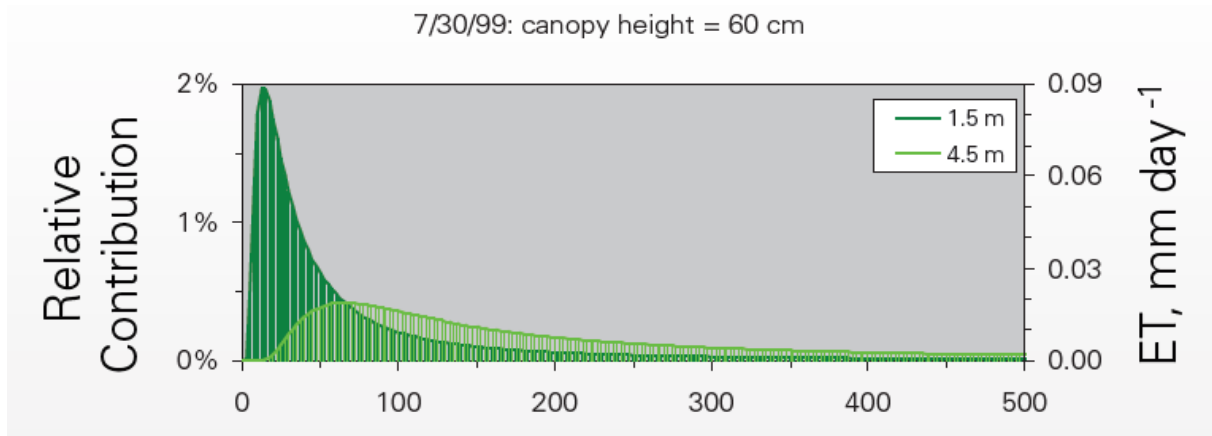
Az ún. footprint (forrásterület) az a terület, amelyen generált különböző anyagáramlásokat a műszerek érzékelni tudnak. Nagy mértékben befolyásolja a műszer magassága, a felszín érdessége és a hőmérsékleti stabilitás. Megjegyzendő, hogy összetettebb helyzetekben az analízis során további hatásokkal kell számolni (Schmid és Lloyd, 1999). Optimális esetben az ún. CNF⁷ értékével tudjuk számszerűsíteni a forrásterületet, ez a diffúziós egyenletből származtatható. Közel semleges időjárási helyzetben a CNF képlete (Schuepp et al. 1990).

$$CNF(x_L) = - \int_0^{x_L} \frac{U(z-d)}{u_* \kappa x^2} e^{-\frac{U(z-d)}{u_* \kappa x}} dx = e^{-\frac{U(z-d)}{u_* \kappa x_L}} \quad (14)$$

ahol x_L az állomástól vett távolság [m], U az átlagos szélsébség [m/s], z a műszermagasság [m], u_* a súrlódási sebesség [m/s], d a kiszorítási rétegvastagság [m] és κ a Kármán konstans (\approx

⁷ Cumulative Normalized contribution to Flux measurement: Fluxusmérésekhez való kumulatív normalizált hozzájárulás

0,4). A kiszorítási rétegvastagság az a magasság, ahol a logaritmikus szél formula alapján a szélmező zérus. Ez a szint a vegetáció magasságának nagyjából 70% ánál található.



2.ábra: A műszer előoldaláról (luf oldalról) beérkező látens hőáram értékek relatív hozzájárulása a méréshez a műszertől vett távolság függvényében (Burba, 2013, 125p.)

Ahogy a 2.ábrán is látszik, a z műszermagasság, és ebből következően a $(z - d)$ magasságkülönbség helyes megválasztása kulcsfontosságú. A grafikon egy adott állomás kétféle műszerinstallációját hasonlíthatjuk össze, ahol a növényzet magassága 0,6 m. 1,5 m magasságban ($z - d \cong 1,1 m$) a műszer szoros környezetét remek hatásokkal érzékeli, a görbe maximuma (2 %) nagyjából 12-18 m távolságban van, azonban így a napi evapotranszpiráció jelentős része a 80 m-es környezetből adódik. A 4,5 m magasból ($z - d \cong 4,1 m$) vett adatok ennek az ellenkezőjét mutatják. A hozzájárulás csúcsa a műszertől kb. 60-65 m-re található, az állomás 20-30 m-es körzetében nem érzékel fluxust, viszont az effektív mintavételezési tartománya jelentősen bővült, mintegy 400 m-re.

Hasonlóképpen a növényfelszín érdessége is befolyásolja a lenyomatot. Remek példa a felszín érdességének évközi változására a szántóföldeken az aratás. Egy durva felszín felett, 1,5 m magasan elhelyezett érzékelő a napi párolgási adatok jelentős részét a torony 80 m-es sugarából észleli, azonban a műszer 5 m-es körzetét nem érzékelt. Sima felszín felett mért napi párolgás effektív hozzájárulása a műszer 250 m-es körzetében és 10 m-es körzetben nem érzékelt fluxust (Gurba et al. 2001). 4,5 m magasan a 60 cm érdességű felszínt a mérés ideálisan reprezentálja. Érdes felszín feletti mérés esetén a magasság megválasztása kritikus, mivel az alacsonyabban végzett mérések esetén az érdesség hatása felerősödik. Ebből adódik, hogy számottevő érdességű felszínborítottság esetén érdemes magasabbra telepíteni a műszereket.

A légköri stabilitás is közrejátszik a forrásterület kiterjedésében. A stabilitást az emelési index (LI⁸) segítségével számszerűsíthetjük. Amikor az LI pozitív, a légkör stabil, amikor negatív, a légkör instabil helyzetben van. Semleges (neutrális) légkörről LI \cong 0 esetén beszélünk.

A mérőket 1,5 m magasba telepítve, 60 cm magas növényzet esetén:

1. Instabil légkörben a mérési terület beszűkül a torony közvetlen környezetére (kevesebb, mint 50 m);
2. Neutrális helyzetben 250 m-nél kevesebb a forrásterület sugara;
3. Stabil helyzetben akár 500 m sugarú is lehet.

Összegzésként elmondható, hogy a fluxus-mérés lenyomatának hatékonysága abban rejlik, hogy a mintavétellel a lehető legnagyobb területet legyünk képesek lefedni, továbbá, hogy az ökoszisztéma sajátosságaihoz idomulva a lehető legkevesebb utólagos adatkorrekciót kelljen alkalmazni. A műszerek magasságának emelésével növelhetjük a forrásterületet, azonban minél magasabbra helyezzük a műszereket, a torony környezete annál inkább kiesik a mérési gyűrűből, illetve annál több lesz az ökoszisztémán kívülről érkező zaj. A felszíni érdesség kiküszöbölése végett bizonyos magasságig a mérési magasságot emelhetjük. A légköri stabilitás szélsőségessége nagyban torzíthatja a mérés pontosságát. Erős instabilitás esetén a mintavétel tartománya nagymértékben lecsökken, a torony környezetében lévő zavaros területről érkeznek az adatok, így azokat korrigálni szükséges, alkalmanként az is előfordulhat, hogy a mért adatok nem vehetők figyelembe a nagy hiba miatt. Erős stabilitás esetén a túlságosan megnövekedett mérési felület miatt a készülék túl sok zajt érzékel a vizsgált ökoszisztémán kívülről, ezért az adatokat vagy korrigálni kell, vagy teljesen elhagyni. Az ideális beállítások mindig telep-specifikusak, azonban elengedhetetlen a térség alapos vizsgálata annak érdekében, hogy a megfigyeléshez kapcsolódó utómunkát megkönnyítsék.

3. Modellezés

Az eddy-kovariancia mérésekből származó szén-dioxid-áramok a teljes ökoszisztémából időegység alatt ki- és beáramló anyag mennyiségét jelölik. A mért értékeket tetszőleges időintervallumra integrálva megkapjuk a NEE⁹ értékét, mely az ökoszisztéma szénmérlegét jellemzi.

$$NEE = R_H + R_A - GPP \quad (15)$$

⁸ Lifted Index

⁹ Net ecosystem exchange, nettó ökoszisztéma kicserélődés [gC/m²]

A GPP^{10} azt mutatja meg, hogy a növényzet mennyi szenet képes megkötni a légkörből. A respiráció (R) két tagja a heterotróf (R_H) és autotróf (R_A) szervezetektől származik. Ebből a (15) képletből látszik, hogy abban az esetben, ha a fotoszintézis meghaladja a respiráció mértékét, az NEE értéke negatív lesz. Az NPP^{11} a növények nettó gázcsere folyamatait számszerűsíti ($NPP = R_A - GPP$). A GPP -t a (15) egyenlet alapján egy empirikus hőmérsékleti válaszfüggvénnyel modellezett respiráció és a mért NEE különbségeként kapjuk meg (Reichstein et al., 2005).

A növényzet tevékenységének az éghajlati változásokra adott válaszainak megértése kulcsfontosságú annak érdekében, hogy az ökoszisztémák sebezhetőségét és adaptációs lehetőségeit értékelni tudjuk (Zhao és Running, 2010). Az in situ mérések hiába adnak remek, időben folytonosnak mondható adatsort, térben erősen korlátozottak. Térben kiterjedt mérések elvégzéséhez távérzékelési eszközökre van szükség. A szárazföldi NPP műholdas becslésekor három elméleti támpont használatos: (1) a növényi NPP közvetlen kapcsolatban áll a növény által elnyelt sugárzási energiával, (2) az elnyelt napsugárzás összefügg a műholdas mérésekből származó vegetációs indexekkel, (3) bizonyos okok miatt a napenergia elnyelési hatékonysága az elméleti érték alá süllyed.

A PAR^{12} a napsugárzás azon spektrális része, amelyet a növényzet elméletben képes fotoszintézis formájában hasznosítani. Ez hivatalosan a 400-700 μm közötti tartomány, a beérkező teljes rövidhullámú sugárzás nagyjából 45%-a (Tang et al., 2015). Az elnyelt sugárzás az $APAR^{13}$ ami távérzékeléssel becsülhető (Sellers, 1987). Számos, műholdas adatokból számítható vegetációs indexet használhatunk, melyek közül a legelterjedtebb az $NDVI^{14}$, amit a felszín reflektanciájából származtatunk a vörös (red) és közeli infravörös (NIR) tartományon.

$$NDVI = \frac{NIR - red}{NIR + red} \quad (16)$$

$$FPAR = \frac{APAR}{PAR} \approx NDVI \quad (17)$$

Az $NDVI$ közvetlenül számszerűsíti a fotoszintézisre használható sugárzás arányát ($FPAR$).

¹⁰ Gross primary production, bruttó primer produkció [gC/m^2]

¹¹ Net primary production, nettó primer produkció [gC/m^2]

¹² Photosynthetically active radiation, fotoszintézisre használható sugárzás

¹³ Absorbed photosynthetically active radiation, elnyelt fotoszintézisre használható sugárzás

¹⁴ Normalized difference vegetation index, normalizált vegetációs index

Számos modellt fejlesztettek ki az elmúlt közel 50 évben a bioszféra széncsere folyamatainak megértése és előrejelzése céljából. Vannak közöttük egyszerű, empirikus következtetéseken alapuló egyenletek, mint például az úttörőnek számító Lieth és Whittaker (1975) globális NPP-re tett becslése az evapotranszspiráció (ET) függvényében:

$$NPP = 3000[1 - e^{-0.0009695(AET-20)}] \quad (18)$$

ahol AET jelöli az átlagos evapotranszspiráció értékét mm-ben.

2000 óta a NASA műholdak MODIS szenzorai folyamatos megfigyeléseket végeznek a szárazföldi GPP becslésére széles idő- és térbeli skálán. A legfontosabb mérföldkövek a GPP modellezésében (a teljesség igénye nélkül) Tang et al. (2015) alapján:

- I. ún. light use efficiency (LUE) modellek (Running et al., 2004; Coops et al., 2007), pl. CASA, MAESTRO (Medlyn, 1997)
- II. ökoszisztéma folyamatmodellek (Morales et al., 2005; Nightingale et al. 2007; Schaefer et al., 2008)
- III. empirikus modellek, melyek a műholdas adatokat kalibrálják az eddy-kovariancia mérésekkel (Rahman et al., 2005; Wu et al., 2011)
- IV. Machine-learning algoritmusok (Xiao et al., 2010; Jung et al., 2011)

Természetesen a legtöbb modell nem sorolható csak az egyik vagy másik osztályba. Az igények és szimulációk evolúciója miatt egyre összetettebb módszereket dolgoznak ki, amelyek komplex problémák megoldására hivatottak és megkövetelik a több irányból történő megközelítést. Követzőkben a fent említett modell típusok karakterisztikáit mutatom be.

3.1.LUE modellek

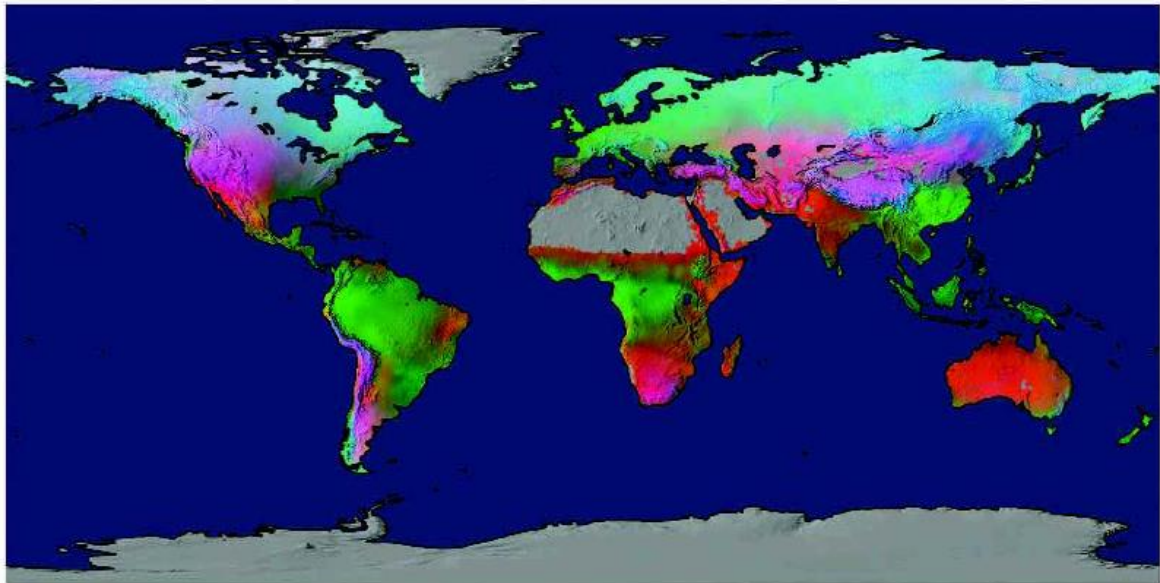
A különböző növények a rájuk eső, azonos mennyiségű PAR mennyiségét más hatásokkal képesek hasznosítani. Ezt a fajfüggő képességet (angolul light use efficiency) napfény-hasznosítási hatékonyságnak vagy efficienciának nevezzük, jele ε , [4 - Agroklimatológia jegyzet] mértékegysége gC/MJ. A megfigyelések azt mutatják, hogy környezeti stresszmentes növények efficienciája meghatározható a növény által elnyelt hasznos sugárzás és az NPP hányadosaként, vagyis (17) szerint:

$$NPP = \varepsilon \times APAR = \varepsilon \times PAR \times FPAR \approx \varepsilon \times PAR \times NDVI \quad (19)$$

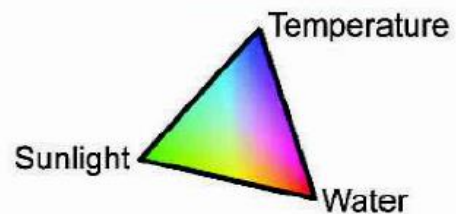
ϵ értékét számos faj esetén meghatározták (Ruimy et al., 1994). Az NPP és APAR között fennálló lineáris kapcsolatot az a tény árnyalja, hogy a levelek fotoszintézise és az elnyelt kvantum áramsűrűség (lásd alább) közötti kapcsolat nem lineáris (Medlyn, 1997). Az egyik magyarázat a megfigyelt lineáris összefüggésre, hogy az NPP-t idő szerint integrálva a linearitás növekedik (Ruimy et al., 1995). Medlyn (1997) MAESTRO szimulációk segítségével bebizonyította, hogy a linearitás fennáll dús vegetációjú területeken, éves vagy annál nagyobb időbeli skálázás esetén. A MAESTRO modell egy mikroskálájú szimuláció, mely remek közelítést ad növénycsoportosulások sugárzás elnyelési folyamataira és körülményeire.

A következőkben a MODIS NPP modellt mutatom be, mely a (19) egyenleten alapszik (Running et al, 2004). Az algoritmus Monteith (1972) tanulmányából indul ki, mely szerint gabonafélék fényhasznosítási hatékonysága jelentős változékonyságot mutat. Bármely vegetáció esetében a fotoszintézis termékének egy része egyből felhasználásra kerül karbantartási respiráció formájában. Ennek az értéke nagyjából 2 gC/MJ gabonanövények esetén, az érték lágyszárú növények esetén a mérettel egyenes arányban nő, míg fás szárú növényekben ez csekélyebb, 0,2 és 1,5 gC/MJ közötti (Running et al., 2004). További befolyásoló tényezők a nem optimális éghajlati állapotok. Például a túlevelűek egész évben elnyelik a PAR bizonyos hányadát, mégis fagypon alatti hőmérsékletek idején a levelek gázcsere nyílásai bezárására kényszerülnek. A modell ezért kizárja azokat a napi GPP értékeket, amikor a minimum hőmérséklet $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatt van. Egy kényszertényező magas ($>2000\text{ Pa}$) telítési hiány sokszor szintén gázcsere nyílás-záródást eredményez, leggyakrabban a szemi-arid régiókban, a tenyészidőszak jelentős részében. Ezért az algoritmus limitálja a napi GPP-t ϵ csökkentésével akkor, amikor magas telítési hiány jelentkezik meteorológiai adatsor alapján. A tápanyag kényszert nem az ϵ , hanem a levélfelületi index (leaf area index, LAI) módosításával szimulálja. Az előbb említett hatásokat a Biome-BGC¹⁵ modell szimulálta a ϵ kiszámítására, előre meghatározott GPP felhasználásával. Az így létrehozott biom paraméter táblázat minden biom típusra (amelyeket előre jellemeztek) tartalmaz hőmérsékleti és telítési hiány határértékeket, levélfelületi index értékekkel és respirációs együtthatókkal egyetemben (Running et al., 2000).

¹⁵ Biomok szerinti biogeokémiai ciklus-modell



Potential Climate Limits



3. ábra: Az éghajlati tényezők fotoszintézis gátló jelentősége különböző területeken (Running et. al, 2004, 4. old.)

A modellben felhasznált időjárási adatok a NASA Adatasszimilációs Hivatala (DAO¹⁶) által gyűjtött globális, 3 órás időbeli felbontású megfigyelések. A DAO ezeket interpolálja, majd rácspontokra illeszti, és globális klímamodellt futtat, 10 méteres felszín feletti magasságban, $1^{\circ} \times 1,25^{\circ}$ -os térbeli felbontással. A MODIS NPP algoritmus ezután lekér négy mérést: (1) 24-órás napi minimum hőmérséklet ($^{\circ}\text{C}$), (2) 24-órás napi átlaghőmérséklet ($^{\circ}\text{C}$), (3) aktuális telítési hiány (DAO specifikus nedvességből származtatott), (4) rövidhullámú PAR ($\text{MJ}/\text{m}^2\text{3h}$ -három órás időkeret).

A 3. ábra bemutatja az éghajlati vezérlők szerepét az éves NPP globális eloszlásában, illetve annak limitálásában. A víz az egyik legmeghatározóbb klimatikus gátló faktor, a szárazfölk kb. 40%-án a legjelentősebb, beleértve olyan területeket, ahol az éves csapadékhiány meghaladhatja a 3000 mm-t. A hőmérséklet a második legfontosabb gátló tényező, a szárazföldi területek mintegy harmadán limitálja a vegetáció produktivitását. A harmadik gátló faktor pedig a fotoszintézisre fordítható napsugárzás (PAR). A szárazfölk 27%-án a legerősebb visszafogó hatást ez a tényező fejt ki. Megfigyelhető, hogy a PAR, mint gátló tényező főleg a trópusokon jelentkezik, ahol magas hőmérséklet és bőséges csapadék áll a

¹⁶ Data Assimilation Office

vegetáció rendelkezésére. Érdekes a mérsékelt öv abból a szempontból, hogy rendkívül összetett módon jelentkeznek a különböző gátló faktorok. A mérsékelt övi erdő télen általában sugárzási és hőmérsékleti, tavasszal hőmérsékleti, nyár közepén pedig csapadék hiánytól szenved.

A műholdas globális modellszimulációk validálása egy rendkívül nehéz feladat. Háromféle adat lehet hasznos a probléma megoldásában. Közvetlen biomassza mérések, torony fluxus mérések és légköri CO₂-koncentráció mérések. Mindegyiknek megvan a problémája, gyengesége. A közvetlen NPP biomassza mérések gyakran csak éves gyakoriságúak, és a mintavételi terület rendszerint kisebb, mint 1 ha. A fluxus mérések forrásterület átmérője megközelíti a MODIS 1 km-es pixelméretét, azonban csak az ökoszisztéma nettó szén-cseréjét (NEE) képes mérni, így NPP és GPP csak követetten mérhető. A harmadik lehetőség esetén pedig meghatározhatatlan a forrásterület, illetve jelentős mértékben szennyezhetik a mintavételezést antropogén kibocsátások.

A MODIS 8 napos intervallumú GPP-jének értékeléséhez a FLUXNET hálózat állomásain mért fluxust használjuk (Running et al., 2004). Az NEE-ből becsült GPP-t összevetjük a mérőállomásokról származtatott meteorológiai adatokkal és a MODIS GPP-vel. A kapott eredmények alapján a modell remekül adja vissza a napi GPP évszakos menetét a mérőállomásokon különböző éghajlati viszonyok esetén. Éppen ezért nem véletlen, hogy az NDVI mérésén alapuló módszerek pontosan meg tudják határozni a vegetációs periódus hosszát (Running és Nemani, 1988; Myneni et al., 1997). A MODIS algoritmus alábecsüli a tavaszi GPP robbanást, azonban konzisztensen túlbecsüli a nyár közepi GPP-t (a pontatlan aszály kényszerek miatt). Az időjárási adatok pontosságának ellenőrzésére a DAO adatait használják fel, ezen adatokkal újra lefuttatják a szimulációt. A vizsgálatok során kimutatták a globális meteorológiai adatok által okozott bizonytalanságot, ami a térben inkonzisztens mezők miatt jelentkezik. A legjelentősebb különbség a telítési hiány értékeiben található: a toronymérésekből származó telítési hiány konzisztensen több, mint a DAO által származtatott adatok. A távérzékelési módszer alkalmazása során a legnagyobb torzulást a MODIS LAI/FPAR adatsora okozhatja, melyeket könnyen befolyásolhat a felhőzet megjelenése, ez a hatás leggyakrabban a boreális és trópusi régiókban jelenik meg. Tovább lehet pontosítani a modellt, ha a légköri szén forrásait és nyelőit is figyelembe vesszük a szimuláció során, azonban a modell jelenlegi verziója ezt nem tartalmazza, beillesztése rendkívül bonyolult feladat lesz. A globális szén-ciklus tározói közötti fiziológiai folyamatok leírására az ökoszisztéma modellek alkalmasabbak.

3.2. Ökoszisztéma folyamat modellek

Az ökoszisztémákban lejátszódó fiziológiai folyamatokról az utóbbi 30-40 évben egyre többet tudunk meg, ezek megértése kulcsfontosságú annak érdekében, hogy minél pontosabban modellezhessük. A folyamatmodellek skálája az erősen mechanisztikus és összetett, folyamat-orientált modellektől a végletekig leegyszerűsített statisztikus regressziós szimulációkig terjed a felhasználási terület függvényében. A változatos tér- és időbeli felbontású meteorológiai cirkulációs modellek megkövetelik a szárazföldi ökoszisztéma modellek széleskörű és részletes biológiai és fizikai folyamatok leírását. Ehhez az szükséges, hogy a modell magában hordozza a szénraktárak minél pontosabb közelítéseit anélkül, hogy a hozzáadott változók (például biomassza égetés vagy aratás) esetén se legyen szükség komoly átstrukturálásra. A Biome-BGC modell (Running et al., 1993; Hidy, 2010) a hazai kutatások és tanulmányok előszeretettel használt modellje. A modell a növényi anyagforgalmat szimulálja, az ökológiai rendszer alrendszerében foglalt anyagmennyiséget és az ezek közötti anyagáramlást modellezi, beleértve az ökoszisztéma és a légkör közötti áramot is (Barcza et al., 2012).

Hasonló alapokon nyugszik a kombinált SiBCASA¹⁷ szárazföldi szén-ciklus modell (Schäfer et al, 2008), amely két, már létező és általánosságban elterjedt modellből (SiB 2.5¹⁸, illetve CASA¹⁹) áll.

A SiB2.5 egy biofizikai modell, ami az NEE, valamint a látens és szenzibilis hő felszíni fluxusát nagy időbeli felbontással (10-20 percenként) becsüli éghajlati modellek számára. Ebbe a verzióba integrálva megtalálható a lombzat légterének parametrizációja (CO₂ koncentráció, légnedvesség és hőmérséklet prognosztikus változókként). A SiB2.5 felhasználta Bonan (1996) CLM²⁰ elnevezésű talaj-modelljét, mely 3,3 m mélységig 10 réteget foglal magába, továbbá a CLM hómodelljét. A hóborítottság nagymértékben befolyásolja a látens és szenzibilis hőáramot. A látens hőáram becsléséhez szükség van a Ball-Berry sztóma-vezetőképesség modellre (Ball, 1988). A sztómák aktivitása szoros kapcsolatban áll a növény anyagcsere-folyamataival, azon keresztül történik a légkör és a növényzet közötti gázcsere, ezáltal (20) szerint összeköthető a sztóma vezetőképessége (g_c), és az NPP:

$$g_c = m \frac{A_n}{C_s} h_s p + bLAI \quad (20)$$

ahol m a megfigyelésekből származó empirikus konstans, C_s a CO₂ parciális nyomása a levél felületén, h_s a relatív nedvesség a levél felszínén, p a légköri nyomás, b a lehetséges g_c

¹⁷ Simple Biosphere/Carnegie-Ames-Stanford Approach: Egyszerű Bioszféra/Carnegie-Ames-Stanford megközelítés

¹⁸ Simple Biosphere (Egyszerű Bioszféra) modell 2.5-ös verziója

¹⁹ Carnegie-Ames-Stanford Approach: Carnegie-Ames-Stanford közelítés

²⁰ Community Land Model: Közösségi Szárazföldi Modell

minimuma, LAI a levélfelület index, A_n pedig a növényzet nettó fixációja ($A_n = GPP - R_a$; $A_n = -NPP$). A fiziológiai gátló tényezők (nitrogén, rövidhullámú sugárzás vagy anyagtranszport) befolyását Farquhar módosított enzim-kinetikus modelljével szimulálhatjuk (Farquhar et al., 1980), melynek alapfeltétele, hogy a legerősebb gátló tényező határozza meg a GPP-t. Megjegyzendő, hogy a modell különbséget tesz C_3 és C_4 típusú növények között. A SiB2.5 a GPP kiszámítását a levél kloroplasztiszában lévő CO_2 parciális nyomásának iterációjával végzi oly módon, hogy a Ball-Berry és a módosított enzim-kinetikus modell között a különbség minimális legyen. A GPP-t és a g_c -t kiszámolja először a lombkorona tetején lévő levél esetén, majd az egész lombra átskálázza a fotoszintézisre használható sugárzás arányának (FPAR) segítségével. Az FPAR-t és a LAI-t a távérzékelési NVDI-ből származtatják. A SiB2.5 hosszútávú szénegyensúlyt feltételez ($NEE=0$), amely remekül működik egynapi és éves skálán is, azonban nem tudja hosszútávon a forrásokban és nyelőkben végbemenő változásokat előre jelezni. Ezt a hiányosságát egészíti ki a CASA.

A CASA egy biogeokémiai modell, ami számos széntározó heterotróf respirációjában végbemenő hosszútávú változásokat vizsgálja. Magát a bioszfért 13 tározóra osztja fel: a növényzetet 4 részre (energiaraktár, levél, gyökér és szár), az avarszintet is 4 részre (fás törmelék, tápanyag, mikrobiális és szerkezeti) a talajt pedig 5 részre (tápanyag, mikrobiális, szerkezeti, lassan lebomló, közetbeli). A tározók közötti szénmozgást egy elsőrendű, lineáris egyenletrendszerrel jellemezhetjük:

$$\frac{dC_i}{dt} = G_i - T_i - R_i + \delta_i \quad (21)$$

ahol (21) azt fejezi ki, hogy az n elemű rendszerben (leggyakrabban $n=13$) az i -edik tározóban lévő szén mennyisége (C_i) időben változik a többi tározótól kapott mennyiség (Gain, G_i), a belőle elszállított mennyiség (Transfer, T_i), a respirációs veszteségek (R_i) és a hibtag (δ_i) függvényében. δ_i értéke változik a biomassza csökkenésével vagy növekedésével, aratásnál, égetésnél és egyéb zavaró körülmény esetén. G_i a széntranszferek függvénye, T_i és R_i pedig C_i függvényében változik:

$$\frac{dC_i}{dt} = \sum_{j=1}^n f_{j2i} k_{Tj} C_j - k_{Ti} C_i - k_{Ri} C_i + \delta_i \quad (22)$$

ahol k_{Ti} és k_{Ri} a pusztulási ráta konstansai szénszállítás és respiráció esetén, f_{j2i} a j tározóból elvont és i tározóba elszállított szén aránya. Mivel T_i és R_i általában összefüggenek, ezért megállapíthatjuk az effektív pusztulási rátát ($k_i = k_{Ti} + k_{Ri}$) és szállítási hatékonyságot (e_{j2i}), így

$$\frac{dC_i}{dt} = \sum_{j=1}^n f_{j2i} e_{j2i} k_j C_j - k_i C_i + \delta_i, \quad (23)$$

ahol e_{j2i} az i -edik tározó által fogadott szénmennyiség és a j -edik tározó veszteségének az aránya úgy, hogy a maradék respiráció formájában távozik. Az i -edik tározó respirációja

$$R_i = \sum_{j=1}^n (1 - e_{i2j}) f_{j2i} k_i C_i. \quad (24)$$

A k_i effektív pusztulási ráta a környezeti hatások függvényében változik, ezt a modellben skálázási faktorokkal (S_i) határozták meg:

$$k_i = \frac{f_i S_T S_F S_M}{\tau}, \quad (25)$$

ahol τ a referencia forgalmi idő, mely az átlagos tartózkodási időt jellemzi, f_i a tározó azon része, ami áthelyezhető, S_T , S_F és S_M a hőmérsékleti, fagyási és nedvességi skálázási faktor, melyek tározónként eltérnek. A különböző tározókban alkalmazott skálázási faktorok meghatározásakor rendkívül körültekintően járnak el, mivel ezek szimulálják a környezeti stresszre a növény által adott választ (Schäfer et al., 2008).

A SiBCASA-ban foglalt tározók egyenletét mátrix formátumban felírva:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{C} = \mathbf{TKC} - \mathbf{KC} + \mathbf{D}, \quad (26)$$

ahol \mathbf{C} a tározók méretének n -dimenziós vektora, \mathbf{T} a transzfer arányok és hatékonysági ráták $n \times n$ elemű mátrixa, \mathbf{K} diagonális, a pusztulási ráták $n \times n$ elemű mátrixa és \mathbf{D} a zavarások n -dimenziós vektora. A f_{j2i} nemzérus elemei határozzák meg, melyik tározó melyiknek szállít szenet, ezért \mathbf{T} definiálja azt, hogy melyik tározók vannak kapcsolatban egymással. A mátrix formátum nagyban megkönnyíti a tározókban végbemenő esetleges változások szimulációba illesztését. Mivel τ minden tározó esetében nagyságrendekkel nagyobb a SiBCASA 10 perces időbeli skálájánál, probléma nélkül térhetünk át numerikus módszerekre:

$$C_{t+\Delta t} = C_t + \Delta t(\mathbf{TKC}_t - \mathbf{KC}_t + \mathbf{D}), \quad (27)$$

ahol C_t a pillanatnyi tározó mérete, $C_{t+\Delta t}$ a tározó mérete a következő időlépésre, Δt pedig a SiBCASA időlépése.

Egyik modell sem képes egymagában teljesíteni a általános légköri cirkulációs modellek komplex elvárásait: a SiB2.5 nem prognosztizál biomasszát, a CASA nem tud NEE-t számítani napi skálán, és egyik sem tud autotróf respirációt számítani. A CASA egy egyszerű napfény-hasznosítási hatékonyság modellel becsüli az NPP-t, ami azt feltételezi, hogy az autotróf

respiráció egy állandó hányada a GPP-nek. Mivel azonban a respiráció folytonos, GPP pedig csak napközben lehetséges, a CASA nem képes NEE-re napi becsléseket adni. A SiB2.5 számol teljes respirációt, a CASA pedig NPP-t, így képesek együtt jó elemzéseket végezni arról, hogy miként befolyásolják a különböző klimatikus változások és egyéb faktorok a globális szén ciklust.

3.3. Empirikus, távérzékelési modellek

Műholdas megfigyelések lehetőséget teremtenek arra, hogy nagy idő- és térbeli felbontással globálisan becsljük a GPP értékét. Számos modell épül távérzékelési technikákára, például a VPM²¹ (Xiao et al., 2006) és a 3-PG²² (Coops et al., 2005). Megjegyzendő, hogy a LUE modellek túlnyomó többsége is ide tartozik. Sajnos minél több változót és paramétert igényel egy modell, hiába tud pontosabb becslést adni a GPP-re, annál kevésbé állnak rendelkezésre mért adatok, ezáltal annál kevésbé képes globális becslést adni. Ezáltal végső soron a pontosság az alkalmazási terület méretének rovására megy. Az efféle modellek főként arra összpontosítanak, hogy globális kiterjedésű, mennyiségi becslést adjanak a szén csere folyamataira.

A következőkben az ún. TG²³ modellt (Sims et al., 2008) és a GR²⁴ modellt (Gitelson et al., 2006) mutatom be részletesebben. Mindkét modell MODIS adatokat használ fel, és jelentős hasonlóságokat mutatnak, mint ahogy azt később látni fogjuk.

A TG földfelszíni hőmérsékleti (land surface temperature, LST) és a megnövelt növényzeti index (enhanced vegetation index, EVI) adatokat származtat a Terra MODIS légköri korrekciókon átesett felszíni reflektancia (MOD09A1) méréseiből. Három elnyelési sávon mérik a reflektanciát, kék (k, 459-479 nm), vörös (v, 620-670 nm) és közeli infravörös (NIR, 841-876 nm) tartományon. A reflektanciát 8 napos felbontással az EVI számítására használják. A felhő által árnyékolt és/vagy nagymennyiségű aeroszol részecskéket tartalmazó pixeleket eltávolítják a minőségjelző paraméter alapján.

$$EVI = 2,5 \cdot \frac{R_{NIR} - R_v}{1 + R_{NIR} + 6R_v - 7,5R_k}, \quad 3)$$

ahol R_x a sávoknak (k, v, NIR) megfelelő reflektancia.

²¹ Vegetation Photosynthesis Model: Vegetáció Fotoszintézis Modell

²² Physiological Principles for Predicting Growth: Fiziológiai Alapok Növekedés modellje

²³ Greenness and Temperature: Zöldesség és Hőmérséklet

²⁴ Greenness and Radiation: Zöldesség és Sugárzás

A legfontosabb jellemzője a TG modellnek az, hogy az éghajlati jellemzőktől független. Az LST közeli kapcsolatban áll olyan változókkal, mint a PAR és a telítési hiány, ezért a GPP becsülhető a skálázott növényzet zöldesség és a skálázott felszínhőmérséklet szorzataként.

$$GPP = EVI_s \cdot LST_s \quad (29)$$

Mivel a GPP átlagosan zérus lesz $EVI=0,1$ esetén, ezért $EVI_s = EVI - 0,1$.

LST-t a GPP számára optimális hőmérséklet meghatározása szerint skálázzák. A GPP általánosan $LST=30\text{ °C}$ esetén maximális, ezért két lineáris egyenlet segítségével definiálhatjuk LST_s -t (skálázott felszíni hőmérséklet):

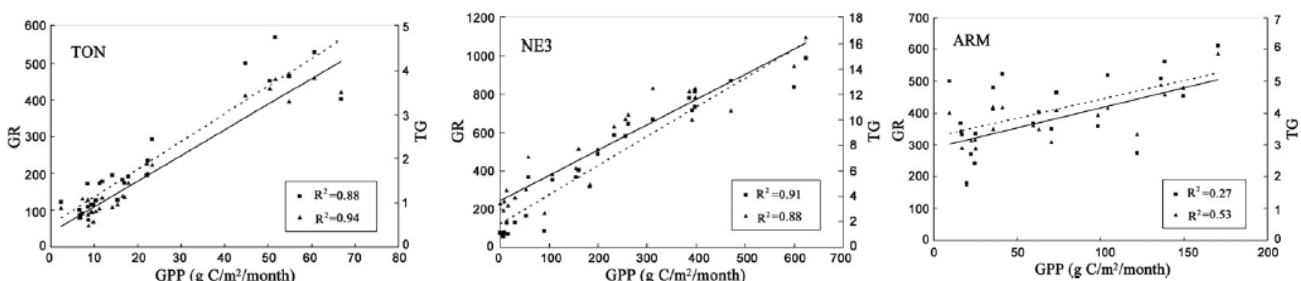
$$LST_s = \min \left[\left(\frac{LST}{30} \right), (2,5 - 0,05 \cdot LST) \right]. \quad (30)$$

Mindazonáltal a MODIS LST használata hibákat okozhat, mivel a sugárzás a felszín és a légkör együtteséről érkezik a műholdas szenzorra (Götzt et al., 2000). Ezért a modellvalidáció érdekében a mérőtornyokról származtatják a levegő hőmérsékletét (T_a) és másik megközelítést használnak. Így a TG modell végső egyenlete:

$$GPP = (EVI - 0,1) \cdot \min (T_a, 50 - T_a) \quad (31)$$

A GR modell a klorofill vegetációs index (CVI) és PAR adatokból dolgozik. Gitelson (2006) egy kukoricáson végzett megfigyelései alapján alkotta meg. A déli GPP és a növény teljes klorofilltartalma közötti szoros kapcsolat miatt a GR modell alkalmas ültetvények és gabonátáblák GPP-jének becslésére. A távérzékelésből származó vegetációs index értékeket felskálázva közelíthetjük a klorofilltartamot (VI_{chl}). Ezáltal a modellt az alábbi egyenlet formájában fejezhetjük ki (Wu et al., 2010):

$$GPP = VI_{chl} \cdot PAR. \quad (32)$$



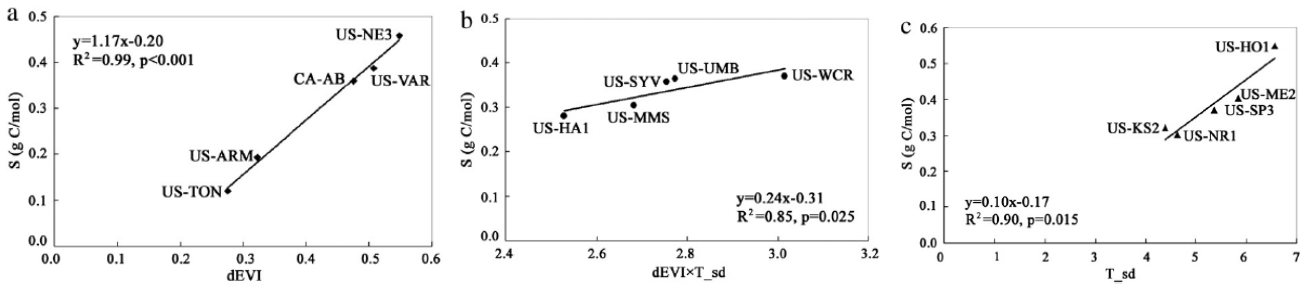
4. ábra: A mért, TG által és GR által szimulált GPP értékek kapcsolata nem fás vegetációjú állomások esetén (Wu et al., 2011)

A modell validációjához összesen 15 AmeriFlux állomás eddy kovariancia adatait használják fel (Wu et al., 2011). Az asszimiláció során a MOD09A1 műholdképekről fluxus

tornyok 3×3 pixeles környezetét ($\approx 1,5 \text{ km} \times 1,5 \text{ km}$) kivonják, és ezek értékeit hasonlítják össze a felszínen mért GPP értékekkel. A determinációs együtthatókat (R^2) vizsgálva nem erdős állomásokon megfigyelhetjük, hogy egy kivétellel (US-Ne3 gabonamező, Nebraska) a GR jobb korrelációt mutat, mint a TG modell. Egy fás szavanna vegetációjú állomáson (US-Ton, Kalifornia) a GR modell R^2 értéke 0,94 volt (tökéletes illeszkedés esetén ez az érték 1 lenne), az egyik ültetvényes állomáson (US-Arm, Oklahoma) azonban a GR csak 0,53, a TG pedig csak 0,27 értékű hasonlóságot mutatott (Wu et al., 2011). Ez a meglepő eltérés a mért adatoktól annak tudható be, hogy a területet hosszú ideig aszály sújtotta a megfigyelés időszakában (2003-2006), s a TG modell a szárazságot nem képes megfelelő pontossággal kezelni (Sims et al., 2008). E mögött az áll, hogy a szárazság csökkenti a hőmérséklet és PAR közötti korrelációt.

Lombhullató erdők GPP szimulációinál jó becsléseket adott mindkét modell, mindegyik állomáson a determinációs együttható nagyobb volt 0,8-nál. Ezen eredmények azt mutatják, hogy mindkét modell képes változatos zöldességtű ökoszisztémák produktivitasát modellezni. Örökzöld erdők vizsgálatakor az R^2 értéke mindkét modell esetében változatos. A TG esetén például a Howard erdei állomáson (US-Ho1, Maine) 0,91, Floridában (US-SP3) pedig 0,28 adódott. A GR is a Howard erdőnél becsült a legpontosabban ($R^2=0,85$), míg a legkisebbet ($R^2=0,25$) a Sziklás-hegység vidékén (US-Nr1, Denver, Colorado). A vegetációs különbségeket vizsgálva észrevehető, hogy a lombhullató erdők változtatják leginkább a zöldességüket, ezáltal a legnagyobb EVI szórást ($\sigma_{EVI}=0,15$) ezen állomások esetén tapasztalhatunk. Így magyarázható az, hogy a lombhullató erdei állomásokon becsültek a modellek a legpontosabban. Általánosságban elmondható, hogy a GR modell jobb becsléseket ad (magasabb értékű determinációs együtthatókat számol) mindhárom vegetáció típusra, mint a TG modell (Wu et al., 2011). A modellben használt T_a léghőmérséklet az örökzöld erdők esetében rendkívül alacsony korrelációt ($R^2=0,11$) mutat a PAR-ral, ezért a modell pontossága is csökken ($R^2=0,31$).

A modellek kalibrációja fontos lépés annak érdekében, hogy használhatóságukat részletesen értékelhessük. Ennek során különféle problémákba ütközhetünk, mert a különböző biotomok reakciói a strukturális és éghajlati változásokra eltérhet. A következőkben a GR modell kalibrációját mutatom be.



5. ábra: A GR modell kalibrációja a különböző vegetációs típusokra: a) nem fás, b) lombhullató, c) örökzöld. dEVI jelöli a maximális és minimális EVI közötti különbséget T_{sd} pedig a havi átlagos T_a léghőmérséklet szórása

A GPP és a EVI·PAR tag közötti korreláció, illetve az ezekből számított regressziós egyenes meredeksége (S) mindegyik vegetáció típusra jól megadható. A nem fás állomásoknál tökéletesen ($R^2=0.99$) illeszkedik S és a maximális és minimális EVI közötti különbség (dEVI). Lombhullató erdők esetén a meredekség a havi átlaghőmérséklet (T_{sd}) és dEVI szorzatának függvénye. Örökzöld erdők esetén pedig S egyenesen korrelál T_{sd} -vel. Habár csak öt állomás alapján készültek a statisztika elemzések, mindegyik korreláció jelentős, tehát a GR modellt a következőképp lehet korigálni (Wu et al., 2011):

$$GPP = S \cdot (EVI \cdot PAR) \quad (33)$$

$$S = \{1,17 \cdot dEVI - 0,20 \quad 0,24 \cdot (dEVI \cdot T_{sd}) - 0,31 \quad 0,10 \cdot T_{sd} - 0,17 \quad (34)$$

A kalibrált modelladatokat és a méréseket összehasonlítva láthatjuk, hogy a szimuláció megfelelő becsléseket adott havi skálán. Az átlagos RMSE²⁵ a nem fás száru vegetációnál 40 gC/m²/hó, a lombhullató erdő esetén 40 és 60 gC/m²/hó közé esik, az örökzöldek esetében pedig 30-45 gC/m²/hó az átlag. Mind a 15 állomásra számítva RMSE 47.18 gC/m²/hó adódik (Wu et al., 2011). Míg a modell meglehetősen pontosan számolta a havi GPP összegeket a legtöbb állomásra, hajlamos túlbecsülni a vegetációs periódus korai szakaszát. Ez örökzöldeknél nem annyira jelentős, ezért azt feltételezhetjük, hogy a MODIS reflektancia adatokból eredő bizonytalanság okozhatja a kapott hibákat. Mindkét másik vegetációnál fennáll a dEVI relatíve nagy éves ingadozása, ezért könnyen hibák lépnek fel a tenyészidőszak elején, feltehetően a növényzet levélhajtása miatt. Másik lehetséges magyarázat, hogy kezdetben a klorofilltartalom az alacsony hőmérséklet miatt gyorsabban emelkedik, mint a megkötött szén mennyisége (Chen et al., 2000), így ekkor még nem teljesen igaz a lineáris összefüggés. Ez okozhatja a kapott túlbecsülést és indokolhatja az örökzöldek eltérő viselkedését.

²⁵ Root Mean Squared Error: Átlagos négyzetes hiba

3.4. Machine-learning modellek

A bioszféra-atmoszféra kapcsolatának modellezését számos irányból meg lehet közelíteni. A 21. században rengeteg modellt fejlesztettek annak érdekében, hogy jobban megértsük az anyag- és energiaháztartási folyamatokat. A különböző tér- és időbeli felbontású modellek több-kevesebb sikerrel jártak. Az összetett folyamatok és sokszor hiányzó változók miatt ezek a szimulációk egytől-egyig kisebb-nagyobb hibával terheltek. Az in situ eddy kovariancia mérések pontos, azonban erősen lokalizált információt szolgáltatnak. Az automatizált tanuló algoritmusok (angolul machine-learning programok) a mérési eredmények, illetve a különféle szimulációk szintetizálásán alapszik. Ide tartoznak például a mesterséges neurális hálózatok, regressziós és modell fák, gráfmodellek. Segítségükkel a mérési adatokat az egész bolygóra felskálázhatjuk, megfelelően sok modellszimuláció együttes alkalmazásával a modellek különböző eredetű hibáit számszerűsíthetjük és korrigálhatjuk.

A következőkben egy skálázási problémát (melynek forrása Ito et al., 2016) és egy együttes modellszimulációt (melyet Jung et al., (2011) publikált) mutatok be.

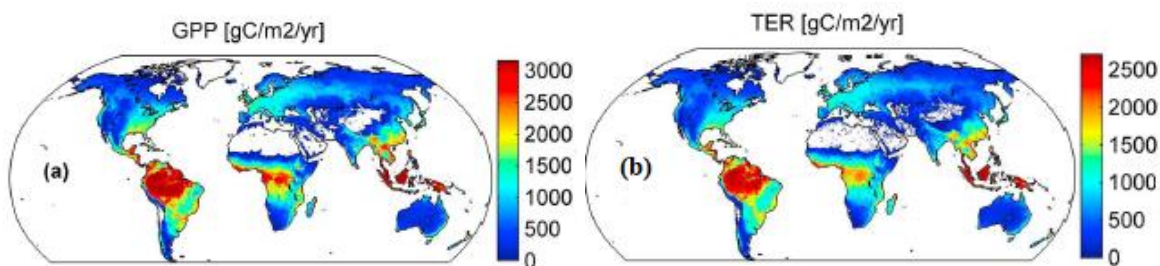
Ito et al. (2016) a gráfelmélet felhasználásával ún. modell fa ensemble (MTE) technikát alkalmazott a FLUXNET által szolgáltatott CO₂ fluxusok felskálázására. A módszer három alaplépésből áll: 1) input adatok feldolgozása és minőség ellenőrzése, 2) MTE tanulási szakasza a vizsgált fluxusokra (GPP, R, NEE) állomás szintű segédváltozók segítségével, 3) MTE alkalmazása a globális rácspontok segédváltozóinak adatsoraira. A vizsgálat során havi időlépcsőt választottak a számítási igény csökkentése érdekében, illetve azért is, mert általában a havi időskálán a legpontosabbak az ilyen típusú modellek. Így a zaj gyengül, de a szezonális továbbra is megfigyelhető marad. 25 modellfuttatás történt, mely alapján az egyes szimulációkból minden rácspontban a fluxus adatok mediánjából abszolút eltérést határoztak meg. Az így kapott statisztika torzítatlan és a kiugró adatok nem nagyon módosítják az általános tulajdonságokat. A modell fák hierarchikus sorrendbe állítják az adatsor tagjait egy egyszerű logikai döntés alapján ($x > y$). A fa a végső tartományaiban („leveleiben”) többváltozós lineáris függvények segítségével adják meg a célváltozót. Így bármilyen nemlineáris összefüggést is becsülhetünk lineáris kapcsolattal. A tanulmány az ún. TRIAL²⁶+ERROR²⁷ algoritmust használja (Jung et al., 2009). A TRIAL modul elkülönítő döntéseket hoz minden csomópontnál úgy, hogy minimalizálja mindkét tartomány regressziójának négyzetes hibáját. A következő időlépcsőnél pedig a többszörös lineáris regressziót alkalmazza. Az ERROR modul részeket

²⁶ Tree Induction Algorithm: Indukciós Fa Algoritmus

²⁷ Evolving tRees with RandOm gRowth: Véletlen növekedésű fa fejlesztés

távolít el létező fákból, melyeket véletlenszerűen növeszt, majd a levelekhez érve a TRIAL módszerét alkalmazva választja ki a legjobb „útvonalat” (Jung et al., 2009).

A FLUXNET NEE napi adatokból egy olyan hiperbolikus sugárzási válasz görbét alakítottak ki a GPP becslésére, ami figyelembe veszi a hőmérséklet és a telítési hiány hatását a fotoszintézisre (Lasslop et al., 2010). A másik bevett módszer Reichstein et al. (2005) tanulmányában olvasható, mely az éjszakai respirációt (F_r) extrapolálja a nappali időszakra. Kiszámítják mindegyik állomásra mindhárom változóra (GPP, R, NEE) a két módszer által adott különbséget, meghatározva így a bizonytalanságot. Majd a leggyengébb 5%-ot kihagyták a modellből. A számítások során 29 segédváltozót különítettek el, melyek vagy a döntésben, vagy a regresszió kialakításában jelennek meg. Mindegyiknek elérhetőnek kellett lennie az összes vizsgált FLUXNET állomáson, illetve globálisan is. Kereszt validációval értékelték a MTE-t, amely két lépésben történt. Először az állomások kb. 20%-át eltávolították, s a maradék 80% alapján meghatározott modellt alkalmazták a kihagyott állomások adataira. Az így kapott modellhatékonysági mérőszám (Nash és Sutcliffe, 1970) a három széntranszportot jellemző változóra (NEE, GPP, R) 0,48 és 0,76 között alakult (Jung et al., 2011). Az eredmények azt mutatták, hogy a szezonális kapcsolat volt a legerősebb, és az állomások közötti gyengébb. A második lépésben pedig különböző időszakokat vágta ki a validáció elvégzéséhez, ebben az esetben az előző validációs eljárás értékeinél magasabb modellhatékonysági mérőszámok (0,67 és 0,86 között) adódtak (Jung et al., 2011). A távérzékelési megfigyelésekből 1982 és 2008 közötti NDVI értékekből származtatható fAPAR adatsort kértek le, illetve ECMWF ERA Interim reanalízis adatokat. Az MTE modellből kapott GPP és R globális térbeli eloszlását a 6. ábra mutatja be.



6. ábra: Átlagos éves a) GPP, b) R a felskálázott FLUXNET adatok szerint (1982-2008) (Jung et al, 2011)

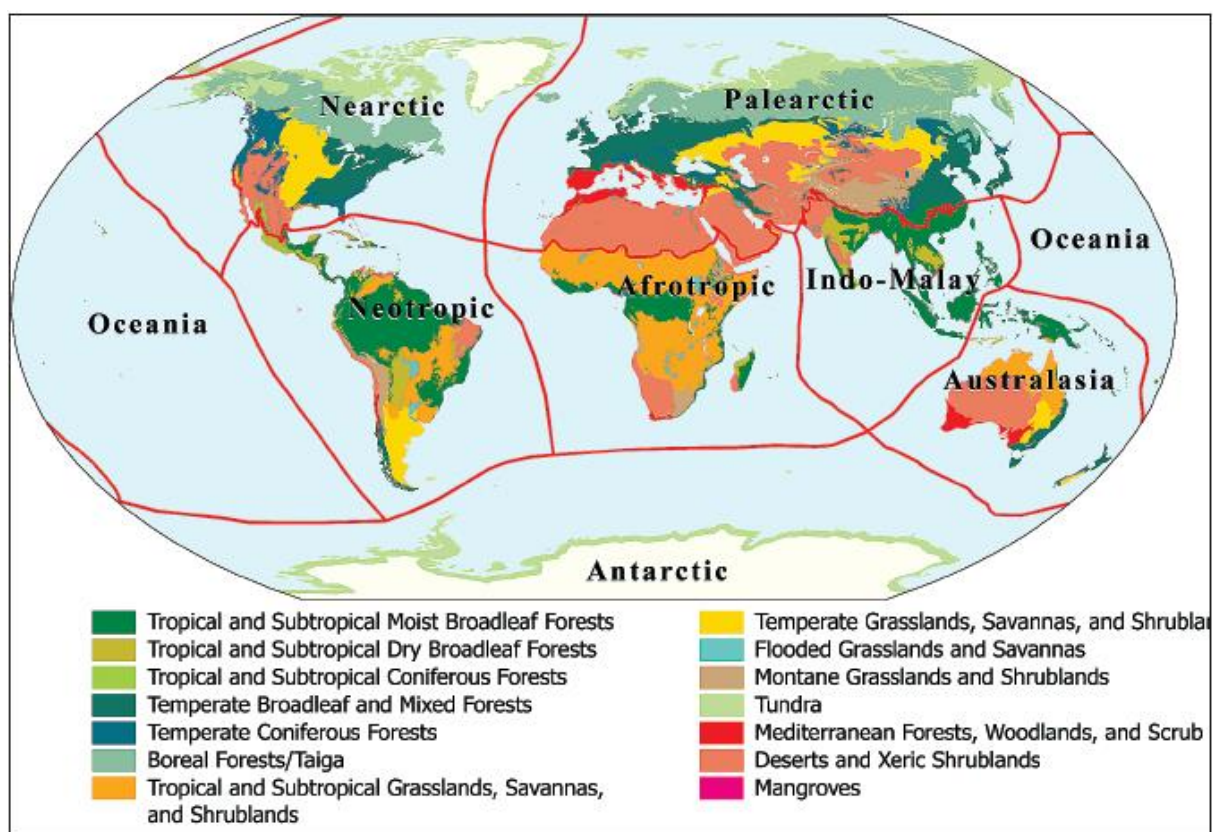
A két térkép meglehetősen hasonló, habár a színskála valamelyest eltér rajtuk. A GPP értéke sok helyen magasabb, ahol a színárnyalat alapján egyenlőséget feltételezünk. A legnagyobb értékek mindkét esetben az Egyenlítőnél találhatóak, utánuk következnek a szubtrópusi monszon területek, a legkisebbek pedig a hideg és száraz területeken jellemzőek. A nagymértékű hasonlóság azt is jelzi,

hogy a fotoszintézis mértéke szorosan összefügg a respiráció mértékével, s így a respirációt elsődlegesen a GPP határozza meg (Lasslop et al., 2010).

4. Éghajlati tényezők hatása

Az éghajlat osztályozások között számos különbséget felfedezhetünk, azonban legtöbbjük megegyezik abban, hogy a hőmérsékletet és a csapadékmennyiséget is befolyásoló tényezőként tartja számon. Köppen (1884) a Föld éghajlati rendszerét öt fő részre osztotta: A) trópusi, B) száraz, C) meleg mérsékelt, D) boreális, E) hideg poláris. Ezeket a csapadék és a hőmérséklet szezonális szerinti tovább bontotta. Trewartha (1968) finomította ezt a rendszert a növényföldrajzi jellegzetességek nagyobb mértékű figyelembe vételével. Az általuk kialakított Köppen-Trewartha klímaosztályozás (KTC) területi eloszlását a 8. ábra mutatja be.

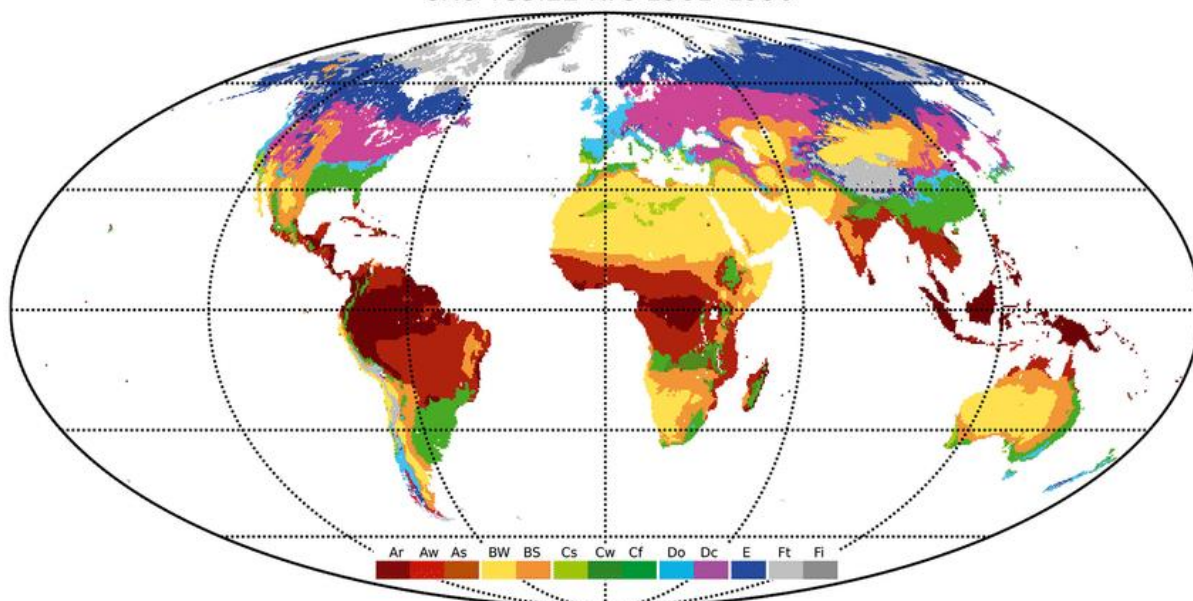
A biogeográfiai osztályozási elv a kontinensek elkülönítő szerepét is figyelembe veszi, így az ökoszisztémákat összesen nyolc ökobirodalomra, azokat 193 biotikus provinciára, azon belül 867 ökorégióra oszthatjuk fel (Udvardy, 1975). A WWF²⁸ megbízására Olson et al. (2001) egységesítette Udvardy (1975) elképzelései alapján a biotikumok kategorizálását, és meghatározott 14 szárazföldi biotikumot, melyeket a 7. ábra szemléltet.



7.ábra: A szárazföldi ökoszisztémák biotikumok és ökobirodalmak szerinti csoportosítása (Olson et al., 2001)

²⁸ World Wildlife Fund: Vadvédelmi Világalap

CRU TS3.22 KTC 1961–1990



8.ábra: KTC osztályozás földrajzi eloszlása (forrás: Belda et al., 2016)

Az 1. (nagy) betűjel jelzi a fő éghajlati típusokat: A: trópusi, B: száraz, C: meleg mérsékelt, D: hűvös, E: sarkvidéki, F: magashegységi

A 2. (kis) betűjel: r: esőerdő; s: száraz; w: nedves; f: száraz évszak nélküli; o: óceáni; c: kontinentális; t: tundra; i: jég

Vegetációs típus angol elnevezése	Rövidítés	Magyar nyelvű elnevezés
Croplands	CRO	Gabonamező
closed shrublands	CSH	sűrű bozótos
deciduous broadleaved forest	DBF	lombhullató erdő
evergreen broadleaf forest	EBF	örökzöld lombos erdő
evergreen needleleaf forest	ENF	örökzöld tűlevelű erdő
Grasslands	GRA	füves puszta
mixed forest	MF	vegyes erdő
open shrublands	OSH	ritka bozótos
Savanna	SAV	Szavanna
snow and ice covered	SNO	hóval és/ jéggel fedett
Wetlands	WET	mocsár, láp
woody savannas	WSA	fás szavanna

1.Táblázat: Az IGBP által meghatározott és a FLUXNET által használt 12 vegetációs típus

A 7. ábrán bemutatott osztályozásban felismerhető az éghajlattól való függés. A különböző vegetáció típusokat tovább osztályozhatjuk aszerint, hogy melyik éghajlati övben található. Például lombos erdőket a trópusi övezetben és a mérsékelt övben is láthatunk, mint ahogyan tűlevelű erdőket is találunk mindkét klimatikus zónában. Éghajlati szempontok érvényesülnek a puszták elkülönítése esetén is, továbbá megkülönböztethetünk bozótost (shrublands) és füves pusztát (grasslands) is. A tundra és a tajga hasonlóképp elkülöníthető mind az ökológiai, mind a klimatikus osztályozás esetén. Megjegyzendő, hogy bár az ökológusok

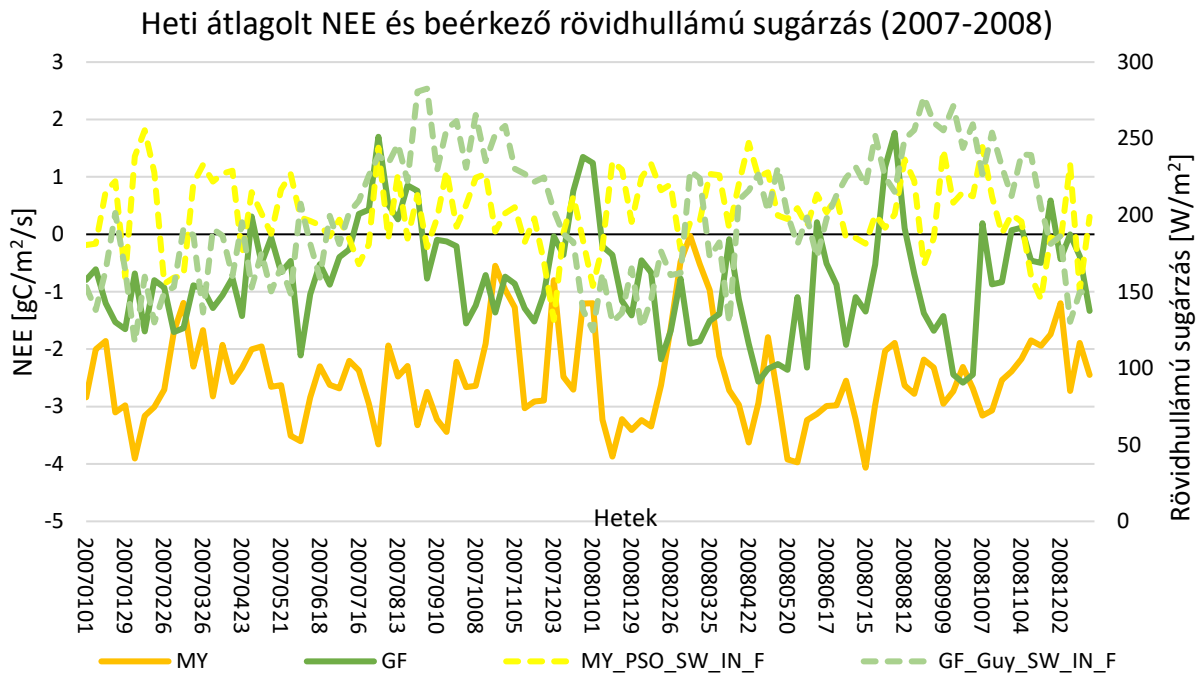
körében a WWF ajánlása szerint ez a típusú osztályozás a legelterjedtebb, a FLUXNET a mérőállomások leírásában az IGBP²⁹ egyszerűsített felosztását (1. táblázat) használja, mely a vegetációs típusok különbségeire fektet nagyobb hangsúlyt, s az éghajlati viszonyokat kevésbé tekinti fontosnak.

A növényzet számára a három legfőbb szükséglet a kellő mennyiségű csapadék, hőmérséklet és napsugárzás. Ezek megfelelő egyensúlya biztosítja a vegetáció életműködéseinek fenntarthatóságát. A 3. ábrán feltüntetett színezés az egyensúlyi mérleg nyelvének kitérését mutatja, vagyis bizonyos területeken az ökoszisztémát a három tényező valamelyikéből nem megfelelő mennyiség éri. fenti összefüggésekből adódik a szoros kapcsolat az éghajlati változók, a vegetáció típusok és az ökoszisztéma légcseré folyamatok között.

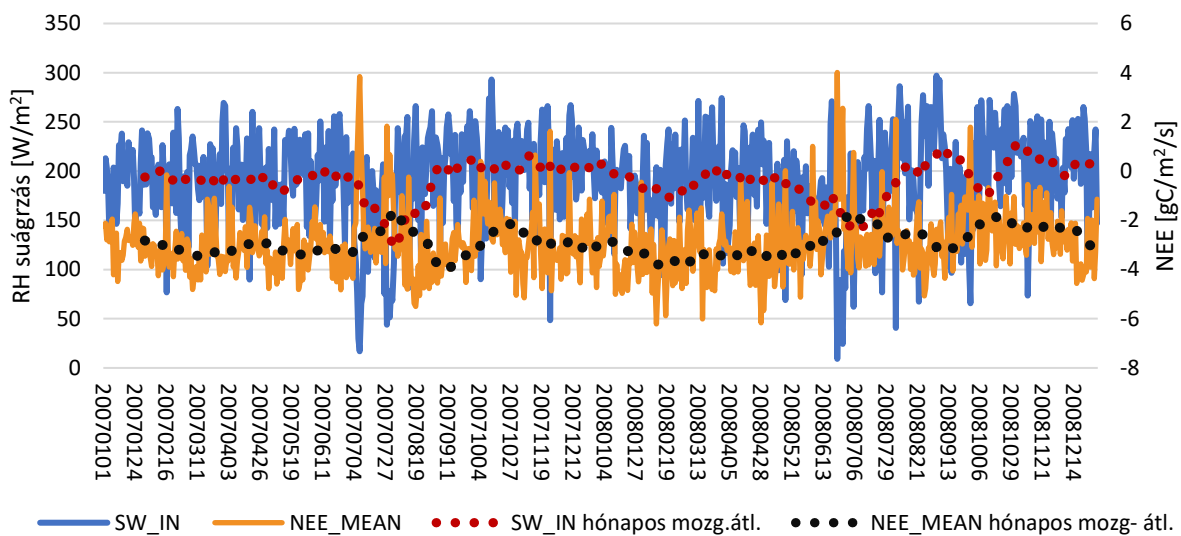
A 6., 7. és 8. ábra összehasonlításakor megfigyelhetjük, hogy a sűrű vegetációjú, intenzív gázcsere folyamatokkal jellemezhető ökoszisztémák hőmérséklet- és csapadékeloszlás szempontjából bőségesen ellátottak. Észrevehető, hogy a száraz és forró területek növényzete jól alkalmazkodott a környezetéhez, a minimális rendelkezésre álló nedvesség felhasználásával és csekély mértékű gázcserével biztosítja a szélsőséges éghajlati viszonyok közötti túlélést. A magasabb szélességeken, sarkköri és szubarktikus éghajlaton a boreális fenyőerdők és füves puszták a legjellemzőbbek, amelyek jól tűrik a szélsőségesen hideg hőmérsékletet és a besugárzás nagymértékű ingadozását. Megfigyelhető továbbá a mérsékelt területek változatos vegetációs formáinak és ezek klimatikus jellegeinek szén-dioxid áramokra gyakorolt hatása.

A trópusi területekről két FLUXNET mérőállomás adatsorát választottam ki az ott megtalálható biom jellemzésére (9.ábra). Mindkét állomás az IGBP besorolása szerint az örökzöld lombos erdők osztályába (EBF) tartozik. Az egyik állomás (FG-Guy, 5,2788°É, 52,9249°Ny) Francia Guyanában található, egy zavartalan, természetes esőerdőben. Éves átlaghőmérséklete 25 °C körül alakul csekély éven belüli hőingás jellemzi és évente átlagosan 3000 mm csapadék hullik a területre. A másik állomás Malajziában van (MY-PSO, 2,9730°É, 102,3062°K), Kuala Lumpurtól 70 km-re keletre. A tájvédelmi körzet tágabb környezetét jelentős emberi tevékenység alakította az elmúlt 30 évben. Hőmérséklet szempontjából hasonlít GF-Guy állomáshoz, azonban kevésbé csapadékos (2000 mm).

²⁹ International Geosphere-Biosphere Programme: Nemzetközi Geoszféra-Bioszféra Program



Napi átlag NEE és beérkező rövidh. sugárzás (MY-PSO)



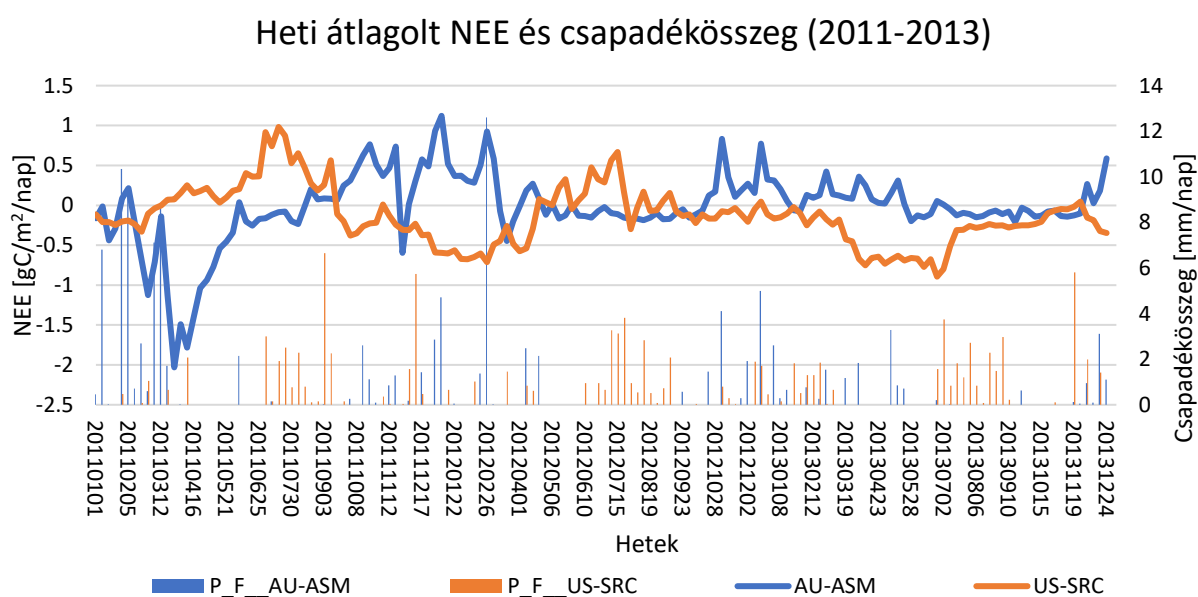
9. ábra: MY-PSO és GF-Guy mérőállomás szén-dioxid mérlegének és a beérkező rövidhullámú sugárzás alakulása heti bontásban (fent) és a napi bontású NEE kapcsolata a beérkező rövidhullámú sugárzással az MY-PSO állomáson (lent), 2007-2008

Adatok forrása: FLUXNET

A 9. ábra felső grafikonja a két állomáson mért nettó szén-dioxidáram alakulását összegzi egy kétéves időszakon (2007-2008) keresztül. Látható, hogy rendkívül egyenletesen működő ökoszisztémáról van szó, ha lineáris trendet illesztünk az idősorokra, a vonal meredeksége mindkét területen 0-hoz közelít. A besugárzás mennyisége a felhőborítottsággal fordítottan arányos, a rövidhullámú sugárzásban hosszútávon nincs változás, bár a csapadékmennyiségekben relatíve nagy mértékű eltérés van a két helyszínen. Mindkét

ökoszisztéma nettó szén-dioxid nyelőként funkcionál, MY esetén nem is volt olyan hét, amikor összességében CO₂ forrás lett volna.

Az alsó ábra a maláj állomáson mért napi NEE és RH beérkező sugárzás értékeit viszonyítja egymáshoz. A havi mozgóátlagok (pontosított görbék) segítségével könnyebben érzékelhető az erős negatív kovariáció, mely abból az összefüggésből származik, hogy a felhőzet visszaveri a fotoszintézishez szükséges napsugarakat. Ilyenkor a respiráció megerősödik és a NEE értéke növekedik. Alacsony frekvenciájú zaj látható a heti felbontású adatsorban (felső grafikon), azonban ezek kiegyenlítődnek a havi átlagolású adatsorokban.



10. ábra: Felsővitatagi ökoszisztémák összehasonlítása heti felbontású NEE és átlagos napi csapadékösszeg idősoraival (Adatok forrása: FLUXNET)

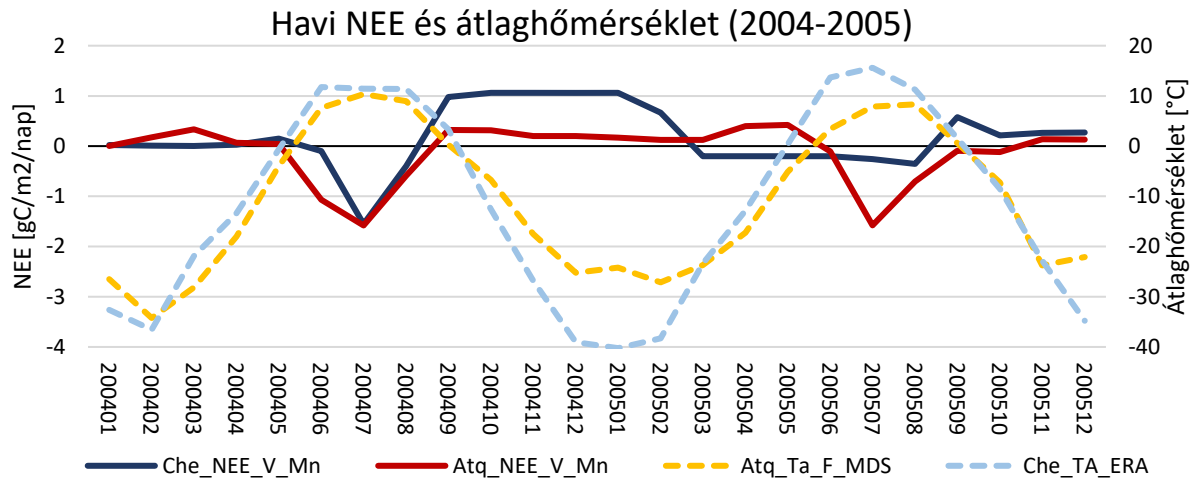
A szavanna éghajlat bemutatására egy ausztrál (AU-ASM, 22,2830°D, 133,2490°K) és egy arizonai (US-SRC, 31,9083°É, 110,8395°Ny) állomás 2011-2013 időszakban mért adatsorát mutatom be. Előbbi Ausztrália középső területein található, Alice Springs mellett. Felsővitatagi füves puszta és mulga fák³⁰ jellemzik a térséget. Maga a műszer 10 m magasán helyezkedik el. Az arizonai állomás Tucsonától délre, a mexikói határ közelében helyezkedik el. Vegetációját tekintve jellegzetes creosote cserjék³¹ borítják a területet. Ausztráliában az éves átlaghőmérséklet 22 °C, az éves csapadékösszeg 280 mm, míg Arizonában ezek az éghajlati értékek rendre 20 °C és 240 mm. Az éves csapadékösszegek jelentős változékonyságot mutatnak Alice Springs esetében, a vizsgált időintervallumban 411 mm-t és 142 mm-t is regisztráltak.

³⁰ Acacia aneura: Nyugat-Ausztráliában honos közepes méretű aszálytűrő fa,

³¹ Larrea tridentata: Észak- és Közép-Amerikában honos só- és aszálytűrő cserje, bozót

A 10. ábra illusztrálja az ökoszisztémák víztől való függőségét. Mindkét állomás a nyári esős évszak alatt kapja a legjelentősebb mennyiségű csapadékot, a grafikonon jól megfigyelhető a szezonális, illetve a két félgömb közötti féléves fáziseltolódás. 2011-ben, amikor az AU-SRC állomás 411 mm csapadékot kapott, a vegetáció a nyári időszakban (2011.01.-05.) jelentős nyelőként funkcionált. Folyamatosan érte csapadék, így a növényzet hatékonyan tudta felszívni és hasznosítani, így abban a félévben csupa negatív értékeket kapunk. Észrevehető, hogy a kiugró csapadéértékek megjelenését nem minden esetben követi NEE csökkenés. 2012 elején a térség legmagasabb értékét regisztrálták a vizsgált időszakban (13 mm/nap), mégis csekély csökkenést mutat a szén-dioxid mérleg. Ez annak köszönhető, hogy mivel előtte ritka és kevés volt a csapadék, a magas hőmérséklet kiszárította a talajt. Így hiába vált hirtelen elérhetővé jelentős mennyiségű víz, a talaj nem tudta azt elraktározni a növények számára, és az egyszerűen lefolyt vagy elpárolgott, mielőtt a növényzet hasznosíthatta volna.

A tundra éghajlaton a legjelentősebb vezérlő hatás a beérkező sugárzás nagymértékű éves ingadozása és az ebből adódó hőmérsékleti extrémumokhoz kapcsolódik. A növényzet jellemzően megszokta, hogy féléves sötét, hibernációs időszak után fél évig intenzív fénymennyiség éri.



11. ábra: Atqasuk (Alaszka) és Cherski (Szibéria) havi átlagos NEE és hőmérséklet viszonyai

Adatok forrása: FLUXNET

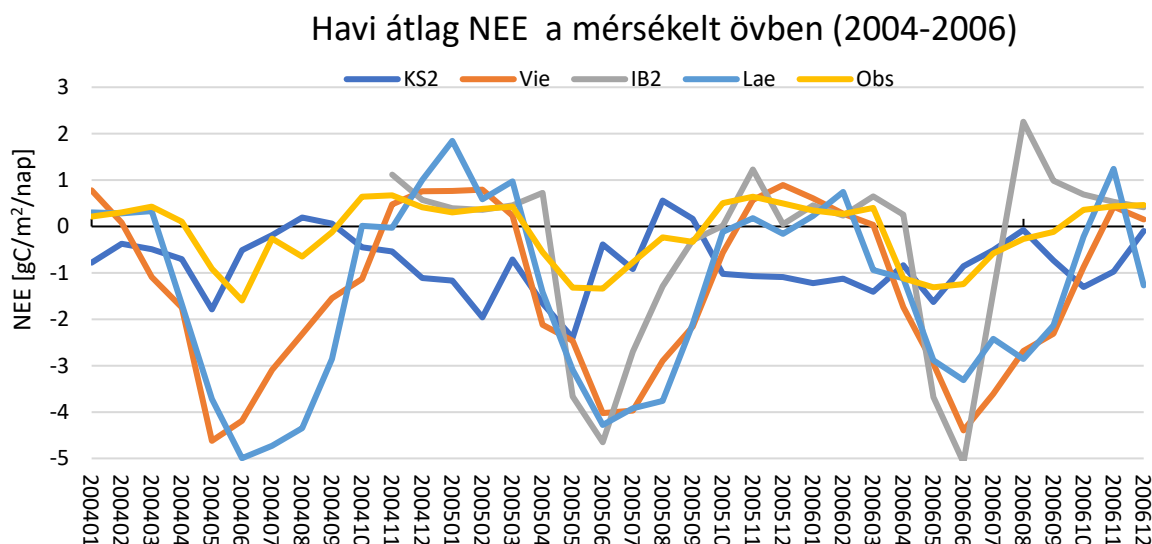
Atqasuk (US-Atq, 70,4696°É, 157,4089°Ny) Észak-Alaszka fagyos mocsarain terül el, Barrowtól mintegy 100 km-re délre. Növényzete gyér, fagyűrő sás és füves tundra. Évi átlagban -10°C az hőmérséklet jellemzi, mely csak nyáron emelkedik fagypont fölé. Kis mennyiségű csapadék (évente átlagosan 90-100 mm) hullik, mely leginkább nyáron fordul elő. Cherski a Kolima folyó deltáján helyezkedik el ÉK-Szibériában, mintegy 80 km-re a Kelet-Szibériai tengertől. -11°C az éves átlaghőmérséklete, majdnem 200 mm átlagos évi csapadékkal. Füves

tundra növényzet települt a szikes permafroszt talajra. Látható, hogy a téli hónapokban az NEE nagyjából konstans, mivel a növény fiziológiai folyamatai leállnak, tulajdonképpen megfagy a növény, viszont a respiráció miatt tovább működik.

Kód	Elhelyezkedés	KTC	Földrajzi szélesség [°É]	IGBP	pp átlag [mm]	T átlag [°C]	T SD [°C]
US-KS2	Kennedy Űrközpont, Florida, USA	Cfa	28,6086	CSH	1150	21,6	1,39
BE-Vie	Viesalm, Belgium	Cfb	50,3051	MF	995	8,1	1,91
US-IB2	Fermi Laboratórium, Chicago, USA	Dfa	41,8406	GRA	828	9,6	2,58
CA-Obs	Prince Albert, Saskatchewan, Kanada	Dfc	53,9872	ENF	621	1,1	2,35
CH-Lae	Laegern, Svájc	Dfb	47,4781	MF	1085	7,5	1,91

2. táblázat: A mérsékelt övi állomások éghajlati és ökológiai jellemzői a 2004-2006 időszakban., T SD a napi átlaghőmérsékletek szórását jelöli, és a kontinentális jelleget jellemzi.

A nyár érkezésével nő a sugárzási mennyiség és a hőmérséklet, ezek miatt a talaj víztartalma felolvad, és a környezet feléled. A tenyészidőszak csupán a nyár 3 hónapjából áll, amikor a hőmérséklet fagypont fölé emelkedik, azonban az éves NEE mérleget ilyen rövid idő alatt is pozitívba, illetve zérus közeli állapotba hozza.



12. ábra: Mérsékelt övi ökoszisztémák havi szén-dioxidáramai, 2004-2006
Adatok forrása: FLUXNET

A mérsékelt övi állomások éghajlati és ökológiai jellemzőit a 2. táblázat és a 12. ábra foglalja össze. Látható, hogy Vie és Lae a két legkevésbé változékony és leghatékonyabb ökoszisztéma, az idősorok egyértelműen mutatják a szezonálisitást. Naponta átlagosan 1 g szenet képesek megkötni m²-enként. Több éven keresztül is egyenletes menet jellemzi ezeket a

helyszíneket, mely az éghajlati változók kiegyensúlyozott menetének köszönhető. A hőmérséklet éves szinten csak kis mértékben változik, az európai klímát meghatározó Golf-áramlat pozitív hőmérsékleti anomáliája ellensúlyozza a magas szélesség miatti kisebb beérkező rövidhullámú sugárzást. A legnagyobb szezonális változékonyságot az IB2 állomás mutatja, melynek oka a nagyobb mértékű kontinentális jelleg. A szárazabb nyár miatt esetenként kialakuló aszályos jelleg miatt a száraz kontinentális éghajlat ökoszisztémái hajlamosak a vegetációs periódus közepén is CO₂ forrásként viselkedni (pl.: 2006.08.). A kisebb magasságú vegetációk jobban ki vannak téve az éghajlati változékonyságnak. A KS2 állomás a szubtrópusi monszun övezetbe esik, ahol nyáron jelentős mennyiségű csapadék hullik. A monszun esők tipikus megjelenése májusra tehető, és az NEE évi minimuma mindhárom évben májusban volt. Végül az Obs állomás Kanada mérsékelt nedves kontinentális területén található, egy fenyves területen. A boreális öv déli határán megfigyelhető a kontinentális jelleg a hűvös nyarakkal, ami a növényzet hőmérsékleti igényét behatárolja. A maximális nappali átlaghőmérséklet a bemutatott a három évben sosem haladta meg a 20 °C-ot.

Összességében elmondható, hogy a mérsékelt övi ökoszisztémák forrásként viselkednek az év legnagyobb részében, ezáltal átmenetet képeznek a szubarktikus és trópusi jellegű területek között. Éppen ezért változó, hogy melyik abiotikus tényező hatása érvényesül a leginkább, és melyik gátolja a legnagyobb mértékben a fotoszintézis folyamatait.

5. Összefoglalás

Szaktervezésben összefoglaltam a növényzet általános szerepét a felszín és a légkör közötti szén-dioxid körforgalom folyamatában. Ehhez áttekintettem az ökoszisztémák szén-dioxid fluxusának mérési lehetőségeit, a mérőállomások felépítését és a telepítés feltételeit, a mérőeszközök kalibrációját és szerkezeti működését, valamint az adatfeldolgozáshoz elengedhetetlen feltételeket és módszereket. Részletesen áttekintettem továbbá a számításokhoz alkalmazott legelterjedtebb modell típusokat (LUE modellek, ökoszisztéma folyamatmodellek, empirikus statisztikai modellek, machine-learning algoritmusok), melyeket az elérhető szakirodalom felhasználásával konkrét példákkal illusztráltam. Végezetül a különböző éghajlati viszonyok között megtalálható legfontosabb ökoszisztémák szénforgalomban játszott konkrét szerepét ismertettem a rendelkezésre álló FLUXNET mérések alapján. Ezek alapján a növényzet szénforgalomban játszott szerepével kapcsolatban elmondható, hogy a trópusi övezet ökoszisztémái szinte egész évben nettó szénnyelők, és a mérsékelt öv növényrendszerei is hatékonyan vonják ki a szén-dioxidot a légkörből. A térsíkok területén viszont az aszályos jelleg, míg a poláris területeken a napsugárzás nagy éven belüli változékonysága miatt a helyi növényzet inkább szénforrásként viselkedik.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni Dr. Pongrácz Ritának a konzulensi munkáját és segítségét, T. Puskás Mártának az OMSZ könyvtárbéli munkám megkönnyítéséért.

Ehhez a szaktervezéshez eddy kovariancia adatokat használtam, melyet a FLUXNET közössége (melynek tagjai a következő hálózatok: AmeriFlux, AfriFlux, AsiaFlux, CarboAfrica, CarboEuropeIP, CarboItaly, CarboMont, ChinaFlux, Fluxnet-Canada, GreenGrass, ICOS, KoFlux, LBA, NECC, OzFlux-TERN, TCOS-Siberia, USCCC) állított elő és osztott meg. Az ERA Interim analízis adatait, melyet az LSCE dolgozott fel, az ECMWF szolgáltatta. A FLUXNET eddy-kovariancia adatait a European Fluxes Database Cluster, AmeriFlux Management Projekt és a FLUXNET Fluxdata projektje dolgozta fel és egységesítette a CDIAC és ICOS Ecosystem Thematic Center, az OzFlux, ChinaFlux és AsiaFlux szervezet segítségével.

Irodalomjegyzék

- Aubinet, M. et al. (2000): Estimates of the annual net carbon and water exchange of European forests: The EUROFLUX methodology. *Adv. Ecol. Res.*, 30, 113–175.
- Baldocchi, D.D., Hicks, B.B., Meyers, T.P. (1988): Measuring biosphere–atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology*, 69, 1331–1340.
- Ball, J.T. (1988): An analysis of stomatal conductance, Ph.D. thesis, Stanford Univ., Stanford, Calif.
- Barcza, Z., Haszpra, L., Hidy, D., Gelybó, Gy., Dobor, L. (2012): A légkör és a bioszféra közötti széndioxid csere vizsgálata, *Légkör* 57/4., 147-150.
- Bartholy, J., Dezső, Zs., Gelybó, Gy., Kern, A., Pongrácz, R., Radics, K. (2013): 3.3. Párolgás. In: *Alkalmazott és városklimatológia* (szerk.: Pongrácz Rita, Bartholy Judit). Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest. 32-34.
- Belda, M., Holtanová, E., Kalvova, J., Halenka, T. (2016): Global warming induced changes of climate zones based on CMIP5 projections. *Climate Research*. 71. 10.3354/cr01418.
- Bonan, G.B. (1996): A Land Surface Model (LSM Version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies: Technical description and users guide, NCAR Tech. Note NCAR/TN-417+STR, Natl. Cent. for Atmos. Res., Boulder, Colo.
- Burba, G.G. (2013): Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural and Regulatory Applications. LI-COR Biosciences, Lincoln, Nebraska. 331.
- Burba, G.G. (2001): Illustration of Flux Footprint Estimates Affected by Measurement Height, Surface Roughness and Thermal Stability. In K. Hubbard and M. Sivakumar (Eds.). *Automated Weather Stations for Applications in Agriculture and Water Resources Management: Current Use and Future Perspectives*. World Meteorological Organization publication No.1074. HPCS Lincoln, Nebraska – WMO Geneva, Switzerland: 77-87
- Chen, W., Chen, J., Liu, J. and Cihlar, J. (2000): Approaches for reducing uncertainties in regional forest carbon balance. *Biogeochemical Cycles*, 14, 827-838.
- Ciais, P., Tans, P. P., Trolier, M., White, J. W. C., Francy, R. J. (1995): A large North Hemisphere terrestrial CO₂ sink indicated by the ¹³C/¹²C ratio of atmospheric CO₂. *Science*, 269, 1098–1102.
- Conway, T.J., Tans, P.P., Waterman, L.S., Thoning, K.W., Kitzis, D.R., Masarie, K.A., Zhang, N. (1994): Evidence for interannual variability of the carbon cycle from the NOAA/CMDL global air sampling network, *J. Geophys. Res.*, 99, 22831-22855.
- Coops, N.C., Black, T.A., Jassal, R.P.S, Trofymow, J.A.T., Morgenstern, K. (2007): Comparison of MODIS, eddy covariance determined and physiologically modelled gross primary production (GPP) in a Douglas-fir forest stand. *Remote Sensing of Environment*, 107(3): 385–401. doi: 10.1016/j.rse.2006.09.010

- Coops N.C., Waring, R.H., Law, B.E. (2005): Assessing the past and future distribution and productivity of ponderosa pine in the Pacific Northwest using a process model, 3-PG. *Ecological Modelling*. 183, 107-124
- Crowley, T. J., és S. K. Baum (1995): Reconciling Late Ordovician (440 Ma) glaciation with very high (14X) CO₂ levels, *J. Geophys. Res.*, 100(D1), 1093–1101, doi:10.1029/94JD02521
- Farquhar, G. D., von Caemmerer, S., Berry J. A. (1980): A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species, *Planta*, 149, 78–90, doi:10.1007/BF00386231.
- Foken, T., and Wichura, B. (1996): Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agric. For. Meteorol.*, 78, 83–105.
- Folland, C.K., Karl, T.R., Christy, J.R., Clarke, R.A., Gruza, G.V., Jouzel, J., Mann, M.E., Oerlemans, J., Salinger M.J., Wang, S.-W. (2001): Observed Climate Variability and Change. In: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
- Gitelson, A.A., Vina, A., Verma, S.B., Rundquist, D.C., Arkebauer, T.J., Keydan, G., Leavitt, B., Ciganda, V., Burba, G.G., Suyker, A.E. (2006): Relationship between gross primary production and chlorophyll content in crops: Implications for the synoptic monitoring of vegetation productivity. *Journal of Geophysical Research*, 111.
- Götz, S.J., Prince, S.D., Small, J. (2000): Advances in satellite remote sensing of environmental variables of epidemiological applications. *Advances in Parasitology*, 47, 289-307.
- Haszpra, L. (1996): Üvegházhatású gázok a légkörben. *A Természet Világa*. 127, 11-13.
- Haszpra, L., Barcza, Z., Davis, K.J., Tarczay, K. (2005): Long-term tall tower carbon dioxide flux monitoring over an area of mixed vegetation, *Agric. For. Meteorol.*, 132, 58–77.
- Hidy, D. (2010): Agroökológiai rendszerek szén- és vízháztartásának modellezése. doktori értekezés, Szent István Egyetem, Gödöllő (Témavezető: Dr. Nagy Zoltán PhD, Dr. Haszpra László PhD, Dr. Barcza Zoltán PhD) 119pp.
- Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A. (2001): IPCC, 2001: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
- Jung, M. et al. (2011): Global patterns of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide, latent heat, and sensible heat derived from eddy covariance, satellite, and meteorological observations, *J. Geophys. Res.*, 116, G00J07, doi:10.1029/2010JG001566.

- Keeling, C. D. (1960): The Concentration and Isotopic Abundances of Carbon Dioxide in the Atmosphere. *Tellus*, 12: 200–203. doi:10.1111/j.2153-3490.1960.tb01300.x
- Keeling, C. D., Piper, S. C., Heimann, M. (1996): Global and hemispheric CO₂ sinks deduced from changes in atmospheric O₂ concentration. *Nature*, 381, 218–221.
- Knoll, A., Bambach, R., Canfield, D., Grotzinger, J. (1996): Comparative Earth History and Late Permian Mass Extinction. *Science*, 273(5274), 452-457 pp.
- Köppen, W. (1884): Lefordította: Volken, E.; Brönnimann, S. "Die Wärmazonen der Erde, nach der Dauer der heissen, gemässigten und kalten Zeit und nach der Wirkung der Wärme auf die organische Welt betrachtet" [The thermal zones of the earth according to the duration of hot, moderate and cold periods and to the impact of heat on the organic world]. *Meteorologische Zeitschrift* (published 2011). 20 (3): 351–360.
- Lasslop, G., Reichstein, M., Papale, D., Richardson, A.D., Arneth, A., Barr, A., Stoy, P., Wohlfahrt, G. (2010): Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach: Critical issues and global evaluation, *Global Change Biol.*, 16, 187–208, doi:10.1111/j.1365-2486.2009.02041.x.
- Le Treut, H., Somerville, R., Cubasch, U., Ding, Y., Mauritzen, C., Mokssit, A., Peterson, T., Prather, M. (2007): Historical Overview of Climate Change. In: *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., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Leclerc, M., and Thurtell, G. (1990): Footprint prediction of scalar fluxes using a Markovian analysis. *Boundary-Layer Meteorology*, 52: 247-258
- Lieth, H., Whittaker, R.H. [Eds.] (1975): *Primary Productivity of the Biosphere*. New York: Springer-Verlag. 328pp.
- Lovelock, J. E. és Margulis, L. (1974): Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: The Gaia hypothesis. *Tellus*, 26: 2–10. doi:10.1111/j.2153-3490.1974.tb01946.x
- Luthi, D., Le Floch, M., Bereiter, M., Blunier, T., Barnola, J.-M., Siegenthaler, U., Raynaud, D., Jouzel, J., Fischer, H., Kawamura, K., Stocker T.F. (2008): High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present. *Nature*, Vol. 453, pp. 379-382, 15 May 2008.
- Masarie, K.A., Tans, P.P. (1995): Extension and integration of atmospheric carbon dioxide data into a globally consistent measurement record, *J. Geophys. Research*, vol. 100, 11593-11610
- Medlyn, B.E. (1997): Physiological basis of the light use efficiency model. *Tree Physiology*, Volume 18, Issue 3, 1 March 1998, Pages 167–176, <https://doi.org/10.1093/treephys/18.3.167>
- Monteith, J.L. (1972): Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology* 9: 747–766.

- Morales, P. et al. (2005): Comparing and evaluating process-based ecosystem model predictions of carbon and water fluxes in major European forest biomes. *Global Change Biology*, 11(12): 2211–2233. doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.01036.x
- Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., Zhang, H. (2013): Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (szerk.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Myneni, R.B., Keeling, C.D., Tucker, C.J. Asrar, G., Nemani, R.R. (1997): Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature* 386: 698–702.
- Nightingale, J.M., Coops, N.C., Waring, R.H., Hargrove, W.W. (2007): Comparison of MODIS gross primary production estimates for forests across the USA with those generated by a simple process model, 3-PGS. *Remote Sensing of Environment*, 109(4):500–509. doi: 10.1016/j.rse.2007.02.004
- Nyitrai, P., Bratek, Z., Fodor, F., Király, I., Parádi, I., Rácz, I., Rudnóy, Sz., Sárvári, É., Solti, Á., Szigeti, Z., Tamás, L. (2013): 3. A fotoszintézis. In: *A növényi anyagcsere élettana* (szerk.: Dr. Fodor, F.). Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest. 114-116
- Olson, D. et al. (2001): Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on Earth. *Bioscience* 51(11):933-938,
- Pálfia, Zs. és Kristóf, Z. (2013): A plasztiszok és a fotoszintézis. In: *A sejtbiológia alapjai* (szerk.: Pálfia Zs.). Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest. 85-86
- Rahman, A. F., Sims, D. A., Cordova, V. D. et al. (2005): Potential of MODIS EVI and surface temperature for directly estimating per-pixel ecosystem C fluxes. *Geophysical Research Letters*, 32(19): L19404. doi: 10.1029/2005GL024127
- Reichstein, M. et al. (2005): On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology*, 11: 1424–1439.
- Reynolds, O. (1895): On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of criterion. *Philosophical Transactions of Royal Society of London*, A174, 935-982.
- Ruimy, A., Saugier, B., Dedieu, G. (1994): Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *J. Geophys. Res.* 99:5263--5283.
- Ruimy, A., Jarvis, P.G., Baldocchi, D.D., Saugier B., Valentini, R. (1995): CO₂ fluxes over plant canopies: a review. *Adv. Ecol. Res.* 26:2--68
- Running, S.W. és Hunt, E.R.J. (1993): Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, Biome-BGC, and an application for global-scale models. San Diego (CA): Academic Press.

- Running, S.W., Nemani R. R., Heinsch F. A., Zhao, M., Reeves, M., Hashimoto, H. (2004): A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *Bioscience*, 54(6): 547–560. doi: 10.1641/0006-3568
- Running, S.W., Nemani, R.R. (1998): Relating seasonal patterns of the AVHRR vegetation index to simulated photosynthesis and transpiration of forests in different climates. *Remote Sensing of Environment* 24: 347–367.
- Running, S.W., Thornton, P.E., Nemani, R.R., Glassy, J.M. (2000): Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system. Pages 44–57 in Sala O, Jackson R, Mooney H., eds. *Methods in Ecosystem Science*. New York: Springer-Verlag.
- Schmid, H. P., (1994): Source areas for scalars and scalar fluxes. *Bound. -Layer Meteor.*, 67, 293–318.
- Schmid, H.P., Lloyd, C.R., (1999): Spatial representativeness and the location bias of flux footprints over inhomogeneous areas. *Agricultural and Forest Meteorology*, 93, 195-209
- Schuepp, P., Leclerc, M., Macpherson, J., Desjardins, R., (1990): Footprint Predictions of Scalar Fluxes from Analytical Solutions of the Diffusion Equation. *Boundary-Layer Meteorology*, 50: 355-373
- Sellers, P. J. (1987): Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration II. The role of biophysics in the linearity of their independence, *Remote Sens. Environ.*, 21, 143–183 pp.
- Sims, D.A. et al. (2008): A new model of gross primary productivity for North American ecosystems based solely on the enhanced vegetation index and land surface temperature from MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 112, 1633-1646.
- Stull, R. B. (1988): *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. 670.
- Tans, P. P., Fung, I. Y., Takahashi, T. (1990): Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. *Science*, 247, 1431–1438.
- Thoning, K.W., Tans, P.P., Komhyr, W.D. (1989): Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory, 2. Analysis of the NOAA/GMCC data, 1974 1985., *J. Geophys. Res.* ,94, 8549 8565.
- Trewartha, G.T. (1968): *An introduction to climate*. McGraw-Hill, New York, NY
- Trolier, M., White, J.W.C., Tans, P.P., Masarie, K.A., Gemery, P.A. (1996): Monitoring the isotopic composition of atmospheric CO₂: measurements from the NOAA Global Air Sampling Network, *J. Geophys. Res.*, 101, 25897-25916.
- Udvardy, M.D.F. (1975): *A classification of the biogeographical provinces of the world*. Morges (Switzerland): International Union of Conservation of Nature and Natural Resources. IUCN Occasional Paper no. 18.
- Wu, C., Chen, J. M., Huang, N. (2011): Predicting gross primary production from the enhanced vegetation index and photosynthetically active radiation: evaluation and calibration. *Remote Sensing of Environment*, 115(12): 3424–3435. doi: 10.1016/j.rse.2011.08.006

- Wu, C., Munger, J.W., Niu, Z. and Kuang, D. (2010): Comparison of multiple models for estimating gross primary production using MODIS and eddy covariance data in Harvard Forest, *Remote Sensing of Environment*, 114, 2925-2939.
- Xiao, J. et al. (2010): A continuous measure of gross primary production for the conterminous U.S. derived from MODIS and AmeriFlux data. *Remote Sensing of Environment*, 114(3): 576–591. doi: 10.1016/j.rse.2009.10.013
- Xiao, X., Zhang, Q., Braswell, B., Urbanski, S., Boles, S., Wofsy, S., Moore, B., Ojima, D. (2004): Modelling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. *Remote Sensing of Environment*, 91, 256-270.
- Zhao, M., Running, S.W., (2010): Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science*, 329(5994): 940–943. doi: 10.1126/science.1192666

Internetes források

- [1- Az élet fejlődéstörténete jegyzet] elte.pene.hu/~foldtud/1.../az_élet_fejlodestortenete/.../az_élet_fejlodestortenete.doc
- [2- Carbon Tracker 2016] <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/carbontracker/>
- [3- NOAA] ftp://aftp.cmdl.noaa.gov/products/trends/co2/co2_annmean_gl.txt
- [4- Agroklimatológia jegyzet] - <http://nimbus.elte.hu/~acs/pdf/OKTATAS/agroklimatologia.pdf>