

A LIZIMÉTER ÉS AZ EDDY-KOVARIANCIA ALAPÚ EVAPOTRANSZSPIRÁCIÓ ÖSSZEHASZNÁLÓ ELEMZÉSE SZÁNTÓFÖLDI KÖRNYEZETBEN

Incze Dóra⁽¹⁾ , Barcza Zoltán^(1, 2) , Fodor Nándor⁽³⁾ 

⁽¹⁾ ELTE Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet,

Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A

⁽²⁾ Czech University of Life Sciences Prague, Faculty of Forestry and Wood Sciences,
165 21 Prague 6, Kamýcká 129

⁽³⁾ ATK – Hun-Ren, Mezőgazdasági Intézet, 2462 Martonvásár, Brunszvik u. 2.

e-mail: incze.dora96@gmail.com, zoltan.barcza@ttk.elte.hu, fodor.nandor@atk.hu

Bevezetés

A felszíni párolgás a víz bonyolult globális körforgásának egyik legfontosabb komponense. A talaj-növény-légkör rendszerben a talajban tárolt vízmennyiség a csupasz talajról történő párolgás (evaporáció), és a növények párologtatása (transzspiráció) révén távozik a légkörbe. Emellett a lehullott csapadék egy része nem éri el a talajt, mert a vegetáció felfogja a vizet (intercepció). A növényzet felszínéről a nedvesség szintén evaporációval kerül vissza a légkörbe. Az említett folyamatokat együttesen evapotranszspirációnak (ET) nevezzük (Aubinet et al., 2012; Bonan, 2002).

A közvetlen ET becslési módszerek telepítési és karbantartási költségei magasak, azonban pontosabb és megbízhatóbb értékeket szolgáltatnak, mint az egyéb módszerek. Az egyik legismertebb közvetlen módszer a lizimétereken alapszik, amelyek kiemelt fontosságú szerepet töltenek be a talaj-növény-légkör rendszer megértésének folyamatában (Lanthaler, 2004; Evett et al., 2016). A liziméteres mérések alapján számított evapotranszspirációs értékeket széles körben elfogadott referenciának tekintik, amellyel gyakran összehasonlíthatják más módszerek – például az eddy-kovariancia méréstechnikán (Teuling, 2018) alapuló – evapotranszspiráció becslését.

A nemzetközi érdeklődés az ET mérési és modellezési módszereinek tesztelését és fejlesztését szorgalmazza (Stisen et al., 2021; Szilágyi & Crago, 2023), azonban a párolgási folyamatokkal kapcsolatos ismereti hiátusok miatt jelenleg is az ET az egyik legnehezebben becsülhető komponense a vízmérlegnek.

A mérési körülmények leírása és az adatok feldolgozásának módszertana

Az itt bemutatott tanulmány célja a tényleges ET mértékének meghatározása szántóföldi növényekre – kiemelt figyelemmel az őszi búzára – vonatkozóan liziméteres és eddy-kovariancia mérések alapján.

A kutatáshoz felhasznált liziméteres adatokat a Martonvásáron (1. ábra) 2018-ban telepített tizenkét darab liziméterből álló állomás szolgáltatja. A liziméterek egyenként 1 m² alapterületűek és 2 m magasságúak, illetve a peremmagasságuk 10 cm a talaj felszínétől számítva amiatt, hogy a felszíni el- és hozzáfolyás tagok elhanyagolhatók legyenek. A talajoszlopok tömegmérése precíziós mérleggel történik, amivel akár 0,01 mm pontossággal és nagy időbeli felbontással meghatározható az evapotranszspiráció értéke (Barcza & Fodor, 2018).

A liziméterek esetén az adatfeldolgozás az alábbi fő részfolyamatokból tevődik össze, amik közül a számítási és ábrakészítési feladatokhoz az R programnyelvet [1 – R-project.org] használjuk:

- 1) adatgyűjtés;
- 2) adatkorrigálás a csurgalékvíz figyelembevételével;
- 3) kiugró értékek azonosítása és kezelése;
- 4) a szélesebbség keltette zaj csökkentése érdekében simítási eljárás alkalmazása;
- 5) a napi ET (mm nap⁻¹) meghatározása a talaj vízmérleg egyenletéből kiindulva.

A liziméterekkel kapcsolatos adatfeldolgozás részletesebb leírását Incze et al. (2022) munkája tartalmazza.

Az eddy-kovariancia (EK)¹ mérési adatait a martonvásári liziméter mérőállomáshoz legközelebb található, szántóföldi környezetben működő kajászói és pettendi (1. ábra) EK tornyok szolgáltatták. Megjegyzésként, Magyarországon több helyen is végeznek EK méréseket, melyeknek az összehasonlító elemzését az ET vonatkozásában Incze et al. (2023) foglalta össze.

Az EK mérés technikával a nagy gyakorisággal detektált vertikális szélesebbség és egy adott koncentráció kovarianciáját származtatjuk, ami leírja az időegység alatt felületegységen átáramló anyag mennyiségét, azaz a fluxust, amit félórás felbontásban szokás megadni.

Az ET EK mérések esetén a felszíni energiamérleg egyenletéből kiindulva, a látens hő és a párolgáshő hányadosából határozható meg (Denager et al., 2020), ahol a látens hőáram turbulens fluxusa a vízgőz koncentrációból származtatható (Aubinet et al., 2012). Az EK mérés technikával számolt látens hőáram (LE) félórás értékeiből a következő módon aggregálunk napi ET (mm nap⁻¹) értéket:

$$ET_{EK,napi} = \frac{1}{\rho_w} \sum_{i=0}^{48} \frac{LE_{30min}^i}{\lambda(T)} \quad (1)$$

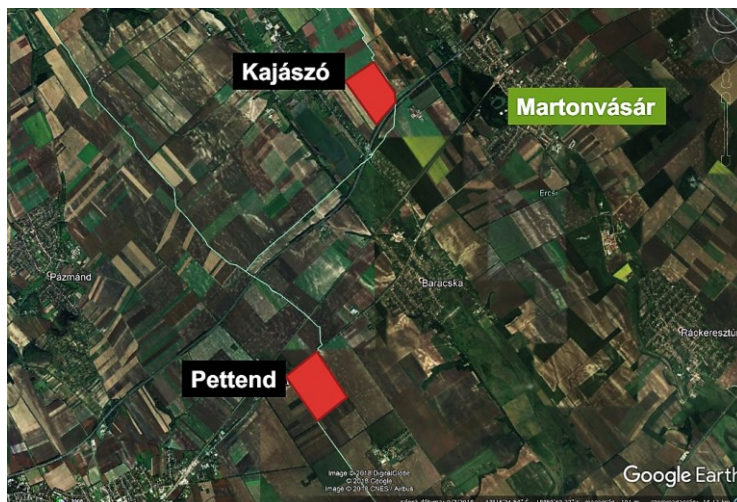
ahol ρ_w a víz sűrűsége (kg m⁻³) és λ a párolgáshő (MJ kg⁻¹), ami a T hőmérséklet (°C) függvénye. Ez utóbbit Ding et al. (2010) egyenlete alapján számítjuk:

$$\lambda = (2.501 - 0.00236T) \quad (2)$$

Az EK módszerrel ideális esetben (viszonylag sík területen, valamint anticiklonális és advekciónélküli időjárási helyzetben) lehet kizárólag pontos mérést végrehajtani. Mivel a legtöbb esetben ezek a feltételek nem adóttak, a mérések sok esetben véletlen hibával terheltek. Vannak olyan technikai okok (például áramszünet, műszer-kalibráció), amikor a folyamatos méréshez szükséges feltételek nem tudnak teljesülni, ezáltal pedig akár 20–60%-os arányban hiányoznak adatok az adatsorból (Fine et al., 2022). Az adatok napi, havi, illetve éves szintű integrálásához a hiányzó adatok pótlása elengedhetetlen, amit úgynevezett “gap filling” módszerekkel szoktak végrehajtani (Aubinet et al., 2012). A kutatásunk során a

¹ Az eddy-kovariancia (EK) mérés technika egy olyan mikrometeorológiai módszer, ami folyadékdinamikai és statisztikai alapokon nyugszik (Baldocchi, 2014). A módszer elnevezése a légkörben előforduló örvényekre (angolul “eddy”) utal, amelyek biztosítják a talaj-növény-légkör rendszerben lezajló folyamatok által létrehozott különböző anyag- és energiaáramok (például szén-dioxid, szénzibilis és/vagy látens hő, illetve momentum) szállítását. Kellően magas frekvenciával működő, rövid válaszidővel rendelkező szónikus anemométerek és gázanalizátorok révén a mikrometeorológiában jól ismert anyagmegmaradási egyenletből kiindulva ezen függőleges irányú, turbulens, sztochasztikus jellegű anyag- és energiaáramokat tudjuk számszerűsíteni (Stull, 1988). Az elnevezésben szereplő „kovariancia” egy statisztikai mérőszám, amivel azt vizsgáljuk, hogy két adatsor (esetünkben idősor, konkrétan a vertikális szélesebbség és a gázkoncentráció) esetén a változók változékonysága milyen mértékben hasonlít egymáshoz (Goodman, 1960).

hiányzó adatok pótlása az átlagos napi menetek (MDV, mean diurnal variance, Vekuri et al., 2023) módszerével történt.



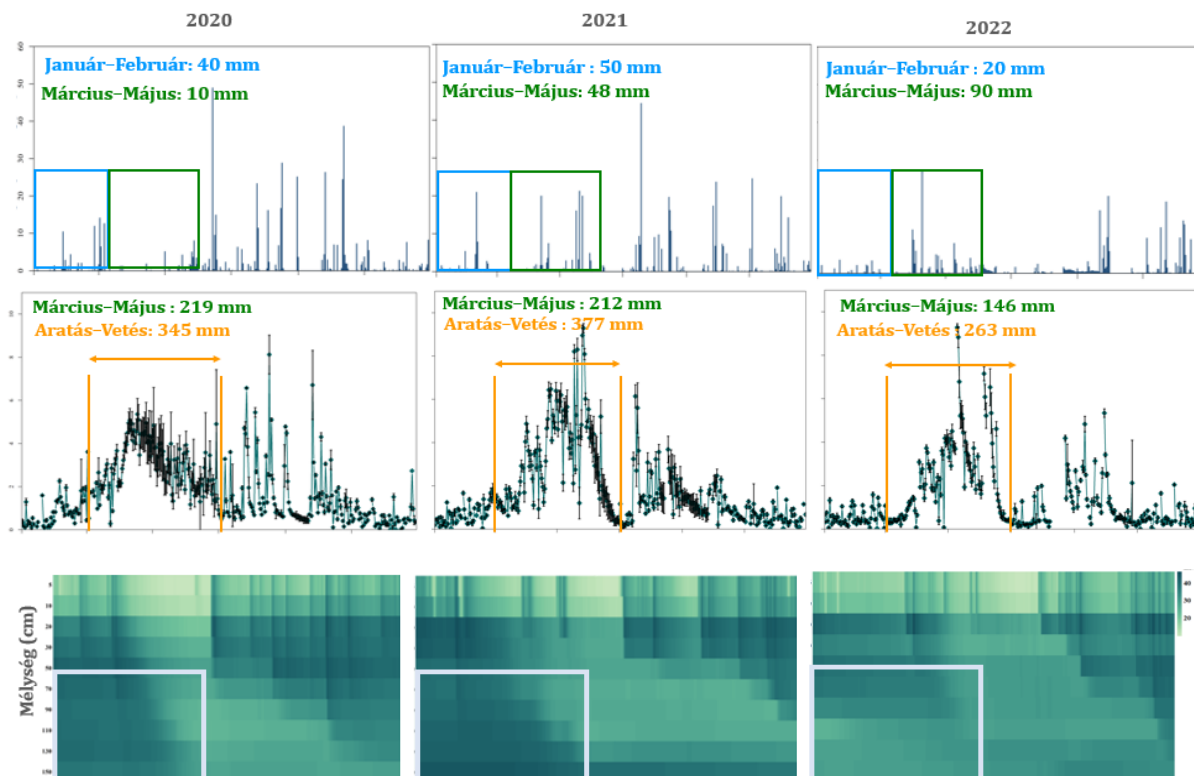
1. ábra: Jelen tanulmányban bemutatott mérési helyszínek földrajzi elhelyezkedése
[2 – Google Earth].

Eredmények

A liziméteres mérések 2020–2022 közötti időszakban kapott eredményét a 2. ábra szemlélteti. A felső sorban a napi csapadékösszegek (mm), középen a napi ET értékek (mm), valamint az alsó sorban a napi talajnedvesség értékek ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) láthatók az őszi búzára vonatkozóan.

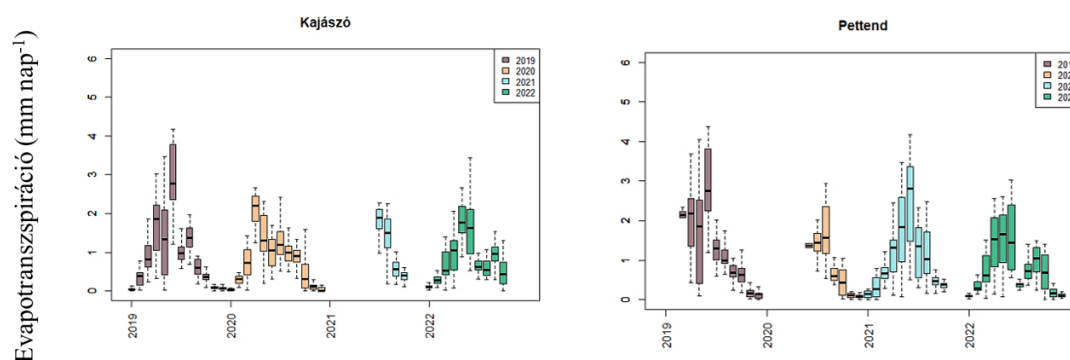
Az eddigi évek eredményei alapján elmondható, hogy a csapadék mennyisége és a csapadékhullás intenzitása nagyban befolyásolhatja a talajnedvességet, ami hatással van a csupasz talaj párologására, a növényi párologtatásra, és így az ET mértékére is. A 2022-es évben extrém hosszú száraz időszak sújtotta az országot, a csapadékösszeg 20 mm volt a januártól márciusig tartó időszakban, ami kevesebb mint a fele a korábbi évek csapadékmennyiségeinek (2. ábra, felül). Ennek eredményeként 2022-ben az őszi búza ET mértéke jóval alatta maradt a megelőző évek ET mértékének. Számszerűsítve, a március elejétől június végéig terjedő időszakban 2020-ban 345 mm, 2021-ben 377 mm volt az összesített ET mértéke. A legmagasabb átlagos napi ET 6–8 mm nap^{-1} volt. 2022-ben azonban az összesített ET mértéke nem érte el a 300 mm-t (263 mm), a legmagasabb átlagos napi ET alig érte el az 5 mm nap^{-1} mértéket. A téli csapadék megléte ez alapján kiemelt szerepet tölthet be a rendelkezésre álló vízmennyiség szempontjából (2. ábra, középen).

Továbbá, az ún. Hovmöller diagram (2. ábra, alul) látványosan szemlélteti az őszi búza esetén megfigyelhető lassú csökkenést a talajnedvesség értékek esetén, ami a mélyebb rétegekből a gyökérzet fejlődése révén történő fokozatos vízfelvétellel magyarázható. 2021-ben a tél nem volt csapadékban szegény, azonban 2022-ben egészen áprilisig nem hullott jelentős csapadékmennyiség, és ennek megfelelően mind a talaj felső rétegeiben, mind pedig az alsó rétegekben alacsonyabb volt a nedvességtartalom a korábbi évekhez képest. Ennek köszönhetően a 2022-es évben a talaj mélyebb rétegeiben – ahol a növényzet általi vízfelvétel elsősorban történik – nem állt rendelkezésre elég nedvesség ahhoz, hogy az őszi búza kellő mértékben tudjon párologtatni. Ez összhangban van azzal, hogy az előző évekhez viszonyítva az ET mértéke is kisebb volt.



2. ábra: A liziméteres mérésekből származtatott napi csapadékösszegek (felül), napi evapotranszspirációs értékek (középen), napi átlagos talajnedvesség értékek (alul) a 2020–2022 közötti időszakban, az őszi búzával borított liziméterek átlagos értékeit véve.

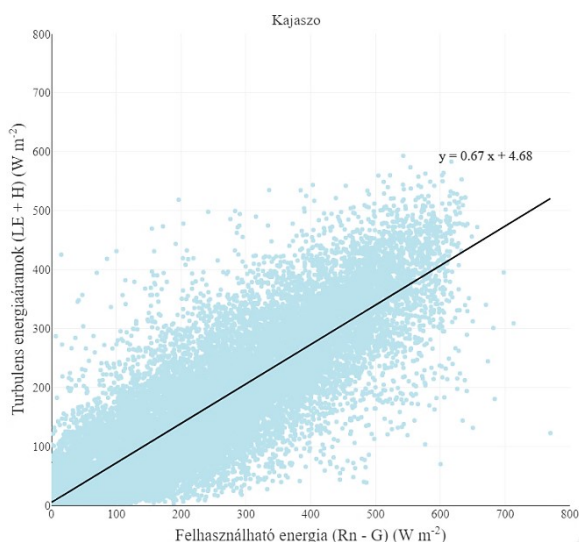
A 2019–2022 közötti időszakban Kajászón és Pettenden különböző típusú mezőgazdasági növényeket termesztettek, ezek közül az őszi búza éveit (2019 és 2022) vettük figyelembe a jelen tanulmányban. Az EK mérések feldolgozását követően a hiányzó napi adatok közül azokat pótoltuk a havi átlaggal (Zitouna-Chebbi et al., 2018), amelyek esetén az adott hónap legalább 66%-os időbeli lefedettséggel rendelkezett a napi szintű fluxusok alapján. Az ET értékeket dobozdiagram (ún. boxplot) segítségével mutatjuk be (3. ábra). A legmagasabb átlagos napi ET értékek 2019-ben 4 mm nap^{-1} , 2022-ben 3 mm nap^{-1} körül alakultak. Az ET összesített értéke a március elejétől június végéig tartó időszakban 2019 és 2022 esetén rendre 330 mm és 250 mm volt átlagosan Kajászó és Pettend esetén.



3. ábra: ET értékek a 2019–2022 közötti időszakra vonatkozóan Kajászó (bal oldal) és Pettend (jobb oldal) esetén.

Az eredmények alapján az EK módszerével alacsonyabb ET értékeket kaptunk, mint a tömegmérésen alapuló liziméteres mérésekkel. Az EK mérések esetében azonban sokszor felmerül az energiamérleg lezárásának problémája is (Twine et al., 2000; Mauder et al., 2020). Az adatfeldolgozás során emiatt megvizsgáltuk az energiamérleg hiányt, vagyis a látens és a szenzibilis hőáram, illetve a felhasználható energia egyensúlyát. Abban az esetben, amikor a regresszió meredeksége egy körüli (azaz az energiamérleg zár, és teljesül az energiamegmaradás törvénye), a becslés realisztikusnak tekinthető (Verma et al., 2005).

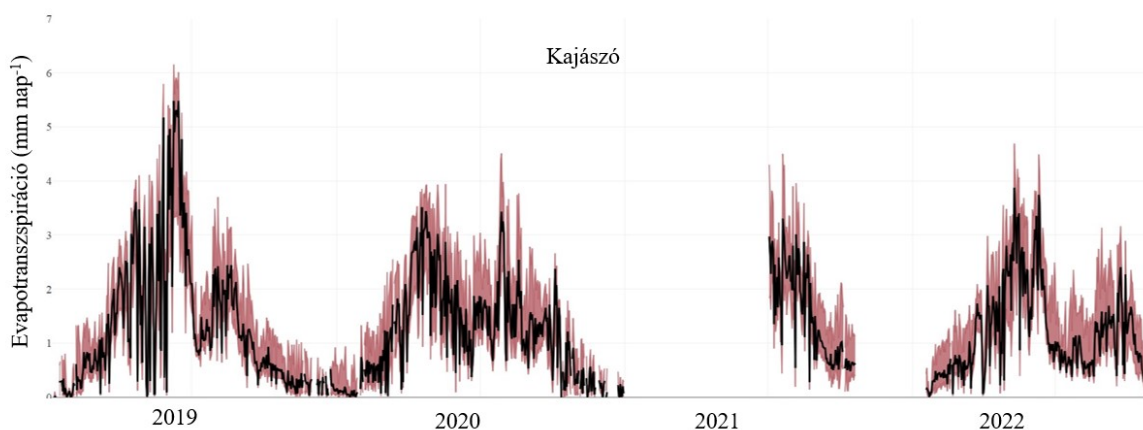
A 4. ábrán a félórás értékek alapján vett energiamérleg hiányát mutatjuk be Kajászó esetén a 2019–2022-es időszakot tekintve. A kutatás célja kifejezetten a félórás értékek vizsgálata volt, mivel a szakirodalom szerint (Mauder et al., 2020) a zárási hiba a napi értékek alkalmazásával csökken. Az ábrán jól látható, hogy a regresszió meredeksége 0,67, ami jóval alatta van a kívánt eredménynek. Ebből adódóan az EK módszer akár jelentősen alulbecsülheti az ET értékét.



4. ábra: Az energiamérleg hiány vizsgálata Kajászó esetén a 2019–2022 közötti időszakot tekintve, a félórás értékekből kiindulva.

A szakirodalom (Mauder et al., 2020; Durand, 2022) több megoldást javasol az energiamérleg lezárásához, amik alapján három esetet vizsgáltunk meg: 1) kizárólag a szenzibilis hőáramnak tulajdonítottuk a veszteséget; 2) kizárólag a látens hőáramnak tulajdonítottuk a veszteséget; 3) a Bowen-arány (a szenzibilis és látens hő aránya) megmaradását figyelembe véve korrigáltuk a szenzibilis és a látens hőáramot. Az 1) esetben az ET lehető legkisebb, a 2) esetben pedig a lehető legnagyobb értékét kaptuk, tehát energetikai szempontból behatároltuk a lehetséges ET értékét.

A korrekciót követően meghatároztuk a lehető legnagyobb és legkisebb napi ET értékeket (mm nap^{-1}) a kajászoói szántóföldre vonatkozóan a teljes idősorra vonatkozóan. A 2019–2022 közötti időszak lehetséges ET értékeit az 5. ábra szemlélteti. A kapott eredmények a liziméteres mérésekből kapott eredményeket már jobban tükrözik: a legmagasabb napi ET értékre $6,15 \text{ mm nap}^{-1}$ -ot kaptunk a 2019-es évben, míg a 2022-es évben ugyanez az érték $4,7 \text{ mm nap}^{-1}$ volt. Az eredmények viszont azt sugallják, hogy igen nagy bizonytalansággal becsülhető az ET az EK mérések alapján: akár a $2,5 \text{ mm nap}^{-1}$ mértéket is meghaladhatja a lehető legmagasabb és legalacsonyabb ET értékek közötti eltérés napi szinten.



5. ábra: A napi ET lehetséges értékei (mm nap⁻¹) Kajászó (szántóföld) esetén a 2019–2022 közötti időszakban. Az intervallumba eső vonal a Bowen-arány megőrző módszer eredménye.

Összefoglalás

A növénytermesztésben a rendelkezésre álló vízmennyiség egyre fontosabb kérdéssé válik a klímaváltozás tükrében, hiszen a népesség növekedésével nő az élelmiszer iránti kereslet is. A növekvő élelmiszerigény kielégítése érdekében az édesvízkészletek fenntartható használata iránti nemzetközi érdeklődés az ET mérési és modellezési módszereinek tesztelését és fejlesztését szorgalmazza (Stisen et al., 2021; Szilágyi & Crago, 2023).

A liziméteres mérések alapján számított ET értékeket széles körben elfogadott referenciának tekintik, és más módszerek tesztelésére használják (Lanthaler, 2004; Evett et al., 2016). Az egyik módszer az EK mérésekre támaszkodik (Pan et al., 2020), amivel a függőleges irányú, turbulens anyag- és energiaáramokat tudjuk számszerűsíteni, köztük a látens hőáramot, amiből az ET meghatározható. Mivel azonban az EK mérések esetén sokszor felmerül az energiamérleg lezárásának problémája, ezért az ET meghatározása előtt korrekcióra van szükség. Tekintve a szakmai konszenzus hiányát a korrekció kapcsán, úgy korrigáltuk a hőáramokat, hogy megkapjuk napi szinten a lehető legkisebb és legnagyobb ET értékeket, amit a hozzáférhető energiamennyiség korlátozott. A korrekciót követően az EK méréseken alapuló legmagasabb napi átlagos ET értéke közelítette a liziméterekkel kapott eredményeket.

Köszönetnyilvánítás

A tanulmány elkészítéséhez hozzájárult még a TKP2021-NKTA-06 projekt, amely a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból, a [TKP2021-NKTA] támogatási program keretében finanszírozott, az Innovációs és Technológiai Minisztérium által nyújtott támogatással valósult meg.

A kutatások a GINOP-2.3.2-15-2016-00028 és az Éghajlatváltozás Nemzeti Multidiszciplináris Laboratórium RRF-2.3.1-21-2022-00014 számú projektek és az MTA-MATE Agroökológia Kutatócsoport támogatásával valósultak meg.

Hivatkozások

Aubinet, M., Vesala, T., Papale, D., 2012: Eddy covariance: A practical guide to measurement and data analysis. Dordrecht, the Netherlands/ Heidelberg, Germany/London, UK/New York, NY: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2351-1>

- Baldocchi, D., 2014: Measuring fluxes of trace gases and energy between ecosystems and the atmosphere - the state and future of the eddy covariance method. *Global Change Biology*, 20: 3600–3609. <https://doi.org/10.1111/gcb.12649>
- Barcza, Z., Fodor, N. (szerk.), 2018: Az AgroMo megközelítés: integrált biogeokémiai és mezőgazdasági modellrendszer kialakítása a hazai agroklimatológiai környezetben – modellfejlesztés és megfigyelőrendszer kapcsolata és együttműködése. Martonvásár. 150p.
- Bonan, G., 2002: Ecological Climatology. Concepts and applications. Cambridge University Press, Cambridge. 678p. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(02\)00008-3](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(02)00008-3)
- Denager, T., Looms, M.C., Sonnenborg, T.O., Jensen, K.H., 2020: Comparison of evapotranspiration estimates using the water balance and the eddy covariance methods. *Vadose Zone Journal*, 19(1): e20032. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20032>
- Ding, R., Kang, S., Li, F., Zhang, Y., Tong, L., Sun, Q., 2010: Evaluating eddy covariance method by large-scale weighing lysimeter in a maize field of northwest China. *Agriculture Water Management*, 98: 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.08.001>
- Durand, P., 2022: A Possible Reconciliation between Eddy Covariance Fluxes and Surface Energy Balance Closure. *Atmosphere*, 13: 1965. <https://doi.org/10.3390/atmos13121965>
- Evet, S.R., Howell, T.A., Schneider, A.D., Copeland, K.S., Dusek, D.A., Brauer, D.K., ... & Gowda, P.H., 2016: The Bushland weighing lysimeters: A quarter century of crop ET investigations to advance sustainable irrigation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)*, 59: 163–179. <https://doi.org/10.13031/trans.58.11159>
- Fine, L., Richard, A., Tanny, J., Pradalier, C., Rosa, R., Rozenstein, O., 2022: Introducing State-of-the-Art Deep Learning Technique for Gap-Filling of Eddy Covariance Crop Evapotranspiration Data. *Water*, 14: 763. <https://doi.org/10.3390/w14050763>
- Goodman, L.A., 1960: On the exact variance of products. *Journal of the American Statistical Association*, 55: 708–713. <https://doi.org/10.1080/01621459.1960.10483369>
- Incze, D., Barcza, Z., Fodor, N., 2022: Liziméteres mérési adatok feldolgozása. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, 34: 57–64. <https://doi.org/10.31852/EMF.34.2022.057.064>
- Incze, D., Barcza, Z., Pintér, K., Nagy, Z., Balogh, J., Fodor, N., Haszpra, L., 2023: Eddy-kovariancia alapú evapotranszspiráció mérések összehasonlító elemzése. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, 35: 41–53. <https://doi.org/10.31852/EMF.35.2023.041.053>
- Lanthaler, C., 2004: Lysimeter stations and soil hydrology measuring sites in Europe: Purpose, equipment, research results, future developments. Diplomamunka (témavezető: Dr. Johann Fank). School of Natural Sciences at the Karl-Franzens-University Graz, Graz. 147p.
- Mauder, M., Foken, T., Cuxart, J., 2020: Surface-energy-balance closure over land: A review. *Boundary-Layer Meteorology*, 177: 395–426. <https://doi.org/10.1007/s10546-020-00529-6>
- Pan, S., Pan, N., Tian, H., Friedlingstein, P., Sitch, S., Shi, H., ... & Kato, E., 2020: Evaluation of global terrestrial evapotranspiration by state-of-the-art approaches in remote sensing, machine learning, and land surface models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24: 1485–1509. <https://doi.org/10.5194/hess-2019-409>
- Stisen, S., Soltani, M., Mendiguren, G., Langkilde, H., Garcia, M., Koch, J., 2021: Spatial Patterns in Actual Evapotranspiration Climatologies for Europe. *Remote Sensing*, 13: 2410. <https://doi.org/10.3390/rs13122410>
- Stull, R.B., 1988: An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. 670p. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3027-8>
- Szilágyi, J., Crago, R.D., 2023: A thermodynamics-based versatile evapotranspiration estimation method of minimum data requirement for water resources investigations. *Journal of Hydrology*, 624: 129917. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129917>
- Teuling, A.J., 2018: A forest evapotranspiration paradox investigated using lysimeter data. *Vadose Zone Journal*, 17: 170031. <https://doi.org/10.2136/vzj2017.01.0031>

- Twine, T.E., Kustas, W.P., Norman, J.M., Cook, D.R., Houser, P.R., Meyers, T.P., ... & Wesely, M.L., 2000: Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103: 279–300. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00123-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00123-4)
- Vekuri H., Tuovinen, J.P., Kulmala, L., Papale, D., Kolari, P., Aurela, M., ... & Lohila, A., 2023: A widely-used eddy covariance gap-filling method creates systematic bias in carbon balance estimates. *Scientific Reports*, 13(1):1720. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28827-2>
- Verma, S.B., Dobermann, A., Cassman, K.G., Walters, D.T., Knops, J.M., Arkebauer, T.J., ... & Yang, H., 2005: Annual carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maizebased agroecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 131: 77–96. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.05.003>
- Zitouna-Chebbi, R., Prévot, L., Chakhar, A., Marniche-Ben Abdallah, M., Jacob, F., 2018: Observing actual evapotranspiration from flux tower eddy covariance measurements within a hilly watershed: Case study of the Kamech site, Cap Bon Peninsula, Tunisia. *Atmosphere*, 9: 68. <https://doi.org/10.3390/atmos9020068>

Internetes hivatkozások

- [1 – R-project.org]: <https://www.R-project.org/>
[2 – Google Earth]: <https://www.google.com/earth/>
-

ORCID

- Incze D.  <https://orcid.org/0000-0003-0374-8842>
Barcza Z.  <https://orcid.org/0000-0002-1278-0636>
Fodor N.  <https://orcid.org/0000-0002-6460-1767>