

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR

Biológia TDK 2022, tavaszi forduló

**Hol erdősítsünk szénmegkötés céljából a
vízhiányos sík vidékeken?**

Tóth Benedek György

Biológia MSc, I. évfolyam

Témavezető:

Dr. Tölgyesi Csaba,

egyetemi adjunktus

Szeged, 2022

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés	3
2. Célkitűzés	6
3. Anyagok és módszerek	7
3.1. <i>Vizsgálati területek</i>	7
3.2. <i>Mintavételezés és elemzés</i>	8
4. Eredmények	11
4.1. <i>Talajszerkezet</i>	11
4.2. <i>Talajnedvesség</i>	12
4.3. <i>Lombkorona borítás</i>	18
4.4. <i>A lágyszárú biomassza és az avar összetétele</i>	20
4.5. <i>Mikroklíma</i>	22
5. Megvitatás	23
6. Összefoglalás és kitekintés	26
7. Köszönetnyilvánítás	27
Irodalomjegyzék	28
Nyilatkozat	32

1. BEVEZETÉS

Az ember természet- és környezetátalakító hatása mára soha nem látott méreteket öltött. Mindezek egyik fő következménye a globális klímaváltozás is, melyet elsősorban az ipari forradalom óta folyamatosan növekvő légköri szén-dioxid megemelkedése okoz (*Von Stork és Stehr*, 2006). A klímaváltozás megfékezésére regionálisan és világszinten is születtek kormányzati, kormányközi és civil kezdeményezések, és a tudományos szakma is évtizedek óta foglalkozik a modellezésével, a változás és a felmelegedés jövőbeni predikcióinak felállításával, illetve a hatások mérséklésének lehetőségeivel (*Araujo és Rahbek*, 2006, *Laffety*, 2009). Az emelkedő szén-dioxid szint megfékezésére nagyon sok javaslat született. Jelenleg nemzetközileg a legígéretesebb megoldást a degradált élőhelyek helyreállításában és a még érintetlen területek megóvásában látják (*Lewis és mtsai*, 2019). Az élőhely-rekonstrukciós programok közül eddig az erdősítés kapta a legnagyobb hangsúlyt. Egyes álláspontok szerint globálisan az aktuálisan fátlan, de fás vegetációt eltartani képes régiók erdősítése jelentheti a leghatékonyabb megoldást a légköri szén-dioxid szint csökkentésére (*Bastin és mtsai*, 2019). Viszont azt is érdemes figyelembe venni, hogy a fátlan, mérsékelt övi gyepterületek alatti talajban kötött formában igen nagy mennyiségű szén tud felhalmozódni, mely az erdősítés során felszabadulhat, és további felhalmozódása gátolt lehet az erdei talajfauna nagyobb lebontó aktivitása miatt (*Bond*, 2019). A gyenge vízellátottság miatt fátlan régiók (mint például az erdős-sztyepp zóna vagy számos trópusi szavannás övezet) erdősítésével fokozhatjuk a tüzesetek gyakoriságát és intenzitását, ami a további szénmegkötés helyett szénfelszabadulást eredményezne és növelné a légkör szén-dioxid szintjét. További aggályokat vet fel, hogy az erdősítés, mint fogalom nem egyértelműsíti, hogy a régióra jellemző őshonos fás közösségek telepítése vagy idegenhonos fafajok betelepítése a cél. Mindezek figyelembevételével tehát nem biztos, hogy jó irány olyan területeket, első sorban gyepeket, erdővé alakítani, amelyek vagy korábban sem rendelkeztek erdőségekkel, vagy a jelenlegi biotikus és abiotikus tényezők már nem teszik lehetővé a terület fásítását (*Zeng és mtsai*, 2009; *Veldman és mtsai*, 2019).

Potenciális erdősíthető területnek tekinthetők a Kárpát-medence síkvidéki, jelenleg nagyjából fátlan, vagy erdős-sztyepp fiziognómiájú területei is. A régió éghajlata szubkontinentális, enyhe mediterrán hatással. Növényföldrajzi szempontból az Eurázsiai erdős-sztyepp zónához tartozik (*Dövényi*, 2012). Az erdős-sztyepp olyan mérsékeltövi élőhelykomplexumok, melyek keletkezése az éghajlat szemi-arid jellegének köszönhető. Klimatikusan ez magában foglal egy száraz nyári periódust, de erős befolyással lehetnek biotikus (pl. legelő herbivorok) tényezők is a fás vegetáció záródásának meggátolásában, mely

végül fás-gyepes mozaikok kialakulását tette lehetővé természetes körülmények között (*Erdős és mtsai*, 2018). Palinológiai kutatások azt mutatják, hogy a mérsékeltövi lombhullató erdők és a nyílt sztyeppi élőhelyek már a posztglaciális időszakban is fellelhetőek voltak a Kárpát-medencében (*Magyari és mtsai*, 2010). Mivel ezek a területek megfelelő éves hőmérséklettel és megfelelő csapadékkal rendelkeznek a mezőgazdasági növények számára, sajnos jelentős hányadukat a történelem során szántófölddé alakították (*Gowda és mtsai*, 2012). Ezekből napjainkban elég sok termőföld merül ki, és veszt el gazdasági hasznát. E felhagyott területek a globális élőhely-restaurációs törekvések célpontjaivá válhatnak (*Hobbs és Cramer*, 2007). A helyreállítási mozgalmak azonban a gyep- vagy erdő restauráció helyett az erdősítést helyezik előtérbe annak minden káros hatásával együtt.

Az egyik fő oka annak, hogy ezek a területek nem erdősültek be az éghajlatból származó vízhiány, amit a jelenleg is folyamatban lévő klímaváltozás tovább súlyosbít (*Mátyás és Sun*, 2015). Az erdősüléshez egész évben stabil vízellátásra van szükség, amit a hulló csapadékból vagy az elérhető talajnedvességből képesek a fák felszívni. A fás szárú növények mélyebb talajrétegekből hasznosítják a vizet és ez egy erdő esetében jelentős szárító hatással lehet a talajra, éppen ezért erdősültség esetén elengedhetetlen ezen rétegek megfelelő vízutánpótlása, ezért hosszú távon zárt erdőkben csak megfelelő vízutánpótlás esetén gondolkozhatunk, ellenkező esetben regionális vízhiányt generálhatunk (*Zhai és mtsai*, 2014). Erre a legismertebb példát az észak-kínai sztyepp és erdőssztyepp területek kiterjedt erdősítése jelenti, melyet az elsivatagosodás megfékezésére kezdeményeztek, de végső soron a régió további kiszáradását okozták vele (*Cao és mtsai*, 2007; *Li és mtsai*, 2021).

Az erdősítés okozta esetleges problémák előrejelzéséhez a fák sokrétű, ökoszisztéma mérnök hatásait kell megértenünk, amelyekkel befolyásolják egy terület hidrológiai tulajdonságait. Terebélyes lombkoronájukkal csökkentik a lombkoronájuk alatti besugárzást és a hőmérsékletet (*Vetaas*, 1992), de a lombkorona felfogja a hulló csapadék jelentős hányadát, ami így kisebb mértékben éri el a talajt és szárító hatással van a területre (*Hasselquist és mtsai*, 2018). Mikroklimatikus hatásuk mellett, az erdőfoltok növelhetik a légkör hőmérsékletét is. A lombkorona felülete ugyanis többnyire sötétebb, mint a gyepterületeké, ezért nagyobb fényelnyelési képességgel, azaz kisebb albedóval rendelkeznek. Hóborította téli időszakokban pedig kevésbé tud kialakulni rajtuk egységes fehér, fényvisszaverő felület, mint a gyepterületeken (*Li és mtsai*, 2015). A fáknak nem csak a föld feletti szerveik kiterjedtebbek, mint a gyepi fajoké, hanem a gyökérzetük is, mely jóval mélyebb talajrétegekbe hatol le (*Knoop és Walker*, 1985). Továbbá amellet, hogy a fák horizontálisan mélyebb területekre hatolnak be, az erdőszegélyeken képesek lehetnek oldalgyökereikkel benyúlni a szomszédos fátlan területek

belsejébe és onnan elvonni a vizet. (Belsky 1994). Ennek hatására jóval nagyobb felületen jóval több nedvességet tudnak felvenni a talajból, ami tovább csökkenti a talajvíz utánpótlását (Scholes és Archer, 1997).

A növényzet jellege és a makroklíma mellett számos fizikai paraméter befolyásolhatja a vízben szegény területeken a vízállapot és a növényzet kölcsönhatását. Ilyen például a terület topográfiája vagy a talaj mélysége (Wilcox és mtsai, 2017; Jin és mtsai, 2020; Knighton és mtsai, 2020). Egy további potenciális tényező a talaj textúrája, azaz szemcsemérete, mely jelentősen befolyásolja a leszivárgási dinamikát és a talaj víztartó képességét, s így módosíthatja a növényzet jellegének hatását, de jelenleg nem ismerjük, hogy ez hogyan befolyásolja az erdő-gyep egyensúlyt, és ez által hogyan módosítja a vízhiányos, erdős-sztyepp zónába tartozó területek erdősítési potenciálját.

2. CÉLKITŰZÉS

Kutatásunkban a következő fő kérdésekre kerestük a választ:

- Hogyan befolyásolják a gyepes és az erdős élőhelyek a talaj-nedvességétartalmát a vízhiányos mérsékelt övi régió finom (agyagos-iszapos) és durva (homokos) szemcseméretű talajain?
- Milyen típusú élőhely rekonstrukciót érdemes alkalmazni klímavédelemi program céljából vízhiányos mérsékelt övi régióban?

Ezek megválaszolásához kötött és laza talajok különféle erdőtípusain és kontroll gyepterületeken egy éven keresztül monitoroztuk a talaj felső rétegének vízállapotát a leszivárgási dinamika megismerése céljából, és becsültük a vízveszteséget (teljes evapotranszpirációt) okozó minden tényezőt: a lombkorona intercepciót és párologtatást a lombkoronaborítással, a lágyszárúszint intercepcióját és párologtatását annak biomasszájával, az avarintercepciót annak is a biomasszájával, és a talajfelszíni párologtást a talajfelszíni hőmérséklet alakulásával.

3. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

3.1. Vizsgálati területek

A vizsgálati területeinket magába foglaló régió Kelet-Közép-Európa egyik legnagyobb egybefüggő síksága, a nagyrészt Magyarország határain belül elhelyezkedő, 52 000 km² területű Nagy-Alföld volt. A Kárpát-medencére jellemző regionális klíma szubkontinentális, melyre erőteljes befolyással lehetnek a főként dél felől érkező mediterrán légtömegek. Az átlagos évi csapadékmennyiség 500-550 mm, amelynek nagyrésze nyár elején, a legtöbb növény vegetációs időszakában hullik le, melyet aztán egy száraz periódus követ a nyár második felében. Az évi átlaghőmérséklet megközelítőleg 10-11,5°C, amit általánosan meleg nyári és hideg téli hőmérséklet jellemez meglehetősen magas hőingással (Dövényi, 2012; Tölgyesi és mtsai, 2016). Vizsgálatainkhoz az erdőssztyepp övön belül előforduló, két eltérő talajtípussal rendelkező területet választottunk.

Az egyik vizsgálati célpont egy kötött, finom szemcsés öntéstalajjal rendelkező terület volt az Alföld és azon belül is a Tiszántúl dél-keleti részén. A vizsgálati tájegységen megtalálható természetes vagy természetközeli területek közül véletlenszerűen választottunk ki négyet: Bucsa, Füzesgyarmat, Dévaványa és Ecsegfalva települések közelében. Mind a négy mintaterületen háromféle vegetációtípusban végeztünk méréseket. Gyepeken, ahol főként pázsitfűfélék domináltak, mint például a réti ecsetpázsit (*Alopecurus pratensis*), a sovány csenkesz (*Festuca pseudovina*) vagy a keskenylevelű réti perje (*Poa angustifolia*). A gyepek mellett két erdőtípust jelöltünk ki. Az egyik egy tölgyes volt, melynek az erdőalkotó faja javarészt a régióban őshonos kocsányos tölgy (*Quercus robur*). A másik erdőtípus az idegenhonos fehér akác (*Robinia pseudoacacia*) alkotta akácos, melyet leginkább faanyaga és jó mézelő tulajdonsága miatt ültetnek az országban. A régió négy-négy mintaterülete között átlagosan $17,8 \pm 6,3$ km (átlag $\pm$ szórás) volt a távolság.

A másik vizsgálati területünk hazánk legnagyobb homokterülete, a Duna és Tisza folyók között elhelyezkedő Kiskunsági homokhátság volt. A homokhátság azős-Duna hordalékából keletkezett körülbelül 20 000 évvel ezelőtt a Pleisztocén időszakban (Molnár, 2003). Az eljárás itt is ugyanaz volt, mint a kötött talajon végzett vizsgálatnál. Itt is random kiválasztottunk négy területet, annyi különbséggel, hogy itt három helyett négy, a területen előforduló élőhelytípust vizsgáltunk: egy őshonos leginkább a homoki csenkesz (*Festuca vaginata*) és a homoki árvalányhaj (*Stipa borysthénica*) által dominált természetközeli nyílt homoki gyept, egy őshonos nyarast (*Populus alba*), illetve két nem őshonos faültetvényt, egy fenyvest (*Pinus*

nigra, *P. sylvestris*) és egy akácost (*Robinia pseudoacacia*). A kutatásban feltüntetett erdőtípusok lombkoronája más-más életciklust mutatott. A fenyőerdő örökzöld, így az egész év folyamán állandó lombkorona-intercepcióval rendelkezik, a nyár és a tölgy a koratavaszi időszakban hoznak leveleket, és csak késő ősz folyamán hullajtják le őket, míg az akác csak a késő tavaszi időszakban növeszt leveleket, és hamarabb le is hullajtja őket. Kötött talajon a gradiens az örökzöld hiányában csak a két lombhullatót tartalmazta. A homokhátság négy-négy azonos mintaterülete között átlagosan $16,6 \pm 8,0$ km (átlag $\pm$ szórás) távolság volt.

3.2. Mintavételezés és elemzés

A talaj szerkezetének értékeléséhez minden vizsgált élőhelyen két talajrétegből vettünk két-két mintát: a felső talajrétegből (0-10 cm, az avarszint alatti talaj) és a mélyebb (60-70 cm) talajrétegből. A talajmintákat a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem Karcagi Talajlaboratóriumába továbbítottuk a szemcseméret-eloszlás mérésére. Az eloszlás jellemzésére három méretkategóriát alkalmaztunk: homok ($>0,05$ mm), iszap (0,05-0,002 mm) és agyag ($<0,002$ mm).

A mintavételi területek minden vizsgált élőhelytípusában két darab 100 cm mély lyukat fúrtunk a talajnedvesség monitorozása céljából, melynek során 10 cm-enként lefelé haladva Fieldscout TDR 300 (0,3%-os pontosság, Spectrum Technologies, Bridgend, Egyesült Királyság) talajnedvesség-mérővel mértük a talaj térfogatszázalékos víztartalmát. A lyukak 100 cm maximális mélyégét elég mélynek tartottuk az infiltráció dinamizmusának jellemzéséhez, ugyanis a vizsgálatba vont fafajok gyökértömegének több mint 90%-a erre a mélységre korlátozódik (Cao és mtsai, 2007). A méréseket külön furatokban a 2020-as évben négy alkalommal, a vegetáció éves ciklusának megfelelően végeztük el (téli, tavasszal, nyáron, illetve ősszel). A talajfúrásakor arra figyeltünk, hogy a lyukak az erdős és a gyepes élőhelyen is legalább 20 m távolságra helyezkedjenek el egymástól.

A fák párologtatását nagyban befolyásolja a lombkoronájuk aktuális fenológiai állapota. Éppen ezért kutatásunkban évi négy alkalommal, mindkét terület, mindegyik erdős élőhelyén legalább két lokalitásban lombkorona fotókat készítettünk. A fotózáshoz a Canon EOS 7D Mark II típusú digitális fényképezőgépet és 55 mm-es objektívet használtuk. A fotók elemzését a GNU Image Manipulation Software (GIMP 2.10.14) nevű digitális szoftverrel végeztük. A szoftverben fekete pixelre konvertáltuk a növényi részeket, mint a leveleket és az ágakat, és fehér színű pixelekre az eget. Az volt a célunk, hogy megállapítsuk a fekete pixelekből a lombkoronaborítást. Ugyan a fa nem fotoszintetizáló részei nem vesznek részt a

párologtatásban, de jelentős mennyiségű vizet foghatnak fel, mely onnan részben elpárologhat, így az evapotranszspirációhoz hozzájárulnak (*Scholes és Archer, 1997*).

A talaj hidrológiai tulajdonságait befolyásolhatja továbbá a talajfelszínen felgyülemlett lomb- és fűavar, mivel a lomboronához hasonlóan jelentős intercepciós felületet képviselnek, és a csapadék egy része elpárologhat róla, mielőtt a talajt elérné. A talajfelszínen a vízbeszivárgást a lágyszárú növényzet is képes befolyásolni. A lágyszárú fajok a felszínhez közeli gyökereikkel és a párologtatásával szárító hatást tudnak kifejteni a talaj felső rétegeire (*Knoop és Walker, 1985*). Ezen információk tudatában az élőhelyek avarmennyiségét és a lágyszárúsínt evapotranszspirációját is becsültük. Minden élőhelyen biomasszáat gyűjtöttünk a talaj felszínén található élő biomasszából és a holt avarból. A gyűjtést a mintaterületek minden élőhelyén két-két 50×50 cm-es random elhelyezett kvadrátból, a vegetációs időszak közepén végeztük. Az összegyűjtött biomasszáat négy napon keresztül szárítottuk 40°C-on egy szárítókamrában, majd lemértük külön a biomassza és külön az avar tömegét.

A talaj vízháztartását befolyásoló tényezők közül utolsóként a mikroklimát mértük, mivel a melegebb és szárazabb mikroklimával rendelkező élőhelyeken magasabb párolgási ráta várható a talajfelszínről, mint a fedettebb, hűvösebb élőhelyeken. A méréshez két típusú mikroklimamérőt használtunk: az Optin Ambient Data IS-t a finom szemcsés talajú területeken és a Voltcraft DL-121TH-t a homok talajú élőhelyeken. A mérőeszközök szenzorait 2-3 cm-rel a talaj felszíne felett helyeztük el, és lefedtük őket műanyag fedőkkel, hogy megvédjük őket a közvetlen besugárzástól és csapadéktól. Mind a két mérőeszköztípus megbízhatósága elég magas volt: 0,1-0,2°C-os pontossággal mértek. A méréseket egy éven keresztül, a talajnedvesség-mérésekkel egy időben végeztük mind a két régióban. Minden terület minden élőhelyén egy darab eszközt helyeztünk ki, ami 24 órás időtartamban 10 percenként rögzítette a hőmérsékleti értékeket.

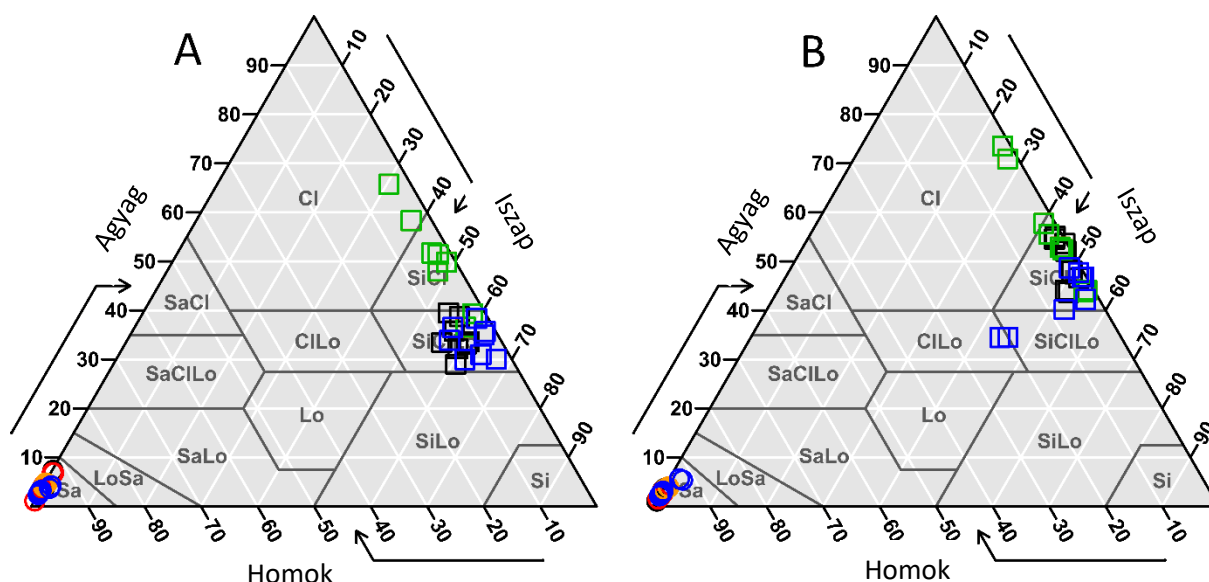
Az adatok statisztikai elemzéséhez kevert lineáris modelleket alkalmaztunk a talajnedvességre, a lombkoronaborításra, az avarra és az élő biomasszára. A talajnedvesség számolásához a 10 cm-es mélységi rétegeket 20 cm-es blokkokba vontuk össze az elemzések során. A két talajtípusú régiót és az évszakokat minden változó esetében külön kezeltük. Így nyolc-nyolc modellt készítettünk a lombkorona borításra (2 régió, 4 évszak), és két-két modellt az avarra és biomasszára (2 régió). A talajnedvességre összesen 40 modellt írtunk fel (2 régió, 4 évszak, 5 réteg). A lombkorona-borítás, a biomassza és az avar esetében a lokalitást használtuk random tényezőként, míg a talajnedvesség esetében figyelembe vettük a furatot is (lévén furatonként is több adatpontunk volt), azaz beágyazott random tényezőt alkalmaztunk. A hőmérséklet esetében csak leíró statisztikát és ábrázolást alkalmaztunk.

Az adatok elemzését az R 3.6.1. szoftverrel végeztük. A modellek elkészítéséhez az lme4 package „lmer” függvényét használtuk, s a szignifikanciát a car package „Anova” függvényeivel ellenőriztük. Páronkénti összehasonlításokat is számoltunk korrigált p-értékekkel az emmeans package „emmeans” függvénye használatával. A talajtípusok jellemzésére szolgáló standard talajháromszögek ábrázolásához a „TT.plot” függvényt használtuk a soiltexture.package-ból.

4. EREDMÉNYEK

4.1. Talajszerkezet

A felső és az alsó talajrétegből vett talajmintákat az elemzésük után két kategóriába tudtuk elkülöníteni: egy homokosabb lazább és kompaktabb, iszapos-agyagos talajszerkezetet kaptunk. A kapott eredményeink azt támasztották alá, hogy nincs jelentős szerkezeti különbség sem a homok, sem kötött talajú élőhelyek felsőbb és mélyebb talajrétegei között, és a típusokon belüli egyes élőhelyek között is elenyésző a különbség, csupán a tölgyerdők egy részének felsőbb talaját találtuk némileg agyagosabbnak, míg két akácos mélyebb talaját enyhén vályogosabbnak (1. ábra).

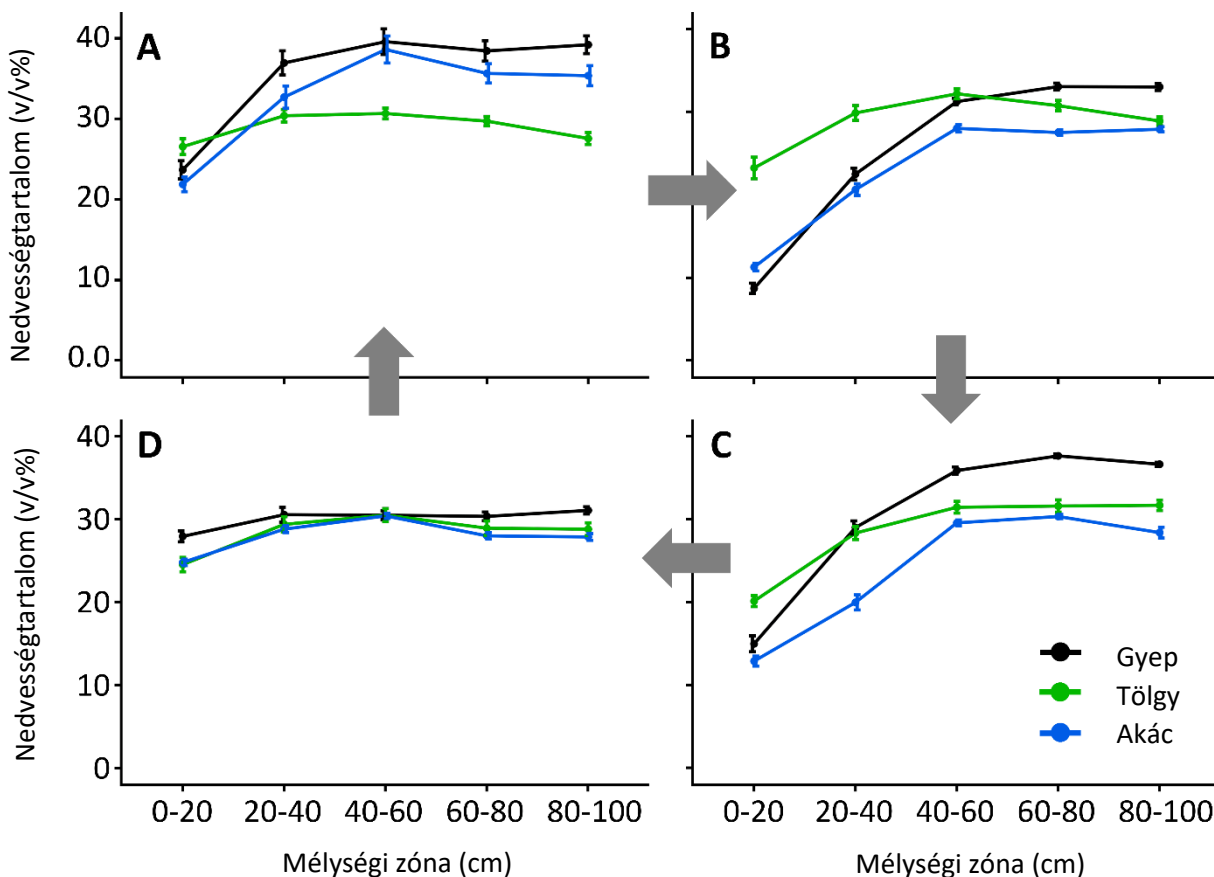


1. ábra: A területi egységek szerinti talajtípusok a felső (0-10 cm) és az alsó (60-70 cm) talajrétegekben. A körök a kiskunsági homoki területeket jelölik, a négyzetek pedig a kelet-alföldi vizsgálati helyszínek. Fekete színnel jelöltük a gyepeket, arannyal a fenyveseket, pirossal a nyarasokat, késsel az akácokat és zölddel a tölgyeseket. Az **Sa (sand)** a homok, a **Lo (loam)** vályog, **Si (silt)** iszap, **Cl (clay)** agyag rövidítéseket jelölik. Az egyes kategóriák elkülönítését a United States Department of Agriculture talajtaxonómiai kategóriák szerint végeztük.

4.2. Talajnedvesség

A kötött talajú élőhelyek legfelső talajrétegének (0-10 cm) nedvességtartalma között a téli hónapok után nem volt kimutatható eltérés, azonban a mély talajokban különbségek mutatkoztak (2. ábra). A gyepek egyértelműen magasabb nedvességtartalommal rendelkeztek, mint a tölgy- vagy az akácerdők, továbbá az akácok csak a felső 40 cm-ig szárazabbak a tölgyeknél. 40 cm alatt már a tölgyesek bizonyultak szárazabbnak (1. Táblázat).

Habár a mélyebb rétegekben a legmagasabb volt a gyepek nedvességtartalma a tavasz végeztével, a fokozatosan növekvő párologtatás miatt a legfelső 40 cm-en szárazabbá váltak, mint a tölgyerdők. Az akácok talajának nedvességtartalma szintén csökkent a tavaszi hónapokban és hasonlított a gyepek felső 40 cm-es nedvességtartalmához. Továbbá az akácok 60 cm-ig szárazabbak voltak a tölgyeseknél, azonban az az alatti rétegekben már nem volt kimutatható különbség (2. ábra).



2. ábra: A talaj nedvességtartalma a kötött, üledékes-agyagos talajon a téli (A), tavaszi (B), nyári (C) őszi (D) évszak után. Az ábrákon feltüntettük a standard hibát. A szignifikáns különbségeket a szövegben és az 1. táblázatban adtuk meg.

A nyári esőzések megnövelték gyepterületek mély talajrétegeinek nedvességtartalmát, azonban a felső 40 cm-es zónában továbbra is szárazabb maradt a talaj, hasonlóan a tölgyesek ugyanezen zónájához (2. ábra). Az akácosok esetében a nedvességtartalom minden mélységi zónában alacsonyabb volt, mint a másik két vizsgált élőhelynél, viszont a 60 cm alatti rétegek már nem tértek el szignifikánsak a tölgyerdők ugyanezen talajrétegeinek víztartalmától.

Az őszi hónapok alatt a csapadék visszatöltötte az élőhelyek nedvességtartalmát és nem maradt számottevő különbség az egyes élőhelytípusok között (2. ábra).

1. Táblázat: A talajnedvesség adatainak lineáris kevert modelljeinek eredménye a kötött talajú régióban a felső 100 cm-es talajrétegben. A szignifikáns eredményeket félkövérrel jelöltük ($p < 0,05$). Páros összehasonlításokat csak szignifikás modellek esetében végeztünk.

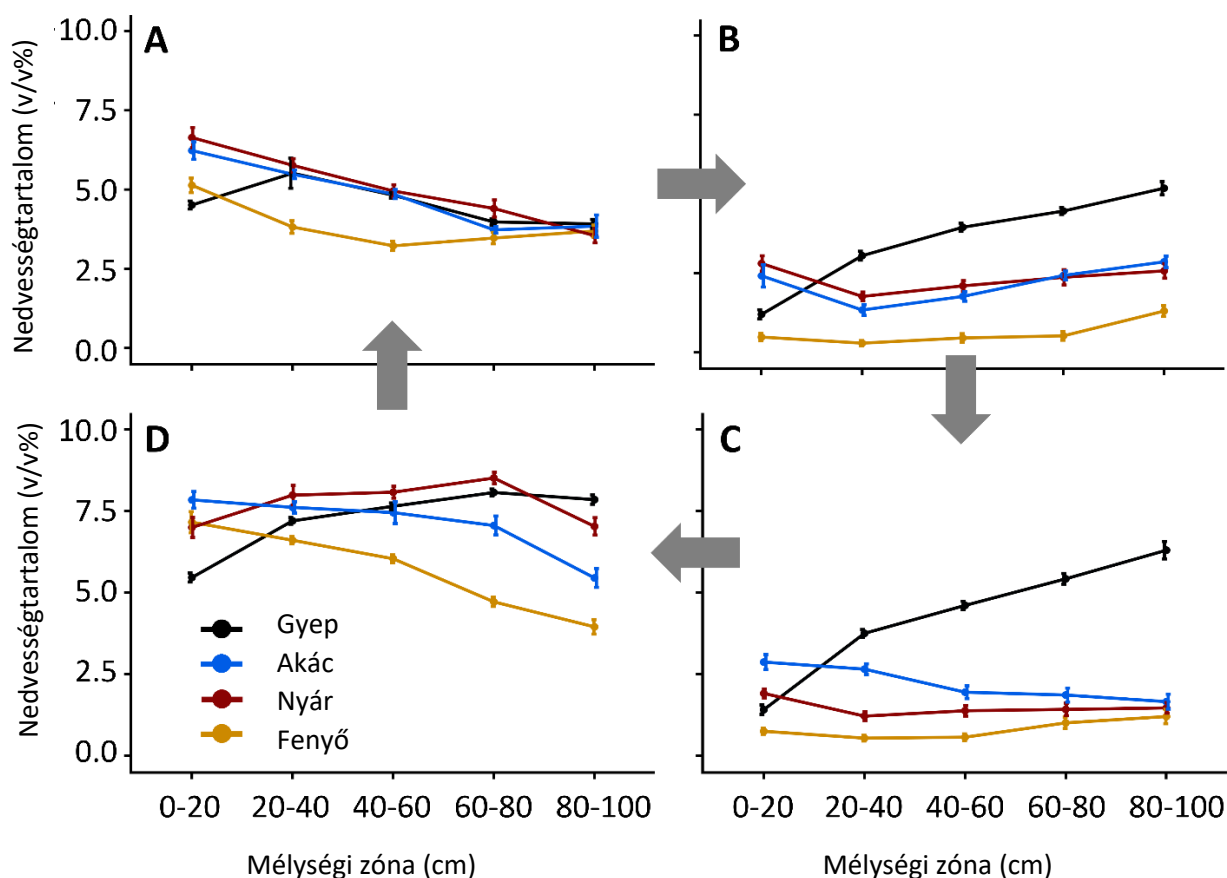
TÉL	0-20 cm		20-40 cm		40-60 cm		60-80 cm		80-100 cm	
	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>
Teljes modell	4,12	0,127	10,32	0,006	12,1	0,002	28,27	<0,001	27,62	<0,001
	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>
Gyep - Tölgy	,	,	3,17	0,014	3,17	0,014	5,21	<0,001	5,16	<0,001
Gyep - Akác	,	,	2,05	0,129	0,35	0,936	1,67	0,245	1,7	0,231
Tölgy - Akác	,	,	-1,11	0,518	-2,83	0,029	-3,54	0,006	-3,45	0,008

TAVASZ	0-20 cm		20-40 cm		40-60 cm		60-80 cm		80-100 cm	
	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>
Teljes modell	46,73	<0,001	28,69	<0,001	15,09	<0,001	13,53	0,001	15,74	<0,001
	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>
Gyep - Tölgy	-6,4	<0,001	-4,04	0,002	-0,83	0,689	1,52	0,306	3,01	0,02
Gyep - Akác	-1,13	0,51	1,03	0,57	2,87	0,026	3,66	0,005	3,74	0,004
Tölgy - Akác	5,28	<0,001	5,07	<0,001	3,7	0,004	2,14	0,109	0,74	0,746

NYÁR	0-20 cm		20-40 cm		40-60 cm		60-80 cm		80-100 cm	
	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>
Teljes modell	14,66	<0,001	19,53	<0,001	17,58	<0,001	25,97	<0,001	22,52	<0,001
	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>
Gyep - Tölgy	-2,65	0,041	0,29	0,954	2,87	0,026	3,94	0,003	2,83	0,029
Gyep - Akác	1,07	0,543	3,97	0,003	4,08	0,002	4,77	<0,001	4,71	<0,001
Tölgy - Akác	3,72	0,004	3,67	0,005	1,22	0,458	0,82	0,694	1,88	0,172

ŐSZ	0-20		20-40		40-60		60-80		80-100	
	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>
Teljes modell	6,02	0,049	0,88	0,645	0,01	0,996	2,2	0,334	3,51	0,173
	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>
Gyep - Tölgy	2,21	0,097	,	,	,	,	,	,	,	,
Gyep - Akác	2,04	0,132	,	,	,	,	,	,	,	,
Tölgy - Akác	-0,17	0,984	,	,	,	,	,	,	,	,

A homoktalajú területek élőhelyei esetében sokkal jelentősebb volt a gyepek és erdőtípusok közötti hidrológiai különbség. A téli hónapokat követően a gyepek legfelső talajrétege (0-20 cm) szárazabb volt, mint az őshonos nyaras vagy idegenhonos akác ugyanezen rétegei. A fenyvesek felső talajrétege (0-20 cm) ugyanolyan száraz volt, mint a gyepterületeké, viszont a 40-60 cm közötti talajszelvény szárazabbnak mutatkoztak a többi élőhelyénél. A fenyvesek továbbá szárazabbak voltak a felső 60 cm-en a nyarasoknál és szárazabbak a 20-60 cm közötti rétegekben akácoknál. A 60 cm alatti rétegek esetében nem volt tapasztalható eltérő különbség az élőhelyek között (3. ábra)(2. Táblázat).



3. ábra: A talaj nedvességtartalma homoktalajon a téli (A), tavaszi (B), nyári (C) őszi (D) évszak után. Az ábrákon feltüntettük a standard hibát. A szignifikáns különbségeket a szövegben és a 2. táblázatban adtuk meg.

A tavasz végeztével a gyepi területek feltalaja továbbra is száraz állapotban maradt. Jóval szárazabbak voltak nyarasoknál és az akácoknál a felső 20 cm-en, azonban 20 cm alatt mindkét erdőtípus szárazabbnak bizonyult. A nyarasok talajnedvesség-tartalma magasabb értéket mutatott a felső rétegekben az akácokénál, azonban a mélyebb talajrétegekben nem

volt tapasztalható eltérés közöttük. A fenyvesek talajának nedvességtartalma közel megegyező értékeket mutatott a gyepekkel a felső 20 cm-en, azonban a 20-100 cm közötti zónában jelentősen szárazabb volt, mind a gyepeknél, mind a többi erdőtípusnál (3. ábra).

A nyári időszak végén a gyepterület talaj-nedvességtartalma alacsonyabb volt a felső 20 cm-en, mint az akácosoké, de nem mutatott lényegi eltérést a nyarasok ugyan ezen rétegből vett mintáitól. A többi rétegben (20-100 cm) a gyepterületek nedvességértékei azonban bőven a többi élőhely értékei fölött maradtak. Az akácosok talajnedvesség-tartalma a nyári évszakban magasabb volt nyarasoknál a felső talajrétegekben (0-40 cm) és magasabb a felső 60 cm-en a fenyveseknél. A nyarasok és az akácosok között statisztikai különbség csak a 20-40 cm közötti zónában volt kimutatható. A fenyvesek nedvességszintje az egész nyár folyamán alig mérhető szinten stagnált (3. ábra).

Ősszel a beérkező csapadék elkezdte feltölteni a homoktalajok vízkészleteit is. Az erdők felső talajrétege aktuálisan nedvesebbnek mutatkozott, mint a gyepeké. A fenyvesek az ősz folyamán is hasonló nedvességszinttel rendelkeztek a felső talajrétegekben, mint a gyepek, azonban a mélyebb rétegek (40-100 cm) még nem töltődtek fel. A fenyvesek 40 cm alatt szárazabbnak bizonyultak a nyarasoknál, és a 60-80 cm közti rétegben szárazabbak voltak az akácosoknál is. Viszont 60 cm fölött és 80 cm alatt az akác és a fenyőerdő között nem volt tapasztalható eltérő különbség. Az akácosok továbbá megkülönböztethetően szárazabbak voltak a gyepeknél a 80-100 cm-es mélységben, azonban a nyarasokkal semelyik rétegben nem tudtunk szignifikánsan különbséget kimutatni (3. ábra).

2. Táblázat: A talajnedvesség adatainak lineáris kevert modelljeinek eredménye a homokos talajú régióban a felső 100 cm-es talajrétegben. A szignifikáns eredményeket félkövérrel jelöltük ($p < 0,05$). Páros összehasonlításokat csak szignifikás modellek esetében végeztünk.

TÉL	0-20 cm		20-40 cm		40-60 cm		60-80 cm		80-100 cm	
	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>
Teljes modell	32,6	<0,001	10,61	0,014	28,57	<0,001	3,67	0,3	0,62	0,892
	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>
Gyep - Fenyő	-1,47	0,465	2,83	0,038	4,73	<0,001	,	,	,	,
Gyep - Nyár	-5,04	<0,001	-0,44	0,97	-0,42	0,975	,	,	,	,
Gyep - Akác	-4,07	0,002	0,03	1	-0,13	0,999	,	,	,	,
Fenyő - Nyár	-3,09	0,02	-2,85	0,037	-4,46	<0,001	,	,	,	,
Fenyő - Akác	-2,25	0,132	-2,43	0,091	-4,2	0,001	,	,	,	,
Nyár - Akác	0,84	0,834	0,41	0,978	0,25	0,994	,	,	,	,

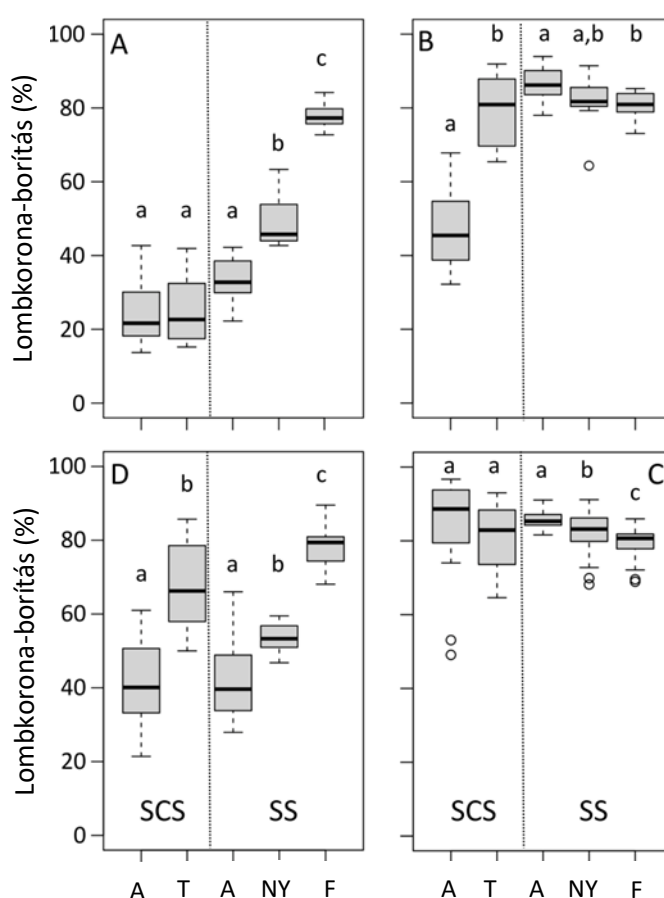
TAVASZ	0-20 cm		20-40 cm		40-60 cm		60-80 cm		80-100 cm	
	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>
Teljes modell	33,99	<0,001	70,23	<0,001	81,46	<0,001	88,3	<0,001	45,4	<0,001
	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>
Gyep - Fenyő	1,78	0,301	8	<0,001	8,55	<0,001	9,11	<0,001	6,23	<0,001
Gyep - Nyár	-3,98	0,002	3,75	0,004	4,53	<0,001	4,83	<0,001	4,2	0,001
Gyep - Akác	-3,01	0,024	4,98	<0,001	5,35	<0,001	4,7	<0,001	3,74	0,004
Fenyő - Nyár	-4,99	<0,001	-3,68	0,004	-3,48	0,008	-3,7	0,004	-1,76	0,309
Fenyő - Akác	-4,15	0,001	-2,61	0,062	-2,77	0,043	-3,82	0,003	-2,16	0,156
Nyár - Akác	0,84	0,837	1,07	0,71	0,71	0,894	-0,12	0,999	-0,4	0,978

NYÁR	0-20 cm		20-40 cm		40-60 cm		60-80 cm		80-100 cm	
	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>
Teljes modell	27,58	<0,001	110,35	<0,001	118,94	<0,001	76,59	<0,001	60,76	<0,001
	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>
Gyep - Fenyő	1,8	0,289	9,41	<0,001	9,57	<0,001	7,14	<0,001	6,09	<0,001
Gyep - Nyár	-1,36	0,535	7,42	<0,001	7,66	<0,001	6,48	<0,001	5,77	<0,001
Gyep - Akác	-3,97	0,002	3,2	0,015	6,32	<0,001	5,77	<0,001	5,54	<0,001
Fenyő - Nyár	-2,74	0,047	-1,72	0,331	-1,65	0,366	-0,58	0,937	-0,27	0,993
Fenyő - Akác	-5	<0,001	-5,38	<0,001	-2,81	0,037	-1,19	0,635	-0,47	0,965
Nyár - Akác	-2,27	0,127	-3,66	0,005	-1,16	0,657	-0,62	0,926	-0,2	0,997

ŐSZ	0-20 cm		20-40 cm		40-60 cm		60-80 cm		80-100 cm	
	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>
Teljes modell	24,81	<0,001	7,19	0,066	13,94	0,003	60,45	<0,001	44,19	<0,001
	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>
Gyep - Fenyő	-3,22	0,015	,	,	3,16	0,017	6,95	<0,001	6,24	<0,001
Gyep - Nyár	-2,91	0,031	,	,	-0,81	0,848	-0,92	0,795	1,31	0,561
Gyep - Akác	-4,51	<0,001	,	,	0,4	0,977	2,1	0,175	3,84	0,003
Fenyő - Nyár	0,26	0,994	,	,	-3,44	0,008	-6,81	<0,001	-4,27	<0,001
Fenyő - Akác	-1,12	0,678	,	,	-2,39	1	-4,2	0,001	-2,08	0,181
Nyár - Akác	-1,39	0,516	,	,	1,05	0,719	2,61	0,061	2,19	0,147

4.3. Lombkorona borítás

A kötöttebb talajok erdőtípusainak lombkorona-borítása nem különbözött szignifikánsan a téli hónapok után ($\chi^2=0,13$; $p=0,723$). A tavasz végén a tölgyerdők lombkoronája majdnem teljesen kifejlődött, viszont az akácok a késői lombfakadásuk miatt még alacsony értékeket mutattak, ezért a két erdőtípus értékei jelentősen eltértek egymástól ($\chi^2=69,30$; $p<0,001$). A nyár végére az akácok utolérte a tölgyeseket ($\chi^2=0,24$; $p=0,621$), azonban ősszel hamarabb hullajtotta le a leveleit, míg a tölgyesnél tovább kitartottak a levelek ($\chi^2=40,79$; $p<0,001$) (4. ábra)(3. Táblázat).



4. ábra: Lombkorona-borítás erdőtípusok szerint a különböző évszakokban. Tél (A), tavasz (B), nyár (C) és ősz (D). SCS (silty-clayey site): kötött talajon; SS (sandy site): homokon. A: akác; T: tölgy; NY: nyár; F: fenyő. A kis körök kiugró értékeket ábrázolnak.

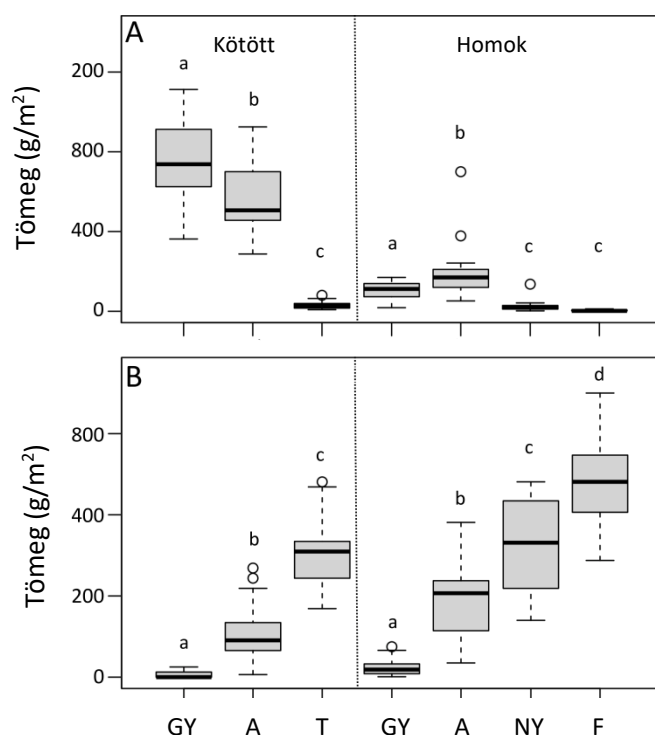
A homoktalajú élőhelyek lombkorona-borítása minden évszakban jól látható eltéréseket mutatott. Tél végén az örökzöld fenyőerdőnél teljes borítást láthattunk, míg a nyarasnál a barkák miatt egy közepes szintű borítás volt megfigyelhető. Ezzel szemben az akácos szinte semmi árnyékot nem vetett ebben az időszakban. A kötött talajú erdőkhöz képest az akác teljes lombkoronát hozott a tavasz végére a homoktalajon, úgy, hogy az még a fenyő borítását is meghaladta. A nyári hónapokban az összes erdőtípus kompakt és sűrű lombkoronával rendelkezett, a közöttük tapasztalható különbségek statisztikailag ugyan szignifikánsak, de ökológiai szempontból elhanyagolhatóak voltak. Ősszel az akácosok jóval gyorsabban hullajtották le a leveleiket, mint a nyárfák, mindeközben a fenyőerdők borítása állandóan magas maradt.

3. Táblázat: A lombkorona-borítás lineáris kever modelleinek eredményei a homokos talajú régióban. A szignifikáns eredményeket félkövérrel jelöltük ($p < 0,05$). Páros összehasonlításokat csak szignifikáns modellek esetében végeztünk.

	Tél		Tavaszi		Nyár		Ősz	
	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>
Teljes modell	218,92	<0,001	8,14	0,017	30,28	<0,001	283,28	<0,001
	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>
Fenyő - Nyár	9,41	<0,001	-0,42	0,906	-2,44	0,045	11,25	<0,001
Fenyő - Akác	14,59	<0,001	-2,60	0,036	-5,49	<0,001	16,47	<0,001
Nyár - Akác	5,19	<0,001	-2,23	0,082	-3,05	0,009	5,21	<0,001

4.4. A lágyszárú biomassa és az avar összetétele

Kötött talajon a vegetációs időszakban a gyepek biomasszája mutatta a legnagyobb mennyiséget, de az akácerdők alatt is jelentős mennyiség volt megfigyelhető. A tölgyesek lágyszárú-mennyisége a vegetációs időszak csúcspontján meglehetősen csekély volt. A homoktalajú területek biomasszája általánosságban jóval alacsonyabb volt, mint a kötött talajú élőhelyeken (5. ábra)(4. Táblázat). Homokon továbbá az akác magasabb értéket mutatott, mint a gyepek. Mind a nyaras, mind a fenyőerdő aljnövényzete a nullához közelített. Ezzel szemben a lomb- és fűavar mennyisége teljesen ellentétes mintázatot mutatott a kötött talajú erdőkben. Az avarnak a legnagyobb denzitása a tölgyerdőkben volt megtalálható, még az akácosban már egy jóval kisebb mennyiség volt jelen, és a gyepe szinte semennyit nem tartalmazott. A homokterületeken a fenyves produkálta a legnagyobb avarsűrűséget, majd a nyaras avarmennyisége a kötött talajú tölgyerdőkéhez hasonlított, viszont az akác avarmennyisége magasabb volt a kötött talajú ültetvényekhez képest. A homoki gyepek és a kötött talajú gyepek között nem volt tapasztalható különbség.



5. ábra: A lágyszárú biomassa (A) és az avar (B) tömege négyzetméterenként a kutatásban vizsgált élőhelyeken: GY: gyepe; A: akác; T: tölgy; NY: nyár; F: fenyő.

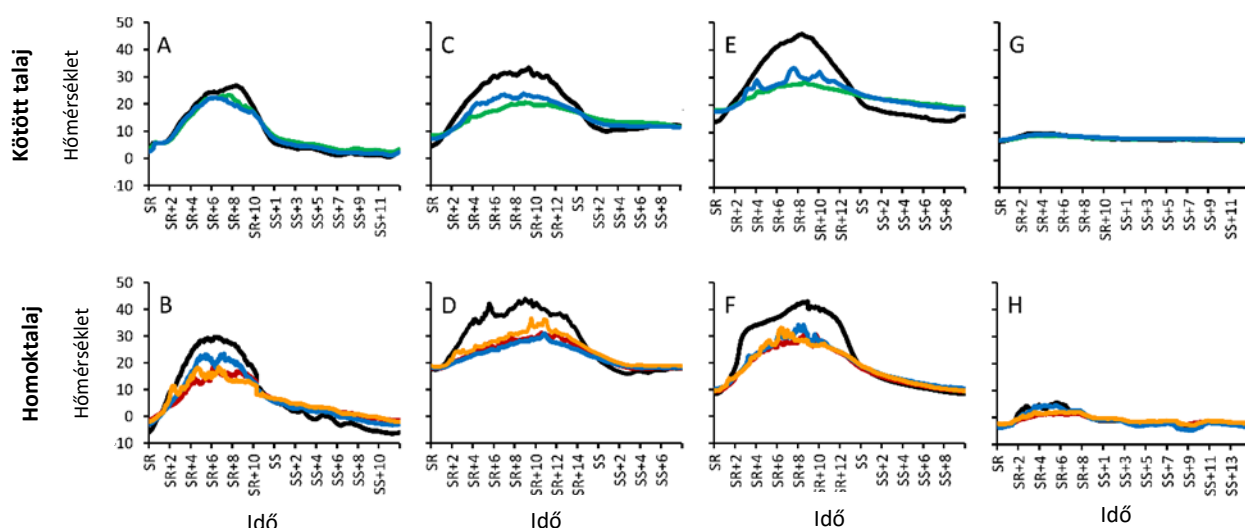
4. Táblázat: A biomassza és az avar denzitás lineáris kevert modelleinek eredményei mind a két talajtípusban. A szignifikáns eredményeket félkövérrel jelöltük ($p < 0,05$). Páros összehasonlításokat csak szignifikás modellek esetében végeztünk.

KÖTÖTT	Biomassza		Avar	
	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>
Teljes modell	79,04	<0,001	85,3	<0,001
	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>
Gyep - Tölgy	-12,12	<0,001	12,84	<0,001
Gyep - Akác	-2,96	0,005	4,37	<0,001
Tölgy - Akác	9,03	<0,001	-8,48	<0,001

HOMOK	Biomassza		Avar	
	<i>Chi²</i>	<i>p</i>	<i>Chi²</i>	<i>p</i>
Teljes modell			73,58	
	<i>t arány</i>	<i>p</i>	<i>t arány</i>	<i>p</i>
Gyep - Fenyő	3,33	0,002	14,27	<0,001
Gyep - Nyár	-2,55	0,017	9,24	<0,001
Gyep - Akác	3,35	0,017	5,18	<0,001
Fenyő - Nyár	0,78	0,441	-4,80	<0,001
Fenyő - Akác	6,69	<0,001	-9,70	<0,001
Nyár - Akác	5,89	<0,001	-4,12	<0,001

4.5. Mikroklíma

A napi hőmérsékletváltozás a homoki és a kötöttebb talajú területeken nagyon hasonlított. Tavaszodáskor még nem volt kiemelkedően magasabb a gyepek nappali hőmérséklete az erdőkénél, azonban ez a nyár folyamán jelentősen megemelkedett. Az őszi hőmérsékletet az évszakra jellemző hűvös, ködös és kis napi ingadozású időjárás jellemezte. Az éjszakai hőmérsékletek többnyire hasonlóak voltak, az egyedüli különbséget az jelentette, hogy a nyári időszakban a kötöttebb talajokon a gyepek jóval hidegebbek voltak, mint a szintén ilyen talajú erdők. Az erdőtipusok között az egész év folyamán alig tapasztaltunk eltérést, ökológiai szempontból a mikroklímájuk nagyon hasonló volt (6. ábra).



6. ábra: A hőmérséklet változása a dolgozatban szereplő élőhelyek esetében a tél végén a kötött (A) és a homok (B), tavasszal a kötött (C) és a homok (D), nyáron a kötött (E) és a homok (F), ősszel a kötött (G) és a homok (H) területeken. SR: nappali; SS: éjszaka. Minden görbe egy átlag a négy terület adataiból.

5. MEGVITATÁS

Az erdősítés természetbarát megoldást nyújt olyan környezeti problémákkal szemben, mint a talajerózió, árvízvédelem vagy esetünkben a klímaváltozás mérséklése a légköri széndioxid megkötésével (Knighton és mtsai, 2020). Természetes körülmények között a fátlan területek erdősítésével azonban csökkenhetjük az albedót (Temperton és mtsai, 2019), esetenként másodlagosan szikesedést válthatunk ki (Mujica és mtsai, 2021) és gyakran ronthatjuk a talajvízháztartást (Farley és mtsai, 2005). Általánosságban az erdősítés kapcsán a szénmegkötés és a vízháztartás között csereviszony áll fenn (Jackson és mtsai, 2005; Li és mtsai, 2021), mely különösen vízhiányos területeken fontos szempont lehet az erdősítés vagy gyepesítés mellett való állásfoglalásban. Eredményeink szerint a döntést jelentősen árnyalhatja terület a talajtípusa is.

Eredményeink azt mutatták, hogy a talaj nedvességtartalma az egyes rétegek között nem egyformán változik: a felső és a mélyebb rétegekre is eltérő dinamika jellemző. A felső talajrétegek víztartalmát a napsugárzás erőteljesen meghatározza és a napközbeni magasabb hőmérséklet erőteljesebb szárítást fejthet ki a talajra (lásd még Zellweger és mtsai, 2020), ami esetünkben a lombkorona-borítás nélküli fátlan gyepterületeken mutatkozott meg. Az erdők esetében homoktalajon a fenyvesek (*Pinus nigra*, *P. sylvestris*), kötött talajon pedig az akácok (*Robinia pseudoacacia*) felső talajrétege is hasonlóan száraz volt, mint a gyepek ugyanezen rétege. A fenyvesek erős szárító hatása leginkább az örökzöld lombkoronájuknak köszönhető, ami egész évben állandóan magas intercepciót tart fenn, míg tavasszal az akácok a talajt érő besugárzást nem csökkentették. Fontos tényezőnek számított továbbá a talaj felszínén lévő avar mennyisége, mely gátat szabott a lehulló csapadék talajba jutásának, így e módon korlátozta az adott élőhely vízkészletének újratöltődését, különösen fenyvesek esetén. Az akácok esetében a lombkorona-fakadás előtt felhalmozódó nagy mennyiségű lágyszárú biomassa evapotranspirációja is hozzájárulhatott a felszínközeli talaj-nedvességnek a csökkenéséhez.

A csapadéknak nemcsak a talajfelszín, hanem a mélyebb talajrétegeket is el kell érnie a talajvíz utánpótlásának biztosításához. A kötött talajú gyepeken a szárazság hatására a felszínhez közeli talaj megrepedezik, ami csatornákat alakít ki a hulló csapadék mélyebb rétegekbe jutásához (Smith és mtsai, 2018; Qi és mtsai, 2020), ami meg is mutatkozott a nyári esők kapcsán az altalaj megnőtt nedvességtartalmában. Az akácok esetén a felrepedezést nem tapasztaltuk, így a mélyebb talajrétegek sem váltak nedvesebbé nyáron. Nedvesebbé a tölgyesek sem váltak a mély talajrétegekben, még télen sem, noha ugyan annyi csapadék hullott rájuk, mint a gyepekre. Ennek hátterében leginkább az állhat, hogy a legelő állatok hiányában

a talaj kevésbé kompaktálódott (Valente és mtsai, 2021), és őshonos fafajú erdőként a jobb talajélet is kedvezőbb szerkezetet eredményezhetett, mely fokozta a leszivárgás ütemét a mérésünk során átfogott 1 m-es rétegnél mélyebb rétegekbe.

A homoki területeken a gyepek, 40 cm alatti talajrétegeinek nedvességtartalma tavasztól ősziig magasabb volt, mint az erdőkben. A homokterületek erdői tehát egyértelműen szárító hatással voltak a mély talajrétegek víztartalmára, míg a gyepek, melyek fajainak gyökérzete alapvetően a feltalajt használja (Schulze és mtsai, 1996; Poeplau és mtsai, 2019), nem befolyásolták az altalaj nedvességtartalmát. Az erdők szárító hatása összefüggött a lombkorona borítással és így a fák párologtatásával. A fenyvesek lombkoronája egész évben örökzöld maradt, így a legerősebb szárító hatást fejtették ki a talajra az egész év folyamán. A lombhullató erdők, az akác és a nyár is erősen szárította a talajt, de a rövidebb lombkorona-borításuk miatt a vegetációsidőszak rövidebb periódusaira korlátozódott a hatásuk.

Figyelembe véve a felső és a mélyebb talajrétegek részben ellentétes nedvességi dinamikáját, arra a következtetésre jutottunk, hogy a durva szemcsés homoktalajok erdősítése erősen korlátozza a talajvíz feltöltődésének mértékét (lásd még Huang és mtsai, 2020), ami vízhiányt okozhat az alacsonyabban fekvő, talajvízzel táplált vizes élőhelyeken, és negatív hatással lehet a talajvízre támaszkodó, öntözéses mezőgazdasági termelékenységre is. Kijelenthetjük, hogy nem javallott a szemiárid homoktalajú régiókban az erdős élőhelyek természetes szint fölé emelése klímavédelmi célokból. Eme térségek további erdősítésével, habár átmenetileg nyereséges szénmegkötést kaphatunk (Plante és mtsai, 2006), később azonban súlyos vízvesztést és negatív vízháztartást idéznénk elő, és csökkentenénk a jövőbeni nettó szén-dioxid nyereségünket, különösen a mélyen fekvő vizes élőhelyek kiszáradásával, és biomasszában, illetve talajukban tárolt szénmennyiségük csökkenésével. Megfontolandó lehet inkább szemiárid, degradált homokterületeken a gyepi élőhelyek rekonstrukcióját előtérbe helyezni az erdősítési programokkal szemben.

Hasonlóan szemiárid, azonban kötöttebb talajú régiók erdős élőhelyei kevésbé hatnak negatívan a mélyebb talajok nedvességi állapotára. Mivel kötöttebb talajon több időre van szükség a víz mélyebb talajrégekbe szivárgásához, ezért ezeken a területeken hosszú lombkorona élelciklussal rendelkező erdők, mint a tölgyesek azzal, hogy csökkentik a nap szárító erejét, inkább segítik a nedvesség megőrzését és a mélyebb rétegek irányába történő leszivárgásának lehetőségét.

Érdekes módon a javallatunkkal ellentétes mintázatokat tapasztalhatunk Magyarországon, azaz a vízhiányos homokterületek nagyobb erdőborítással rendelkeznek, mint a finom szemcsés kötött talajú régiók. Ez a tendencia annak köszönhető, hogy a csapadékvíz

talajrétegek közötti áramlása lassabb a kötöttebb talajokon, ezért több ideig elérhető marad a lágyszárúak számára (Acharya és mtsai, 2018), ami előnyös a mezőgazdasági növénytermesztés, valamint a gyephasználat (legeltetés vagy kaszálás) szempontjából ezeken a területeken. Ezzel szemben homoktalajon a nedvesség jóval gyorsabban szivárog le a mélyebb rétegekbe, ahol fák gyökerei – amint azt eredményeink is sugallják – a vegetációs időszak csúcspontján igen hatékonyan fel tudják azt használni. További érv volt a homoktalajú régiók erdősítésére az erózióvédelem, mivel a gyepekkel szemben az erdőtakaró megakadályozza a homokmozgásokat és gátolhatja a homoktalaj erózióját (Tölgyesi és mtsai, 2021). Azonban a tájhasználók gyakran eltérnek a természetes arányoktól és így a homokterületek túlerdősítésével, és a kötött talajú területeken az erdők erős visszaszorulásával találkozhatunk (Zeng és mtsai, 2009).

Összefoglalva tehát vízhiányos mérsékelt övi területeken, mint a hazai erdős-sztyepp zóna, a klímavédelmi motivációból végzett erdőrekonstrukció súlypontját a kötöttebb talajokra érdemes helyezni, a jelenleg felhagyott szántó vagy egyéb degradált területek őshonos fafajokkal történő beültetésével, és táji léptékben az erdős sztyepp fiziognómia kialakításával. A homoktalajokon különösen, ha már jelenleg is nagy erdőborítással rendelkeznek, érdemes az erdősítést, mint klímavédelmi intézkedést elkerülni. Itt célszerű inkább a gyepek helyreállítására helyezni a hangsúlyt. Mindemellett törekedni kell a már meglévő erdők természetességének növelésére és az idegenhonos ültetvények felszámolására, mivel ezek biodiverzitása jóval csekélyebb (Rédei és mtsai, 2020) és szénmegkötésük is elmarad az őshonos erdőkétől (Lewis és mtsai, 2019).

6. ÖSSZEFOGLALÁS ÉS KITEKINTÉS

Napjainkban az antropogén természet- és környezet-károsítás kedvezőtlen hatásainak mérséklésére az egyik legelterjedtebb megoldás az élőhely-rekonstrukció, azon belül is az erdősítés. Az ökológia viszonyrendszerek nem kellő mértékű figyelembevételével végzett erdősítés azonban számos kedvezőtlen hatással járhat, melyek közül a legfenyegetőbb az erdők jelentős evapotranszspirációs kapacitása miatt jelentkező szárító hatás. Kutatásunkban arra kerestük a választ, hogy e szárító hatást hogyan befolyásolják a talajtani viszonyok eredendően vízhiányos régiókban, mint pl. hazánk síkvidéki területeinek jelentős részén. A Duna-Tisza közti homokhátság durva szemcsés homoktalaján, illetve a Tiszántúl kötött talaján különféle erdőtípusokban és szomszédos gyepterületeken vizsgáltuk a talaj felső 1 m-es, telítetlen rétegének vízviszonyait négy évszakon át. Különféle proxikkal becsültük a vízvesztéshez hozzájáruló tényezők szerepét, így a lombkoronáról elpárolgó és általa elpárologtatott mennyiséget a lombkorona borításával, a lágyszárú szintről távozó vizet a biomassza és az avar abundanciájával, a talajfelszínről elpárolgó vízmennyiséget pedig a mikroklimatikus viszonyokkal közelítettük. Eredményeink szerint mindkét talajtípus esetén az erdők nedvesebb viszonyokat tartanak fenn a talaj felső 20-30 cm-es zónájában, mint a gyepek. Ennek hátterében a lombkorona mikroklíma-mérséklő hatása áll, és a lágyszárú szint evapotranszspirációja ezt alig befolyásolja. Homoktalajok esetén a mélyebb rétegeket az erdők fái rendkívüli mértékben kiszáritják, és a szárítás mértéke a lomb éves életidejével függ össze, így a legerősebben az örökzöldek gátolják a talajvíz-utánpótlást. A kötött talajok erdei alig csökkentették a mélyebb talajrétegek nedvességtartalmát a gyepekhez képest. A rövid életű lombkorona itt inkább a feltalaj nedvességének részleges elvesztését eredményezte, a mélyebb talajrétegek kapcsán nem tapasztaltunk jelentős különbséget. Kijelenthetjük tehát, hogy a kötöttebb talajok talajvíz-utánpótlását és regionális vízgazdálkodását kevésbé rontja az erdősítés. A jelenleg fátlan homoki élőhelyek erdősítése erősen ellenjavallt, míg a kötött talajjal rendelkező Tiszántúl nem szikesedő felhagyott szántói megfelelőek lehetnek erdő-gyep mozaikok és erdőfoltok tervezésére az élőhely-rekonstrukciós törekvések keretein belül. Természetközeli gyepterületek erdősítése egyik régióban sem javasolható megoldás. E könnyen alkalmazható irányelvet más mérsékeltövi vízhiányos síkvidékeken is célszerű alkalmazni.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnék köszönetet mondani elsősorban a témavezetőmnek Dr. Tölgyesi Csabának, aki hihetetlen odaadással és egyedülálló szakmai tudásával segítette a dolgozatom elkészítését. Külön szeretnék köszönetet mondani Dr. Bátori Zoltánnak, aki nagy segítséget nyújtott a terepi munkában és a szellemi fejlődésemben egyaránt. Szeretnék még köszönetet mondani Hábenczyus Alida Annának a szakmai segítségéért és Kukla Luca Sárának a terepen végzett munkájáért. Köszönettel tartozom a Kiskunsági és Körös-Maros Nemzeti Parkok Igazgatóságának, hogy területeiken végezhattük a kutatómunkát, továbbá Szél Antalnak a tiszántúli területek kiválasztásáért. Köszönet a Szegedi Ökológia Tanszék összes munkatársának a kellemes légkörért és a sok pozitív és jószándékú segítségért, amit adtak nekem a dolgozatom készítése során. Végül köszönet illeti a páromat, Biró Zsanettet, aki folyamatos biztatásával és végtelen szeretetével támogatott végig az egész munkám során.

IRODALOMJEGYZÉK

- Acharya B., Kharel G., Zou C., Wilcox B., Halihan T. (2018): Woody Plant Encroachment Impacts on Groundwater Recharge: A Review. *Water*, 10(10): 1466.
- Araujo M. B., Rahbek C. (2006): How does climate change affect biodiversity? *Science* 313: 1396-1397.
- Bastin J.-F., Finegold Y., Garcia C., Mollicone D., Rezende M., Routh D., Zohner C. M., Crowther T. W. (2019): The global tree restoration potential. *Science* 365:76–79.
- Belsky A. J. (1994): Influences of trees on savanna productivity: tests of shade, nutrients, and tree-grass competition. *Ecology*, 75: 922-932.
- Bond W.J., Stevens N., Midgley G. F., Lehmann C. E. R. (2019): The trouble with trees: afforestation plans for Africa. *Trends in Ecology & Evolution* 34: 963-965.
- Canadell J., Jackson R. B., Ehleringer J. B., Mooney H. A., Sala O. E., Schulze E. D. (1996): Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia*, 108(4): 583-595.
- Cao S., Chen L., Xu C., Liu Z. (2007): Impact of three soil types on afforestation in China's Loess Plateau: Growth and survival of six tree species and their effects on soil properties. *Landscape and Urban Planning*, 83: 208-217.
- Dövényi Z. (2012): A Kárpát-medence Földrajza. *Akadémiai Kiadó, Budapest, HU*, pp. 1351.
- Erdős L., Ambarlı D., Anenkhonov O. A., Bátori Z., Cserhalmi D., Kiss M., Kröel-Dulay Gy., Liu H., Magnes M., Molnár Zs., Naqinezhad A., Semenishchenkov Y. A., Tölgyesi Cs., Török P. (2018): The edge of two worlds: A new review and synthesis on Eurasian forest-steppes. *Applied Vegetation Science*, 21: 345-362.
- Farley K. A., Jobbágy E. G., Jackson R. B. (2005): Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. *Global Change Biology* 11: 1565-1576.
- Gowda J. H., Kitzberger T., Premoli A. C. (2012): Landscape responses to a century of land use along the northern Patagonian forest-steppe transition. *Plant Ecology* 213: 259-272
- Hasselquist N. J., Benegas L., Roupsard O., Malmer A., Ilstedt U. (2018): Canopy cover effects on local soil water dynamics in a tropical agroforestry system: Evaporation drives soil water isotopic enrichment. *Department of Forest Ecology and Management, Swedish University of Agricultural Sciences (SLU)*: 901-983
- Hobbs, R. J., Cramer, V. A. (2007): Why old fields? Socioeconomic & ecological causes & consequences of land abandonment. In Cramer V. A., Hobbs R. J. (Eds.), *Old fields*: 1–14. Washington, DC: Island Press.

- Huang T., Pang Z., Yang S., Yin L. (2020): Impact of afforestation on atmospheric recharge to groundwater in a semiarid area. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(9): e2019JD032185.
- Jackson R. B., Jobbagy E. G., Avissar R., Roy S. B., Barrett D. J., Cook C. W., Farley K. A., Maitre D. C., McCarl B. A., Murray B. C. (2005): Trading water for carbon with biological carbon sequestration. *Science*, 310: 1944-1947.
- Jin, K., Wang, F., Zong, Q., Qin, P., & Liu, C. (2020): Impact of variations in vegetation on surface air temperature change over the Chinese Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 716: 136967.
- Knighton, J., Vijay, V., Palmer, M. (2020): Alignment of tree phenology and climate seasonality influences the runoff response to forest cover loss. *Environmental Research Letters*, 15(10), 104051.
- Knoop W. T., Walker B. H. (1985): Interactions of Woody and Herbaceous Vegetation in a Southern African Savanna. *Journal of Ecology* 73(1): 235-253.
- Lafferty K. D. (2009): The ecology of climate change and infectious diseases. *Ecology* 90: 888-900.
- Lewis S. L., Wheeler C. E., Mitchard E. T. A., Koch A. (2019): Restoring natural forests is the best way to remove atmospheric carbon. *Nature* 568: 25-28.
- Li R., Zheng H., O'Connor P., Xu H., Li Y., Lu F., Robinson B. E., Ouyang Z., Hai Y., Daily G. C. (2021): Time and space catch up with restoration programs that ignore ecosystem service trade-offs. *Science Advances*, 7: n8650.
- Li Y., Zhao M., Motesharrei S., Mu Q., Kalnay E., Li S. (2015): Local cooling and warming effects of forests based on satellite observations. *Nature Communications*, 6603.
- Magyari E. K., Chapman J. C., Passmore D. G., Allen J. R. M., Huntley J. P., Huntley B. (2010): Holocene persistence of wooded steppe in the Great Hungarian Plain. *Journal of Biogeography*, 37: 915–935.
- Mátyás Cs, Sun G. (2015): Forests in a water limited world under climate change. *Environmental Research Letters* 9: 085001.
- Molnár Zs. (2003): A Kiskunság száraz homoki növényzete. *TermészetBÚVÁR Alapítvány Kiadó*, Budapest. pp. 159.
- Mujica, C. R., Bea S. A., Jobbágy E. G. (2021): Modeling soil chemical changes induced by grassland afforestation in a sedimentary plain with shallow groundwater. *Geoderma*, 400: 115158.

- Plante A. F., Conant R. T., Stewart C. E., Paustian K., Six J. (2006): Impact of soil texture on the distribution of soil organic matter in physical and chemical fractions. *Soil Science Society of America Journal*, 70(1): 287-296.
- Poeplau C., Germer K., Schwarz K. U. (2019): Seasonal dynamics and depth distribution of belowground biomass carbon and nitrogen of extensive grassland and a Miscanthus plantation. *Plant and Soil*, 440(1): 119-133.
- Qi W., Zhang Z. Y., Wang C., Chen Y., Zhang Z. M. (2020): Crack closure and flow regimes in cracked clay loam subjected to different irrigation methods. *Geoderma*, 358, 113978.
- Rédei T., Csecserits A., Lhotsky B., Barabás S., Kröel-Dulay Gy., Ónodi G., Botta-Dukát Z. (2020): Plantation forests cannot support the richness of forest specialist plants in the forest-steppe zone. *Forest Ecology and Management*, 461: 117964.
- Scholes R. J., Archer S. R. (1997): Tree-grass interactions in savannas. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 28: 517-44.
- Schulze E. D., Mooney H. A., Sala O. E., Jobbagy E., Buchmann N., Bauer G., ... Ehleringer J. R. (1996): Rooting depth, water availability, and vegetation cover along an aridity gradient in Patagonia. *Oecologia*, 108(3): 503-511.
- Smith R. J., Uddin M. J., Gillies M. H. (2018): Estimating irrigation duration for high performance furrow irrigation on cracking clay soils. *Agricultural Water Management*, 206: 78-85.
- Temperton V. M., Buchmann N., Buisson E., Durigan G., Kazmierczak Ł., Perring M. P., Dechoum d. S. M., Veldman J. W., Overbeck G. E. (2019): Step back from the forest and step up to the Bonn Challenge: how a broad ecological perspective can promote successful landscape restoration. *Restoration Ecology*, 27: 705-719.
- Tölgyesi Cs, Zalatnai M, Erdős L, Bátori Z, Hupp N. R., Körmöczi L. (2016): Unexpected ecotone dynamics of a sand dune vegetation complex following water table decline. *Journal of Plant Ecology* 9: 40-50.
- Tölgyesi Cs., Buisson E., Helm A., Temperton V. M., Török, P. (2021): Urgent need for updating the slogan of global climate actions from ‘tree planting’ to ‘restore native vegetation’. *Restoration Ecology*, e13594.
- Valente M. L., Reichert J. M., Cavalcante R. B. L., Minella J. P. G., Evrard O., Srinivasan R. (2021): Afforestation of degraded grasslands reduces sediment transport and may contribute to streamflow regulation in small catchments in the short-run. *Catena*, 204: 105371.

- Veldman J. W., Aleman J. C., Alvarado S. T., Anderson T. M., Archibald S., Bond W. J., et al. (2019): Comment on "The global tree restoration potential." *Science*, 366: 6463.
- Vetaas O. R. (1992): Micro-site effects of trees and shrubs in dry savannas. *Journal of Vegetation Science* 3: 337-344.
- Von Storch H., Stehr N. (2006): Anthropogenic climate change: a reason for concern since the 18th century and earlier. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 88(2): 107-113.
- Wilcox, B. P., Maitre, D. L., Jobbagy, E., Wang, L., Breshears, D. D. (2017): Ecohydrology: processes and implications for rangelands. In Briske D. D. (Ed.): *Rangeland systems*: 85-129.
- Zellweger F., Frenne P. D., Lenoir J., Vangansbeke P., Verheyen K., Bernhardt-Römermann M., Baeten L., Hédal R., Berki I., Coomes D. et al. (2020): Forest microclimate dynamics drive plant responses to warming. *Science*, 368: 772-775.
- Zeng D. H., Hu Y. L., Chang S. X., Fan Z. P. (2009): Land cover change effects on soil chemical and biological properties after planting Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) in sandy lands in Keerqin, northeastern China. *Plant and Soil*, 317: 121-133.
- Zhai D. L., Xu J. C., Dai Z. C., Cannon C. H., Grumbine R. D. (2014): Increasing tree cover while losing diverse natural forests in tropical Hainan, China. *Regional Environmental Change*, 14: 611-621.

NYILATKOZAT

A 35. OTDK
BIOLÓGIA SEKCIÓ FELHÍVÁSÁNAK
2. SZÁMÚ MELLÉKLETE
TÉTELES SZERZŐI HOZZÁJÁRULÁS*

Alulírott Tóth Benedek György nyilatkozom, hogy a 35. OTDK-ra benyújtott

„Hol erdősítsünk szénmegkötés céljából a vízhiányos sík vidékeken?”

című dolgozatomban leírtak esetében az alábbi munkafolyamatok elvégzésében vettem részt:

Rész/feladat*	Felkészítés után önállóan végeztem a dolgozathoz szükséges mennyiségben (%-ban megadva)	Folyamatos segítséggel végeztem a dolgozathoz szükséges mennyiségben (%-ban megadva)
Terepi adatgyűjtés ¹		50
Biomassza feldolgozás és mérés	50	50
Talajminták laboratóriumi előkészítése mérésre	100	
Adatelemzés ²	30	30

Magyarázat:

¹A szerző-hallgató a két mintaterületi régió egyikén a témavezetővel együtt gyűjtötte az adatokat. A másik régió adatai egy korábbi publikáció nyomán a Dryad Data Repository forrásban szabadon hozzáférhetőek voltak.

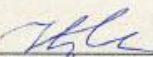
²Lombkoronafotók és mikroklímaadatok elemzését a hallgató a témavezető javaslatai alapján önállóan végezte, más elemzéseket a témavezetővel együtt, míg a fennmaradó, összetettebb elemzéseket nagyjából a témavezető végezte.

Kelt: Szeged, 2022. 04. 11.



Tóth Benedek György
alírása

A nyilatkozatban foglaltak helyességét megerősítem:



Dr. Tölgyesi Csaba, SZTE-TTIK Ökológiai Tanszék