

jakab.gergely.imre_226_24

A szerves anyag tér- és időbeli változása Magyarország
feltalajában

MTA doktori értekezés

Jakab Gergely

Budapest, 2024

1.	Bevezetés, célkitűzések.....	5
2.	Irodalmi áttekintés.....	7
2.1.	A talaj és talajegészség	7
2.2.1.	A talaj aktuális szervesanyag-tartalma.....	8
2.2.2.	A talajban maximálisan eltárolható szerves anyag mennyisége	9
2.3.	A talaj szerves anyagának összetétele.....	11
2.4.	A talaj degradációja	14
2.5.	Megváltozó környezeti feltételek és a talaj	16
2.5.1.	A változó klimatikus hatások	16
2.5.2.	A talajhoz kapcsolódó megoldási lehetőségek.....	17
2.6.	A „talajkímélő” mezőgazdaság.....	18
3.	Az elvégzett vizsgálatok módszertana.....	21
3.1.	Az esettanulmányok vizsgálati területeinek bemutatása	21
3.1.1.	Szentgyörgyvári Kísérleti Állomás leírása	21
3.1.2.	A Hatvanpuszta Józsefmajori Kísérleti Állomás leírása	23
3.2.	Talajmintavétel országos léptékben.....	25
3.2.1.	A talajminták frakcionálása	26
3.3.	Az alkalmazott analitikai módszerek ismertetése	28
3.3.1.	A talaj szénttartalmának meghatározása	28
3.3.2.	A talaj szerkezetére vonatkozó vizsgálatok.....	29
3.3.3.	A talaj szemcseösszetételének meghatározása.....	29
3.3.4.	Az in situ talaj szerves anyag összetételének meghatározása.....	30
3.3.5.	A talaj szerves anyagának extrakciója.....	31
3.3.6.	Az extrahált szerves anyag mennyiségi meghatározása	32
3.3.7.	Az extrahált szerves anyag összetételének meghatározása.....	33
3.3.8.	In situ talaj biológiai vizsgálatok	34
3.4.	Az országos léptékű vizsgálatokhoz használt környezeti változók meghatározása	34
3.5.	A mesterséges esőztetés módszertanának ismertetése.....	34
3.5.1.	Az esőztetés során mért eredmények értelmezése.....	36
3.6.	A használt statisztikai módszerek bemutatása	37
3.6.1.	Az országos léptékű vizsgálatban alkalmazott statisztikai módszerek.....	38
3.7.	Az országos talajszervesszén telítettség meghatározásának módszertana.....	40
3.7.1.	Koncepcionális háttér	40

3.7.2.	A referenciaként használt, telített talajok adatbázisa	40
3.7.3.	A modellezéshez használt környezeti és talaj változók	42
3.7.4.	A pedotranszfer függvények megalkotásának elméleti alapjai	43
4.	Eredmények.....	45
4.1.	Az eltérő talajművelési és területhasználati rendszerek hatása a talaj egészségére különös tekintettel a szervesanyag-tartalomra és összetételre agyagbemosódásos erdőtalajon	45
4.1.1.	A vizsgált művelésmódok talajának szemcseösszetétele és szervesanyag-tartalma agyagbemosódásos barna erdőtalajon	45
4.1.2.	A szerves anyag összetétel változásai az eltérően művelt területeken agyagbemosódásos barna erdőtalajon	47
4.1.3.	A különböző raktárakban tárolt szerves anyag összetételének változásai agyagbemosódásos barna erdőtalajon	49
4.1.4.	A fulvósav frakcióban (alkalikus extrakció) tapasztalt spektroszkópiás és fluoreszcens különbségek az extrahált szerves anyag összetételében művelésmódok között agyagbemosódásos barna erdőtalajon	52
4.1.5.	A vízzoldható szervesanyag-frakcióban tapasztalt spektroszkópiás és fluoreszcens különbségek az extrahált szerves anyag összetételében művelésmódok között agyagbemosódásos barna erdőtalajon	53
4.1.6.	A talaj szerves anyag változásának eredményei a művelésmódok között agyagbemosódásos barna erdőtalajon az irodalmi adatok tükrében.....	54
4.2.	A kémelő művelés és a takarónövények hatása a talaj vízgazdálkodására és erodálhatóságára agyagbemosódásos barna erdőtalajon	60
4.2.1.	A talaj vízmegőrzésének változása a változó agrotechnika függvényében.....	61
4.2.2.	A változó agrotechnika hatása a talajpusztulásra a mesterséges esőztetések alapján.....	64
4.2.3.	A változó agrotechnika hatása a vízmegőrzésre és talajpusztulásra a természetes csapadékok alapján	66
4.3.	Az eltérő talajművelési rendszerek hatása a talaj egészségére különös tekintettel a szervesanyag-tartalomra és összetételre mezősségi dinamikájú talajon	69
4.3.1.	A teljes talaj főbb tulajdonságai az eltérő művelésmódok alatt	69
4.3.2.	Az ásványi fázishoz kötött és az aggregátumokban tárolt szervesanyag-készletek közötti különbségek mezősségi dinamikájú talajon	71
4.3.3.	A szerves anyag összetételének változásai eltérő művelésmódok és raktárak között mezősségi dinamikájú talajon	71
4.3.4.	Az eltérő művelésmódok eredményeinek értékelése az irodalmi adatok tükrében	73
4.4.	A feltalaj szervesanyag-tartalmának és összetételének változása országos léptékben ...	78
4.4.1.	A szervesszén tartalom területi változékonysága Magyarország feltalajában.....	78
4.4.2.	A szervesanyag-tartalom összetételének területi változásai országos léptékben ...	79

4.4.3.	A feltalaj szerves anyagának eredményei Magyarországon az irodalmi adatok tükrében.....	83
4.5.	Magyarország feltalajának szervesszén telítettsége	86
4.5.1.	A telített szervesszén tartalom meghatározását célzó pedotranszfer függvény alkalmazhatóságának korlátai	89
4.5.2.	A telített talaj szervesszén tartalmának területi eloszlása és a Magyarország feltalajában pótlólagosan eltárolható szervesszén tartalom.....	91
4.5.3.	Hazánk feltalajának szervesszén telítetlensége az irodalmi adatok tükrében	92
5.	Összefoglalás	95
Irodalom		98

1. Bevezetés, célkitűzések

Hazánk egyik legfontosabb természeti erőforrása a talaj. Szerepe alapvető a jó minőségű és biztonságos élelmiszer termelésben de jóval túl is mutat ezen. Meghatározó szerepet játszik többek között a csapadékvíz tárolásában. A talaj magas porozitása miatt képes akár jelentős mennyiségű csapadék eltárolására helyben anélkül, hogy a vizet el kellene vezetni. Az eltárolt vízmennyiség pedig a növényzet számára létkérdés az év szárazabb időszakainak átvészeléséhez. A talajnak szintén kitüntetett szerepe van a víz mellett a táp- és szennyező anyagok forgalmában is. Az alapvető elemek körforgásának fontos része a talaj mely ezeken keresztül képes ellátni ökológiai funkcióit. A talajnak az emberi tevékenység káros hatásainak tompításában ugyancsak meghatározó szerepe van. Míg az atmoszférába vagy a hidroszférába kerülő szennyezőanyagok gyorsan és szinte korlátozások nélkül tudnak elterjedni és hatni, addig a talaj a legtöbb szennyezőanyagot – bizonyos határokon belül – megköti és esetenként le is bontja ezzel érdemben javítva a környezet élhetőségét.

Ugyanakkor a talaj sem képes a negatív hatásokat korlátlanul és mindenféle veszteség nélkül átvészelni. A talajt érő, részben természetes, de meghatározó módon az emberi tevékenység következményeként kialakult káros hatások folyamatosan rombolják szerkezetét, összetételét és funkcionalitását is. Mivel a talaj az emberi időlépték alapján csak feltételesen megújuló közeg, védelme, illetve egészségének megőrzése létkérdés. Annál is inkább, mert a folyamatosan degradálódó talajok mellett a kihívások, melyekkel szemben eddig olyan hatékonyan védekezett szintén növekednek.

A hazánk területére készülő klimatikus előrejelzések alapján az átlaghőmérséklet csekély növekedése mellett leginkább az időjárási szélsőségek fokozódására kell számítanunk. Ezzel a kihívással szemben létkérdés, hogy a talaj funkcionalitását ne csak megőrizzük, hanem a lehetőségekhez mérten még fokozni is tudjuk. Az egyre rendszertelenebb és egyre hevesebb csapadékesemények eróziót és tápanyag veszteséget okoznak, villámárvizeket indukálnak, melyek már lakott területeket, sőt embereket is veszélyeztetnek. Mindemellett a lefolyt víz hiánya a tenyészidőszak folyamán aszályt okoz mely végső soron az élelmiszerbiztonságot is veszélyezteti. Már a mért adatok alapján de az előrejelzések szerint méginkább egyre nagyobb területeken kell kezelnünk az adott éven belül egymás után jelentkező víztöbblet és aszály okozta problémát.

A lehetséges megoldások között kiemelt helyen kell kezelnünk az ásványi talajok szervesanyag-gazdálkodásának kérdéskörét. A hosszú ideje művelt talajok elvesztették szervesanyag-készletük jelentős részét ezzel összefüggésben funkcionalitásuk érdemben romlott. E talajok szervesanyag-tartalmának visszapótlásával a talajtulajdonságok széles körét, többek között a vízgazdálkodást és a termékenységet is jelentősen lehet javítani. A célra hagyományosan alkalmazott szerves trágyázás, tekintve, hogy az állattartás intenzív, nagyüzemi keretek között történik, napjainkban már nem képes ellátni ezt a feladatot.

A problémát és a megoldási lehetőséget felismerve a közelmúltban világszerte születtek olyan kezdeményezések mely a talaj szervesanyag-tartalmának növelése útján remélik annak funkcionalitását javítani. A változások két alappillére a talajművelés intenzitásnak csökkentése és a talajba juttatott növényi maradványok mennyiségének növelése. Míg az előbbi hatására a talaj mikroorganizmusainak élettevékenysége azaz a

szerves anyag lebontása mérséklődik, addig az utóbbi révén a talajba kerülő friss szerves anyag ott hosszabb távon is raktározódik, átalakul és érdemben járul hozzá a talaj tulajdonságainak javításához.

Habár az elképzelést egyre több helyen ültetik át a gyakorlatba és ennek kapcsán egyre több mért eredménnyel rendelkezünk számos kérdést illetően még nem egyértelműek az adatok. Nem világos például, hogy a talajba kerülő friss szerves anyag milyen mechanizmusok alapján stabilizálódik, illetve e stabilizációs lehetőségeket hogyan befolyásolják a talajtulajdonságok. További kérdés, hogy ezek az elérő mechanizmusok okoznak-e különbségeket a megkötött szerves anyag kémiai összetételében, illetve ezt hogyan befolyásolja a talaj típusa. Az sem egyértelmű, hogy a talaj vízbefogadó képessége csak időszakosan, például csak tömörödött, állapotában javul a szerves anyag növekmény hatására, vagy e kedvező hatás az év egészében, a talajműveléstől függetlenül jelentkezik.

Szintén válaszra vár a kérdés, hogy mekkora hazánk talajtakarójában a maximálisan eltárolható szerves anyag mennyisége, illetve ez milyen területi heterogenitással bír. Ennek ismeretében válnának meghatározhatóvá azok a területek melyeken a legkisebb befektetéssel a legnagyobb szerves anyag növekményt tudnánk elérni a feltalajban. Ugyancsak meghatározásra vár a kérdés, hogy országos léptékben mely tényezők hatnak leginkább a feltalaj pillanatnyi, stabilan kötött szerves anyag tartalmára és összetételére.

Jelen dolgozat célja, hogy összefoglalja kutatásom eredményeit a talaj degradációjával kapcsolatosan és választ adjon a fenti kérdésekre, egyúttal egy gyakorlati megoldási lehetőséget is felvázoljon. A témakör részletekbe menő vizsgálatát esettanulmányokon keresztül közelítettem, melyeket a mezőgazdasági talajhasználat számára legfontosabb két talajtípuson egy agyagbemosódásos barna erdőtalajon és egy csernozjomon végeztem el. Ezen vizsgálatok eredményeit általánosítva megpróbáltam országos léptékben is áttekinteni a talaj szerves anyagának mennyiségét és összetételét.

2. Irodalmi áttekintés

2.1. A talaj és talajegészség

A talaj fogalmára napjainkig sem született általánosan elfogadott, széles körben alkalmazott definíció. Az egymással párhuzamosan használt definíciók a leíró szemléletmódját tükrözik vagyis a talajnak csak bizonyos tulajdonságaira fókuszálnak, míg másokat elhanyagolnak. Anyagtudományi szempontból a talaj egy polidiszperz rendszer, mely különböző arányban tartalmaz ásványokat, holt szerves anyagot, vizet, gázokat és élőlényeket. Ha rendszerszemlélet alapján tekintjük, akkor a talaj a közös halmaz a lito-, bio- hidro- és atmoszférák találkozásában és mint ilyen meghatározó helyszíne a szférák közötti interakcióknak. A mezőgazdaság számára a talaj legfontosabb tulajdonsága a termékenység, ill. a növények számára a folyamatos nedvességutánpótlás biztosítása. Egy régésznek elsősorban a talaj egy olyan közeg mely megőrzi a múlt emlékeit, míg az építészet számára leginkább a statikai tulajdonságai a meghatározóak. Környezeti szempontból a talaj óriási fajlagos felülete a mérvadó melynek segítségével az őt ért hatásokat – szemben a földfelszín másik két meghatározó fázisával a vízzel és a levegővel – tompítani képes. Azaz a talaj szűrőként is funkcionál és képes a szennyezőanyagok jelentős részét hosszabb rövidebb távon megkötni és ártalmatlanítani is. Szintén alapvető szerepe van a rendszertelenül érkező csapadék tárolásában ezzel egyszerre minimalizálva az árvizek és az aszály kialakulását. Biológiai értelemben a talaj egy olyan életközösség melyben tömérdek élőlény nagyon magas változékonyságban jelenik meg. Ennek ellenére, a talaj csak feltételesen és jellemzően nagyon hosszú idő alatt képes megújulni.

Összességében tehát a talajt általános definíció híján célszerű a fent említett funkciói alapján leírni és megítélni. E funkciók összességének meglétét a talaj egészségének fogalmával próbálták definiálni. E szerint az egészséges talaj funkcionalitásában nem korlátozott. A probléma, hogy ahogy a talaj funkcionalitása, úgy annak egészsége sem számszerűsíthető közvetlenül (Lehmann et al., 2020). A talajegészség becslésére ezért indikátorokat alkalmaznak. Ezen indikátorok köre meglehetősen széles, területenként és a talaj elsődleges funkcióját tekintve tág határok között mozog. Közös jellemzőjük, hogy általában analitikai, távérzékelési vagy GIS módszerekkel jól mérhetőek ugyanakkor összefüggésük a talaj tényleges egészségével, azaz funkcionalitásával nem abszolút hanem a talajhasználat céljától és módjától függ. A helyzetet tovább bonyolítja, hogy a talajoknak ökoszisztéma szolgáltatásai is vannak melyek ugyan szintén felfoghatóak funkciókként azonban mégis általában külön fogalomkörként kezelik őket (Rinot et al., 2019). Ebből következően, a mai napig sincs egy pontosan definiált és széles körben elfogadott indikátorcsoport melyeknek mérésével a talajegészség pontosan számszerűsíthető. A leggyakrabban alkalmazott indikátorokat kémiai, fizikai és biológiai csoportokba szokták sorolni, melyek között kitüntetett szerepe van a kémhatásnak, a talajszerkezetnek, a tápanyagszolgáltató képességnek, az erózióknak és a biológiai aktivitásnak.

Az Egyesült Államokban végzett meta-analízis alapján a leginkább meghatározó, talajegészséget jelző tulajdonságok a felszíni lefolyás és a talajerózió mennyisége (Stewart et al., 2018). A másik, szinte az összes talajegészségi indikátorhoz szorosan kapcsolódó

tulajdonság a talaj szervesanyag-tartalma és összetétele. Ebből kifolyólag jelen tanulmány a továbbiakban e két talajegészség jelző indikátor vizsgálatára fókuszál.

2.2.1. A talaj aktuális szervesanyag-tartalma

A talajban a szerves anyag mennyisége sem térben sem időben nem állandó. A bevételi oldalon, elsődleges forrásként a növényi produkció áll, mely egyrészt a gyökértömeg által, másrészt a földfeletti részek elhalásával, majd talajba kerülésével növeli a talaj szerves anyag mennyiségét. Mivel e bevétel meghatározó része a talajfelszín felől érkezik ezért általában a talajok legfelső szintje tartalmazza a legtöbb szerves anyagot majd a mélységgel ennek mennyisége csökken.

A veszteség oldalon a mikrobiológiai lebontás áll mely a bonyolult szerves molekulákat hosszadalmas kémiai átalakulások után végső soron széndioxiddá és vízzé alakítja. A folyamat végén a széndioxid a légkörbe távozik. Következésképp, minden olyan folyamat mely befolyásolja a talajba kerülő növényi maradványok mennyiségét illetve a lebontás sebességét hatással van a talaj szervesanya- tartalmára (Schmidt et al., 2011).

Az ásványi talajban a szerves anyag tárolás tehát a mikrobiális lebontással szembeni védettség mértékétől függ. E stabilizációs mechanizmusok két alapvető formája a szerves anyag ásványi felülethez történő kémiai kötése (Chenu et al., 2019; Kögel-Knabner et al., 2008), illetve az aggregátumok belsejébe történő fizikai elzáródása (Six et al., 2002). Az első típusú raktározás nehezebben felbontható, kémiai kötésekre épül ezért általában az ilyen módon tárolt szerves anyag kora (más szóhasználattal tartózkodási ideje) magasabb a talajban mint az aggregátumokban tárolt szerves anyagé. Ezért nevezik az ásványi fázishoz kötött szerves anyagot „stabil” vagy „lassú” készletnek is, míg a rövidebb idő alatt is változékonyabb, az aggregátság pillanatnyi fokához kötődő szervesszén készletet „mobil” vagy „gyors” raktárnak. A talajba jutó, holt szerves anyag először fizikailag aprózódik, így hozva létre a szerves törmelékét mely kevésbé átalakult, jellemzően növényi részekből áll és gyakorlatilag a mikrobiális lebontás/átalakítás szabad prédája (Kay és Vandenbygaart, 2002). Mindemellett, e szerves törmelék frakciónak meghatározó szerepe van a talaj aggregátumainak képződésében (Kan et al., 2020). Ennek során a szabad szerves anyag az aggregátumok belsejébe záródva fizikailag védetté válik a mikrobiom átalakításával szemben. Ennek ellenére a mikrobiális átalakítás és a heterotróf talajlégzés elsődleges forrása szintén e szerves törmelék frakció. Ebből adódóan a talajba kerülő nagyobb mennyiségű friss szerves anyag hatására a szervesanyag-lebontás sebessége időlegesen de gyorsan felfut amit „priming” hatásnak neveznek (Kuzyakov et al., 2000). E hirtelen megnövekedő lebontás azonban gyakran a védett szervesanyag-készleteket is érinti.

A fentiek okán a talajban élő mikrobáknak a szervesszén megkötésén kívül szintén kulcsszerepe van a szerkezetképzésben és –fenntartásban is. A talajokban található aggregátumok mennyisége, összetétele és stabilitása széles körben használt mutatók a szerkezet megítélésére. Az aggregátság szoros és direkt összefüggésben áll a talaj szervesanyag-tartalmával és a mikrobiom állapotával (Garcia-Franco et al., 2015). Magasabb aggregátum stabilitás értékek jobb nedvesség és oxigén ellátottságot okoznak ami pozitív visszacsatolásként javítja a mikrobiom talajbeli életfeltételeit.

Azaz a talajban pillanatnyilag megtalálható szerves anyag mennyisége egy dinamikus egyensúlyi állapot függvénye, melyet talajtani (Rasmussen et al., 2018), domborzati és klimatikus hatások is erősen befolyásolnak. A domborzat alapvetően az erózió dinamikát ezen túl pedig a mikroklimatikus viszonyokat határozza meg, ezeken keresztül hat. A meleg és nedves klíma kedvez a primer produkció mennyiségének, azaz direkt összefüggésben áll a talajba kerülő szerves maradványok tömegével. Ugyanakkor e feltételek ugyancsak kedveznek a mikrobiális lebontásnak is, következésképpen a mineralizáció is gyorsabbá válik. Globális összehasonlításban a trópusi területeken a talaj szervesanyag-tartalma alacsony az intenzív lebontás miatt, míg a magas szélességeken sok szerves anyag található a talajban annak ellenére, hogy csekély a biológiai produkció, tekintve hogy a lebontás a hosszabb fagyott időszakok miatt gátolt. Mindemellett az eltérő raktárakban tárolt szervesanyag-készletekre eltérő módon hatnak a klimatikus viszonyok (Lugato et al., 2021). E hatások még regionális léptékben is kimutathatóak (Leirós et al., 1999), azonban pl. hazánk esetében az országon belüli klimatikus különbségek nem feltétlenül akkorák, hogy ez érdemben hatna a talaj szerves anyag dinamikájára.

2.2.2. A talajban maximálisan eltárolható szerves anyag mennyisége

Ásványi talajokban az eltárolható szervesanyag-tartalom korlátos, mely értéket gyakran telítettségnek vagy szaturációnak neveznek. Ezen elméleti maximum meghatározása alapvető kérdés például, hogy viszonyítási alapként szolgáljon a pillanatnyi szervesanyag-tartalom megítéléséhez és ezen keresztül megbízható mutatója legyen a talaj egészségének. Mélyebb talajtani ismeretek nélkül, pl. szerves anyag és a talaj ásványos fázisa közötti összetett kémiai reakciókon, melyek a mai napig sem teljesen tisztázottak (Inagaki et al., 2020), a szervesszén telítettség fogalma a gazdálkodók és a döntéshozók számára is jól értelmezhető és használható (O'Rourke et al., 2015). Következésképpen, egy térkép alapú, pontos és részletes szervesszén telítettségi adatbázis jelentős segítséget tud nyújtani a gyakorlat számára úgy a talajegészség megítélésében mint a vállalt klímacélok elérésében (Minasny et al., 2017). Ennek ellenére, a szervesszén telítettség meghatározására a mai napig nincs széles körben elfogadott eljárás (Sanderman et al., 2010). A problémát a számos, egymással jellemzően szinergiában álló klimatikus, talajtani, területhasználati és antropogén hatótényező megléte okozza, melyek az alapvető ásványos összetétel és szemcseméret eloszlás mellett hatnak a végső értékre (Briedis et al., 2018; Cotrufo et al., 2019; Fekete et al., 2021).

Amennyiben a keletkező szerves anyag mennyisége nagyságrendekkel haladja meg a lebontás szintjét a talaj szervesszén tartalma gyors növekedésnek indulhat. Például a permanens vízborítás okozta oxigén hiány olyan mértékben képes gátolni a szerves anyag oxidációját, hogy csekély biológiai produkció mellett is szerves talajszint képes kialakulni (Aide et al., 2021). A fenti körülmények között természetesen a tözeg felhalmozódását nem limitálja semmi, így nem beszélhetünk a szervesszén-tartalom szaturációjáról, tekintve, hogy e fogalom kizárólag csak ásványi talajok esetében értelmezhető. Mindemellett, az eddig megalkotott szaturációs modellek alapján számos, a modellek által túltelítettnek jelzett talajt találunk (Wiesmeier et al., 2014).

A szemcseméret és a fajlagos felület fordított összefüggése miatt a korai tanulmányokban a finom frakció (elemi részecskék < 20 vagy 50 μm) talajon belüli aránya

szerepelt meghatározó tényezőként a megköthető szervesszén tartalom becslésében (Hassink, 1997a). Később kiderült, hogy a finom frakció sem egyformán köti a szervesszenet, jelentős különbségek adódtak eltérő mélységű talajszintek, illetve eltérő területhasználatú talajok között (Chen et al., 2019, 2018). További vizsgálatok rámutattak, hogy nagy általánosságban véve a talajok szerves szén tartalmának csak mintegy fele kötődik közvetlenül, kémiaiilag az ásványi felületekhez (Wiesmeier et al., 2014), ezért Barré et al. (2017) megállapította, hogy a finomfrakció szervesszén kötő képessége nem utal a talaj egészének szervesszén tároló kapacitására. Az esettanulmányok egyre növekvő számának köszönhetően előállt egy statisztikai szempontból is értelmezhető adatbázis mely egy konkrét indikátor helyett a hatótényezők széles spektrumának szerepét támasztotta alá. A vizsgálatok egy jelentős részében az agyag frakció ásványos összetétele szerepelt meghatározó tényezőként a szerves anyag mennyiségének és ezen keresztül a telítettség meghatározásának kérdésében. A vizsgálatok az egyik leginkább meghatározó hatótényezőként a talaj szeszkvioxid tartalmát, illetve az oldható alumínium mennyiségét azonosították (Rasmussen et al., 2018). A hazánkban végzett vizsgálatok alapján szintén az alumínium (Zacháry, 2019), a fajlagos felület, a kicserélhető kationok mennyisége és a bázistelítettség bizonyultak a leginkább meghatározó tulajdonságoknak (Juhos et al., 2021).

Mindazonáltal szükséges megjegyeznünk, hogy ezek a kutatások és következtetések a vizsgált hatótényezők sem vették figyelembe a talaj kevésbé stabilizált szerves törmelék tartalmát. A hagyományos talaj szerves anyag felosztás alapján e szerves törmelék közvetlenül a növényi maradványok fizikai feldarabolódása útján keletkezik és mivel nem kötődik ásványos alkotóelemekhez semmiféle védelemmel sem rendelkezik a mikrobiális lebontással szemben. Ezért lebontását nagyon gyorsnak gondolták és az egész frakciót nem létezőnek tekintették a talajban hosszú távon tárolt szervesszén tartalom és a telítettség szempontjából (Hassink, 1997a). Ezzel szemben, később bebizonyosodott, hogy pl. homoktalajokon e szerves törmelék frakció adja a talaj szerves anyagának döntő részét (Hanegraaf et al., 2009), és ez a szervesanyag-tartalom hosszú távon is része marad a talajnak (Witzgall et al., 2021). Az általánosan elfogadott vélemény alapján a visszaerdősítés vagy a talajművelés intenzitásának csökkentésével fokozatosan megemelkedő talaj szerves anyag tartalom meghatározó része szintén e szerves törmelék frakció része (Cardinael et al., 2015; Chimento et al., 2016). Ebből fakadóan, a hagyományos, az ásványi fázishoz kötött szerves anyag kizárólagosságán alapuló telítési megközelítés a gyakorlat számára nem alkalmazható közvetlenül. Ennek ellenére napjainkban is használják az ásványok által stabilizált szerves anyag mennyiségét mint a talajban praktikusán eltárolt szerves anyagot és a talaj telítettségét is ennek a raktárnak a méretéhez viszonyítják (Chen et al., 2018). Például Chen et al. (2019) e frakció alapján becsülte meg a teljes feltalaj szervesszén raktározó képességét és a szaturáltság fogalmát is ilyen értelemben alkalmazta Franciaország egészére elvégzett vizsgálatában. Ezzel szemben, az általunk használt megközelítés alapján a talaj szervesszén telítettségén a legmagasabb természetes körülmények között értéket értjük, mely független a szervesszén raktáraktól és így a talaj egészére vonatkozik (Barré et al., 2017; Chenu et al., 2019; Six et al., 2002).

Az újabb megközelítések szerint két alapvető lehetőség nyílik a talaj maximálisan eltárolható szervesszén tartalmának becslésére (Barré et al., 2017): (i) az ismert tárolási mechanizmusok kinetikájának elméleti közelítésével, majd a becslések összegeként; (ii) empirikus meghatározással referencia szelvények/mérések alapján. Mindkét megközelítés mért adatokon, majd a mért adatokból származtatott modellek alkalmazásán alapszik.

Következésképpen a legmagasabb mért értékek használata az elméleti telítettség meghatározására a mai napig alapvetés. Szintén Barré et al. (2017) javaslata alapján egy kiválasztott agroklimatikus területi egységben a hosszú ideje erdővel borított talajok szervesszén tartalmának felső 10%-át érdemes elfogadni elméleti telítettségi értéknek. Ezzel a megközelítéssel az a probléma, hogy e felső 10% az esetek többségében nem reprezentálja a teljes területi egység talajtani és domborzati heterogenitását (Suleymanov et al., 2021). Másrészt az ezen telítettségi értékek alapján felállított modell kizárólag csak az agroklimatikus egység figyelembe vett környezeti hatótényezői között érvényes, tágabb területi egységekre történő kiterjesztése problematikus. Nagyobb adatbázisokban magasabb eséllyel fordulhatnak elő olyan adatok melyek valójában nem telítettek. Ha a lineáris regressziót ilyen pontokat is tartalmazó adatbázis elemeire végezzük el az a becslések során nagyobb mennyiségű „túltelített” szelvényt eredményezhet (Feng et al., 2013). Következésképpen, ha egy nagyobb területi egységre pl. országos léptékben szeretnénk talaj szervesszén telítettséget becsülni, úgy a mért értéken alapuló és a modellezett értékekre épülő megközelítések együttes használata tűnik optimális megoldásnak.

2.3. A talaj szerves anyagának összetétele

A talajba természetes úton bejutó szerves anyagok összetétele megegyezik az elsősorban növényi, mikrobiális és esetleg állati maradványok kémiai összetételével. Ezek között meghatározó szerepe van a fehérjéknek, a szénhidrátoknak (cukrok, keményítő, cellulóz), a peptideknek és a ligninnek. Ezen viszonylag „tisztá” alkotórészek a talajban átalakulnak és jellemzően olyan „kevert” molekulák anyagok jönnek létre, melyeknek nem csak a kémiai összetételét nehéz meghatározni hanem sokszor egy adott vegyületcsoportba történő besorolásuk is nehézséget okoz. Ebből fakadóan a talaj szerves anyagának pontos összetételét nem ismerjük, számszerűsítése inkább csak az egyes alkotórészek arányainak becslésével lehetséges.

A klasszikus talajtanban használták a humuszanyagok és nem humuszanyagok felosztást. A második csoport a fent említett nyers szerves anyagok összessége, míg az első az ezekből a talajban átalakulás útján képződött szerves anyagok összefoglaló neve. Napjainkra ezt az elméleti jellegű felosztást többé-kevésbé felváltotta az empirikus, vizsgálati eredményeken alapuló csoportosítás.

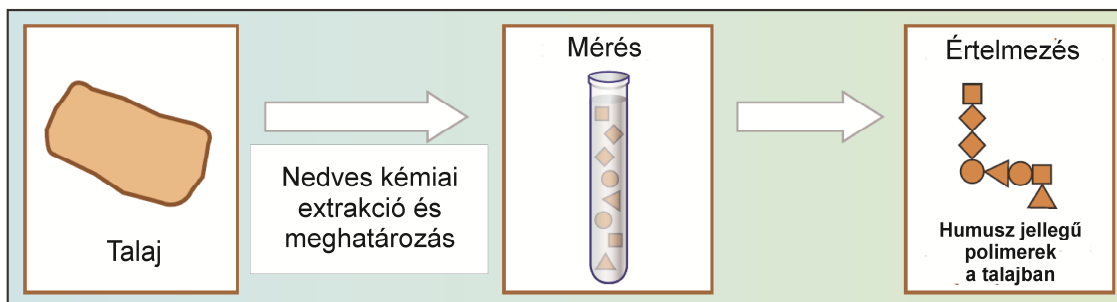
Az általános felfogás szerint a szerves anyag átalakulása során a talajban a könnyen bomló alkotórészek átalakításával a stabilabb nehezen bomló részek aránya növekszik (Lehmann és Kleber, 2015). Adott talaj szerves anyagának összetétele összefügg a talajt képződésének kezdete óta ért hatások pl. növényborítottság, redox viszonyok, területhasználat, eróziós viszonyok változásaival. Mindemellett a talaj szerves anyagának aktuális állapota elsősorban mégis csak a pillanatnyi környezeti változókkal mint pl. a hidrológiai viszonyok, a pH, az ion koncentráció és összetétel, a redox viszonyok, a biológiai aktivitás tart egyensúlyt (Eckard et al., 2017). Következésképpen a talaj szerves anyagának vizsgálata nem csak a pillanatnyi talajegészség szempontjából létkérdés, hanem akár a környezeti változások detektálásában is fontos szerepet játszhat (Jakab et al., 2018a).

A talaj szervesanyag-összetételének meghatározására két alapvető módszer létezik melyeket gyakran egymással párhuzamosan is használnak (Kögel-Knabner, 2000). Az első megközelítés a szerves anyagot természetes közegében, a talaj egészével együtt, in situ módon vizsgálja. Ennek a megközelítésnek hátránya, hogy a jelenleg használatos vizsgálati módszerek nem képesek a konkrét kémiai összetétel detektálására, ehelyett csak közvetett információkat szolgáltatnak. Az egyik legelterjedtebb módszer a Fourier transzformált infravörös spektroszkópia (FTIR) az egyes atomok közötti kötések energiját tudja detektálni, így eredményeiből az anyagban megtalálható kötéstípusok, esetleg funkciók csoportok gyakoriságára következtethetünk. A másik, napjainkban egyre elterjedtebb de meglehetősen költséges in situ vizsgálati módszer a nukleáris mágneses rezonancia spektroszkópia mely kimondottan csak a szerves alkotók meghatározására fókuszál. Magas költsége mellett hátránya, hogy csekély szervesanyag-tartalmú mintákon nehezen alkalmazható, illetve, hogy a minta mágnesezhető anyag tartalma kizárja a használatát ezért rutin vizsgálatokra nem alkalmazzák. A talaj ásványos alkotóelemei jellemzően organominerális komplexeket alkotnak a szerves anyagokkal, ezért az ásványi fázis hatását nem lehet kiszűrni az FTIR spektrumokból. Azokban az esetekben, ha a vizsgálni kívánt szerves anyag és valamely ásványos alkotó ugyanazon a hullámszámon ad csúcsot az eredmények értelmezése gondokat okozhat (Stevenson et al., 2016; Stumpe et al., 2011).

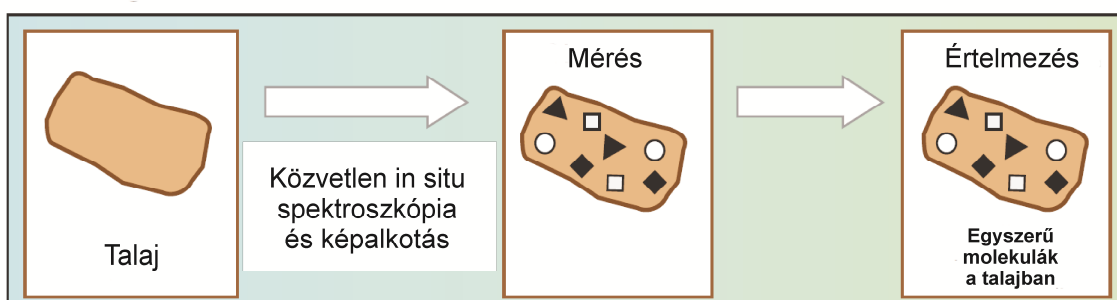
A másik megközelítés az ásványos alkotók fent említett zavaró hatását igyekszik kiküszöbölni azáltal, hogy a talaj szerves anyagát leválasztja a talaj egészéről és az így előállított extraktumokat vizsgálja. A módszer hiányossága, hogy ezidáig nem sikerült olyan extrakciós eljárást találni, mely a talaj szervesanyag-tartalmának egészét képes oldatba vinni. Az általánosan használt extrakciós eljárások szelektálnak, csak az adott extrahálószerben oldódó komponenseket viszik oldatba ezáltal a talaj szerves anyagának meghatározó részéről nem kapunk információt. E szelekció következtében a kinyert és megvizsgált szerves anyag nem feltétlenül jellemzi a talaj szerves anyagának egészét (Marinari et al., 2010).

A hagyományos extrakciós eljárás során nem elégedtek meg a szerves anyag kivonásával, hanem ezt a továbbiakban igyekeztek többé-kevésbé tiszta, homogén frakciókra is bontani. A két legelterjedtebb, a mai napig is használt talaj szervesanyag-extraktum csoport a fulvósavak és a huminsavak csoportja (Kononova, 1961). A fulvósavak kis molekulatömegűek, reaktívak és mozgékonyak, következésképpen ezt a csoportot tekintették a talaj elérhető, mobilis szervesanyag-készletének. Ezzel szemben a huminsavak sötétebbek, nagy a molekulatömegük, kevésbé savas a karakterük ezért hagyományosan ezek jellemezték a talaj stabil szervesanyag-készletét. Később aztán világossá vált, hogy ez a csoportosítás nincs egyértelműen összhangban a szervesanyag tényleges funkciók csoportjaival (Schmidt et al., 2011). További probléma, hogy az extrakció, majd az egyes frakciók szétválasztása erős savak és bázisok alkalmazásával történik. Ezeknek hatására a szerves anyag egy jelentős része ugyan oldatba kerül, később kicsapják majd újra visszaoldják, miáltal az eredeti, talajban megtalálható kémiai szerkezet megváltozik. Ennek következtében a fulvó- és huminsav frakciókkal kapcsolatos vizsgálatok feltehetően olyan eredményeket adnak melyek az in situ talaj szempontjából csak nagyon komoly fenntartásokkal értelmezhetőek. Schmidt et al., (2011) interpretációja alapján a humusz jellegű makromolekulák az extrakció hatására jönnek létre, a talajban, in situ módon nem tudták őket kimutatni. Azaz a talajosodott szerves anyagot (humuszt) sokkal inkább egyszerű biomolekulaként kellene kezelnünk (*l. ábra*).

a Tradicionális megközelítés



b Új megközelítés



1. ábra A talajban található szerves anyag vizsgálatának hagyományos és új megközelítései illetve az interpretáció eredményei (Schmidt et al., 2011)

Ahhoz, hogy a talajban ténylegesen lejátszódó folyamatokat tudjuk számszerűsíteni egyre nagyobb figyelem fordult a vízdoldható szerves anyagok vizsgálatára. Amellett, hogy e frakció előállítására nem ütközik nehézségekbe a víz által oldott szerves anyag alapvető fontosságú a talajszelvény szervesanyag-forgalmában ez a legdinamikusabban változó, legreaktívabb frakció (Battin et al., 2008), ebből kifolyólag elméletileg ez reagál leggyorsabban a talajt érő környezeti változásokra is. Mindemellett bizonyított, hogy a vízdoldható frakció nagyon stabil, idős szerves komponenseket is tartalmaz (Kalbitz et al., 2000). Annak ellenére, hogy a vízdoldható rész aránya nagy általánosságban 1% körül mozog a talaj teljes szervesanyag-tartalmához képest, Kalbitz és Kaiser (2008) kimutatta, hogy egy erdőtalaj szervesanyag-tartalmának 19–55%-a legalább ideiglenesen vízdoldott formában volt és így vándorolt és ragált a többi talajalkotóval a szelvényen belül. Ebből fakadóan a talaj pórusait kitöltő nedvességben oldott szerves anyagnak kitüntetett szerepe van a globális szén körforgalomban, ugyanakkor koncentrációja és összetétele jól jellemzi a talajszelvény általános egészségi állapotát (Filep et al., 2015). A felszíni vizek elemzésén alapuló szervesanyag-készlet vizsgálati eredmények alapján két alapvető szerves anyag forrást különböztethetünk meg. Ezek a talaj átalakult, konzerválódott szervesanyag készlete és a mikrobiom uralta, recens élő szerves anyag (Tipping et al., 2012).

A talajban az oldott szerves anyag tulajdonságai szorosan kötődnek a mikrobiótához (Huang et al., 2021), következésképpen bármelyikük hirtelen megváltozása hatással van a másik tulajdonságaira. Embacher et al. (2007) nagyobb változékonyságot talált egy talajszelvény oldott szerves anyagának összetételében az évszakok között, mint a különböző talajtípusok között. Másrészt, erdőtalajok esetében a friss szerves törmelék és az oldott szerves anyag anyagi összetétele között is egyértelmű a kapcsolat (Filep et al., 2022).

A talaj egyben egy kromatografikus rendszerként is felfogható, ahol a jobban adszorbeálódó alkotórészek kevésbé vándorolnak, míg a mobilisabb alkotók nagyobb távolságokat is megtehetnek a talaj nedvességtartalmának mozgásával. A talajba jutó friss növényi maradványok jellemzően a felszínről és a gyökerek irányából kerülnek a talajba, ahol távolabbi, mélyebb részekhez történő eljutásukat a fizikai keverés mellett, elsősorban a nedvességmozgás iránya és dinamikája határozza meg, miközben mikrobiális lebontás, átalakítás és organominerális komplex képződés is folyamatosan zajlik (Kaiser és Kalbitz, 2012; Kotrocó et al., 2020).

A mezőgazdaság és ezen belül is a talajművelés megnöveli a vízben oldott szerves anyagban a mikrobiális alkotórészek arányát (Wilson és, a felszíni lefolyásban az egyszerű molekulaszervezetű oldott szerves anyagok arányát (Singh et al., 2017; Williams et al., 2010), míg a talaj pórusvizében a komplex molekulaszervezetű oldott szerves anyag részaránya nő meg (Graeber et al., 2012). Az intenzív talajművelés okozta fokozott szerves anyag lebontás a biológiailag kevésbé hasznosítható aromás és kondenzált szervesanyag alkotórészek arányának relatív növekedésével jár (Delprat et al., 1997; Embacher et al., 2008). Másrészről számos tisztázatlan kérdés is felmerül a művelés intenzitásának hatásával kapcsolatosan a talaj vízzoldható szerves anyagáról. Például Marinari et al. (2010) beszámolója alapján a szántott területeken a klímától függetlenül konzekvensen magasabb oldott szervesanyag-koncentrációt mértek a csökkentett művelésű területekhez viszonyítva, habár a szerves anyag összetétele csak a mediterrán területeken különbözött a két művelésmód között. Ezzel szemben, pl. Romero et al. (2017) a csökkentett intenzitású talajművelés alatt talált magasabb vízzoldható szervesanyag-koncentrációkat. A téma vizsgálata már csak azért is indokolt, mert a felszíni édesvizekben található oldott szerves anyag – különösen a dombvidéki agrár területek esetében – a szántóterületekről lefolyó vízzel kerül a víztestekbe (Eckard et al., 2017).

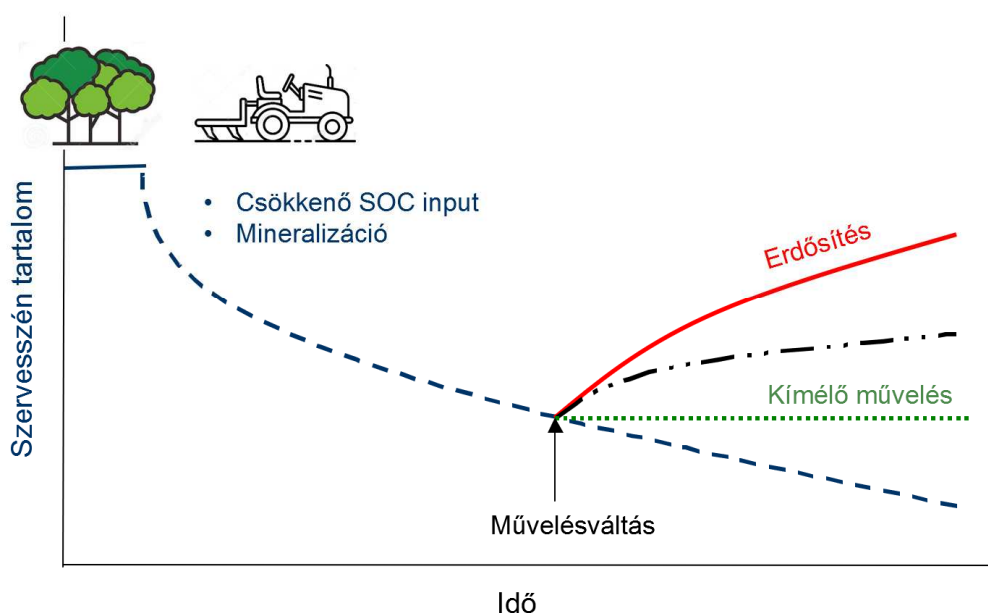
2.4. A talaj degradációja

Habár a talajok degradációja természetes körülmények között is bekövetkezhet az ember által közvetve vagy közvetlenül kiváltott degradációs folyamatok mellett a természetes degradáció mértéke eltörpül. Habár napjainkban leginkább az erdőirtásokhoz kapcsolódó fokozott talajeróziós folyamatok szerepelnek a köztudatban mint degradációs folyamatok, a folyamatos intenzív mezőgazdasági tevékenység ennél is komolyabb károkat okoz (Hu et al., 2021).

A talajok degradációja egy vagy több talajfunkció romlását, esetenként teljes elvesztését jelenti. Habár a degradáció általában komplex folyamat mely nem korlátozódik egyes funkciók sérülésére a szakirodalomban mégis degradációs folyamatokat írnak le. Az általánosan elfogadott rendszer szerint e folyamatokat a talaj mennyiségi és minőségi változásaihoz, majd az utóbbin belül fizikai, biológiai és kémiai folyamatokhoz köthetjük. A mennyiségi talajromlás elsősorban az eróziót jelenti de ide tartozik a talajok elszigetelése a légkörtől, vagyis a beépítés is. A minőségi változások kémiai csoportjába a szikesedés (sófelhalmozódás), a savanyodás, míg a fizikai degradáció csoportjába a vízgazdálkodási problémák megjelenése, szerkezetromlás tömörödés tartoznak. A biológiai leromlás általában a biológiai sokféleség csökkenésén keresztül érhető tetten (Lal, 2015). A legtöbb

talajt érintő degradációs folyamat közvetve vagy közvetlenül visszavezethető a talaj szervesanyag-tartalmának csökkenésére.

A csökkenő szervesanyag-tartalom oka általában a területhasználat megváltozásához és ezen belül is a mezőgazdasági termelés megindulásához kötődik. Az emberi tevékenység napjainkra szinte teljesen átalakította az északi félteke természetes tájszerkezetét melyet ma a mezőgazdaság ural (Forman, 1995). Az intenzív növénytermelés által igénybe vett területeken a talaj szervesanyag-tartalma fokozatos csökkenésnek indult (Smith, 2008) (2. ábra). E csökkenés elsődleges oka hogy a biológiai produkció meghatározó része a területhasználat váltása után mint termény elkerült a területről és nem jutott vissza a talajba, ezzel a bevételi oldalon jelentős csökkenés állt be. Ezzel párhuzamosan a talajművelés jelentős mennyiségű oxigént juttatott a feltalajba, ahol a szerves anyag lebontását meghatározó részben e gáz jelenléte/hiánya korlátozta. A többlet oxigén hatására a lebontás intenzitása megnövekedett és a talaj szervesanyag-tartalma csökkenni kezdett. E két, egymást erősítő folyamat hatására a művelt feltalajok szervesanyag-tartalma a művelésbe vonást követően gyorsan csökkent majd egy új alacsonyabb egyensúlyi szinten stabilizálódott.



2. ábra A talaj szervesszén tartalmának változása a területhasználat és az eltelt idő függvényében.

A művelt talajok szervesszén tartalmának globális mértékű csökkenését tovább fokozta a zöld forradalom melynek során a gépesítés hatására a talajművelés intenzitása sokszorosára növekedett, illetve a műtrágya használat elterjedésével a szervestrágyák által a talajba visszapótolt szervesszén mennyisége szinte nullára csökkent.

A talajban a szerves anyag nagy fajlagos felülete miatt az egyik legfontosabb szerkezetképző ágensként szerepel. Mennyiségének csökkenésével a talaj szerkezetessége is romlik, vagyis a vízbefogadó és vízmegtartó képessége is csökken (Tóth et al., 2014). Ez a folyamat tömörödéshez, kéregképződéshez vezet (Jakab et al., 2013) mely végső soron a

szántóföldekről lefolyó nagyobb mennyiségű víz és erózió révén talajpusztulást és villámárvákat okoz (Szabó et al., 2015). A lepusztuló talajmennyiség szintén befolyásolja a szervesanyag-tartalmat mindemellett a hiányzó vízmennyiség a tenyészidőszakban aszályt és termés-csökkenést jelent mely alapjaiban csökkenti az élelmiszerbiztonságot. A talaj vízbefogadó képessége nem egy állandó érték. A talajművelés és ezen belül is a szántás egyik alapvető feladata a talaj porozításának fokozása és ezzel párhuzamosan a talajban eltárolható víz mennyiségének növelése (Mohammadshirazi et al., 2016). Ugyanakkor az így létrehozott talajszerkezet elsősorban az aggregátumok stabilitásának hiánya miatt kimondottan időleges és a tenyészidőszak során gyorsan összeomlik drasztikusan lecsökkentve ezzel a talajba beszivárogni képes víz mennyiségét. Kulcskérdés tehát, hogy a talaj tulajdonságainak évszakos változása és a csapadékok hevésségének évszakos változása hogyan viszonyul egymáshoz (Jakab et al., 2017).

Alapvető fontosságú, hogy a talaj, mint természeti erőforrás nem áll korlátlan mértékben rendelkezésre. A degradáció típusától és mértékétől függően a talaj vagy képes regenerálódni vagy emberi időlépték alapján örökre kiesik az élelmiszertermelésből. Azaz megújulása is csak feltételelesen történik meg. Kulcskérdés tehát, hogy a mesterségesen átalakított, mezőgazdasági termelésbe vont talajaink egészségét mennyire tudjuk megőrizni, adott esetben javítani, azaz mennyire fenntarthatóan kezeljük globálisan illetve hazánkban ezt az alapvető erőforrást (Madarász et al., 2018).

2.5. Megváltozó környezeti feltételek és a talaj

A növekvő népesség fokozódó élelmiszerigénye egyre intenzívebb talajművelést tesz szükségessé. Ez egyrészt a mezőgazdasági területek egyre intenzívebb használatában, fokozódó gépesítésben és kemikália alkalmazásban, másrészt újabb, még nem művelt területek művelésbe vonásában nyilvánul meg. Mindkét folyamat erősen hat a talaj mint ökoszisztéma egészére és érdemben befolyásolja annak funkcionalitását.

Mindemellett a tudományos közösség döntő többsége egyetért abban, hogy a globális klimatikus viszonyok is változóban vannak. Ebben nincs semmi különös, hiszen bolygónk története folyamatos klimatikus változások folyamataként is felfogható. A változás folyamatának mérhető tulajdonságait igyekszünk nyomon követni, mely alapján kisebb-nagyobb bizonytalansággal próbáljuk előrejelezni az események további alakulását és az ezekből származtatható következményeket. Tekintettel mind a rendszer, mind a folyamat rendkívül összetett voltára az eltérő megközelítések alapján végzett előrejelzések nagyon széles skálán becslik a várható változásokat. A globális folyamatokon belül hazánkban különösen magas bizonytalansággal tudunk csak előrejelzéseket készíteni ezért a konkrét értékek helyett érdekesebb inkább a várható tendenciák alapján számba venni a következményeket és a talajhoz köthető adaptáció lehetőségeit.

2.5.1. A változó klimatikus hatások

A rendelkezésre álló mért adatok alapján egyértelmű, hogy az európai trendekhez hasonlóan az éves átlaghőmérséklet emelkedése mellett az extrém mennyiségű és intenzitású

csapadékesemények előfordulása hazánkban is növekszik (Berényi et al., 2021; Fowler és Kilsby, 2003; Schmeller et al., 2022). A gyakoriság növekedésével párhuzamosan ezen szélsőséges csapadékok előfordulása egyre rendszertelenebb, kiszámíthatatlanabb (Milošević et al., 2016). A Kárpát-medence és ezen belül Magyarország speciális földrajzi adottságai miatt relatíve nehezen modellezhető terület a klímaváltozás és ezen belül is a szélsőséges csapadékok szempontjából (Gelybó et al., 2018; László és Salavec, 2018). Az előrejelzések, ugyan változó valószínűséggel de egyöntetűen ennek a trendnek az erősödését prognosztizálják (Bartholy és Pongrácz, 2007; Cheval et al., 2017).

Az emelkedő hőmérséklet hatására a talaj szerves anyagának lebontása, a talajlégzés intenzitása is várhatóan növekedni fog. Ezzel a hatással tarthat némileg egyensúlyt a rendszertelenebb csapadékeloszlás melynek hatására pont a legmelegebb, legintenzívebb lebontást indukáló időszakokban léphet fel a talajban időszakos vízhiány, szárazság mely korlátozhatja a (mikro)biológiai produkciót és ezen keresztül a szerves anyag mineralizációját is. Összességében tehát az egymásnak ellentmondó hatások eredőjeként és a nagyon magas térbeli heterogenitás okán nem prognosztizálhatunk egyértelmű trendet a talaj szerves anyagának változására a változó klíma miatt hazánkban (Farsang, 2016).

A degradáció miatt leromlott szerkezetű talajok nehezebben képesek a lehulló csapadék befogadására és tárolására. Emellett a rendszertelenül érkező, nagymennyiségű, heves csapadékok hirtelen jelentenek nagy terhelést mely pozitív visszacsatolással tovább rombolja a talaj szerkezetét és egyre inkább csökkenti a beszivárgást (Jakab et al., 2013). A felszínen rekedt víz lefolyik magával ragadva a talaj legfelső, tápanyagokban leggazdagabb részét ezzel gyakran visszafordíthatatlan károkat okozva a talaj egészségében. A hirtelen jövő, nagy mennyiségű lefolyás és hordalék villámárvizek kialakulásához vezethet (Czigány et al., 2013), mely a gazdasági következmények mellett újabban már életeket is fenyegethet. Napjainkra már a médiában is egyre gyakrabban hallhatunk a szántóterületeken egy-két csapadék hatására kialakuló több méter széles és mély vízmosásokról melyek megszüntetése, betemetése jellemzően milliós nagyságrendű kiadást jelent (Kertész és Gergely, 2011). Kisebb relief energiájú, mélyebben fekvő területeken a talajba beszivárogni képtelen víz belvízként gyülekezik össze ezzel akadályozva a területhasználatot és rombolva az előtött területek talajainak egészségét (County et al., 2015). Másrészről a talajba be nem szivárgott víz elérhetlenné válik a növényzet számára. Az alföldi területek egyre jelentősebb részén az elérhető vízmennyiség korlátozza a mezőgazdasági termelést (Pinke et al., 2024). A klímaváltozás egyik fontos hatásaként adott tenyészidőszakon belül egyre több területen jelentkezik víztöbblet majd szárazság mely komoly stressz a növényzet számára (Barendrecht et al., 2024).

2.5.2. A talajhoz kapcsolódó megoldási lehetőségek

A közelmúltban felmerült, hogy a légköri széndioxid koncentráció csökkentésének hatékony módja lehet az atmoszferikus szenet a fotoszintézis útján növényi szerves anyaggá alakítani, majd az elhalt növényi maradványokon keresztül a talajban konzerválni (Lal, 2004a, 2004b). Az elképzelés nagy előnyének tűnt, hogy kivitelezése szinte jelentősebb energiabefektetés nélkül megvalósítható, lévén a fotoszintézis egy természetes folyamat, mely a napfény energiáját hasznosítva képes megkötni a légkör széndioxid tartalmát. és a növényi maradványok területen hagyásával szinte minden szántóföldi technológia mellett

kivitelezhető. Az ötlethez kapcsolódva született meg a 4/1000 kezdeményezés mely célul tűzte ki a talaj szervesanyag-tartalmának évenkénti 0,4%-kal történő növelését (Minasny et al., 2017). Az elképzelés már a megjelenése után nem sokkal kritikákat kapott (White et al., 2018). Később a gyakorlati mérések is rávilágítottak, hogy a talajba frissen elhelyezett szerves anyagnak csak egy kisebb része konzerválódik hosszú távon, jelentős része a megemelkedő mikrobiológiai aktivitás révén mineralizálódik és visszakerül a légkörbe (priming hatás) (Huo et al., 2022). A hatás erőssége számos környezeti tényező szinergiájaként alakul ki és időben és térben is változik, ebből fakadóan általános értelemben vett számszerűsítése a mai napig megoldatlan. A tendenciákból azonban az körvonalazódik, hogy a növényi maradványok megemelkedett mértékű talajba juttatásával gazdaságilag is racionális módon a légkör széndioxid tartalma érdemben nem csökkenthető.

Mindazonáltal a kezdeményezés ráirányította a figyelmet a talaj szervesanyag-tartalmára, mely ha nem is közvetlen módon de hatékony eszköz lehet a megváltozó környezeti feltételek hatásaihoz történő alkalmazkodásban. A talaj szervesanyag-tartalma és egészségi állapota közötti pozitív összefüggés alapján egyértelmű, hogy az ásványi talajok szervesanyag-tartalmát növelni szükséges, ezzel ugyanis – többek között – a vízgazdálkodást és a szélsőséges eseményekkel szembeni ellenállóképességet is jelentősen tudjuk növelni. Ennek legegyszerűbb módja a művelési ág megváltoztatása, pl. a szántóterületek gyepesítése (Römkens et al., 1999) vagy erdősítése (Juhos et al., 2021; Somogyi et al., 2013; Vesterdal et al., 2002), vagy egyszerűen csak a művelt területek felhagyása (Novák et al., 2014). Ugyanakkor az egyre növekvő népesség szükségletei miatt inkább a megművelt területek növekedése várható (Borrelli et al., 2017). Következésképp olyan megoldásra van szükség, mely a szántóterületek élelmiszertermelő képességét nem csökkenti, sőt inkább növeli, ugyanakkor a talaj egészségét (praktikusan a szervesanyag - artalmát) is képes növelni, de legalábbis megőrizni.

2.6. A „talajkímélő” mezőgazdaság

A csökkentett intenzitású mezőgazdasági művelés fogalma akkor vált értelmezhetővé amikor a talajművelést gépesítették és ezzel intenzitását nagyságrendileg növelték. Hagyományosan a talajművelés alapja évezredekken keresztül a szántás volt. Ettől függetlenül a szántás csak az elmúlt száz évben érte el az a talajmélységet és nagyságrendet mely érdemben csökkentette a talaj egészségi állapotát. Az addigi döntően hasznos következmények mellett (gyomirtás, porozitás növelése, szerkezet kialakítása) megjelentek a negatív hatások is mint a szervesanyag-vesztés, szerkezetvesztés, kergesedés, fokozódó erózió). A kímélő talajművelés elsősorban ezen káros hatások kiküszöbölése érdekében született meg. Az első csökkentett intenzitással művelt területek az Egyesült Államokban létesültek elsősorban a nedvességmegőrzés és a szélérozió meggátlása okán. Tekintve, hogy a szántás jótékony hatásait más agrotechnikai megoldásokkal (forgatás nélküli művelés, kemikáliák alkalmazása) ki lehetett váltani, alkalmazása már nem volt szükségszerű. Hamar bebizonyosodott, hogy adott körülmények között a szántás elhagyása a költségsökkenés mellett további pozitív hozadékkal járhat a talajegészség tekintetében is.

A kímélő talajművelés másik fontos alappillére a talajon hagyott jelentős szervesanyag-tartalom. Definíció szerint ennek el kell érnie legalább az összes megtermelt

növényi maradvány (szalma) 30%-át (Kassam et al., 2017). E friss növényi törmelék szolgál a talaj megújuló szervesanyag-tartalmának forrásául. A szerves trágyázás háttérbe szorulásával a növényi alapú szervestrágyák mint pl. a zöldtrágya szerepe felértékelődött. A takarónövények egyre szélesebb körben használatos zöldtrágyák (Alliaume et al., 2014; Gómez, 2017). Jótékony hatásuk a talaj szervesanyag-tartalmának növelése mellett megjelenik a rhizobium kapcsolt nitrogénkötés fokozódásában, a talajfelszín erózióval és deflációval szembeni fizikai védelmében, a beporzó rovarok védelmében, a biológiai sokféleség növelésében és a talajszerkezet javításában. Mindemellett meg kell emlékeznünk a takarónövények használatának lehetséges negatív következményeiről is úgy mint a növényi kórokozók megtelepedésének lehetséges helyei, illetve víz és nitrogén tekintetében konkurensei lehetnek a termesztett kultúráknak (Kramberger et al., 2014).

A kímélő mezőgazdasági művelésnek számos, a gyakorlatban eltérő megvalósulási formája terjedt el. Ezekben a művelőeszközök széles skáláját alkalmazhatják. A sávos művelések közös jellemzője, hogy esetükben a területet csak sávonként művelik más részeket nem bolygatnak. A legszélsőségesebb eset a direkt vetés melyben a talajművelés egészét próbálják elhagyni. Ennek hosszútávú, gyakorlati megvalósíthatósága a leggyakoribb környezeti adottságok mellett nem egyértelmű, időszakonként (4–5 évente) pl. a talaj mélylazítása szükséges lehet.

A csökkentett művelés alkalmasnak bizonyult a szántókról már elveszett szervesanyag-tartalom egy részének visszapótlására a feltalajba (Madarász et al., 2021; Mehra et al., 2018) ezúton járulva hozzá a talajegészség és az élelmiszerbiztonság növeléséhez, habár az általános tendenciák mögött a termés és a talaj szervesanyag-tartalmának növekedése a klimatikus és egyéb környezeti tényezők függvényében igen széles skálán mozoghat (Sun et al., 2020). A szervesanyag-tartalom növekedésében a legmeghatározóbb szerepet a területen hagyott és így a talajba kerülő addicionális növényi maradványok mennyisége a takarónövényeket is beleértve játssza (Kay és Vandenbygaart, 2002). Emellett a talaj minél kisebb mértékű bolygatásával csökken a talajban az oxigén mennyisége, miáltal a mikrobiológiai lebontás is limitálttá válik és végső soron a talajból kevesebb széndioxid távozik a légkörbe (Lal, 2004b). E két, alapvető tényező mellett számos további hatás pl. talajbiológiai eltérések, a vonatkozó szerves anyag átalakulási útvonalak, a szerves anyag mélység szerinti eloszlása és a talajszerkezet valamint az ebből származtatható vízgazdálkodási tulajdonságok szintén befolyásolhatják a szervesanyag-tartalom növekedésének mértékét. A témában publikált esettanulmányok száma jelentős, többségüket azonban savanyú talajon mérték, a karbonátos talajokon végzett vizsgálatok száma alacsonyabb. A csökkentett intenzitású művelés okozta szerves anyag lebontás szubsztrátjáról csak korlátozott információk állnak rendelkezésre, mint ahogy az sem tisztázott, hogy a mineralizálódott és a légkörbe jutó szén melyik talaj szervesanyag-készletből származik.

A csökkentett intenzitású, kímélő talajművelés hatására a szántott talajba visszajutó és ott megkötődő többlet szerves anyag dinamikájáról és a megkötődés mikéntjéről az eltérő raktárak között nagyon csekély ismerettel rendelkezünk (Gao et al., 2021). Ugyancsak ellentmondó információk vannak a művelt talajba jutó többlet szervesszén mélység szerinti eloszlásáról. A vizsgálatok többsége szerint a kímélő művelés hatására a pótlólagosan eltárolt szén csak a feltalajban jelenik meg (Bhattacharyya et al., 2012) és ezzel párhuzamosan az altalaj szervesszén tartalma csökken vagyis a talaj egészét tekintve nincs

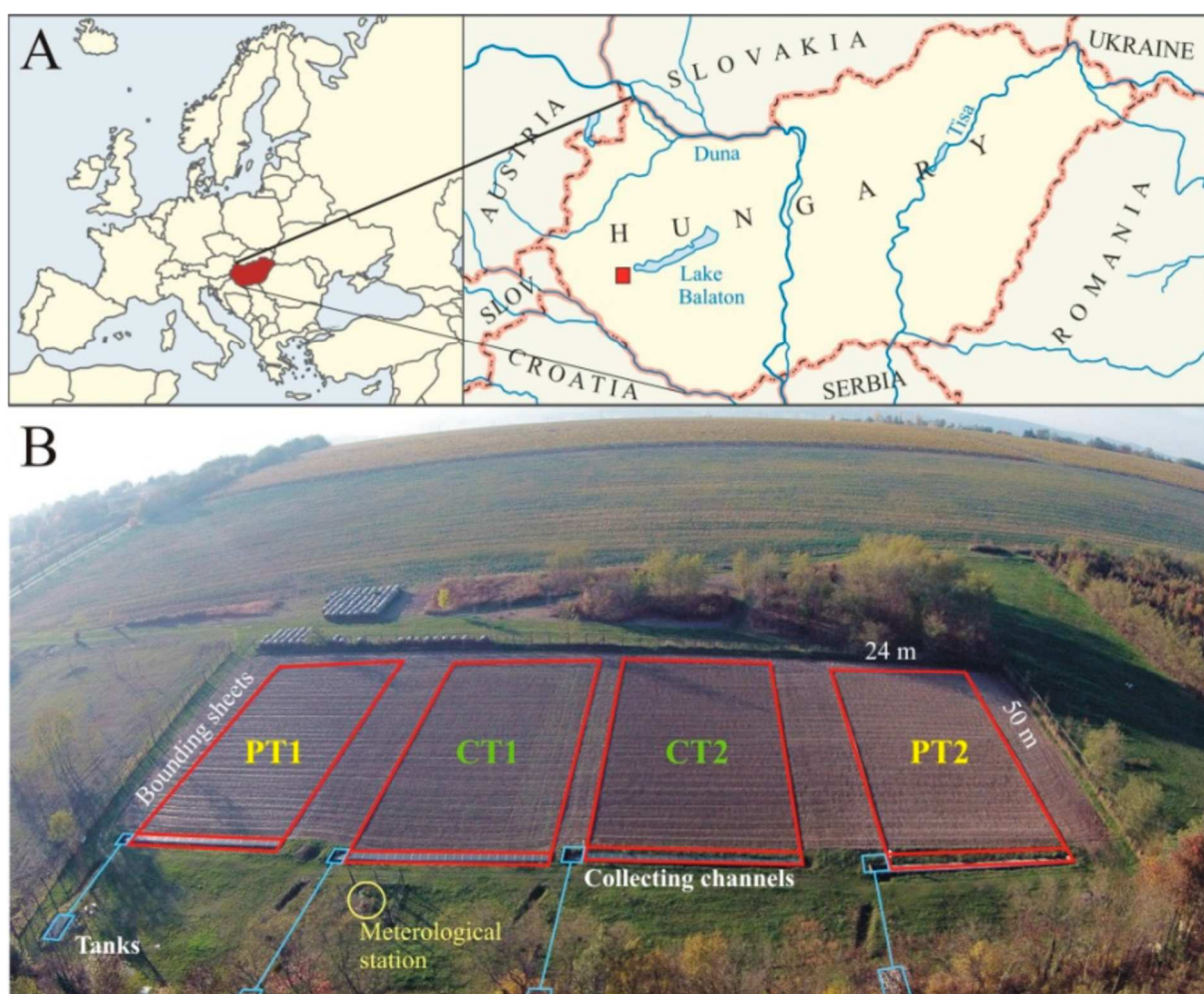
változás a szervesszén tartalomban (Novak et al., 2009). Mások egészen egy méter mélységig kimutatták a szervesszén mennyiségének növekedését a szelvényben a kímélő művelés hatására (Marcela és Nicholas B, 2013). A vizsgálatok zöme a művelt feltalaj réteget célozta, az altalajban alig vizsgálták a növekedést (Wright et al., 2007).

3. Az elvégzett vizsgálatok módszertana

3.1. Az esettanulmányok vizsgálati területeinek bemutatása

3.1.1. Szentgyörgyvári Kísérleti Állomás leírása

A kísérleti állomás 2003-ban létesült abból a célból, hogy tábla léptékben lehessen monitorozni az egyes természetes csapadékok talajbaszivárgását, a felszíni lefolyás és az erodált talaj mennyiségét eltérő művelésmódok alatt. A választott terület Zala vármegyében, a Balatontól mintegy 8 km távolságra helyezkedik el (É 46,748°; K 17,147°) 150 m tengerszint feletti magasságban (3. ábra).



3. ábra A Szentgyörgyvári Kísérleti Állomás PT: szántás alapú talajművelés; CT: kímélő talajművelés

Az éves csapadék átlagos mennyisége 700 mm, a középhőmérséklet 11 °C. A vizsgálati terület 9% lejtésű szántóföld keleti kitettséggel melyet löszön kialakult agyagbemosódásos barna erdőtalaj különböző mértékben erodált, illetve szedimentált változatai borítanak. A kísérlet beállítása előtt a területet folyamatosan, szántás alapú

technológiával művelték (Madarász et al., 2021). Az ebből az időből származó főbb talajtulajdonságokat az 1. táblázat mutatja be.

1. táblázat A Szentgyörgyvári Kísérleti Állomás 0–45 cm talajrétegeinek fontosabb fizikai és kémiai tulajdonságai 2003-ban, a kísérlet beállítása előtt (Madarász et al., 2021).

Mélység cm	pH d. víz	pH KCl	SOM %	CaCO ₃ %	Térf. tömeg g cm ⁻³	Agyag % (v/v)	Iszap % (v/v)	Homok % (v/v)
0–15	6,25	4,80	4,80	0,00	1,37	3,94	59,63	36,43
15–30	6,28	4,57	4,57	0,00	1,57	3,68	57,20	39,12
30–45	6,36	4,72	4,72	0,00	1,59	4,80	58,46	36,74

Az állomás parcelláin a hagyományos, szántás alapú (SZ) és a kímélő (szántás nélküli) (KM) talajművelési rendszereket alkalmazzuk immár 20 éve. A parcellákat a lejtésre merőlegesen műveljük. A szántás alap technológiában minden évben őszi mélyszántást (25–30 cm), szántás-elmunkálást és magágy előkészítést alkalmazunk. A kímélő talajművelési rendszer a szántás teljes elhagyása mellett csökkentett mértékben alkalmazza a talajművelést is (8–10 cm mélységig, tárcsázás, később kultivátorozás) illetve folyamatos felszínborítást biztosít a talajnak a keletkező szár maradványok >30%-nak a talajfelszínen hagyásával. 2007, 2012 és 2015 folyamán mindkét művelés rendszer alatt középmező (20–25 cm) lazítást végeztünk. A termesztett növények őszi búza, kukorica, napraforgó, tavaszi árpa és repce voltak. A 2015-2018 időszakban a kultúrnövények lekerültét követően takarónövényeket alkalmaztunk mindkét vizsgált rendszerben. A takarónövényeket a magágyelőkészítés előtt zöldtrágyaként a talajba dolgoztuk.

Mindkét művelési rendszert 2–2 db, lefolyás irányban 50 m hosszú, egyenként 1200 m² parcellán vizsgáljuk. Az egyes parcellákat a talajba helyezett fémlemezekkel határoljuk a felszíni lefolyás elkülönítésére. A talajművelési és növényápolási eljárásokat a határoló lemezek felszedése után a nagyüzemi tábla léptékű eljárásokhoz hasonlóan végezzük. E parcellaméret már alkalmas a nagyüzemi művelés szimulációjára ugyanakkor elég kicsi hozzá, hogy a keletkező felszíni lefolyást és talajvesztést mind mennyiségben mind összetételben nagy pontossággal mérni tudjuk. Praktikusan, ezen a lejtőhosszon és meredekségen már számottevő mértékben tud kialakulni vonalas erózió is, amely nagyságrendekkel képes megnövelni az egységnyi területről származó talajvesztést, ugyanakkor hagyományos parcellás mérésekkel általában nem számszerűsíthető. A parcellák csak művelésmódban különböznek egymástól, minden egyéb művelet beleértve a vetésváltást, növényvédelmet, betakarítást és tápanyagutánpótlást azonos. A parcellák mellett, azonos domborzati viszonyokon erdővel borított terület található melyet a talajművelés hatásait számszerűsítendő abszolút kontrollként vizsgáltunk. E terület az összes katonai felmérésen erdővel borított és bár nem zárható ki teljesen, hogy az elmúlt 300 év során valamilyen mesterséges talaj bolygatás történt rajta ennek esélye a rendelkezésre álló információk alapján minimális.

A parcellák aljában egy egyedi fejlesztésű felszíni lefolyás és talajvesztés összegyűjtő rendszer található. Ennek kialakítása úgy történt meg, hogy a kis mennyiségű hordalékot és a havária eseményhez köthető veszteségeket is képes legyen pontosan mérhető és mintázható módon kezelni.

Talaj-mintavétel a Szentgyörgyvári Kísérleti Állomáson

A Szentgyörgyvári Állomás talajait évente többször is mintázzuk és vizsgáljuk. A mintavételek alapvető kritériuma, hogy a vizsgát terület egészét reprezentálja ezért minden egyes mintavétel során a parcellák alsó, középső és felső harmadából is veszünk mintákat, hogy az erózió által esetlegesen a parcellán belül áthalmozott talaj okozta heterogenitást is figyelembe vegyük. Ezeket az almintákat homogenizáljuk ezzel alkotva meg a kompozitmintát. A mintavételt háromszoros ismételtsben végeztük el. A mintákat a kémelő művelésű parcellák művelésmélységéhez igazodva a 0–15 cm rétegből vettük mindkét művelés esetében és ugyan ezt a felső talajréteget mintáztuk az erdő borítás alatt is.

3.1.2. A Hatvanpuszta Józsefmajori Kísérleti Állomás leírása

A kísérleti állomás a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem gondozásában áll, a különböző művelésmódok összehasonlításának vizsgálata 2002-ban, Birkás Márta professzorasszony kezdeményezésére indult meg (N 47°41.357'; E 19°36.226'; 110 m a.s.l.) (3. ábra). A kiválasztott terület sík, a kezelések közötti maximális eltérés a tengerszint feletti magasságban nem éri el az 5 métert. Az 1961–1990 időszak mérési eredményei alapján az éves, átlagos csapadékmennyiség 560 mm, melyből 395 mm hullik a tenyészidőszakban (márciustól októberig). Az éves átlaghőmérséklet 10,3 °C (Tóth et al., 2018). A talaj agyagos vályog textúrájú mészlepedékes csernozjom, melynek legfontosabb tulajdonságait a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat A Józsefmajori kísérleti terület talajának főbb tulajdonságai a tartamkísérlet beállítása idején. A textúra adatok térfogat, a kémiai tulajdonságok tömeg százalékban szerepelnek. SOC: szerves széntartalom, C/N szén – nitrogén arány

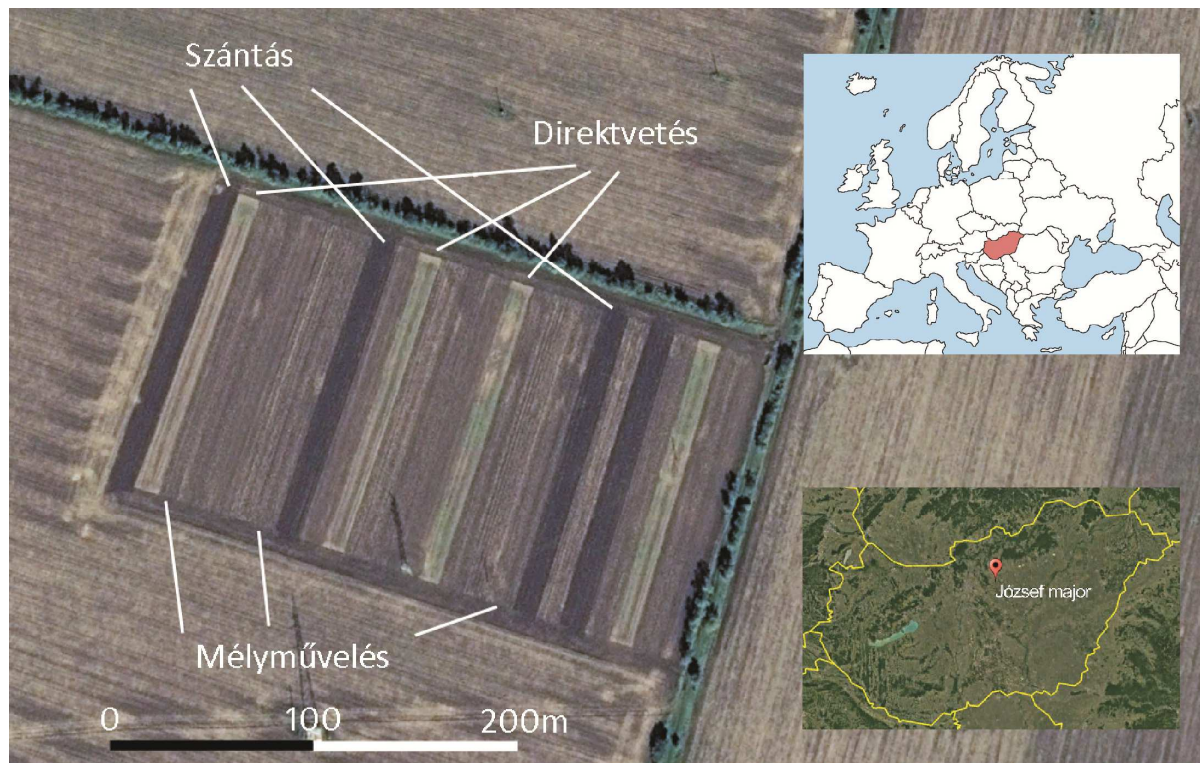
Mélység	Agyag (%)	Vályog (%)	Homok (%)	pH _{dw}	pH _{KCl}	SOC (%)	C/N	CaCO ₃ (%)
0–10 cm	43.8±4.42	51.4±5.67	4.75±1.83	6.8±2.2	5.8±1.9	1.9±0.4	13.4	0.017±0.019
30–40 cm	42.4±2.82	54.4±2.02	3.20±1.30	7.0±2.2	6.3±2.0	1.2±0.3	14.2	0.020±0.037

A tartamkísérletben hat művelésmódot hasonlítanak össze négyszeres ismételtsben, összesen 24 db 13 × 158 m kiterjedésű parcellán randomizát elrendezésben. Az alkalmazott talajművelési rendszerek (Dekemati et al., 2019):

- őszi szántásra (26–30 cm; Kverneland LM100) alapozott, hagyományos művelés
- direkt vetés
- sekély kultivátorra (14–16 cm; Kverneland CLC Pro) alapozott művelés
- mély kultivátorra (22–25 cm; Kverneland CLC Pro) alapozott művelés
- tárcsázásra (16–18 cm; Väderstad Carrier 500) alapozott művelés
- mélylazításra (40 cm; Vogel-Noot TerraDig XS) alapozott művelés

melyek közül ebben a tanulmányban a szántás, mélykultivátorozás és a direkt vetés talajait háromszoros ismételtsben hasonlítottuk össze. A szántás alapú rendszer kivételével minden kezelésben a betakarítás során a szármaradványok 85 %-át mulcs formájában a felszínen hagyják, miáltal a talajművelési rendszertől és az időponttól függően a felszín 10–100%-ban növényi maradványokkal fedett. Minden más tekintetben a növényvédelmi és

tápanyagutánpótlási munkákat is beleértve az egyes művelési rendszerek megegyeznek egymással (3. ábra).



3. ábra A Józsefmajori kísérleti Állomás vizsgált parcellái Hatvanpusztán

A kísérlet beállítását megelőző időszakban, több, mint ötven éven keresztül a terület folyamatosan szántották és semmilyen növényi alapú szerves trágyázás nem történt (Tóth et al., 2018). A vizsgálatokat megelőző időszak növényi sorrendjét a 3. táblázat mutatja be.

3. táblázat A talajmintázást megelőző időszak növényi sorrendje a Józsefmajori kísérleti telep parcelláin.

Év	Kultúra
2001/2002	Őszi búza (<i>Triticum aestivum</i>) (a kísérlet beállítását megelőzően)
2002	Másodvetésű fehér mustár (<i>Sinapis alba</i>)
2002/2003	Őszi búza (<i>Triticum aestivum</i>)
2003/2004	Rozs (<i>Secale cereale</i>)
2004	Zöldborsó (<i>Pisum sativum</i>)
2004/2005	Őszi búza (<i>Triticum aestivum</i>)
2005	Másodvetésű fehér mustár (<i>Sinapis alba</i>)
2005/2006	Őszi búza (<i>Triticum aestivum</i>)
2006	Másodvetésű facélia (<i>Phacelia campanularia</i>)
2007	Kukorica (<i>Zea mays</i> L.)
2008	Napraforgó (<i>Helianthus annuus</i> L.)
2008/2009	Őszi búza (<i>Triticum aestivum</i>)
2015/2016	Őszi búza (<i>Triticum aestivum</i>)
2016	Kukorica (<i>Zea mays</i> L.)
2016/2017	Őszi árpa (<i>Avena fatua</i> L.)
2018	Szója (<i>Glycine max</i>)
2018/2019	Őszi búza (<i>Triticum aestivum</i>)

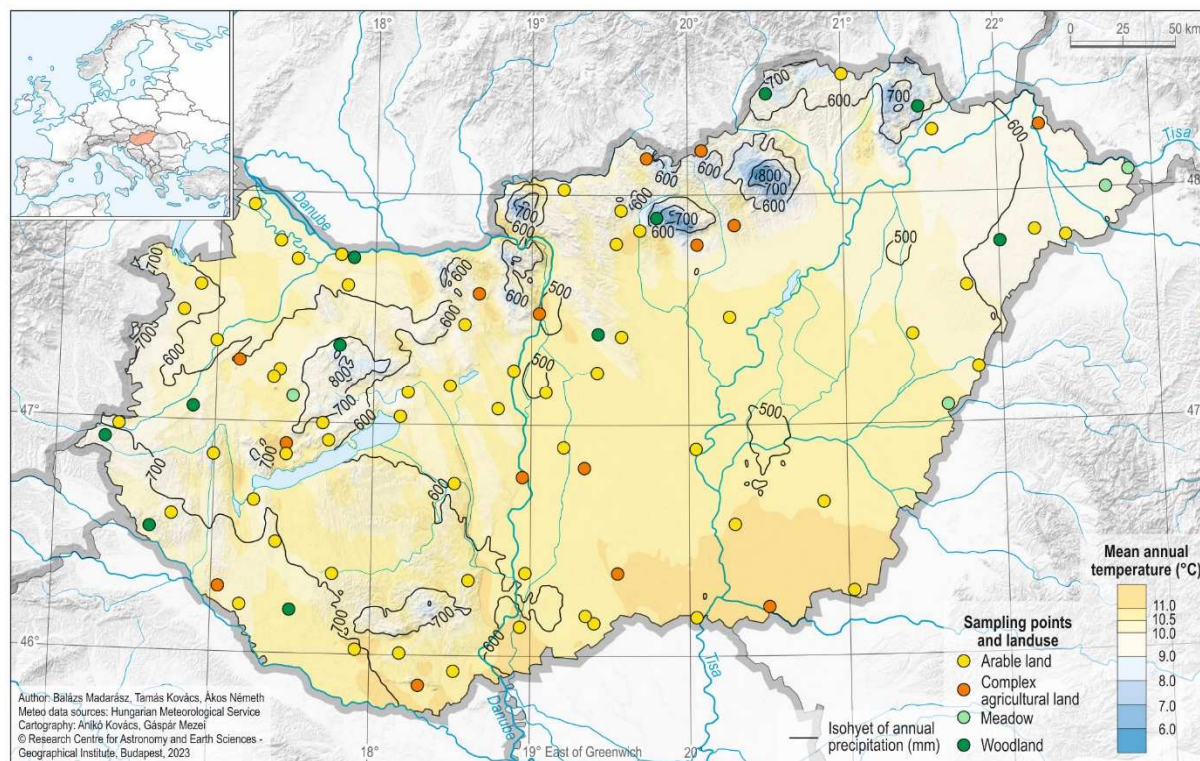
Talaj-mintavétel a Józsefmajori Kísérleti Állomáson

Mindhárom vizsgált talajművelési rendszert három ismétlésből mintáztuk 2019. június 6-án. A felszíni, a potenciálisan művelt rétegből származó minták a 0–10cm rétegből származnak és parcellánként kilenc alminta kompozitjaként jöttek létre. Az almintákat a parcella átlója mentén egymástól egyenlő távolságra vettük majd homogenizáltuk. Ugyan ezeken az alminta helyeken a talaj 30–40cm-es rétegét is mintáztuk melyet már nem érint közvetlenül egyik talajművelési rendszer sem. Összességében tehát 18 db. kompozit talajmintát vettünk kilenc parcelláról melyeket kiszárítottunk és 2 mm-re szitáltunk le.

3.2. Talajmintavétel országos léptékben

Az esettanulmányokon túl, országos léptékben is kísérletet tettünk a feltalaj szervesszén tartalmának leírására. A vizsgálat alapjául a 2019-ben, a kondicionált Latin hypercube mintavételi módszer (Minasny és McBratney, 2006) felhasználásával összesen 640 mintavételi pontból történt talajminta vétel. Az elsődleges cél az ország feltalajának reprezentatív mintázása volt, ezért a mintavételi helyeket a klimatikus viszonyok, domborzat, talajtani adottságok, területhasználat és nem utolsósorban a megközelíthetőség alapján jelöltük ki, jellemzően az intenzív szántóföldi termelést helyezve a középpontba (Vona et al., 2022). A talajminták az esetlegesen a felszínen felhalmozódó szerves anyag zavaró hatását kiküszöbölendő és a szántott réteg homogenitása miatt a 2–20 cm rétegből származnak. Egy talajminta öt alminta kompozitjaként alakult ki, mely almintákat egy egy méter sugarú kör mentén, egymástól egyenlő távolságra vettünk, majd homogenizáltunk. A mintákat szobahőmérsékleten szárítottuk, áteresztettük egy 2mm lyukátmérőjű szitán és további felhasználásig zárt nejlon zacskóban tároltuk. A teljes mintakészletet SOC tartalom

alapján rendezve szisztematikus mintavétellel 87 mintát választottunk ki melyekben frakcionálással választottuk külön az egyes szervesanyagkészleteket. E szűkített mintakörben 57 minta származott intenzív szántóföldi művelésből, 15 reprezentálta a komplex agrár területeket (melyek a gyümölcsösöket, szőlőket és a kerteket is magukban foglalják) 11 származott erdőből és négy volt folyamatosan gyeppel borított (4. ábra).

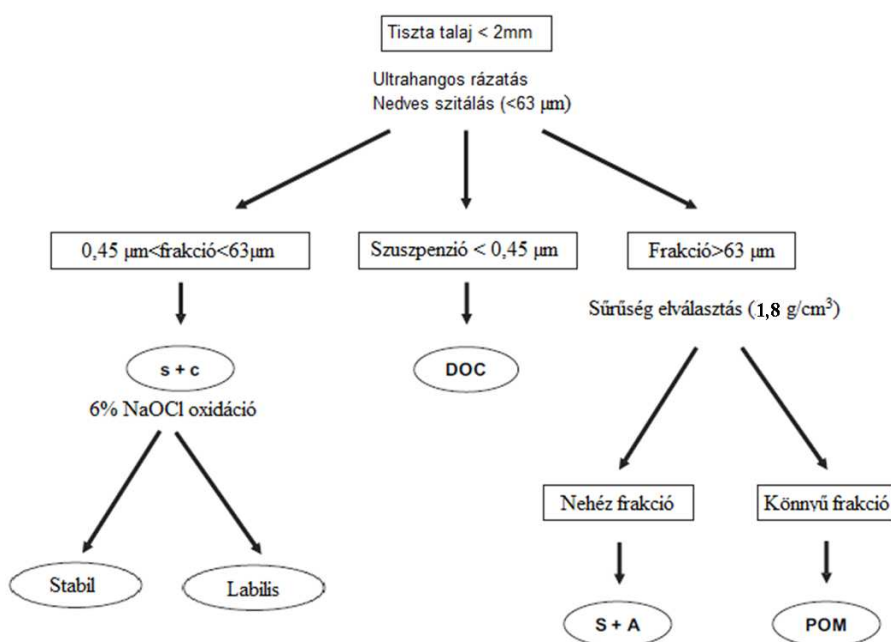


4. ábra Az országos felmérésben használt talajminták mintavételi pontjai. A térkép színei az éves középhőmérséklet értékét, a fekete vonalak az éves csapadékmennyiség izotermáit jelölik. A szántóföldről származó minták helyszínét sárga, a komplex agrár területről származó mintákét narancs, az erdőből sötét, a füves területekről világos zöld pontok jelölik.

3.2.1. A talajminták frakcionálása

Annak érdekében, hogy a talaj szervesanyag-készleteit külön-külön is vizsgálni tudjuk a talajminták egy részét frakciókra bontottuk, mely frakciók szervesanyag-tartalma jó közelítéssel megfeleltethető a RothC talaj szervesszén modell frakcióinak. Az eljárást eredetileg Zimmermann et al. (2007) fejlesztette ki melyben egymás mellett használta a fizikai és kémiai tulajdonságok alapján történő szelekciót. Az osztályozást aztán Poeplau et al. (2013) fejlesztette tovább megteremtve a gyakorlatban máig is használt alapelveket az egyes szervesanyag-készletek elkülönítésére (5. ábra). Az eljárás során a szobahőmérsékleten kiszárított és <2 mm-re szitált talaj 30 grammját 150 mL desztillált vízben szuszpendáljuk majd 22 J mL⁻¹ ultrahangos kezelésnek vetjük alá. Ezután a szuszpenziót egy 63 µm nyílású szitán 2 L desztillált vízzel mossuk át. A <63 µm kisebb frakciót tovább osztályozzuk oldott (<0.45 µm) és egyúttal leginkább mobil és lebontásnak kitett, valamint az agyag és por mérettartományba eső elemi szemcsékhez kötött készletekre. Ez utóbbi szerves anyag kémiai kötésekkel kapcsolódik az ásványos fázishoz és mint ilyen

csak korlátozottan elérhető a mikrobiális lebontás számára. Azaz e frakció szervesanyag-tartalmát nevezzük stabil (esetenként lassan bomló) készletnek. A $>63\ \mu\text{m}$ frakciót tovább osztályozzuk a részecskék térfogattömege alapján. A „nehéz” részecskék jellemzően a homok méretű ásványos szemcsék, míg a könnyebb részecskék jellemzően aggregátumok több–kevesebb addicionálisan körbezárt szerves anyaggal vagy akár szabad, ásványi fázistól független szerves törmelék (POM) részecskék. Ez a szerves anyag mennyiség alkotja a mikrobák által könnyen hozzáférhető készleteket, az aggregátumban tárolt szerves anyag csak fizikailag védett, az aggregátumok szétesését követően azonnal hozzáférhető és lebontható a mikroorganizmusok számára, míg a szerves törmelék semmilyen lebontás elleni védelemmel nem rendelkezik, ezért hívják a szerves anyagok ezen csoportjait gyors vagy mobil raktárnak. Az ebben az elválasztásban használt küszöbértékek tekintetében nagyon nagy szórással találkozunk az irodalomban. Az eredeti és egyben legmagasabb érték az $1,8\ \text{g cm}^{-1}$ melyet a szentgyörgyvári minták esetében használtunk azt eredményezi, hogy némileg csökken a homok frakció aránya és a $>63\ \mu\text{m}$ frakció nagyobb arányban tartalmaz könnyebb alkotókat azaz aggregátumokat és szerves törmeléket. Az elválasztást nehézfolyadékokkal, kezdetben nátrium poliwolframát, majd nátrium jodid oldattal végeztük. Az elválasztás a $>63\ \mu\text{m}$ frakció pontosan beállított térfogattömegű oldatba helyezésével történik ahol is a felülúszót és az ülepedett anyagot el tudjuk választani.



5. ábra A Zimmermann féle talaj szervesanyag-készletek frakcionálásának elvi vázlata

Megjegyzendő, hogy ez az elválasztási módszer komoly technikai nehézségeket okozott. Egyrészt az oldat csak sokszoros átmosás után és korántsem teljes mértékben volt eltávolítható a mintából. (Az átmosások mindig potenciális veszteséget jelentenek a minta egészére nézvést.) Másrészt mindkét só oldotta a szerves anyag egy részét melyt az átmosások során egyértelműen elvesztettünk. Ezekre a nehézségekre a vezető kutatóhelyeken sem találtak kielégítő megoldást ezért ezt az elválasztást egyre gyakrabban végezték el desztillált víz használatával az $1,0\ \text{g cm}^{-3}$ határértéket használva. Későbbi

vizsgálataink során magunk is ezt az eljárást követtük és azt tapasztaltuk, hogy a józsefmajori minták esetében ezen alacsonyabb határérték sem eredményezett olyan mennyiségű szerves törmelék a mintákban mely érdemben befolyásolta volna a teljes talaj tulajdonságait (Jakab et al., 2023).

A szentgyörgyvári minták frakcionálása során a stabil szervesanyag-készleten belül elkülönítettünk egy további alosztályt mely a tartós szerves anyagokat tartalmazza. Ez a mennyiség a mikrobiológiai lebontást szimuláló, háromszor ismételt hypokloritos kezelés (1 g oxidáláshoz 50 ml 6% (60 g L⁻¹) NaOCl) hatására sem oxidálódik el, azaz annyira stabilan kötődik az ásványokon, hogy gyakorlatilag nincs szabad gyöke melyen keresztül a lebontása megkezdődhetne.

A fizikailag elválasztott talaj frakciókat tekintve ugyan sikerült elválasztanunk az aggregátumok belsejében fizikai kötéssel stabilizált szerves anyagot, azonban az aggregátumot alkotó elemi (finom frakcióba tartozó, <63 µm) talajszemcsék felületén ugyanúgy megtalálható a kémiaiilag kötött szerves anyag. Következésképpen az aggregátum frakció vegyesen tartalmazza a két raktár szervesanyag-készletét. Az aggregátumon belüli mennyiségi elkülönítést a (1). egyenlet segítségével végeztük.

$$AAOC_{net} = AAOC - MPAOC \quad 1. \text{ egyenlet}$$

Ahol $AAOC_{net}$ az aggregátumokban tárolt ténylegesen fizikailag stabilizált szervesanyag-koncentráció, $AAOC$ az aggregátumok mért szervesanyag-tartalma, $MPAOC$ pedig közvetlenül az ásványi fázishoz kötött szervesanyag-tartalom. Egyes szélsőséges esetekben, különösen nagy homok tartalmú talajoknál előfordulhat, hogy az aggregátumokban tárolt ténylegesen fizikailag stabilizált szervesanyag-koncentrációja negatív értéket ad. Ez arra utal, hogy a >63 µm frakció jellemzően nem aggregátumokból hanem elemi homokszemcsékből áll. Ha e homokszemcsék agyaga kvarc, a felületükön kötött szervesanyag-mennyisége elenyésző lesz az apróbb méretű szilikátásványokéhoz képest ezért az aggregátum (és homok) frakció szervesszén koncentrációja kisebb lesz, mint a finom frakció szervesszén tartalma.

3.3. Az alkalmazott analitikai módszerek ismertetése

3.3.1. A talaj széntartalmának meghatározása

A talajminták, ill. frakciók széntartalmának meghatározását 900°C-on történő hevítéssel végeztük. A szerves és szervetlen szénformák elkülönítése az eltérő hevítési hőmérsékleten történt méréseken alapulnak. A keletkező CO₂ mennyiségét infravörös detektorral, egy SSM 5000A szilárd fázisú minták vizsgálatára alkalmas egységgel felszerelt Shimadzu TOC-L (Shimadzu Corp., Tokyo, Japan) készülékkel végeztük. Esetenként a szervetlen széntartalom meghatározását a Scheibler féle gáz volumetriás módszer alkalmazásával (Rowell, 2014) is elvégeztük. Az összes széntartalmat a nitrogén és hidrogén tartalommal együtt a Józsefmajorban végzett vizsgálatok esetében Elementar Vario macrocube (Elementar Ltd. Németország) elemanalizátorral végeztük.

3.3.2. A talaj szerkezetére vonatkozó vizsgálatok

Az in situ talajok térfogattömegét Vér-féle bolygatatlan minta-vevő hengerekkel végeztük. A fém hengerek 6 cm magasak és 100 cm³ térfogatúak, a talajok természetes elaszticitása miatt élbehúzással rendelkeznek. A bolygatatlan talajmintákon meghatározható a talaj differenciált porozitása, térfogattömege, felvételi nedvességtartalma. A nyert térfogattömeg adatok alapján az alábbi (2) egyenlettel tudtuk közelíteni a talaj szervesanyag-tőkéjét a vizsgált 10 cm vastag talajrétegre.

$$SOC_{tk} = TT \times SOC_{cc} \quad 2. \text{ egyenlet}$$

Ahol SOC_{tk} a talajréteg szervesanyag-tőkéje (t ha⁻¹ 10 cm⁻¹), TT a talajréteg térfogattömege (g cm⁻³), SOC_{cc} a talaj szervesszén tartalma (g kg⁻¹).

Az aggregátumok vízzel szembeni stabilitásáról a fent említett Zimmermann féle frakcionáció is információval szolgál, tekintve, hogy tömegszázalékosan számszerűsíti a folyó víznek ellenálló aggregátumok (>63 µm) mennyiségét. E közvetett módszer mellett a stabil makro aggregátumok (>250 µm) mennyiségét a nedves szitálás módszerével (Eijkelkamp, Hollandia) határoztuk meg (Kemper és Koch, 1966).

3.3.3. A talaj szemcseösszetételének meghatározása

A dolgozat tematikájában elsődleges szerepe van a talajt alkotó részecskék szemcseméretének. Ezen belül is meghatározó, hogy az adott szemcse elemi, azaz nem osztható további, apróbb szemcsékre vagy aggregátum. Metodikailag e vizsgálat az elemi szemcsék méretének meghatározását célozza, azaz a mintaelőkészítés, az aggregátumok dezintegrálása alapvető fontosságú. Az aggregátumok leggyakoribb „ragasztóanyagaiként” számon tartott CaCO₃ és szerves anyag eltávolításával jelentősen csökkenthető az aggregátság mértéke. Az előbbi 10% HCl, az utóbbit H₂O₂ hozzáadásával távolítottuk el a mintákból. Ezek után az esetlegesen még létező aggregátumokat ultrahangos kezeléssel fizikailag is alkotó elemekre bontottuk, az esetleges újbóli összetapadást 0.5 M Na₄P₂O₇ hozzáadásával minimalizáltuk.

A szemcseösszetételt lézer diffrakcióval, részben Partica LA-950 V2 (Horiba, Japan), részben Fritsch Analysette 22MicroTec Plus (Fritsch GmbH, Idar-Oberstein, Germany) alkalmazásával mértük. A mérés a 0,2-2000 µm tartományban, vizes szuszpenzióban történt. A detektált szóródás adatokat a Mie közelítés alapján számítottuk át szemcseméretté (Centeri et al., 2015). A használt refraktív indexet a kvarc (1,51) értékére állítottuk be, míg imaginárius indexként a 0,2 beállítással számoltunk, bár Szabó et al. (2023) a talajvesztesség szemcseösszetételének vizsgálatánál azt találta, hogy ezek a beállítások a vizsgált tartományban nem befolyásolják érdemben a szemcseeloszlás eredményeit.

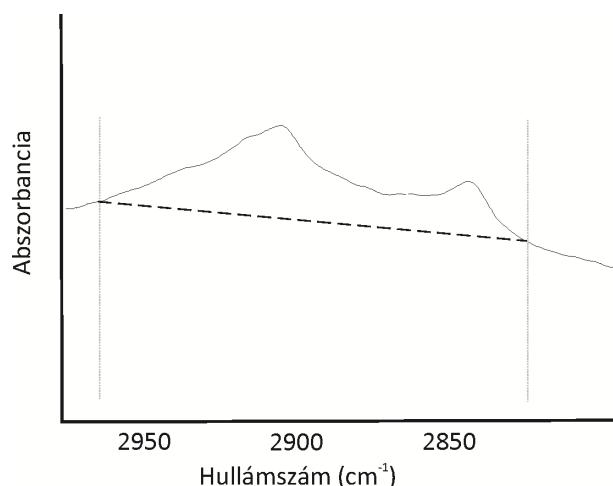
3.3.4. Az in situ talaj szerves anyag összetételének meghatározása

A szilárd fázishoz kötött in situ szerves anyagot alapvetően Fourier transzformált infravörös spektroszkópia alkalmazásával karakterizáltuk. A használt műszer egy RT-DLaTGS detektorral szerelt Vertex 70 spektrométer (Bruker, USA) melyet DRIFT módban használtunk. A mérésre előkészített mintákat 250 µm alá porítottuk és 40 °C-on, egy éjszakán keresztül szárítottuk. A diffúz reflektancia spektrumát 4 cm⁻¹-es lépésközzel a 400–4000 cm⁻¹ tartományban vettük fel, mérésenként 62 szkennelést alkalmazva. Minden egyes mintát legalább három független ismétlésben vizsgáltunk, a mintát végül a megegyező spektrumok átlagával közelítettük. A nyers spektrumokat atmoszferikus CO₂ és nedvességtartalomra korrigáltuk, majd 64 alapvonal pontra illesztett, egy iterációs lépésű, konkáv „rubberband” módszerrel végrehajtott alapvonal korrekciót végeztünk (Bruker Opus 8.1 szoftver). A vizsgálni tervezett szerves anyag funkciós csoportokhoz tartozó hullámszám tartományokat irodalmi adatok alapján de a talajok egyedi anyagi tulajdonságaihoz igazítva állapítottuk meg. Az alifás vegyületekre jellemző sávot 2960–2840 cm⁻¹ között állapítottuk meg (Lehmann és Solomon, 2010), míg az aromás komponensekre jellemző tartományt 1680–1580 cm⁻¹ között definiáltuk (Demyan et al., 2012). Az 1175–1148 cm⁻¹ tartomány a poliszaharidok mennyiségét tükrözi (Egli et al., 2010), míg az abszorbanca a 1465–1360 cm⁻¹ sávban az alifás C-H kötések és a fenolos lignin mennyiségével arányos (Egli et al., 2010). Az amid nitrogén mennyiségét az 1547–1510 cm⁻¹ sáv elnyelés értékei alapján becsültük (Lehmann és Solomon, 2010).

A módszertan alapján a fenti sávok csúcsokat jelölnek. Azonban a talaj meglehetősen vegyes összetétele, heterogenitása és polidszperzitása miatt ezek a csúcsok nem minden esetben különíthetőek el egyértelműen, esetenként más talajalkotók átfedéseket okozhatnak a spektrumban. Illetve a minta és a méréstechnika sajátosságaiból adódóan konkrét hullámszámok mint a sávok határértékei némiképp változhatnak az egyes talajok esetében ezzel okozva csekély eltolódást a ténylegesen kalkulált hullámszámokban. Ezeket az esetleges eltolódásokat a görbék alakja alapján (6. ábra) határoztuk meg. Emellett az alkalmazott módszer az anyagösszetételen túl az egyes alkotók mennyiségről csak korlátozott mértékben felhasználható információval szolgál (u.n. szemikvantitatív). Ezért az egyes szervesanyag-komponensek meghatározása során nem az abszolút mennyiség, sokkal inkább az ezen belüli összetétel arány meghatározása volt a célunk. Ezt pedig az összes vizsgált szerves anyaghoz köthető sáv értékeinek összegzésével, majd az adott sáv ezen belüli arányának meghatározásával közelítettük melyre a továbbiakban relatív sávértékként (RSÉ) hivatkozunk (Demyan et al., 2012)(3. egyenlet):

$$RSÉ = \frac{\text{adott sáv területe (vagy csúcsmagassága)}}{\text{az összes vizsgált sáv területe (vagy csúcsmagassága)}} \times 100 \quad 3. \text{ egyenlet}$$

Az egyes sávokhoz tartozó értékeket a sávok alatti terület számszerűsítésével, integrálással határoztuk meg a mezőségi dinamikájú talaj esetében. A területet nem az abszolút, hanem a lokális alapvonal fölötti rész méretével közelítettük, melyet a 6. ábra (Yeasmin et al., 2020) szemléltet.



6. ábra Az abszorbanca spektrum és a lokális alapvonal közötti terület meghatározásának elve. A függőleges szürke vonalak a vizsgált sáv határait jelölik, a szaggatott vonal a közéjük húzott lokális alapvonal mely fölötti területet integrálással határozzuk meg.

Egyes talajok egyedi összetételéből adódóan a vizsgálni kívánt sávokat részben elfedheti valamely más komponens. Ilyen esetekben célszerű a sáv területe helyett közvetlenül a csúcs magasságát vizsgálni. A csúcsmagasságok számszerűsítése során is érdemes a relatív értékeket alkalmazni, hogy a szerves anyag mennyiségétől függetlenül az összetételről kapjunk információt. Ezzel a módszerrel éltünk az agyagbemosódásos barna erdőtalaj szerves anyag összetételének vizsgálatakor.

Az egyedi RSÉ-k sokszor nem olyan egyértelműen tükrözik a különbségeket az egyes talajok szerves anyag összetételében mint a belőlük alkotott indexek. A jobb áttekinthetőség miatt a szerves anyag jellemzésére az alábbi indexeket alkalmaztuk. Az aromaticitás (aromasság) az aromás és alifás alkotók arányát tükrözi az adott talajra jellemző sávok függvényében (Veum et al., 2014)(4. egyenlet):

$$\text{Aromaticitás} = \frac{RSÉ_{1680-1580}}{(RSÉ_{2960-2940} + RSÉ_{1465-1460})} \quad 4. \text{ egyenlet}$$

A szén illetve oxigén alapú funkciós csoportok arányát szemszerűsítő index (C/O) a szerves anyag átalakultságára (bomlottsági fokára) nézve nyújt támpontot, Yeasmin et al. (2020) alapján értékét az 5. egyenlet szerint határoztuk meg:

$$C/O = \frac{(RSÉ_{1960-1840} + RSÉ_{1680-1580} + RSÉ_{1547-1510} + RSÉ_{1465-1360})}{RSÉ_{1175-1148}} \quad 5. \text{ egyenlet}$$

3.3.5. A talaj szerves anyagának extrakciója

Az extrakció alapvető célja, hogy a szerves anyagot leválasszuk a talaj további alkotórészeiről ezzel egy relatíve tiszta anyagot előállítva, melynek analitikai vizsgálata sokkal egyszerűbb. Az eljárás hátránya, hogy a kivonás sosem teljes, következésképpen

frakcionálja a szerves anyagot vagyis az oldatba vitt és megvizsgált szerves anyag nem reprezentatív a talaj teljes szerves anyagára nézve.

A sokáig egyeduralkodó, hagyományos talaj szervesanyag-vizsgáló módszerek a talajból történő minél nagyobb mértékű kivonáson alapultak. A bázikus ill. savas oldószeres váltakozó alkalmazásán alapuló módszer hozta létre a fulvósavak és huminsavak csoportját melyek vizsgálatával a mai napig számos kutató foglalkozik annak ellenére, hogy e szervesanyag-formák mesterségesen, az extrakció folyamata által kreált anyagok melyeknek vajmi kevés köze van a talajban ténylegesen előforduló szerves anyagokhoz (Lehmann és Kleber, 2015). Ugyanakkor a talaj szerves anyagának vizes kioldása mely része a legtöbb frakcionálási módszernek is fontos információt adhat a leginkább mobilis szerves anyagról és ezen keresztül akár a talaj egészének szerves anyagáról is.

A szentgyörgyvári minták esetében a hagyományos, alkalikus szervesanyag-extrakciót és a vizes kivonást is alkalmaztuk. A vízdíszható szervesanyag-extrahálásához jelen munkában a Maxin és Kögel-Knabner (1995) által kidolgozott és Sharma et al. (2017) által kiegészített eljárást alkalmaztuk, melynek előnye, hogy a viszonylag alacsony szervesanyag-koncentráció miatt nem igényel hígítást, a fluoreszcens és az UV-vis méréseket közvetlenül is el tudtuk végezni a mintákból. Az eljárás menete röviden egy 1:10 szuszpenzió készítése, melyben a talajt miliQ minőségű desztillált vízzel két órán keresztül rázatjuk, majd 0,45 µm üvegszűrőn szűrjük.

Az alkalikus kioldáson alapuló módszer a fulvósavak szeparálásához ajánlott módszeren alapszik, melyet először Kononova (1961) jegyzett le, majd az International Humic Substances Society szabványosított (Swift, 1996). Első lépésben a talajból eltávolítottuk a vízdíszható szerves anyagot. A szerves növényi törmelék 1,8 g cm⁻³ sűrűség alatti anyagként definiáltuk és erre az értékre beállított NaI oldat segítségével eltávolítottuk a mintából. Ezután a mintát 1:10 szuszpenzióban extraháltuk, ahol az oldószer 0,1 M NaOH és 0,1 M Na₄P₂O₇ 1:1 arányú keveréke volt. A szuszpenziót N₂ atmoszférában 24 órán keresztül ráztattuk. Ezután a szuszpenziót 4000 RPM fordulatszámon 10 percig centrifugáltuk hogy elválasszuk a felülúszót. Ez utóbbi pH-ját 1 M HCl adagolásával <2 értékre állítottuk be majd a mintát 10 órán keresztül állni hagytuk. A savas közegben kicsapódott szerves anyagok alkotják a humuszsav-, míg az oldatban maradtak a fulvósav frakciót. A két frakciót centrifugálással választottuk el egymástól. A felülúszót 0,1 M NaOH-dal kezelve a pH-t 6–8 értékre állítottuk be, majd 1 kDa méretű membránon keresztül desztillált vízben dializáltuk, hogy eltávolítsuk a szervesetlen ionokat.

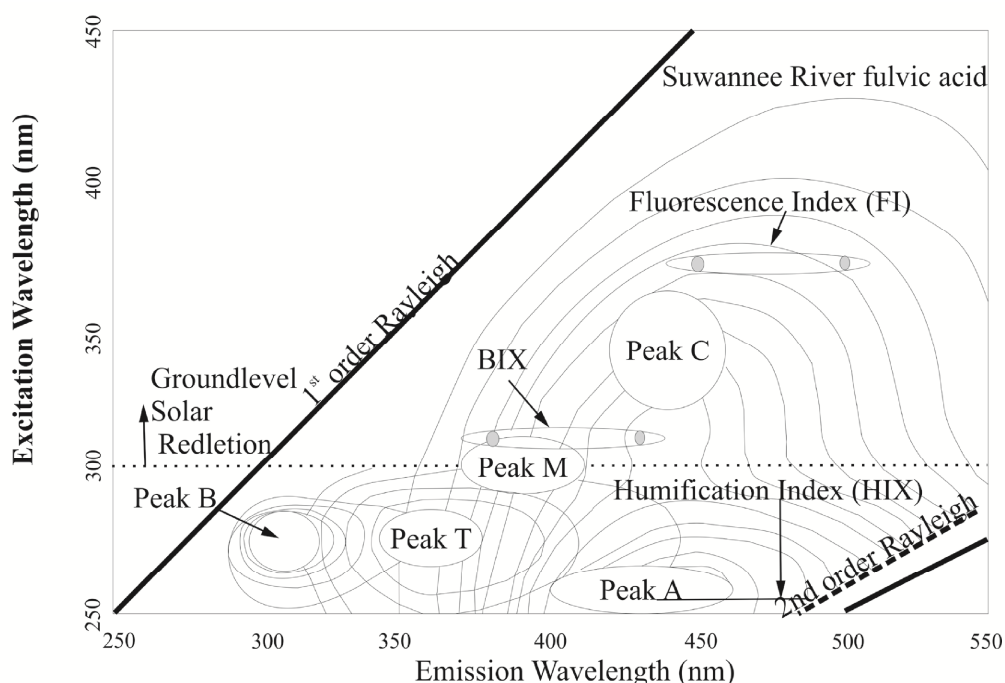
3.3.6. Az extrahált szerves anyag mennyiségi meghatározása

Mindkét típusú extraktumot egy Shimadzu TOC-L/TN-L analizátorral vizsgáltuk az összes szén és összes nitrogén meghatározására. A műszer infravörös detektorral számszerűsíti a képződött széndioxid mennyiségét melyet a minták magas hőfokon történő elégetésével állít elő. A mérés részleteit Jakab et al. (2018b) mutatja be.

3.3.7. Az extrahált szerves anyag összetételének meghatározása

Mindkét extraktum UV-vis abszorbancia spektrumát egy Shimadzu 3600 kétutas spektrofotométerrel a 180–1000 nm tartományban, 0,5 nm felbontással mértük. Az oldott szerves anyagok fluoreszcens tulajdonságait egy Shimadzu RF-6000 spektrofluorofotométer használatával számszerűsítettük. A műszer excitációs tartománya 200–465 nm 5 nm osztásközzel, melynek hatására a bekövetkező emissziót a 260–590 nm tartományban 5 nm lépésközzel detektáltuk ezzel definiálva az emissziós excitációs mátrixot (EEM) (Coble, 1996).

A mért abszorbancia értékeket jellemzően index formájában értékeltük, ezzel közelítve az oldott szerves anyag humifikáltsági fokát (E_4/E_6 index), illetve az aromás alkotók arányát (E_2/E_3 index, abszorbancia értékek 280 és 254 nm-en; $SUVA_{254}$ és $SUVA_{280}$ indexek) (Bertelkamp et al., 2016; Chen et al., 1977; Peuravuori és Pihlaja, 1997; Weishaar et al., 2003). A fluoreszcens csúcs intenzitások és a belőlük számolt indexek szintén az oldott szerves anyag kémiai összetételéről adtak információt (Coble, 1996). Az „A” és „C” csúcsok a humifikált oldott szerves anyagokhoz kötődnek, míg a „B” és „T” csúcsok a tirozin és a triptofán mennyiségéről tájékoztatnak (7. ábra). Tekintve, hogy ez utóbbiak meglehetősen bomlékony fehérjék jelenlétük leginkább a mikrobiomhoz köthető szerves anyag indikátora (Coble, 1996). Az egyes mintákban a fent említett csúcsok magassága elsősorban az oldott szerves anyag mennyiségétől függ, ezért az abszolút csúcsmagasságok helyett a csúcsok egymáshoz viszonyított arányát (A/T ; A/C ; $(A+B)/(B+T)$) vizsgáltuk (Baker et al., 2008), illetve az egyedi értékeket a minta oldott szervesanyag-koncentrációval normáltuk.



7. ábra Az oldott szerves anyag összetételének vizsgálatára használt emissziós-excitációs mátrix elméleti felépítése az értékeléshez használt csúcsok és index elhelyezkedése a Suwannee river fulvósav sztenderd példáján keresztül

A humifikációs indexet (HIX) mint a kondenzáltság és komplexitás fokmérőjét a 254 nm-en gerjesztett, 435–480 és 300–345 nm tartományokba eső fluoreszcens emissziós csúcsok arányaként közelítettük (Ohno, 2002; Zsolnay et al., 1999). A szerkezeti konjugáltság és az aromasság mértékét számszerűsítő fluoreszcens indexet (FI) a 370 nm-en gerjesztett, 470 és 520 nm emissziónál csúcsot adó intenzitások hányadosaként számítottuk. Ha FI <1,5 akkor az oldott szerves anyag inkább humifikált forrásból származik, míg ha FI >1,5 akkor a szerves anyag valószínűleg közvetlen (mikro)biológiai eredetű (McKnight et al., 2001). A biológiai index (BIX) a recens élőlények hozzájárulását hivatott számszerűsíteni az oldott szerves anyag egészéhez. Az indexet a 310 nm-en gerjesztett és a 380 nm és a 420–435 nm tartomány maximális intenzitás értékének hányadosaként mért értékkel modellezzük (Huguet et al., 2009; Wilson és Xenopoulos, 2009) (7. ábra).

3.3.8. In situ talaj biológiai vizsgálatok

A talajok makrobiológiai aktivitásának becslésére több alkalommal is megvizsgáltuk a gyűrűsférgék egyedszámát és tömegét a Szentgyörgyvári kísérleti állomás feltalajában. Percellánként kilenc 10 cm átmérőjű és magasságú hengerbe vettünk mintákat a feltalajból melyekben meghatároztuk a giliszták számát. Az aktuális mikrobiális aktivitást a mikrobiális biomassza szénttartalmának mérésével, a kloroform fumigációs extrakciós eljárással (Vance et al., 1987), minden megvett talajminta vizsgálatával közelítettük. Ezzel párhuzamosan a talajokba 90 napra elhelyezett eltérő szervesanyag fajták lebontását is vizsgáltuk, mely a vizsgált három hónap kumulált biológiai aktivitásának fokmérője (Keuskamp et al., 2013).

3.4. Az országos léptékű vizsgálatokhoz használt környezeti változók meghatározása

Az országos elemzéshez használt mintavételi pontok mindegyikéhez hozzárendeltük a környezeti változók pontra vonatkozó értékeit. A domborzatból származtatható tulajdonságokat egy 100 m térbeli felbontású digitális terepmodell (Bashfield és Keim, 2011) alapján számítottuk. A klímára vonatkozó értékeket, úgymint éves átlagos csapadék összeg és középhőmérséklet, párolgás és evapotranspiráció a Szentimrey és Bihari (2007a) féle adatbázis felhasználásával számszerűsítettük. A mintavételi pontok tényleges területhasználatát a mintavétel során azonosítottuk, a vizsgálatban használt kategória rendszert a Corine Land Cover database (2000) (Bossard és Feranec, 2000) alapján egyszerűsítettük és a talajzavarás csökkenő mértékének függvényében az alábbi négy kategóriát határoztuk meg: szántóföld, komplex agrár művelés, gyepek és erdők. Tekintve, hogy a talajtípus mint környezeti változó a szelvény egészére, rétegzettségére vonatkozóan ad információt és a legfelső (esetlegesen erodált vagy szedimentálódott) talajréteg tekintetében nem egyértelmű minősítő, nem szerepelt változóként a vizsgálatban.

3.5. A mesterséges esőztetés módszertanának ismertetése

Az esőszimulátoros vizsgálatokat a „Shower Power 02” mesterséges esőztető készülékkel végeztük, melyet vízbeszivárgás és talajvesztés in situ mérésére a Földrajztudományi Kutatóintézetben fejlesztettünk (Jakab et al., 2017) (8. ábra). A berendezés $\sim 12 \text{ m}^2$ mesterséges esőztetésre képes, melyből – a szegélyhatás kiküszöbölése érdekében – a közvetlen kísérleti terület $2 \text{ m} \times 3 \text{ m} = 6 \text{ m}^2$. Az esőcseppek előállítása VeeJet 80.100 szórófejek használatával történt (Zhang et al., 2007). Az esőztető alternáló tengelyére két VeeJet 80.100 szórófejet helyeztünk el ugyanabba a síkba, egymástól két méter távolságra, ezzel biztosítva az átfedést és az egyenletes csapadék terhelést a szórófejek alatt három méterrel. A szórófejek a talajfelszín felett három méterrel helyezkedtek el, ezzel biztosítva, hogy a legnagyobb átmérőjű vízcseppek is elérjék a talajba csapódáskor a végső sebességüket, maximális kinetikus energiájukat. A szórófejeket elhagyó víz optimális cseppspektrumát a víznyomás 0,41 barra történő beállításával érték el, az e nyomáson képzett cseppek átmérőinek megoszlása jól közelíti a természetes záporok cseppspektrumát (Loch et al., 2001). A konstans nyomás mellett a szórófejeken állandó mennyiségű víz áramlik keresztül ezért a modellezni kívánt csapadék intenzitásának szabályozhatóságát a szórófejek alternálásával (a területre vagy egy gyűjtőedénybe szór) oldottuk meg. E módszerrel a szimulált csapadék intenzitása az alternáló tengely frekvenciájának változtatásával a $30\text{--}130 \text{ mm h}^{-1}$ intervallumban fokozatmentesen állítható. A laboratóriumi kalibrálás alapján a tengely egy fordulata $0,07 \text{ mm}$ csapadék kiadását eredményezi.



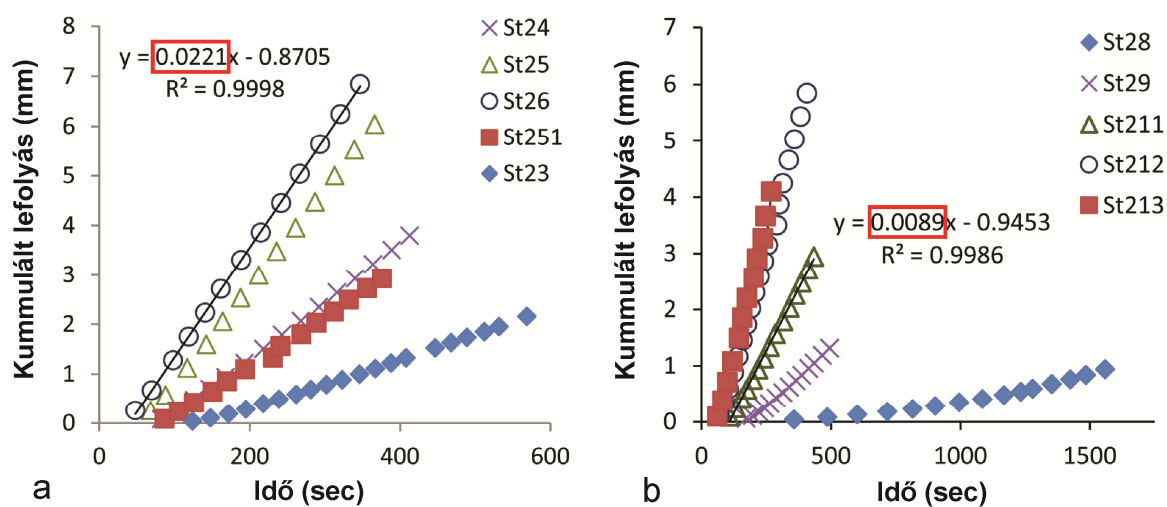
8. ábra Az általunk fejlesztett „Shower Power 02” terepi esőszimulátor a magágy állapotú talaj esőztetése közben a Szentgyörgyvári Kísérleti Állomáson 2016 májusában

Az esőszimulátoros terepi vizsgálatokat 2016 folyamán három időpontban végeztük el a Szentgyörgyvári kísérleti területen. Az első vizsgálati időszak a takarónövény fejlett állapotában, áprilisban volt, a második esőztetési kampányt egy hónappal később a takarónövény lekerülése és a kukorica vetését megelőző magágyelőkészítés után végeztük, míg a harmadik sorozatra aratás után, októberben került sor. Minden esőztetés során

megmértük a vizsgált 6 m² terület vízbeszivárgás és talajveszteség dinamikáját külön a szántás alapú és külön a kímélő művelésű területen. Minden egyes vizsgálat öt eltérő, de adott esőn belül konstans intenzitású (30, 40, 60, 90 és 120 mm h⁻¹) csapadék modellezését jelentette a 9% lejtésű területen. A két alacsonyabb intenzitás rendszeresen előfordul hazánkban és közelebből a Szentgyörgyvári Kísérleti telepen is, a magasabb intenzitások a természetben csak pár perces időtartamra jellemzőek, azonban alkalmazásukkal jól leírható a talaj vízgazdálkodásának és erózióérzékenységének dinamikája. Az esőztető berendezés telepítését követően de még a tényleges mérések megkezdése előtt minden vizsgált parcellán egy 40 mm h⁻¹ intenzitású csapadékot szimuláltunk, melynek célja a talaj szabadföldi vízkapacitásra történő feltöltése volt. Ezzel biztosítottuk, hogy a vizsgálatok már sztenderdizált nedvesség tartalmú talajon történtek. Ezen előkezelést követően az egyes mesterséges csapadékokat egymást követően emelkedő intenzitás értékek mellett szimuláltuk. A területről lefolyó víz és elhordott talaj teljes mennyiségét felfogtuk és mértük, és a lefolyás/talajveszteség értékek változását az idő előrehaladtával is regisztráltuk.

3.5.1. Az esőztetés során mért eredmények értelmezése

Minden egyes esőztetés folyamán a lefolyásintenzitás értékeit időbélyeggel láttuk el és feljegyeztük. A lefolyó víz mennyiségének változása alapján származtattuk a tényleges beszivárgás értékét (9. ábra).



9. ábra A mért lefolyásértékekre illesztett függvény meredeksége (pirossal kiemelve) alapján közelített tényleges beszivárgás érték magágy állapotú talajon a szántott (a) és a kímélő művelésű (b) területen. Az ábrán szereplő kísérleti azonosítók adott parcella eltérő intenzitású csapadékkal kezelt lefolyási adatsorát ábrázolják. Mindkét ábrán öt-öt esőztetés adatai láthatóak, melyek közül csak egy-egy függvényt illetve meredekséget tüntettünk fel a példa kedvéért.

Minden egyes mesterséges esőztetés kumulált lefolyás értékeit az idő függvényében ábrázoltuk. Az értékek időben utolsó 6–10 pontjára (amikor már a lefolyás/beszivárgás intenzitása állandóvá vált) egyenest illesztettünk, melynek meredeksége adta meg az adott talajállapotra és csapadékintenzitásra jellemző, tényleges beszivárgás értékét (mm s⁻¹).

Minden csapadékesemény tényleges beszivárgási értékét a 6. *egyenlet*be helyettesítve a talaj elméleti vízáteresztés értéke meghatározható (Rose, 2004):

$$i_t = i_e \left[1 - \exp \left(\frac{-i_{cs}}{i_e} \right) \right] \quad (6) \text{ egyenlet}$$

Ahol i_t a tényleges beszivárgás (mm h^{-1}), i_{cs} a csapadék intenzitása (mm h^{-1}) és i_e az elméleti vízáteresztés (mm h^{-1}). Ez a meghatározás iterációval történt az i_e értékének közelítésével amíg a normalizált átlagos négyzetes eltérés (NRMSE) összegét minimalizálni tudtuk a 7 *egyenlet* alapján:

$$NRMSE = \left(\frac{1}{N M_{\text{át}}} \right) \sqrt{\sum_{j=1}^N (B_j - M_j)^2} \quad (7) \text{ egyenlet}$$

ahol B_j és M_j a j -dik becsült és mért érték az N megfigyelésből és $M_{\text{át}}$ a mért értékek átlaga. Tekintve, hogy az alkalmazott csapadékmennyiséghez és a kísérletek időtartamához mérten az evapotranspiráció értéke elhanyagolható volt a lefolyásintenzitás (i_l) értéke a csapadék és a beszivárgás intenzitás különbségeként értelmezhető (8 *egyenlet*):

$$i_l = i_{cs} - i_t \quad (8) \text{ egyenlet}$$

Az egyes esőztetések alatt felfogott talajvesztések értékeit C (kg m^{-1}) a Pan European Soil Erosion Risk Assessment (PESERA) modell (Kirkby et al., 2008) vonatkozó összefüggésébe helyettesítve határoztuk meg a talaj erodálhatóságát (k) (9. *egyenlet*).

$$C = k V^2 S^{1,5} \quad (9) \text{ egyenlet}$$

Ahol V a területről egységnyi szélességben lefolyó vízmennyiség ($\text{L}^{-1} \text{ m}$) és S a lejtő meredeksége (dimenzió nélkül). A talaj erodálhatóságát a hagyományos modified universal soil loss equation (MUSLE) közelítése alapján is meghatároztuk.

3.6. A használt statisztikai módszerek bemutatása

Az esetek meghatározó részében a vizsgált tulajdonságokat a számtani közép és a szórás megadásával jellemeztük. Az egyes tulajdonságok grafikus jellemzésére a Tukey-féle doboz ábrákat használtuk. Ezeken az ábrákon a dobozok belsejében található vonal ábrázolja a medián értékét, a doboz maga a második és a harmadik kvartilis. A dobozokon kívül ábrázolt vonalak (bajuszok) adják meg az interkvartilis tartomány másfélszeres értékét. A bajszokon kívül eső értékeket a távolság függvényében karikával vagy csillaggal jelöljük. A dobozok formája már támpontot ad az adott változó eloszlásáról azonban ezt a Shapiro-Wilk teszt alkalmazásával ellenőriztük. Normál eloszlás esetén az egyes kezelések összehasonlítására egy illetve két utas variancia analízist alkalmaztunk. Ha a változó nem normál eloszlású volt akkor a csoportok összehasonlítására a független mintavételes Mann-Whitney féle U tesztet (Mann és illetve a szintén nem paraméteres Kruskal-Wallis tesztet (Kruskal és Wallis, 1952) alkalmaztuk.

A változók közötti lineáris kapcsolat meglétét Pearson (r), ill. Spearman (ρ) féle korreláció számítással közelítettük a változók eloszlásának függvényében. A lineáris regressziót a megbízhatósági együttható (R^2) értékével jellemeztük. A szignifikancia

meghatározására a χ^2 próbát alkalmaztuk az $\alpha=0,05$ valószínűségi szintet fogadva el a szignifikancia határértékének.

A többváltozós elemzési módszerek érzékenyek a kiugró értékekre, ezért ezeket az értékeket eltávolítottuk az adatbázisból. Kiugró értéként határoztuk meg azokat az elemeket melyeknek az átlagtól való eltérése meghaladta a szórás háromszorosát. Az eljárással egyúttal standardizáltuk is az adatbázist a 10. egyenlet alapján:

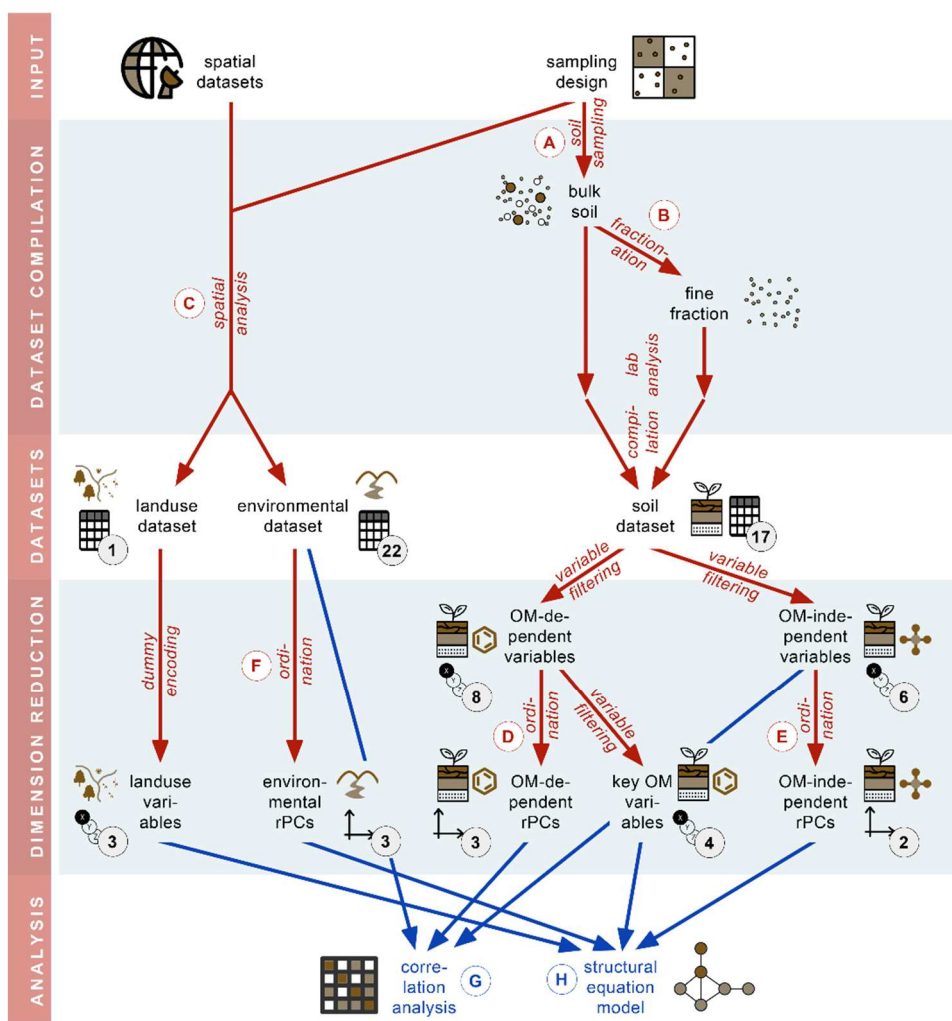
$$z_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \quad (10) \text{ egyenlet}$$

Ahol μ a számtani középértéke, σ pedig a szórása a vizsgált változónak, x_i a változó i -edik értéke, z_i pedig ezen érték standardizált formája (Jakab et al., 2022).

A több esetben is sok tulajdonsággal jellemzett mintákon paraméter csökkentést hajtottunk végre, hogy meghatározzuk a vizsgált szempontokat leginkább befolyásoló tulajdonságok körét. Ezt főkomponens analízis segítségével tettük. Az analízist varimax rotáció, majd Kaiser normálás alkalmazásával végeztük, az egyes változókat melyeknek loading értékei nem el a 0.6 értéket kizártuk a további elemzésből. Az analízis sikerességéről a Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) teszt elvégzésével és az egyes főkomponensek által magyarázott összes variancia értékének vizsgálatával tájékozódunk. Az elemzéseket és az ábrák egy részét az SPSS Statistics 22 szoftverrel (IBM, USA) készítettük.

3.6.1. Az országos léptékű vizsgálatban alkalmazott statisztikai módszerek

A vizsgálat során három, egymástól független főkomponens analízist végeztünk el. Az elsőben az összes szerves anyaghoz közvetlenül kapcsolódó változó paramétercsökkentését céloztuk, hogy meghatározzuk azokat a kulcs tulajdonságokat melyek leginkább hatnak a teljes talaj és a stabil raktár szerves anyagának kémiai összetételére (10. ábra 1D). A második főkomponens analízis hasonlóképpen azt célozta, hogy a vizsgálatba vont szerves anyagtól független talajtani (10. ábra E) és környezeti (10. ábra F) változók számát csökkenteni tudjuk úgy, hogy a megalkotott új változók minél nagyobb hányadát magyarázzák az adatok varianciájának és ezzel alkalmas bemeneti adatként szolgáljanak a modell építéséhez.



10. ábra Az országos léptékű talaj szrevsanyag összetétel vizsgálat módszertani felépítése. A vörös nyilak folyamatokat, a kékkel a statisztikai elemzéshez szolgáló bemeneti adatokat jelölnék. A számok az adott lépésben szereplő változók számát jelölik, a betűk a szövegben hivatkozott lépésekre utalnak. rPCs: varimax rotált főkomponensek

Annak megállapítására, hogy mely környezeti változók határozzák meg leginkább a talaj szerves anyagának összetételét a korreláció analízist (Spearman ρ) végeztünk a környezeti változók és a szerves anyaghoz köthető változók rotált főkomponensei között (10. ábra G). Ezzel párhuzamosan, a feltételezett összefüggések feltárására egy „piecewise structural equation model”-t (pSEM) (Lefcheck, 2016) is fejlesztettünk (10. ábra H). A változókat az 10. egyenlet alapján sztenderdizáltuk. A környezeti változókat három rotált főkomponensben foglaltuk össze, míg a talaj szerves anyagához köthető tulajdonságokat két varimax rotált főkomponens képviselte. A területhasználati kategóriák közül a szántó szerepelt referenciaként a maradék három kategóriát ehhez képest értékeltük. Egy adott változó (mint függő változó) viszonyát az alsóbb szinten lévő változókhoz lineáris modellek segítségével vizsgáltuk. A különböző útvonalakhoz tartozó relatív értékek összehasonlíthatósága érdekében a koefficienseket terjedelemben sztenderdizáltuk, azaz az eredeti számított koefficiens értékeket a függő és a független változó szórásainak arányára skáláztuk újra (Lefcheck, 2021). Az egyes lineáris modellek illeszkedésének jóságát a megbízhatósági együtthatóval (R^2), míg a teljes modell jóságát a Fischer féle C értékének

számításával (Shipley, 2009), illetve a szignifikancia meglétével/hiányával ($\alpha = 0,05$) vizsgáltuk. A modellezést R környezetben (R Core Team, 2022), a piecewiseSEM csomag (Lefcheck, 2016) használatával végeztük, az eredményeket a yED segítségével ábrázoltuk grafikusán.

3.7. Az országos talajszervesszén telítettség meghatározásának módszertana

3.7.1. Koncepcionális háttér

A megközelítés alaptétele, hogy a folyamatos erdőborítás alatti szelvények feltalaja – a gyakorlatilag korlátlan szerves anyag utánpótlás miatt – szerves szénben telített. Hazánk területének nagyságrendileg 30%-a erdővel borított amelyen igen változatos talajtakaró található, a teljesség igénye nélkül homoktalajokon, agyagbemosódásos erdőtalajokon, barnaföldeken, podzolokon, réti talajokon, sőt csernozjomokon is találunk permanens erdőket. Elviekben egyes gyep, ill. legelő területeken is teljesülhet a folyamatos, korlátlan szerves anyag utánpótlás kritériuma, azaz ezek a feltalajok is szerves szénben telítettek lehetnek, azonban e szelvényeket kizártuk, mert a vegetáció miatt nem zárható ki egy, a nem távoli múltban (~ 10 év) történt talajbolygatás/művelés, mely jelentős szerves anyag mineralizációt okozhatott. Illetve a gyepterületek jelentős részénél jelentkeznek legalább időszakos hidromorf körülmények vagy/és legeltetés mely alapjaiban befolyásolja a szerves anyag stabilizációját a feltalajban.

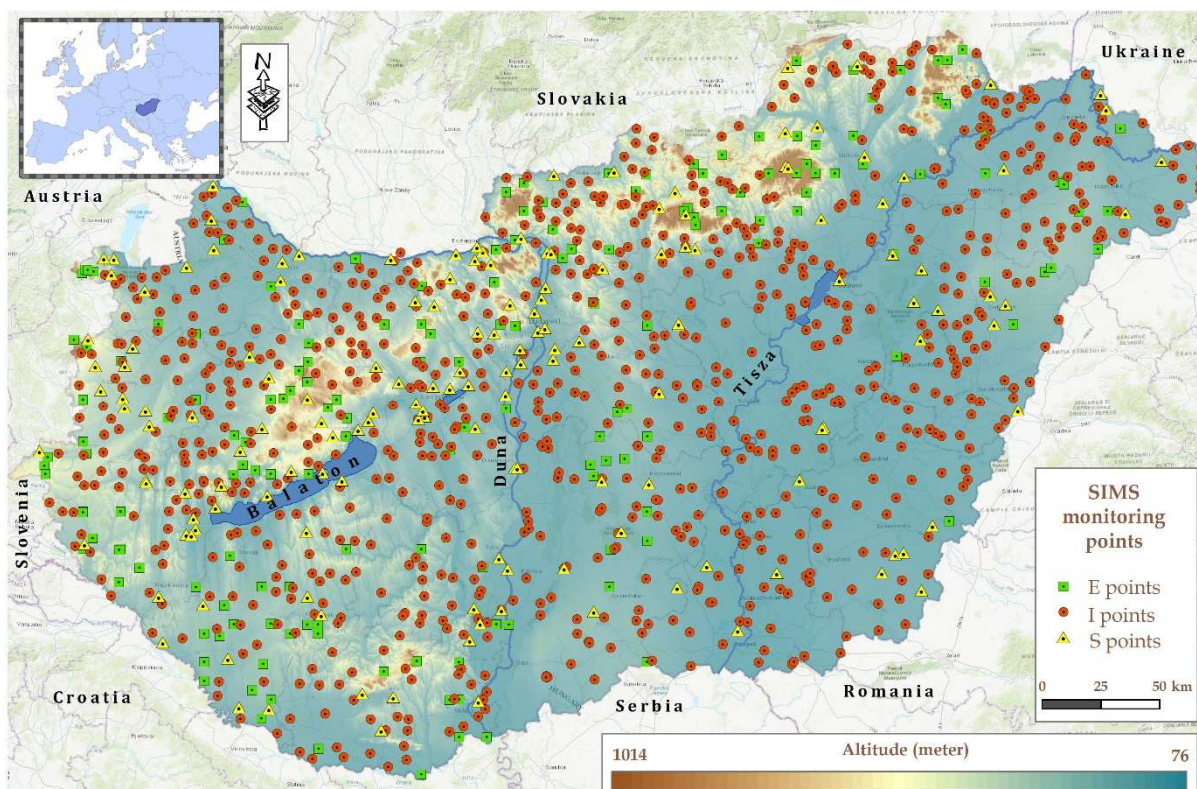
Mindemellett hazánk erdővel borított, telítettnek feltételezett feltalajai komoly szórást mutatnak a szervesszén tartalom tekintetében, következésképpen nem alkalmasak egy egységes viszonyítási alapnak. Például a helyi geomorfológia, a lejtő meredeksége vagy a vizsgált talajszelvény elhelyezkedése lejtőn, illetve a talaj tulajdonságai komolyan befolyásolhatják a feltalajban maximálisan eltárolható szervesszén mennyiségét. Következésképpen, a szervesszén telítettség szempontjából csak azonos fizikokémiai tulajdonságú és környezeti változókkal (domborzat, klíma) jellemzett talajok hasonlíthatókak közvetlenül össze. Az általunk alkalmazott megközelítés a fentiek alapján igyekszik olyan, homogén csoportokat létrehozni melyekben a környezeti és talaj tulajdonságok homogének és ezekben pedotranszfer függvények segítségével összefüggést találni e tulajdonságok és a telített szervesszén koncentrációja között. Ezen összefüggések birtokában elméletileg becsülhetővé válik az ország területén a feltalajokban maximálisan eltárolható szervesszén mennyisége. Ezen túlmenően, a tényleges koncentráció és az elméleti maximum értékeinek összehasonlításával az ország egész területére meg tudjuk határozni a telítettség mértékét, illetve a pótlólagosan eltárolható szervesszén mennyiségét.

3.7.2. A referenciaként használt, telített talajok adatbázisa

A vizsgálatot a Talajinformációs Monitoring rendszer adataira építettük. A rendszer 1992 óta gyűjt és tárol adatokat az ország egész területét lefedő, 1236 georeferált talajszelvény 4859 szintjéből (11. ábra). A vizsgálatok egyaránt célozzák biológiai, fizikai és kémiai tulajdonságok meghatározását és rögzítését, az elmúlt időszak hossza lehetővé

teszi a változások dinamikájának vizsgálatát is. A rendszerben háromféle talajszelvény monitorozása folyik:

- Agrár szelvények (n = 865), melyek művelt területen találhatóak, jellemzően szántóföld, gyümölcsös és kaszáló területhasználat alatt
- Erdő alatti szelvények (n = 183) melyek erdő borítás alatt helyezkednek el
- Környezeti szempontú szelvények (n = 188) melyek potenciális környezeti veszélyforrásokhoz kapcsolódnak (pl. bányaterület, feltöltések, ipari létesítmények területei)



11. ábra A Talajinformációs Monitoring Rendszer (TIM) figyelemmel kísért szelvényei (n=1236). A zöld pontok az erdővel fedett szelvényeket jelölik. A piros pontok az agráriumhoz, a sárgák a potenciális veszélyforrásokhoz kapcsolódnak

A második csoportba tartozó szelvények helyeinek kijelölésekor elsődleges szempontként az erdei ökoszisztémákhoz kötődően a talajok tér- és időbeli változékonyságának áttekintése volt a cél, ezért ez a csoport alkalmas az általunk alkalmazott megközelítés referencia csoportjának. Így vizsgálatunkban 183 talajszelvény feltalaját tekintettük szervesszénben telítettnek és e szelvények fiziko-kémiai tulajdonságait használtuk fel a maximálisan eltárolható szervesszén mennyiségét leíró pedotranszfer függvények megalkotásához. Jelen munkában a feltalaj alábbi tulajdonságait vettük figyelembe: szervesszén tartalom, pH, CaCO_3 tartalom, homok ($>50\ \mu\text{m}$), iszap ($2-50\ \mu\text{m}$) és agyag ($<2\ \mu\text{m}$) tartalom. Irodalmi adatok alapján az eltárolható szervesszén szempontjából az egyik leginkább meghatározó tulajdonság a finomfrakció (agyag és iszap frakció együtt) aránya (Chen et al., 2018; Hassink, 1997b). Más munkákban a talaj fajlagos

felületének szerepét hangsúlyozzák (Beare et al., 2014). A talajban kicserélhető formában található kationok összetétele ezen belül is a Ca és a Na mennyisége szintén meghatározó lehet a szerves anyag stabilizálásának szempontjából mert míg az előbbi stabil és a lebontásnak ellenálló komplexeket képez (Juhos et al., 2021), addig az utóbbi peptizál és ezzel elősegíti a szerves anyag molekulák vízbeni oldódását és vándorlását majd a mineralizációt (Wong et al., 2010). A feltalaj savas vagy alkalikus állapota pedig alapvetően hat a szerves anyag molekulák polimerizáltságára és ezen keresztül a mikrobiom számára történő hozzáférhetőségre (Rasmussen et al., 2018).

Jelen munkában a TIM adatbázis 1992-ben meghatározott adatait vettük alapul. Ennek ugyan a szerves anyagban telített, erdő szelvények esetében nincs nagy jelentősége, tekintve hogy a szervesanyag-tartalom változása ilyen körülmények között tíz éves időtartamban elenyésző. Ugyanakkor ebben a kezdeti időszakban a TIM még genetikai talajszintek alapján végezte a szelvények vizsgálatait, vagyis a talajtípusától függően eltérő mélységekből származtak akár a felszíni minták is. Következésképp, első lépésként az egyes szelvényekben mért szervesanyag-koncentrációkat egységesen a feltalaj 0–30 cm-es rétegére kellett meghatározni. Ehhez a spline interpolációs módszert (Bishop et al., 1999) alkalmaztuk minden szaturált talajszelvény minden vizsgált tulajdonságának mélységbeli eloszlására. A további modellezésben használt értékek a spline illesztéséből származnak és a felszíni 30 cm mély rétegre vonatkoznak.

3.7.3. A modellezéshez használt környezeti és talaj változók

Az ebben a munkában használt, talajra vonatkozó és környezeti változókat a 4. táblázat mutatja be. A DOSoReMI (www.dosoremi.hu) projekt keretein belül számos tulajdonságot, függvényt és szolgáltatást térképezték Magyarország területére figyelembe véve a talajok függőleges változékonyságát (rétegzettségét) is (Pásztor et al., 2018, 2015). A munka során használt térképi adatbázisok mindegyike a 0–30 cm talajrétegre vonatkozott 100 m-es térbeli felbontással.

A talajra vonatkozó tulajdonságok mellett vizsgálatba vontuk a környezeti változók azon körét is melyek hatással lehetnek a talaj szervesszén tartalmára és befolyásolhatják annak telítettségét. A domborzathoz kötődő tulajdonságokat egy országos digitális terepmodell (A. Bashfield és Keim, 2011) adataiból származtattuk, mely tulajdonságok az 4. táblázatban találhatóak. Például az USLE egyenletben használt LS tényező kombinált módon számszerűsíti a lejtő hosszát és meredekségét ezzel nyújt támpontot a lehetséges eróziós kártételről. A topográfiai nedvesség index (TWI) jó fokmérője a domborzati eltérésekből adódó talajnedvesség viszonyoknak és mint ilyen alapvetően határozza meg a talaj biológiai aktivitását és ezen keresztül a szerves anyag lebomlásának dinamikáját. A csatornahálózat függőleges és vízszintes távolsága szintén a talaj nedvességviszonyainak alakulásáról tájékoztat.

Az éghajlatra vonatkozó tulajdonságokat, mint az éves csapadékösszeg, középhőmérséklet, evaporáció és evapotranspiráció a Magyar Meteorológiai Szolgálat adatbázisából (Szentimrey és Bihari, 2007b) a sokéves átlagok alapján használtuk fel. A meteorológiai tulajdonságok szintén a talaj biológiai aktivitásának szabályozásán keresztül befolyásolják a szervesszéntartalom stabilizálódását, illetve lebomlását. A környezeti

változók vegyes forrásai miatt minden egyes változót újramintáztunk, hogy egységesen a 100 m pixelméretű rendszert tudjuk használni.

4. táblázat. A vizsgálatban használt környezeti és talaj változók felsorolása és forrásai DEM: digital elevation model, LS factor: lejtőhossz és meredekség mutatója, MRVBF: multiresolution valley bottom flatness, MRRTF: multiresolution ridge top flatness, SOC: a talaj szerveszén tartalma.

Faktor	Tulajdonság	Mért. egys.	Forrás
Talaj	Kalciumkarbonát tartalom	[w. %]	(Pásztor et al., 2020)
	pH	[-]	(Szatmári et al., 2020)
	Agyag tartalom	[wt. %]	(Laborczi et al., 2019)
	Iszap tartalom	[wt. %]	(Laborczi et al., 2019)
	Homok tartalom	[wt. %]	(Laborczi et al., 2019)
	Aktuális OC tartalom*	[wt. %]	(Szatmári et al., 2019)
Domborzat	Magasság	[m]	DEM
	Lejtés	[%]	DEM
	Profil curvature	[-]	DEM
	Total curvature	[-]	DEM
	Topográfiai pozíció index	[m]	DEM
	Topográfiai érdesség index	[-]	DEM
	Surface area	[m ²]	DEM
	MRVBF	[-]	DEM
	MRRTF	[-]	DEM
	LS tényező	[-]	DEM
	Topographic wetness index	[-]	DEM
	SAGA wetness index	[-]	DEM
	Vertical distance to channel network	[m]	DEM
	Horizontal distance to channel network	[m]	DEM
	Channel network base level	[m]	DEM
	Diurnal anisotropic heating	[-]	DEM
	Mass balance index	[-]	DEM
	Stream power index	[-]	DEM
Klíma	Éves átlagos csapadékösszeg	[mm]	(Szentimrey és Bihari, 2007a)
	Éves átlaghőmérséklet	[°C]	(Szentimrey és Bihari, 2007a)
	Éves átlagos evapotranspiráció	[mm]	(Szentimrey és Bihari, 2007a)
	Éves átlagos evaporáció	[mm]	(Szentimrey és Bihari, 2007a)

*A talaj aktuális szerveszén tartalmát csak a telítetlenség mértékének meghatározására használtuk

3.7.4. A pedotranszfer függvények megalkotásának elméleti alapjai

A referencia (erdő borítású) talajszelvények helyeit sorokba, míg a talaj és környezeti tulajdonságok vonatkozó értékeit oszlopokba rendezve definiáltuk a regressziós mártixot. E mártix és a vonatkozó, telített szerveszén tartalom értékek vektora szolgált a gépi tanulás alapú pedotranszfer függvény megalkotásának alapjául, melyben a telített szerveszén tartalom a függő változó és a felhasznált talaj és környezeti tulajdonságok szerepelnek magyarázó változóként.

A függvények definiálása során nem csak egy kiválóan teljesítő gépi tanulási módszer megalkotása volt a célunk, hanem egyben könnyen interpretálható összefüggéseket szerettünk volna definiálni. A cubist algoritmus teljesítette ezeket az elvárásokat, tekintve, hogy ez a gépi tanulási algoritmus hatékony és ezért gyakran alkalmazott a talajok terén (Adhikari et al., 2014; Minasny és McBratney, 2008; Viscarra Rossel és Webster, 2012) és mindemellett használatával transzparens felépítésű modellek alkothatók (Malone et al., 2017; Miller et al., 2015; Viscarra Rossel és Webster, 2012). Röviden, a cubist mely többféle metodika ötvözéséből született jobbra a 1990-es években (Quinlan, 1993, 1992, 1987), egy

gépi tanuláson alapuló módszer mellyel szabályokon alapuló prediktív modelleket lehet megalkotni (Kuhn és Johnson, 2013). A válaszváltozók adatainak vektorát és a prediktorok regressziós mátrixát felhasználva a `cubist` a függő adatokat részhalmazokra osztja fel, amelyek a használt prediktorok tekintetében homogénnek tekinthetők. A részhalmazokat egy hierarchikusan felépülő szabályrendszer segítségével definiáljuk. Minden egyes szabályhoz egy saját, többváltozós regressziós modell tartozik mely a HA-AKKOR-MÁSKÜLÖNBEN rendszerben értelmezhető.

- HA – a részhalmaz tulajdonságait definiálja
- AKKOR – megadja a részhalmaz adataira illesztett többváltozós regressziós modellt
- MÁSKÜLÖNBEN – a hierarchia alsóbb szintjein álló következő szabályra vonatkozik

A válasz változó becslése során meg kell vizsgálnunk, hogy a prediktorok becsült értékei megfelelnek-e az alkalmazott szabály feltételeinek. Amennyiben igen, akkor a szabályhoz tartozó többváltozós lineáris regressziós modell alkalmas a célváltozó becslésére. Ha a feltételek nem teljesülnek úgy a hierarchiában következő szabály feltételeit vizsgáljuk az előbbieken említett metodika alapján. A folyamat egészen addig ismétlődik, míg a hierarchiában az egyik szabálynál a feltételek teljesülnek következésképpen az ahhoz a szabályhoz tartozó többváltozós lineáris regressziós modell kerül alkalmazásra.

4. Eredmények

4.1. Az eltérő talajművelési és területhasználati rendszerek hatása a talaj egészségére különös tekintettel a szervesanyag-tartalomra és összetételre agyagbemosódásos erdőtalajon

Az eredmények között először esettanulmányok alapján igyekszünk betekintést nyújtani a művelt talajok egészségi állapotába, illetve egy lehetséges alternatív művelési technológiát is megvizsgálva írjuk le ennek jótékony hatásait a talaj egészségére, illetve a változó környezeti adottságokhoz történő alkalmazkodásra.

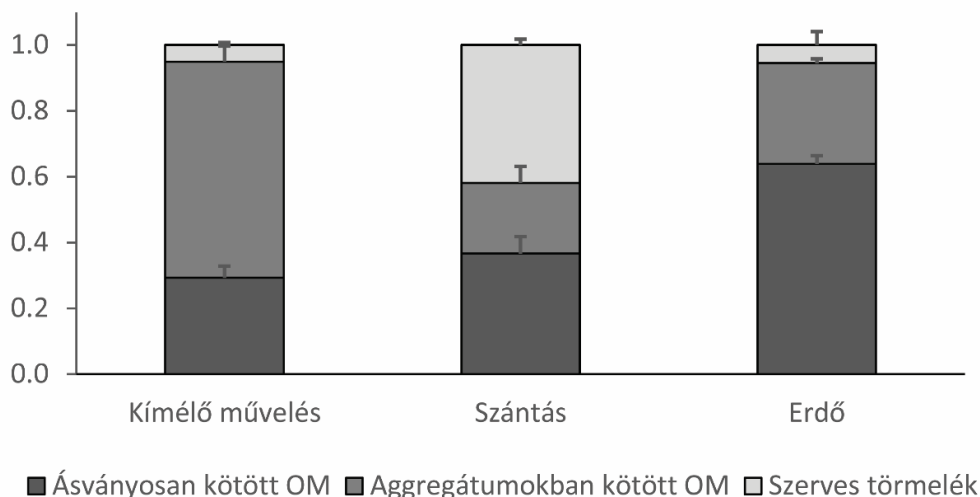
4.1.1. A vizsgált művelésmódok talajának szemcseösszetétele és szervesanyag-tartalma agyagbemosódásos barna erdőtalajon

A Szentgyörgyvári tartamkísérletben a hagyományos, szántás alapú talajművelési rendszer és a kímélő talajművelés alatti talajokat hasonlítottunk össze egymással, illetve a közeli erdő alatti „természetes” állapotú feltalajjal. Az eltérő területhasználatú feltalajok szemcseösszetételének különbségei származhatnak az eltérő mállási folyamatokból vagy az eltérő intenzitású eróziós és szedimentációs felszínfejlődésből is (Szabó et al., 2023), ami miatt a feltalajok szervesanyag-tartalmának összehasonlítása sem egyértelmű. Mind az egyes fizikailag elkülönített frakciók, mind a teljes feltalajok szemcseösszetétele hasonlított egymáshoz az eltérő művelésmódok alatt (5. táblázat), a különbségek inkább a frakciók között, a frakcionálás hatására alakultak ki. Ezek alapján a legnagyobb elemi szemcsék az aggregátumok frakciókban voltak, míg a legkisebb szemcsék a finom frakcióban jelentek meg ahol nem volt különbség az ásványi fázishoz kötött szervesanyag- és a stabilan kötött szervesanyag-frakciók összetételében, tekintve, hogy e két utóbbi szervesanyag-frakció ugyanazon fizikai talajszemcse frakcióhoz kötődik.

5. táblázat Szemcseösszetétel és szervesszén tartalom értékek a vizsgált talajokban és frakciókban eltérő területhasználat és művelésmódok alatt Szentgyörgyváron (SOC: szervesszén tartalom; S+A: aggregátumok; s+c: finom frakció; rSOC: stabilan kötött szervesszén frakciója). Szórás zárójelben.

	<5 μm (%)	5–20 μm (%)	20–200 μm (%)	SOC (g kg^{-1})
Erdő	24,2 ($\pm 0,6$)	34,2 ($\pm 1,2$)	41,6 ($\pm 1,8$)	40,6 ($\pm 0,6$)
E-S+A	24,4 ($\pm 1,0$)	30,9 ($\pm 0,1$)	44,7 ($\pm 1,0$)	26,9 ($\pm 0,8$)
E-s+c	29,1 ($\pm 0,2$)	41,6 ($\pm 0,5$)	29,4 ($\pm 0,3$)	26,1 ($\pm 1,0$)
E-rSOC	29,1 ($\pm 0,2$)	41,6 ($\pm 0,5$)	29,4 ($\pm 0,3$)	10,7 ($\pm 0,2$)
Kímélő m.	24,9 ($\pm 0,3$)	31,5 ($\pm 0,6$)	43,6 ($\pm 0,9$)	13,7 ($\pm 1,2$)
Km-S+A	19,4 ($\pm 0,2$)	24,6 ($\pm 0,3$)	56,0 ($\pm 0,5$)	9,8 ($\pm 0,6$)
Km-s+c	29,2 ($\pm 0,1$)	39,2 ($\pm 0,2$)	31,6 ($\pm 0,0$)	13,9 ($\pm 1,5$)
Km-rSOC	29,2 ($\pm 0,1$)	39,2 ($\pm 0,2$)	31,6 ($\pm 0,0$)	12,7 ($\pm 0,2$)
Szántás	26,7 ($\pm 0,3$)	32,8 ($\pm 0,2$)	40,5 ($\pm 0,5$)	10,5 ($\pm 0,0$)
Sz-S+A	21,5 ($\pm 1,3$)	38,4 ($\pm 1,5$)	40,1 ($\pm 2,8$)	5,0 ($\pm 0,3$)
Sz-s+c	30,7 ($\pm 0,6$)	36,1 ($\pm 4,1$)	32,9 ($\pm 4,0$)	10,5 ($\pm 0,1$)
Sz-rSOC	30,8 ($\pm 0,7$)	36,3 ($\pm 5,8$)	32,9 ($\pm 5,6$)	3,4 ($\pm 0,1$)

A területhasználat változása és a művelésmód megváltozása, már a vizsgált rövid időszak alatt is szignifikánsan hatott a teljes talaj szervesszén tartalmára (5. táblázat), ahogy arról már Angst et al. (2016) is beszámolt. A legmagasabb értéket az erdő feltalajában mértük ($40,60 \pm 0,61 \text{ mg g}^{-1}$) míg a szántott területen a szervesszén tartalom $10,50 \pm 0,02 \text{ mg g}^{-1}$ értékre csökkent. 15 évnyi talajkímélő művelés hatására a szervesszén tartalom a feltalajban ismét emelkedni kezdett és elérte a $13,70 \pm 1,23 \text{ mg g}^{-1}$ értéket. Figyelemre méltó, a szántás szervesszén tekintetében is érvényes homogenizáló hatása. Míg a másik művelt területen volt némi szórása a mintáknak, a szántás alatt gyakorlatilag homogén szervesszén tartalmat találtunk. Az egyes készleteket tekintve, szemben a hagyományos modellekkel (Six et al., 1999) Szentgyörgyváron az intenzív, szántás alapú művelés hatására a stabil szervesanyag-készletben csakúgy, mint az ásványi fázishoz kötött és a stabilan kötött szervesszén mennyiségében is csökkenést tapasztaltunk. Később, a szántás elhagyásával és a kímélő talajművelés bevezetésével a szervesszén tartalom ismét növekedni kezdett és 15 év alatt szignifikánsan magasabb lett e stabil raktárakban is (Rieder et al., 2018) (5. táblázat). A legmagasabb szervesszén veszteséget az aggregátumokban tárolt szerves anyag esetében tapasztaltuk, mely a szántás bevezetése miatt az eredeti koncentráció 19%-ra esett vissza. A 2003-ban megkezdett talajkímélő művelés az akkori aggregátumokban tárolt szervesszén mennyiségét a vizsgálat idejére már megduplázta. A legnagyobb növekedést a stabil szervesanyag-készlet esetében tapasztaltuk, mely a kímélő talajművelés megkezdése után 15 évvel már visszaállt az erdő alatt mért maximum értékére (Jakab et al., 2019b). Feltehetően ezekre az ásványi felületeken található, erősen kötő de szabad helyekre kötnek be először a szabad szerves molekulák, habár a talaj telített szervesszéntároló képessége nem a szemcseméret közvetlen függvénye (Beare et al., 2014). A fentiek következményeként az egyes talajokban a szervesszén mennyiségének raktárak közötti megoszlása erősen eltért egymástól. Az erdő alatt a talaj szervesszén tartalmának jelentős része az ásványi fázishoz kötötten volt megtalálható, míg a kímélő művelésű talajban az aggregátumok által tárolt szervesszén tartalom volt a meghatározó. A szántott területen a friss, nyers szerves anyag mennyisége határozta meg a talaj szerves anyagát (12. ábra). Ezek az eredmények összhangban vannak az irodalmi adatokkal melyek szerint a talajba jutó szerves anyag először nyers, partikuláris szervesszénként jelenik meg a rendszerben, majd rövidesen az aggregátumok belsejében is megjelenik, míg a stabil raktárak teljes telítéséhez hosszabb időre van szükség, ugyanakkor az összes raktárban egyszerre találhatunk friss és idős alkotókat is (Paul, 2016).



12. ábra A vizsgált agyagbemosódásos erdőtalaj szervesszén tartalmának megoszlása különböző területhasználat és művelésmódok alatt.

4.1.2. A szerves anyag összetétel változásai az eltérően művelt területeken agyagbemosódásos barna erdőtalajon

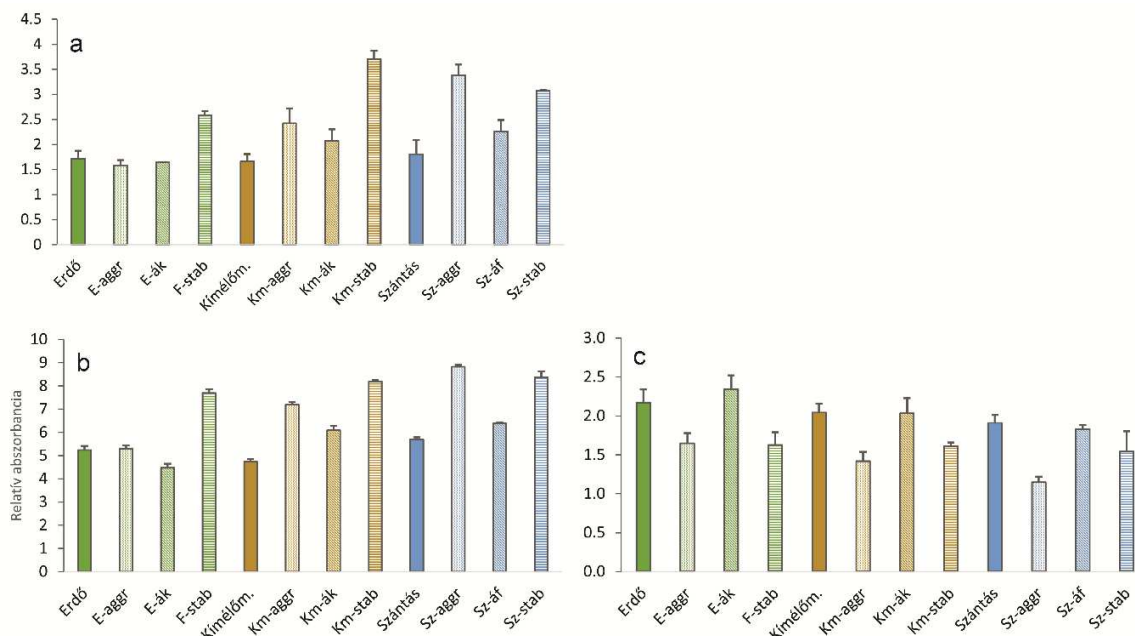
Az FTIR-DRIFT spektrumok hasonló mintázatot követtek a vizsgált talajfrakciók mindegyikében (6. táblázat). A teljes talaj szerves anyagának aromasságát vizsgálva nem találtunk különbséget az erdő és az eltérő szántóföldi agrotechnikák között annak ellenére sem, hogy irodalmi adatok szerint az erdőben keletkező biomassza több aromás alkotót tartalmaz, mint a szántóföldi kultúrák földön/földben maradó biomasszája (Haberhauer és Gerzabek, 1999). A legaromásabb szerves anyagot – függetlenül a művelésmódtól, ill. a területhasználatától – a stabilan kötött raktárban találtuk. Ez utalhat a tradicionális irodalomban axiómaként kezelt tényre, miszerint a mikrobióta az alifás alkotókat preferálja az átalakítás/lebontás során, így a mikrobióta számára elérhetetlen, stabil szerves anyag az aromás alkotók relatív feldúsulását mutatja (Six et al., 2001).

6. táblázat A vizsgált frakciók átlagos abszorbancia értékei a kitüntetett hullámszámoknál zárójelben a szórás értékeivel. (Km: kímélő művelés; ák: ásványi fázishoz kötött szervesanyag; stab: stabilan kötött szerves anyag; aggr: aggregátumokban kötött szerves anyag)

Hullámszám cm ⁻¹	-OH gyök 3400	Alifás alkotók			Oxidációs fok				Aromasság	
		2918	2848	1865	1794	1420	1612	1531	814	
<i>Km</i>	13.7 (±0.5)	7.0 (±0.4)	5.3 (±0.0)	5.5 (±0.7)	4.7 (±0.4)	11.1 (±0.7)	11.6 (±0.0)	8.8 (±0.2)	10.2 (±0.3)	
<i>Km-ák</i>	12.7 (±0.0)	5.6 (±0.0)	4.1 (±0.0)	8.2 (±0.4)	6.1 (±0.6)	10.5 (±0.9)	11.5 (±0.0)	8.1 (±0.4)	11.4 (±0.1)	
<i>Km-stab</i>	10.1 (±0.3)	3.2 (±0.2)	2.3 (±0.1)	11.1 (±0.1)	8.2 (±0.2)	11.7 (±0.3)	11.8 (±0.2)	8.5 (±0.7)	14.8 (±0.9)	
<i>Km-aggr</i>	10.9 (±0.3)	5.0 (±0.2)	3.8 (±0.2)	9.0 (±0.3)	7.2 (±0.1)	11.9 (±0.7)	12.1 (±0.2)	9.6 (±0.2)	12.1 (±0.3)	
<i>Szántás</i>	13.5 (±0.2)	6.1 (±0.2)	4.5 (±0.2)	7.1 (±0.5)	5.7 (±0.1)	10.4 (±0.4)	11.0 (±0.0)	8.1 (±0.3)	10.9 (±0.6)	
<i>Sz-ák</i>	12.6 (±0.4)	5.1 (±0.4)	3.7 (±0.2)	8.8 (±0.5)	6.4 (±0.2)	10.4 (±1.1)	11.4 (±0.2)	7.7 (±0.4)	12.4 (±0.6)	
<i>PT-stab</i>	12.2 (±0.2)	3.7 (±0.1)	2.7 (±0.1)	12.1 (±0.4)	8.4 (±0.2)	9.1 (±0.9)	11.4 (±0.2)	6.8 (±0.8)	14.7 (±0.4)	
<i>PT-aggr</i>	9.1 (±0.3)	3.7 (±0.2)	2.7 (±0.2)	10.7 (±0.2)	8.8 (±0.2)	11.8 (±1.1)	12.4 (±0.1)	10.1 (±0.4)	12.7 (±0.2)	
<i>Erdő</i>	13.2 (±0.2)	6.7 (±0.2)	5.0 (±0.3)	6.0 (±0.4)	5.2 (±0.4)	10.5 (±0.0)	11.4 (±0.2)	9.0 (±0.3)	9.7 (±0.4)	
<i>E-áf</i>	12.9 (±0.2)	7.0 (±0.0)	5.3 (±0.2)	5.5 (±0.2)	4.5 (±0.8)	11.1 (±0.3)	11.5 (±0.1)	8.7 (±0.8)	10.3 (±0.5)	
<i>NF-stab</i>	12.0 (±0.3)	4.3 (±0.2)	3.1 (±0.3)	11.4 (±0.1)	7.7 (±0.2)	9.3 (±0.7)	11.0 (±0.2)	6.9 (±0.5)	12.9 (±0.9)	
<i>NF-aggr</i>	12.8 (±0.5)	7.4 (±0.4)	5.7 (±0.4)	6.6 (±0.1)	5.3 (±0.0)	10.7 (±0.2)	11.6 (±0.3)	9.1 (±0.2)	9.9 (±1.0)	

Megjegyzendő ugyanakkor, hogy a stabil raktár meghatározásához használt intenzív, hypokloritos oxidáció feltehetően szelektíven bontja le az ásványi fázis felületén kötött szerves anyag egy részét, azaz az alifás alkotók érzékenyebbek az oxidációra, tehát jobban bomlanak. Következésképp a felületen maradó, stabilnak tekintett szerves anyag aromásabbnak tűnik. Habár a hypokloritos oxidáció a mikrobiom lebontó tevékenységét hivatott modellezni egyértelműen egy olyan mesterséges beavatkozás mely alapjaiban változtatja meg a szerves anyag összetételét. Ebből fakadóan – az eredmények alapján – úgy ítéltük meg, hogy e stabil készletnek a szerves anyag összetételére vonatkozó eredményeit csak fenntartásokkal lehet kezelni. Emellett a talajművelés intenzitása egyenesen arányos volt az aggregátumokban tárolt szerves anyag aromásságával. E tény egybevág Helfrich et al. (2006) eredményeivel, melyek szerint a fokozódó talajművelés által kiváltott növekvő oxigén mennyiség bevitele a talajba és az ehhez kapcsolódó szerves anyag lebomlás elsősorban a mobil, aggregátumokban tárolt szervesanyag-készletet és annak is az alifás alkotórészeit érinti. Mindazonáltal, Tivet et al. (2013) egyértelmű, de nem tendenciózus változásokról számolt be direkt vetésű szántóföldek aggregátumokhoz kötődő szervesanyag-készleteiben melyek mind az alifás, mind az aromás alkotókat érintették. E tény alátámasztja, hogy a rendszer holisztikus volta és a számos környezeti változó mely közvetlenül is hat a lebontási folyamatokra nem teszi lehetővé általános, a helyi körülményektől független tendenciák leírását. A szántott talajban, ahol a művelés és következtésképp az átlegezőzöttség is a legintenzívebb volt, a mobil raktár mellett az ásványi fázishoz kötött szervesanyag-készlet esetében is emelkedett aromásságot detektáltunk. A szerves anyag oxidáltsági fokának mérőszáma (13c. ábra) az aromássággal megegyező mintázatot mutatott. Általánosságban elmondható, hogy a stabilan kötött szerves anyag magasabb oxidáltságot mutatott, ami nem meglepő, tekintve a fent említett hypokloritos oxidálási folyamatot mellyel e készletet kezeltük a Zimmermann et al. (2007) féle frakcionálás során. Igaz ez akkor is, ha a legmagasabb abszolút oxidáltsági értéket a szántott talaj aggregátumokban tárolt szerves anyagának esetében kaptuk. Ez megint csak azt sugallja, hogy az intenzív talajművelés hatására megnövekedett szerves anyag mobilizáció elsősorban az aggregátumokban tárolt mobil szerves anyagból származik és az ásványi fázishoz kötött szervesanyag-készlet csak másodlagos forrás. Ezzel szemben, a nem művelt, erdővel borított talajon csak a stabil raktár oxidáltsági mutatója különbözött, az aggregátumokban és az ásványi fázishoz kötött szerves anyag esetében nem volt eltérés. Az ásványos összetétel tekintetében az agyag/kvarc arány minden esetben, területhasználatától és művelésmódtól függetlenül magasabb volt a finom frakcióban, mint ugyan azon művelés aggregátumaiban (13b. ábra), ami egyértelműen utal a nagyobb (homok) szemcsék kvarc általi dominanciájára. Mindemelett, a hypokloritos oxidáció egyértelmű csökkenést okozott az erdővel borított talaj finom frakciójában. Tekintve, hogy az ásványos fázis elviekben megegyezik a hypokloritos kezelés előtt és után, a különbség mégis inkább a szerves anyaghoz vagy még inkább az organo-minerális komplexekhez köthető. A szerves anyag olyan bevonatot tud képezni az agyagásványok felületén mely esetenként az ásvány belső felületeivel is képes kölcsönhatásba lépni (Liu et al., 2013), ebből adódóan jelenléte megváltoztathatja az agyagásványra jellemző hullámszámon mért abszorbancia értékeket ezzel befolyásolva az ásványos összetétel eredményeit. Azaz, szélsőséges esetben a szerves anyaggal borított ásványi szemcse akár leárnyékolhat is maradhat (Hrachová et al., 2009) az alkalmazott FTIR eljárás számára. Ezt a teóriát az erdő alatti talaj finomfrakciójában mért

legmagasabb szerveszén tartalom is alátámasztja, hiszen a szántóföldi talajok esetében az alacsonyabb szerveszén tartalom és a feltehetően kevesebb beburkolt ásványi szemcse miatt nem mutatkozott eltérés az agyag/kvarc arányban a hypokloritos kezelés hatására.



13. ábra A vizsgált talajok szervesanyag-készleteinek aromassága (a), oxidáltsága (b) és az agyagásvány/kvarc index értékei. (Km: kémlelő művelés; ák: ásványi fázishoz kötött szerves anyag; stab: stabilan kötött szerves anyag; aggr: aggregátumokban kötött szerves anyag)

4.1.3. A különböző raktárakban tárolt szerves anyag összetételének változásai agyagbemosódásos barna erdőtalajon

Általánosságban igaz, hogy a vizsgált hullámszámokhoz tartozó relatív abszorbancia értékek korreláltak egymással, mely alól csak az 1612, 1531, és az 1420 cm^{-1} hullámszámokhoz tartozó abszorbancia értékek egy része volt kivétel (7. táblázat). Gyenge pozitív korrelációt mértünk a szerveszén tartalom és az alifás alkotók részaránya között, ezzel szemben az aromás komponensek aránya és az összes szerveszén tartalom jellemzően nem mutatott összefüggést (7. táblázat). Ez megint csak utalhat az alifás komponensek nagyobb mikrobiális kitettségére és az egyes szerveszén raktárak közötti eltérő aromaticitás jelentőségére. Haberhauer és Gerzabek (1999) ezzel megegyező tendenciákat közölt, eredményeik alapján az alifás alkotórészek mennyisége csökkent a talajszelvény mélyebb része felé haladva, ugyanakkor az aromás alkotók esetében nem tapasztaltak változást.

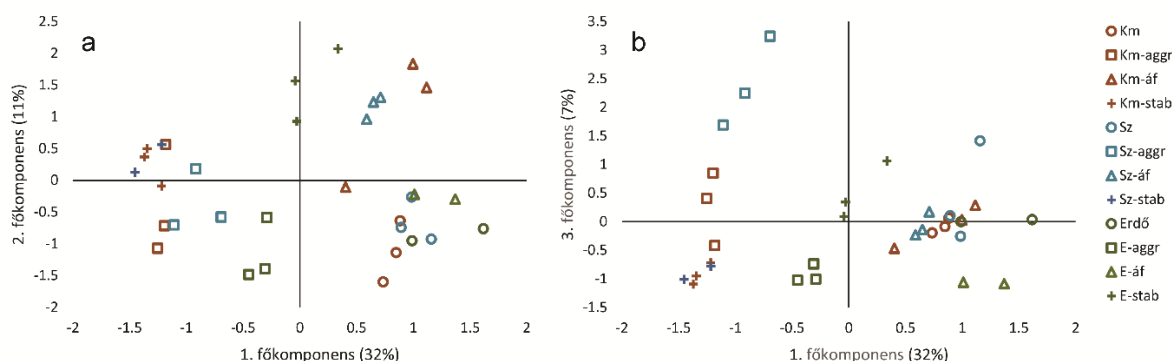
7. táblázat Korrelációs koeficiens értékek a vizsgált hullámszámhoz tartozó abszorbanca értékek, szervesszén tartalom (SOC) és szemcseméret osztályok között (n=58).

	Hullámszám (cm ⁻¹)									SOC	<5 μ	5–20 μ	>20 μ
	3400	2918	2848	1865	1794	1612	1531	1420	814	(m/m)	(%)	(%)	(%)
3697	0,87**	0,68**	0,65**	-0,62**	-0,76**	-0,77**	-0,40*	-0,46**	-0,59**	0,52**	0,40*	0,22	-0,33*
3400		0,77**	0,74**	-0,65**	-0,80**	-0,67**	-0,41*	-0,52**	-0,60**	0,42*	0,27	-0,11	-0,06
2918			1,00**	-0,94**	-0,94**	-0,28	0,20	-0,03	-0,91**	0,68**	-0,18	-0,29	0,27
2848				-0,94**	-0,93**	-0,26	0,23	-0,01	-0,91**	0,69**	-0,20	-0,30	0,28
1865					0,95**	0,11	-0,36*	-0,23	0,89**	-0,69**	0,23	0,28	-0,29
1794						0,29	-0,09	-0,02	0,81**	-0,67**	0,00	0,19	-0,12
1612							0,69**	0,75**	0,15	-0,16	-0,58**	-0,28	0,46**
1531								0,84**	-0,42*	0,26	-0,76**	-0,38*	0,61**
1420									-0,14	0,06	-0,51**	-0,29	0,44**
814										-0,66**	0,35*	0,27	-0,34*
SOC											-0,14	-0,06	0,10
<5 μ												0,60**	-0,85**
5–20 μ													-0,93**

* 95% valószínűségi szinten szignifikáns, ** 99% valószínűségi szinten szignifikáns

A 3400 cm⁻¹ hullámszámnál mért relatív abszorbanca amely a kaolinit mintabeli koncentrációjával arányos, egyenesen arányos volt az alifás és fordítottan arányos az aromás szerves alkotórészekkel. Mindemellett, Calderón et al. (2011) felvetette, hogy az említett hullámszámon a kaolinit mellett a szerves anyag reaktívabb mobil frakciója is abszorbeál. Ez utóbbi felvetést alátámasztja jelen vizsgálat eredménye, ugyanakkor az egyes ásványok kitüntetett szerves komponensekhez köthető preferenciáját is leírták, bár a kaolinit szervesanyag-kötésének kapacitását kétségbe vonták (Bruun et al., 2010). Emellett az aromás alkotók aránya (abszorbanca 1612 cm⁻¹ és 1531 cm⁻¹ hullámszámnál) és az oxidációs fok (abszorbanca 1420 cm⁻¹ hullámszámnál) egyenesen korreláltak a homok mennyiségével és fordítottan az agyagtartalommal. Igaz ugyan, hogy e korrelációk többnyire gyengék voltak mégis azt sugallják, hogy az aromás alkotók előfordulásának gyakorisága inkább a nagyobb szemcsékhez kötődik, míg az alifásoké az agyagfrakcióhoz. Alátámasztja ezen elképzeléseinket Wattel-Koekkoek et al. (2001) vizsgálata, aki az alifás szerves anyag alkotórészek preferált kaolinnal történő komplex képzéséről számolt be. Árnyalja ugyan a képet, hogy ugyanezen tanulmány az aromás komponensek szmektiten történő dúsulásáról is beszámol. Következésképp az organo-minerális komplexeknek meghatározó szerepe lehet az alifás szerves anyag alkotók megkötésében és az eredmények utalhatnak az aromás alkotók aggregátumokban történő dúsulására is duzzadó agyagásványokat nem tartalmazó talajokon.

A főkomponens analízis eredményeképpen az első három főkomponens az összes variancia mintegy felét (49%) magyarázta. A loadingok alapján az első főkomponens az alifás szerves anyag alkotók és az ásványos fázis –OH gyökeinek mennyiségét reprezentálta. A második főkomponens a szerves anyag aromasságának változásaira reflektált, míg a harmadik a 2100 cm⁻¹ hullámszámon mért abszorbanciát számszerűsíti, mely a szén atomok közötti hármas kötések mennyiségével arányos. A vizsgált frakciók jól elkülönültek az első és második főkomponensek mentén (14a ábra). A szervesszén tartalom, a szemcseméret eloszlás és az agyag/kvarc arány nem hatottak érdemben a vizsgált minták variabilitására.



14. ábra Az adatok eloszlása az első és második (a), valamint a második és harmadik főkomponens (b) mentén. A vörös színű jelölők a kímélő művelés, a kékek a szántás alapú művelés, míg a zöldek az erdő alatti szén készleteket ábrázolják. Kör: teljes talaj, négyzet: mobil készlet, háromszög: ásványos fázishoz kötött stabil készlet, kereszt: inaktív készlet.

Mindkét vizsgált szántóföldi művelésű területen az aggregátumokban tárolt és a stabilan kötött szerves anyag csak kisebb arányban tartalmazott alifás összetevőket. Ezzel ellentétben, és Parfitt et al. (1997) eredményeivel összhangban az ásványi fázishoz kötött szervesanyag-készletben és a teljes talajokban is magasabb alifás alkotó arányt találtunk. Az erdő művelési ág alatti talajon az aggregátumokban tárolt és a stabil szerves anyag alifás komponenseinek aránya az előbb említett két szélsőség között foglalt helyet. Az egyértelmű különbség az aggregátumokban tárolt szerves anyagának és a talajok összes szerves anyagának összetétele között feltehetően az agyagásványok jelenlétéhez, ill. hiányához kötődik.

A második főkomponens mentén történő eloszlás alapján a legaromásabb szerves anyagot az erdő borítás alatti stabil készletben és a szántóföldek ásványi fázisaihoz kötött készleteiben találtuk meg. A lehetséges mikrobiális lebontást imitáló hypokloritos oxidáció csak az erdővel borított talaj esetében növelte meg az aromasság arányát az ásványi fázishoz kötött szerves anyag esetében, a művelt területeken nem. Ez arra utalhat, hogy az erdővel borított talajon az ásványos fázishoz kötött szerves anyagot az alifás komponensek határozzák meg, ill. hogy ezen alkotók nem kötődnek olyan erővel, hogy védettek lennének a mikrobiális lebontással szemben. A harmadik főkomponens mentén talált különbségek csekélyek és a szántott talaj aggregátumaiban mutatják az alkinek dúsulását mely feltehetően az e raktárban történt intenzív szervesanyag-lebontás/átalakulás következménye. Meg kell jegyeznünk, hogy az adatok varianciájának felét nem a vizsgált változók magyarázták, következésképpen erősen hatnak olyan környezeti tulajdonságok is melyeket ebben az esettanulmányban nem számszerűsítettünk. Feltehetően meghatározó szerepe lehet az erdő és a művelt területek eltérő mikroklímájának és az ehhez kapcsolódó különbségeknek a mikrobiális közösségekben.

A szántott és a kímélő művelésű talajokon további vizsgálatokat végeztünk. Ezek eredményeképpen a kímélő művelés talajának magasabb szervesszén tartalma nem mutatkozott meg a mikrobiális biomassza tömegében, vagyis a mikrobióta mennyisége nem különbözött egymástól a két kezelésben a május közepi mintavétel idején. Ezzel összhangban, a cellulóz (tealevél) lebontás mértékével számszerűsített biológiai aktivitásban sem találtunk eltérést a két művelésmód között (8. táblázat). Ez a mutató, szemben a

mikrobiális biomassza pillanatnyi állapotával már a tenyésztidőszak egészéről ad információt vagyis a mikrobiális lebontás májustól augusztusig nem különbözött a szántott és nem forgatott talajokban. Másrészt viszont a földigiliszták egyértelműen előnyben részesítették a direkt vetésű területet. Ennek ellenére a talaj porozitása a szántott területen mutatott magasabb értéket. Ez a különbség a mikropórusok (ekvivalens átmérő <50 µm) eltérő mennyiségéből fakadt, a makropórusok aránya nem különbözött a két műveléstípus között.

8 táblázat. A talajtulajdonságok változása eltérő talajművelések alatt a Szentgyörgyvári kísérleti állomás feltalajában 2017-ben. A porozitás értékei magágy állapotú talajra vonatkoznak. A 95% konfidencia szinten szignifikáns különbségek félkövérrel kiemelve. N: mintaszám; M-W: Mann-Whitney.

Tillage	Szántás	Kímélő művelés	N	M-W U	szignifikancia
Összes szervesszén (mg g⁻¹)	8.16±0.572	11.0±0.544	36	0.000	0.000
Mikrobiális biomassza szén (µg g ⁻¹)	127±113	121±94.5	36	134	0.971
Aggregátum stabilitás	19.9±11.2	30.4±9.93	36	74.0	0.005
Gilisztá előfordulás (db dm⁻³)	0.222±0.416	1.06±0.621	36	55.0	0.000
Stabilizációs tényező (S)	0.182±0.031	0.180±0.037	24	65.0	0.951
Lebomlási ráta (k)	0.023±0.010	0.037±0.013	24	8.00	0.186
Makroporozitás (v/v %)	13.9±3.61	12.9±5.39	18	33.0	0.508
Mikropozitás (v/v %)	40.6±2.32	34.0±5.10	18	12.0	0.012
Teljes porozitás (v/v %)	54.5±3.78	46.9±6.04	18	11.0	0.009

4.1.4. A fulvósav frakcióban (alkalikus extrakció) tapasztalt spektroszkópiás és fluoreszcens különbségek az extrahált szerves anyag összetételében művelésmódok között agyagbemosódásos barna erdőtalajon

A fulvósav frakcióban, a szervesszén-tartalomra korrigált összes Coble csúcs szignifikánsan magasabbnak adódott a kímélő művelésű területen a szántáshoz hasonlítva (9. táblázat). Ezzel szemben az fluoreszcens, (A+C)/(B+T), biológiai és T/A index értékei között nem volt statisztikailag igazolható eltérés a különböző művelésmódok alatt. A többi vizsgált index, úgymint a SUVA_{254,280}, A/C, és a humifikációs index ugyancsak a kímélő művelésű talajon adtak magasabb értéket, ezzel számszerűsítve a szántás elhagyásának hatását mely ez esetben a talaj szerves anyagának komplexebbé és aromásabbá válását jelentette (9. táblázat). Ugyan a vizsgált mutatók zöme a fenti különbséget tükrözte, a C/N arány és az E₄/E₆ arány ellenkező irányba mutatott, azaz a szántott terület szerves anyagában jeleztek jobban átalakult, komplexebb szerkezetet, ezzel utalva az alkalmazott megközelítés kézzel fogható bizonytalanságára.

9. táblázat Az eltérő talajművelés okozta különbségek a talaj szerves anyagának összetételében az alkalikus extrakcióval előállított fulvósav frakció spektroszkópiás és fluoreszcens tulajdonságai alapján A 95% megbízhatóság melletti szignifikáns különbségeket félkövér betűtípus jelöli. M-W: Mann-Whitney, n=36

Talajművelés	Szántás	Kímélő művelés	M-W U	szignifikancia
EOC* tartalom (mg L ⁻¹)	35,6±3,70	41,2±4,91	51	0,000
„B” Coble csúcs magasság [§]	0,251±0,066	0,341±0,115	78	0,008
„T” Coble csúcs magasság [§]	0,324±0,102	0,527±0,249	51	0,000
„A” Coble csúcs magasság [§]	3,66±1,02	4,94±0,994	60	0,001
„M” Coble csúcs magasság [§]	1,79±0,396	2,38±0,384	40	0,000
„C” Coble csúcs magasság [§]	0,904±0,162	1,09±0,156	64	0,002
Fluoreszcens index (FI)	1,05±0,030	1,05±0,032	143	0,548
Biológiai index (BIX)	0,414±0,029	0,420±0,036	152	0,752
Humifikációs index (HIX)	0,925±0,014	0,932±0,020	85	0,015
Oldott nitrogén tartalom (mg L ⁻¹)	3,46±1,10	3,62±0,641	112	0,118
Szén/nitrogén arány (C/N)	10,6±1,49	11,5±1,46	90	0,023
Abszorbancia 254 nm-en	0,783±0,112	0,983±0,127	41	0,000
Abszorbancia 280 nm-en	0,621±0,096	0,801±0,117	40	0,000
SUVA ₂₅₄ index	2,21±0,289	2,39±0,203	90	0,023
SUVA ₂₈₀ index	1,75±0,249	1,95±0,183	78	0,008
E ₂ /E ₃ index	4,77±0,398	4,83±0,246	143	0,548
E ₄ /E ₆ index	5,98±2,31	9,65±3,97	41	0,000
T/A index	0,093±0,034	0,108±0,055	129	0,296
A/C index	3,99±0,535	4,51±0,535	85	0,015
(A+C)/(B+T) index	8,12±2,08	7,41±1,70	130	0,311

*extrahált szervesszén

[§]a csúcsmagasságokat az extrahált szervesszén tartalomra korrigáltuk

4.1.5. A vízdoldható szervesanyag-frakcióban tapasztalt spektroszkópiás és fluoreszcens különbségek az extrahált szerves anyag összetételében művelésmódok között agyagbemosódásos barna erdőtalajon

A vízben oldott szervesanyag-frakciót tekintve két vizsgált tulajdonság kivételével minden esetben szignifikáns különbséget igazoltunk az eltérő művelésmódok között. E két tulajdonság a fehérje jelenlétéhez köthető „B” Coble csúcsmagassága és az oldott nitrogén tartalom (10. táblázat). A szántás alatt mért magasabb biológiai index érték az ott található szerves anyag jellemzően mikrobiológiai eredetűre utal, míg a kímélő művelés alatti alacsonyabb érték inkább humusz eredetű szerves anyagot jelez, habár a tisztán mikrobiológiai eredetű szerves anyagok BIX értéke >1 és a tisztán humifikálódott szerves anyagé <0,5. Esetünkben mindkét érték az átmeneti zónában jelenik meg és csak a két meghatározó forrás közötti hangsúly eltolódásokat tükrözi. A humifikációs index ugyancsak a kímélő művelésű talajban jelez komplexebb vízdoldható szerves anyagot a szántott talaj értékéhez viszonyítva. A Coble csúcsmagasságokból képzett indexek egyöntetűen szintén a kímélő művelés alatti vízdoldható szerves anyag aromásabb és összetettebb szerkezetére utalnak a szántott talaj értékéhez képest. Hasonlóképpen, a fluoreszcens index értéke is kímélő művelés alatt volt alacsonyabb ezzel jelezve e terület jobban átalakult, humifikáltabb vízdoldható szerves anyagát a szántó magasabb flureszcens index értékéhez képest. Mindkét hullámhosszon mért specifikus UV abszorbancia a szántott mintákban mutatott alacsonyabb értékeket ezzel jelezve, hogy a szántás elhagyása és a meghatározó mennyiségű szerves növényi maradvány talajon hagyása egyértelműen növeli a növényekhez köthető szerves anyag mennyiségét a vízdoldható fázisban is. Az E₂/E₃ index a megelőző eredményekkel összhangban az aromásabb és a komplexitás alacsonyabb fokát a szántott terület esetében jelezte. Az egyetlen kivétel az általános trend alól az E₄/E₆ index mely az összes többi

mutatóval ellentétben a szántó vízőldható szerves anyagát jelezte jobban átalakultnak, humuszosodottnak. Összességében, a vízőldható szerves anyag sokkal markánsabb és egyértelműbb különbséget jelzett a két művelésmód között mely szerint a kímélő művelés alatt a szerves anyagok ezen frakciója sokkal kondenzáltabb és jobban humuszosodott, magasabb aromassági értékekkel, mint a szántott talaj esetében.

10. táblázat Az eltérő talajművelés okozta különbségek a talaj szerves anyagának összetételében a vízőldható szervesanyag-frakció spektroszkópiás és fluoreszcens tulajdonságai alapján.

A 95% megbízhatóság melletti szignifikáns különbségeket félkövér betűtípus jelöli.

M-W: Mann-Whitney. n=36

Talajművelés	Szántás	Kímélő művelés	M-W U	szignifikancia
EOC* tartalom (mg L⁻¹)	20,3±2,76	30,7±2,52	2,00	0,000
„B” Coble csúcs magasság [§]	0,487±0,114	0,451±0,045	135	0,552
„T” Coble csúcs magasság [§]	0,751±0,130	0,808±0,044	64,0	0,003
„A” Coble csúcs magasság [§]	4,35±0,587	5,10±0,424	33,0	0,001
„M” Coble csúcs magasság [§]	2,94±0,430	3,38±0,267	37,0	0,000
„C” Coble csúcs magasság [§]	1,96±0,265	2,25±0,160	36,0	0,000
Fluoreszcens index (FI)	1,35±0,020	1,28±0,029	6,0	0,000
Biológiai index (BIX)	0,605±0,021	0,544±0,023	8,00	0,000
Humifikációs index (HIX)	0,867±0,014	0,889±0,010	27,0	0,000
Oldott nitrogén tartalom (mg L ⁻¹)	18,3±8,52	19,1±6,88	148	0,869
Szén/nitrogén arány (C/N)	1,13±0,492	1,90±0,907	71,0	0,007
Abszorbania 254 nm-en	0,387±0,058	0,729±0,103	0,000	0,000
Abszorbania 280 nm-en	0,285±0,045	0,546±0,080	0,500	0,000
SUVA ₂₅₄ index	1,90±0,326	2,37±0,231	30,0	0,000
SUVA ₂₈₀ index	1,40±0,256	1,77±0,181	29,0	0,000
E ₂ /E ₃ index	5,40±0,581	5,05±0,206	97,0	0,040
E ₄ /E ₆ index	3,73±1,33	5,69±1,69	24,0	0,005
T/A index	0,172±0,012	0,159±0,010	63,0	0,002
A/C index	2,22±0,036	2,26±0,036	56,0	0,001
(A+C)/(B+T) index	5,16±0,549	5,86±0,473	56,0	0,001

*extracted organic carbon

[§]peak heights are corrected with the extracted organic carbon concentration

**dissolved nitrogen

4.1.6. A talaj szerves anyag változásának eredményei a művelésmódok között agyagbemosódásos barna erdőtalajon az irodalmi adatok tükrében

A művelésváltás hatása a talajtulajdonságokra agyagbemosódásos barna erdőtalajon az irodalmi adatok tükrében

A kímélő talajművelés bevezetése óta (17 év alatt) jelentősen megváltoztatta a feltalaj tulajdonságait. A szántás elhagyása és a jelentős mennyiségű növényi trágya együttes hatására a szervesszén tartalom növekedett a feltalajban. Ahogy arra több tanulmányban is rámutattunk (Rieder et al., 2018) a növekedés az összes (aggregátumokban tárolt, mobil és az ásványokhoz kötött stabil) szervesanyag-készletet egyaránt érintette. A kímélő művelés bevezetése, elsősorban a szántás elhagyás révén kedvezőbb körülményeket teremtett a talaj makrofaunája számára amelyet a földgiliszták megnövekedett egyedszáma is alátámasztott. A giliszták szerepe meghatározó a talaj mikroaggregátumainak kialakításában és ezen keresztül a szerves anyag stabilizációjában (Six és Paustian, 2014). A szántás alatt mért

magasabb talajporozitás valószínűleg a szántás hatására alakult ki (tekintve, hogy ez a szántás egyik alapvető célja), habár a különbség a makropórusok tekintetében már nem látszik. Ahogy arra az eső-szimulátoros vizsgálatokkal rámutattunk a beszivárgás mértéke szántástól függetlenül, az egész tenyészidőszak folyamán a kímélő művelésű parcellákon volt magasabb (Jakab et al., 2017). Következésképpen, a tényleges beszivárgás nem a talaj porozitásának közvetlen függvénye, hanem számos további tényező hatására alakul. Ezzel szemben a mikrobiális biotömegtől a mintavétel időpontjában nem különbözött a két művelésmód alatt. A mintavétel magágy állapotú talajon zajlott mely a művelés miatt jól átkevert állapotban és a szükséges nedvességtartalom mellett mindkét művelésmód alatt kedvező feltételeket teremtett a mikrobiótának (Grandy és Robertson, 2007; Paustian et al., 2016). Ugyanakkor számos tanulmány számolt be nagyobb mikrobiális biotömről a csökkentett művelés vagy a művelés teljes elhagyásának hatására hosszú távon (Hsiao et al., 2019; Sauvadet et al., 2018). Az ellentmondás valószínűleg annak tudható be, hogy a mikrobiom tömege meglehetősen gyorsan, akár hetek alatt is jelentősen változhat a pillanatnyi környezeti feltételek függvényében. Ezért a mintavétel időpontja esetenként jobban hathat a mikrobiális összetétellel összefüggő tulajdonságokra, mint maga a kezelés (Al-Graiti et al., 2022). Mindemellett, a tenyészidőszak folyamán mért cellulóz bontás mértéke szintén egyformának adódott a vizsgált művelésmódok alatt, ami arra utal, hogy a mikrobiológiai aktivitás feltehetően szintén nem különbözött. Ez ellentmond Carbonetto et al. (2014) eredményeinek mely szerint a szántott talajban inkább kopiotróf, míg a kímélő rendszer alapján művelt talajban jellemzően oligotróf szervezetek dominálnak. Ez az elkülönülés valószínűleg, legalább részben, a rendelkezésre álló tápanyag mennyiségétől függ, vagyis a művelésmód ebből a szempontból kevésbé meghatározó, mint az alkalmazott tápanyag utánpótlás (Ujvári et al., 2020).

A talajművelés hatása az oldott szerves anyag összetételére agyagbemosódásos barna erdőtalajon

A vízzel oldható szerves anyag és a fulvósav frakciók közötti alapvető különbség az eredmények alapján az előbbi jóval nagyobb variabilitása a művelésmódok tekintetében. Ez arra utal, hogy a könnyen oldható, leginkább mobil szervesanyag-frakció pillanatnyi összetételét sokkal inkább meghatározza a művelési rendszer, mint az összetettebb molekulákat tartalmazó fulvósav frakciót. Ez az eredmény alátámasztja az általánosan elfogadott képet mely szerint a talaj szerves anyagának zömét adó, jól humuszódott, komplex és inkább szaturált szerves molekulák víz általi oldhatósága alacsony (Guimarães et al., 2013; Kalbitz és Kaiser, 2008). Ugyanakkor a képet árnyalja, hogy az előbb említett összefüggés az oldhatóság és a kémiai szerkezet között nem minden körülmények között érvényes, a talaj összetettsége miatt esetenként nem is mutatható ki (Schmidt et al., 2011). Az oldott nitrogén tartalomban mért majdnem egy nagyságrendi különbség az extrakciós eljárások között jóval nagyobb, mint a művelés okozta eltérés. A fulvósavak izolációja során alkalmazott eljárások és a későbbi dialízis miatt az alkalikus kioldásban mért nitrogén tartalom alulbecsli a tényleges értéket, következésképp a vízzel oldható értékek állnak közelebb a valósághoz. Ezek az értékek azonban nem csak a szerves anyag nitrogén tartalmát számszerűsítik hanem a műtrágyázásból származót is vagyis az előbbi kémiai összetételének becslésére nem alkalmazhatóak.

Egy nemzetközi összehasonlításban Kirkby et al. (2011) 13,6 értéket közölt a szántóföldi talajok átlagos C/N arányára, ökol szabályként pedig a 25 értéket a talajegészség szempontjából a megfelelő tartomány felső határértékének szokták megadni. Természetes erdőtalajokban ez az érték ennél magasabb is lehet, a szerves anyag bevitel és az átalakulás sebességének függvényében anélkül, hogy talajegészségbeli hiányosságot jelezne (Ostrowska és Porębska, 2015). A fulvósav frakcióban mért értékek egybevágóak az irodalomban a mérsékelt öv klímazonális talajaira közölt adatokkal (Eleftheriadis et al., 2018; Kukułs et al., 2019; Yang et al., 2012) és nem különböznek a művelésmódok között (Marinari et al., 2010). A vizes kioldásban mért alacsonyabb értékek a mikrobiális biotom megváltozó hozzájárulására utalhatnak (Stevenson et al., 2016), ugyanakkor az általunk mért <3 értékek egyértelműen ismét csak a külső forrásból származó nitrogén jelenlétét bizonyítják mely nagy valószínűséggel a műtrágyázásból származik. A szerves anyag komplexitását mérő E₄/E₆ index az alkalmazott extrakciós eljárástól függetlenül a szántott talaj esetében mutatott komplexebb molekulaszervezetet ami ellentmond az általános elképzelésnek (Panettieri et al., 2013). Ennek hátterében a kímélő művelés alatti gátolt szerves anyag átalakítás állhat, azonban további vizsgálatok nélkül teljes bizonyossággal ez nem jelenthető ki.

Szintén erdőtalajon végzett vizsgálatokban az oldott szerves anyagok molekulaméretét direkt mérési módszerrel is meghatároztuk (Rieder et al., 2018). E vizsgálatban külön-külön elemeztük az erdő és szántott erdőtalaj egyes készleteinek vízzoldható szerves anyag összetételét. Ez a vizsgálat nem hozott egyértelmű különbségeket, tendenciákat az egyes készletek között, de rávilágított, hogy a szántás hatására a vízzoldható szerves anyag átlagos molekulamérete megnövekedett mind az aggregátumokban tárolt, mind az ásványi fázishoz kötött szervesanyag-készlet esetében az erdő borítású talajokhoz képest. Ugyanakkor e két raktárat összehasonlítva nem különbözött a vízzoldható szerves molekulák mérete amely ellentmond a szilárd fázist leíró eredményeknek és az általánosan elfogadott megoszlásnak (Manzoni és Porporato, 2009). Következésképp a vízben oldott szerves anyag összetétele nem minden esetben (készlettől, ill. területhasználatától függően) feleltethető meg direktben a raktár teljes, szilárd szerves anyagának, ami valószínűleg a csekélyebb szervesanyag-tartalmú talajalkotók esetében kifejezettebb, ahol a mikrobiális biotom tömege nagyobb mértékben tudja befolyásolni az eredményeket (Chantigny, 2003).

Habár az oldott szerves anyag kémiai összetételének közelítésére mind a fluoreszcens indexeket, mind az excitációs emissziós mátrixot a vízzoldható és a fulvósav frakción is széleskörben alkalmazzák (Borisover et al., 2012), egymástól eltérő eredményeket kaptunk a különböző extrakciók esetében. Esetünkben minden egyes Coble csúcs magasabb értéket mutatott a fulvósavak esetében a vízzoldható szerves anyaghoz képest még akkor is, ha a mért értékeket az oldott szervesanyag-tartalommal szétválasztottuk. Tekintve, hogy e szétválasztott értékekből számolt indexek sem adtak egyértelműen koherens eredményeket felmerül a lehetőség, hogy az alkalmazott, széntartalomra alapuló szétválasztási módszer nem biztosíték az eltérő extrakciók direkt módon történő egzakt összehasonlítására, ahogy ez a kétely már Sharma et al. (2017) esetében is megfogalmazódott. A művelésmódok közötti eltérés a „B” csúcs kivételével minden csúcsonál megjelent. Az egyedi csúcsmagasság értékeken túl, az aromásosság mértékét számszerűsítő A/C index szintén a kímélő művelésű terület esetében adódott magasabbnak. Hasonló eredményre jutott Romero et al. (2017) aki szerint a művelés intenzitása fordítottan arányos a talaj vízzoldható szerves anyagának aromásosságával.

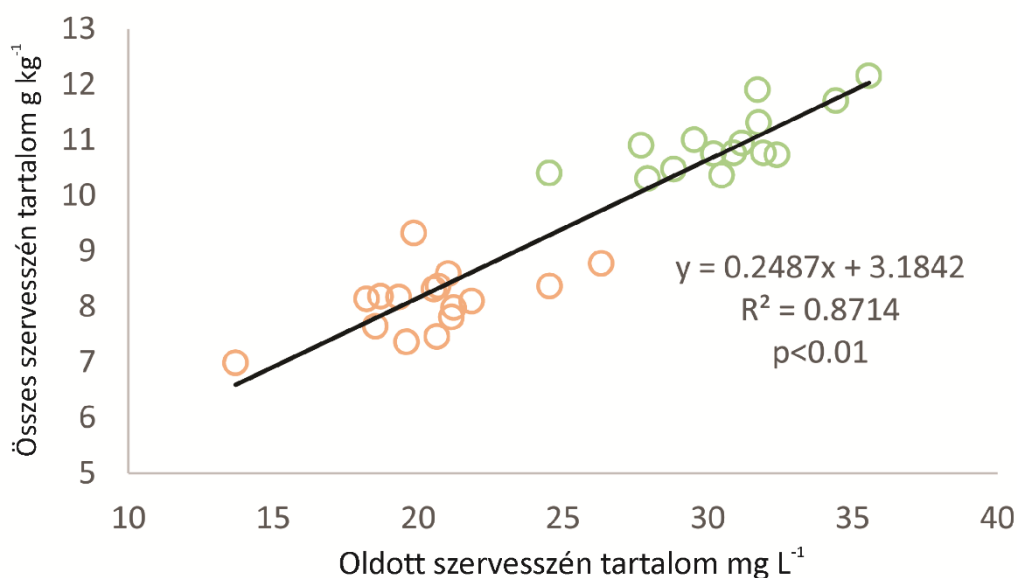
A relatív alacsony fluoreszcens index értékek a friss, kevésbé átalakult, ligninben gazdag szerves komponensek dominanciáját jelezték mindkét művelésmód esetében melyek között nem találtunk statisztikailag igazolható eltérést. A további indexek egymásnak ellentmondó értékeket mutattak. Ez nem egyedi eset, Graeber et al. (2012) szélsőségesen eltérő területhasználatú talajok esetében sem talált különbséget szántó, erdő és vizes élőhely talajainak vízdíszható fluoreszcens- és biológiai index valamint SUVA₂₅₄, értékei között, szemben a humifikációs index eltérő értékeivel (n=42). Sun et al. (2017) tanulmányában az organikus művelés hatására bekövetkező aromasság csökkenéséről számol be a humifikációs index alapján, hozzátéve, hogy a SUVA₂₅₄ index értékei éppen az ellenkező trendet igazolták. Az ellentmondó eredmények lehetséges magyarázataként megemlítjük, hogy a szerves anyag aromasságát leíró humifikációs index érzékenysége csökken a fehérje típusú szerves anyagok mennyiségének növekedésével, tekintve, hogy e két komponens átfedi egymást a spektrumban (Cuss és Guéguen, 2015; Zsolnay, 2003). Következésképpen kizárólag csak az indexek alkalmazásával csekély (művelésmód és nem talajtípus okozta) különbségek az oldott szerves anyag összetételében nem szükségszerűen mutathatóak ki, illetve egy-egy kiragadott index használata helyett több mutató, illetve az excitációs-emissziós mátrix egészének használatával nagyobb biztonsággal becsülhetjük az anyagösszetételt. Ellentmondás esetén különösen a humifikációs index értékét érdemes fenntartással kezelni.

Az eltérő megközelítésekkel mért fluoreszcens és spektroszkópos tulajdonságok közötti összefüggések.

Általánosságban igaz, hogy a fluoreszcens indexek, a Coble csúcs magasságok és az UV-vis spektroszkópiás eredmények sokkal jobban korreláltak egymással és az oldott szervesszén tartalommal a vizes kivonatokban mint a fulvósav extraktum esetében. Ebből következőleg, ugyan a fulvósav extraktumot gyakran használják a talaj szerves anyagának jellemzésére (McKnight et al., 2001), a vizes kivonat esetenként jobban tükrözi a művelésmód okozta változásokat és ezért jobb indikátora lehet a talajban pillanatnyilag is zajló, relatív gyors változásoknak. Ugyanakkor, ez egyben arra is felhívja a figyelmet, hogy a mintavétel időpontja a mikrobiom relatív magas szezonális hozzájárulása miatt szintén befolyásoló tényező lehet az oldott szerves anyag összetételében (Al-Graiti et al., 2022). Illetve a mintavétel időpontjának meghatározásakor nem csak a legutóbbi műtrágyázás időpontját, hanem az azóta eltelt időszak nedvesség és hőmérséklet viszonyait és figyelembe kell venni a műtrágyák hatásának kiszűréséhez. Esetünkben feltehetőleg ezzel magyarázható, hogy az oldott nitrogén tartalom semmilyen más tulajdonsággal nem mutatott szoros összefüggést.

A talaj szilárd fázisában mért tulajdonságokra vonatkozóan a teljes szervesszén tartalom erősen korrelált a vízdíszható szerves anyag fluoreszcens tulajdonságaival míg ez az összefüggés a fulvósav frakció esetében kevésbé bizonyult erősnek. A vízdíszható szervesanyag-koncentrációja egyértelmű összefüggést mutatott a talaj egyérszének szervesanyag-tartalmával, mely kapcsolat a talajművelési rendszertől függetlenül létezett (15. ábra). Ez arra enged következtetni, hogy a vízdíszható szerves anyag mennyisége független a mikrobiom pillanatnyi állapotától vagy aktivitásától a talajban, ahogy erre már Filep és Rékási (2011) is utaltak, ugyanakkor ellentmond más szerzők eredményeinek (Hsiao et al., 2019; Wilson és Xenopoulos, 2009) melyekben a mikrobiális szerves anyagot jelölték meg a vízdíszható szervesszén tartalom elsődleges forrásának a talajosodott szerves anyaggal szemben. Feltehetőleg mindkét fent említett tényező hat a vízdíszható szerves anyag

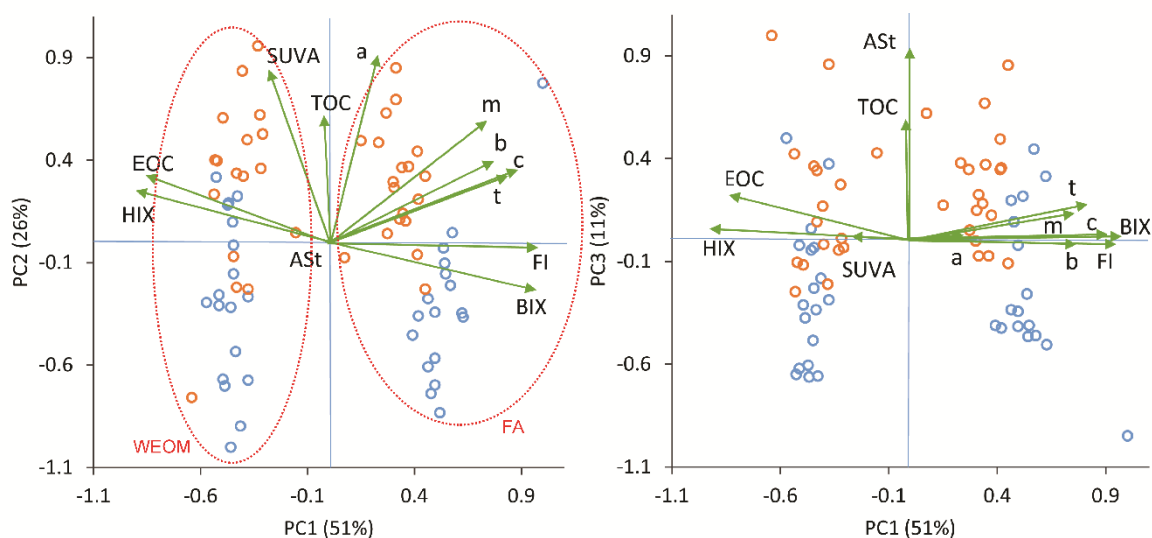
menyiségére, hiszen már a mikrobiomról is bebizonyították, hogy képes nagyon eltérő kémiai összetételű de emellett a lebontásnak ellenálló szervesanyag-produkcióra (Kallenbach et al., 2016) és a vízben oldott szerves anyag is tartalmazhat nagy tömegű, szerkezetileg komplex molekulákat (Li et al., 2013), akár szántóföldi körülmények között is (Marinari et al., 2010). Másrésről, a mikrobiom által közvetlenül befolyásolt oldott szerves anyag mennyisége sokkal inkább meghatározó lehet csekély szervesanyag-tartalmú (pl. homok) talajokban szemben a sok átalakult szerves anyagot tartalmazó, a talajosodás folyamatában előrébb haladott talajokkal. A mikrobiom a talaj szerkezetének kialakításában és fenntartásában is meghatározó szerepet tölthet be (Nebbioso és Piccolo, 2013). A mért aggregátum stabilitás, a mikrobiális biomassza és a talaj térfogattömeg adatok nem függtek össze sem a vízben oldott szerves anyag sem a fulvósav frakció tulajdonságaival, habár az aggregátum stabilitás és a térfogattömeg értékek közepesen jól korreláltak ($r=0,648$). Általános megállapításként elmondhatjuk, hogy a fluoreszcens mérésből származtatható tulajdonságok jól korreláltak egymással, a többi, más metodika alapján mért talajtulajdonság függetlennek bizonyult.



15. ábra A talaj teljes szervesanyag-tartalmának összefüggése a vízzoldható szervesanyag-tartalommal a Szentgyörgyvári kísérleti területen ($n=36$). A narancssárga jelölők a szántás alapú művelés, a zöldek a kímélő művelés tájának adatait számszerűsítik.

Az általános összefüggések leírására alkalmazott dimenziócsökkentő statisztikai eljárás egyik előfeltétele, hogy az egyes változók közötti kollinearitást megszüntessük. Ennek okán az egymásból származtatott adatokat, így a fluoreszcens indexek egy részét kizártuk a további elemzésből. A redundanciát csökkentendő szintén kizártuk a talaj porozitás és a cellulóz lebontásából származó eredményeket. Ezen a redukált adatbázison elvégzett főkomponens analízis segítségével az első három főkomponens magyarázta az adatbázis összes varianciájának 86%-át (16. ábra).

Az első főkomponens 51%-ot magyaráz az összes varianciából és a mintákat az extrakciós eljárás alapján különíti el. Ebben a főkomponensben jelennek meg a bemeneti változók közül a fluoreszcens indexek, az oldott szervesszén tartalom és az „A” csúcs magasságának kivételével a Coble csúcsok. Az oldott szervesszén tartalom és a humifikációs index erős, negatív hatást mutattak jelentősen alacsonyabb értékeket jelezve a vizes kioldás esetében ($23,30 \pm 9,43$ és $0,88 \pm 0,04$) szemben az alkalikusan extrahált fulvósav frakcióval ($38,39 \pm 5,15$ és $0,93 \pm 0,02$). Az oldott szervesszén tartalom sztenderdizált „B”, „T”, „M” és „C” Coble csúcsmagasságok, csakúgy mint a biológiai és a fluoreszcens indexek magasabb értékeket mutattak a vízdoldható szerves anyag esetében mint a fulvósav frakcióban (16. ábra). Összességében a fulvósav frakcióban talajosodott oldott szerves anyagot (fluoreszcens index = $1,05 \pm 0,03$; biológiai index = $0,42 \pm 0,03$) találtunk, míg a vízdoldható frakcióban mért értékek (fluoreszcens index = $1,36 \pm 0,12$; biológiai index = $0,59 \pm 0,05$) már átmenetet mutattak a mikrobiális eredetű szerves anyag irányába. Habár a vízdoldható szerves anyagban kimutatható volt a mikrobiális hatás ezzel együtt a vizsgált környezeti feltételek mellett jó indikátornak bizonyult a vízben oldhatatlan, teljes talaj szerves anyag leírására, ahogy erre már Akagi és Zsolnay (2008) is utaltak.



16. ábra A tengelyek a három főkomponens értékeit szemléltetik zárójelben az általuk magyarázott összes variancia értékekkel. A narancssárga jelölők a kímélő művelés a kékek a szántás alapú művelés alatt vett mintákat ábrázolják. A zöld nyilak a dimenziócsökkentett talajtulajdonságok loading értékeinek vektorai. Az egyedi betűk a vonatkozó Coble csúcsmagasságokat jelölik. AS_t: aggregátum stabilitás; EOC: oldott szervesszén tartalom; TOC: teljes szervesszén tartalom; SUVA: 254nm hullámhosszon mért specifikus UV abszorbancia index érték; HIX: humifikációs index; FI: Fluoreszcens index; BIX: biológiai index; WEOM: vízdoldható szerves anyag; FA: fulvósav frakció

A második főkomponens további 26%-ot magyarázott az összes varianciából. Az e főkomponens által leginkább lefedett változók a talaj teljes szervesszén tartalma, az oldott szervesszén tartalom korrigált „A” Coble csúcs magassága és a SUVA₂₅₄ index. A két utóbbi tulajdonság a szerves anyag aromasságát illetve komplexitását számszerűsíti. Az eltérő talajművelési rendszerek e főkomponens mentén oszlottak meg, magasabb szervesszén

tartalommal, aromásabb és összetettebb kémiai szerkezettel a kémelő művelésű terület alatt. A harmadik főkomponens a talaj szilárd fázisához kötődő tulajdonságait (szervesszén tartalom és aggregátum stabilitás) fogta össze újabb 11% variációt magyarázva. E főkomponens mentén szintén a művelési rendszer bizonyult az osztályozás alapjának, alacsonyabb értékeket jelezve a szántás alapú rendszerben habár a két csoport különválása ebben az esetben sokkal kevésbé volt kifejezett mint a második főkomponens esetében.

4.2. A kémelő művelés és a takarónövények hatása a talaj vízgazdálkodására és erodálhatóságára agyagbemosódásos barna erdőtalajon

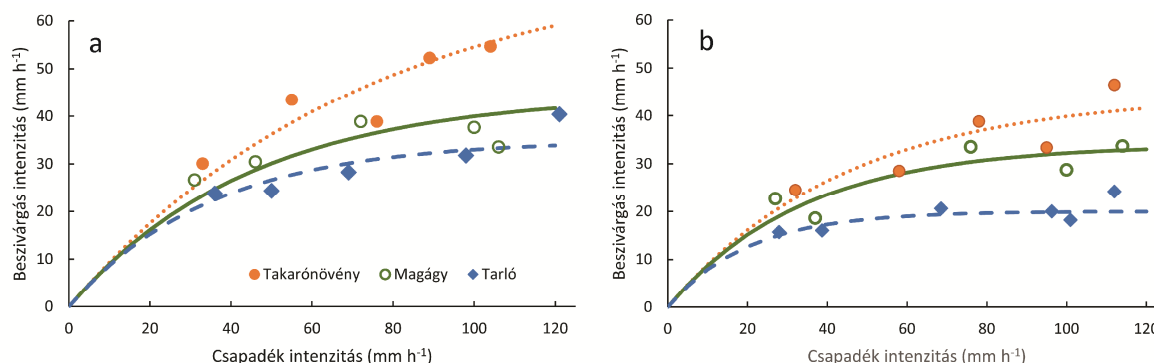
Mind a tizenöt mesterséges esőztetés felszíni lefolyást és talajvesztést is okozott a vizsgált parcellákon. Az alkalmazott csapadékok és az általuk kiváltott folyamatok főbb tulajdonságait a 11. táblázat mutatja be.

11. táblázat Az alkalmazott mesterséges csapadékok főbb tulajdonságai és az általuk kiváltott beszivárgás, lefolyás, talajvesztesség és erodálhatóság értékek. A mérések 6 m²-es 9% lejtésű parcellákon történtek. A színezett sorok a szántás alapú, a fehér háttérű sorok kímélő művelés eredményeit közlik. MUSLE=Modified soil loss equation (Williams, 1975); K=talaj erodálhatósági tényező

	Eső mennyiség	Intenzitás	Feszíni lefolyás	Végső lefolyás intenzitás	Végső beszivárgás	Talaj vesztesség	MUSLE K
	mm	mm h ⁻¹	mm	mm h ⁻¹	mm h ⁻¹	t ha ⁻¹	
Takarónövény	14,7	32	2,6	7,56	24,44	0,06	0,040
	10,6	78	3,7	39,24	38,76	0,09	0,019
	8,2	58	3,4	29,52	28,48	0,04	0,012
	11,1	95	6,6	61,56	33,44	0,16	0,020
	9,7	112	5,5	65,52	46,48	0,11	0,014
	17,5	33	2,3	2,88	30,12	0,01	0,009
	12,7	55	1,9	11,52	43,48	0,03	0,021
	13,5	89	4,2	36,72	52,28	0,06	0,013
	9,2	76	3,3	37,08	38,92	0,05	0,012
	14,5	104	5,7	49,32	54,68	0,08	0,012
Magágy állapot	13,4	27	0,9	4,32	22,68	0,09	0,138
	5,9	37	2,4	18,36	18,64	0,22	0,095
	8,7	76	4,3	42,48	33,52	0,55	0,106
	10,2	100	6,4	71,28	28,72	1,11	0,129
	11,1	114	7,5	80,28	33,72	1,33	0,131
	13,4	31	1,0	4,32	26,68	0,02	0,029
	6,3	46	1,5	15,48	30,52	0,09	0,057
	8,7	72	3,4	33,12	38,88	0,30	0,075
	11,3	100	6,6	62,28	37,72	0,82	0,102
	8,6	106	4,3	72,36	33,64	0,71	0,101
Tarló állapot	6,4	28	2,6	12,24	15,7	0,12	0,113
	6,1	39	2,9	22,68	16,04	0,15	0,070
	10,2	68	6,03	47,88	20,57	0,39	0,062
	10,8	96	7,8	76,32	19,98	0,66	0,053
	13,1	101	10,3	82,8	18,2	0,91	0,059
	6,9	36	1,6	12,24	23,76	0,06	0,066
	6,5	50	2,7	25,56	24,44	0,11	0,075
	9,3	69	5,0	40,68	28,32	0,26	0,086
	12,3	98	7,8	66,24	31,76	0,49	0,040
	15,4	121	9,5	80,64	40,36	0,64	0,036

4.2.1. A talaj vízmegőrzésének változása a változó agrotechnika függvényében

A számított, végső talajba szivárgás értékekre egy beszivárgási függvényt illesztettünk mindkét talajművelési rendszer és mindhárom vizsgált talajállapot esetében (17. ábra).



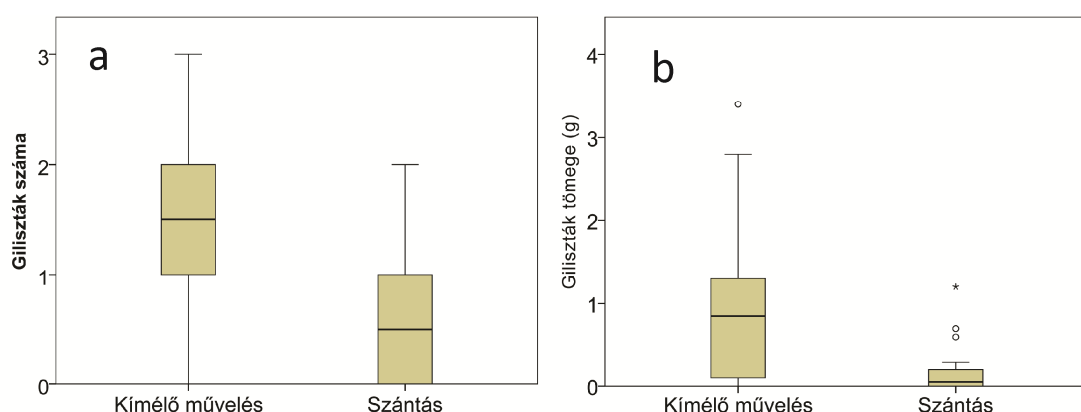
17. ábra A végső talajba szivárgás intenzitásának változása az alkalmazott csapadékintenzitás függvényében; (a) kímélő talajművelés, (b) szántás alapú talajművelés

Mindkét művelésmód esetében áprilisban, növényvel fedett talajon mértük a legmagasabb vízbefogadó képesség értéket mely a kímélő művelés alatti talajon volt magasabb. Mind a legmagasabb beszivárgás érték, mind a legintenzívebb növekedés a beszivárgás intenzitásában a növekvő csapadékintenzitással párhuzamosan a kímélő művelésű talaj takaró növényvel fedett állapotában történt.

Habár a talajművelés egyik alapvető célja a vízbefogadó képesség javítása, májusban a frissen művelt magágy állapotú talajokon valamivel alacsonyabb végső beszivárgás értékeket találtunk mint korábban a takarónövények alatt. Mindemellett a talajba szivárgás intenzitása ez esetben is a kímélő művelés alatt volt magasabb, habár az érték csapadék intenzitásól való függése csökkent (zöld görbe meredeksége, 17. ábra). Következésképpen a takarónövényhez képesti talajba szivárgás annál inkább csökken minél magasabb a lehulló csapadék intenzitása. Vagyis a takarónövények haszna a megnövelt vízvisszatartásban különösen a magas intenzitású csapadékok esetében nyilvánvaló (Jakab et al., 2017). A klimatikus előrejelzések és már mért adatok alapján is a Kárpát-medence területén egyre inkább a szélsőséges csapadékesemények gyakoriságának emelkedésére kell felkészülnünk (Jakab et al., 2019a). Ez a kevésbé gyakori, de annál hevesebb csapadékok bekövetkeztét vetíti előre megemelkedett csapadékösszeggel a téli időszakban. Ezért különösen fontos, hogy a takarónövényeket az aratást követően mielőbb elvessük, hiszen ebben az időszakban a fedetlen talaj különösen kitett az extrém csapadékoknak.

Októberre mindkét művelési rendszerben tarló állapotú talaj alakult ki melyen a tömörödés hatására jelentősen csökkent a vízbeszivárgás intenzitása, habár a kímélő művelés ekkor is magasabb értéket mutatott. A szántás alapú művelés mért pontjaira illesztett függvény meredeksége igen csekély ami csak minimális talajba szivárgás intenzitás növekedést jelent a növekvő intenzitású csapadékok hatására. 40 mm h⁻¹ intenzitás felett a növekedés gyakorlatilag megszűnik ami komoly problémát okozhat, tekintve, hogy napjainkban ennél sokkal magasabb intenzitás értékeket is egyre gyakrabban regisztrálunk. A kímélő művelés tarló állapotában illesztett vízbeszivárgási függvény nagyon hasonlít a szántás alapú művelés magágy állapotában meghatározott függvényhez (11. táblázat, 17. ábra), ami arra utal, hogy a kímélő művelés üledett és kerges talaja nagyságrendileg ugyanannyi csapadékot képes magába fogadni és eltárolni, mint a szántás alapú rendszer, frissen művelt, magágy állapotában. Vagyis esetünkben a talajba szivárgást nem a felszíni hanem a mélyebb réteg tulajdonságai korlátozzák. Azaz a természetes folyamatok által

kialakított talaj porozitása hatékonyabban fogadja be és tárolja akár a hirtelen nagy mennyiségben érkező csapadékot mint a szántás által létrehozott időszakos és sérülékeny pórusok. Az ugyancsak októberben elvégzett giliszta vizsgálatok alátámasztották a fenti különbséget. A kímélő művelésű területen az esőztetést követően átlagosan egyedszámban $2,5 \times$, tömegben $5,3 \times$ magasabb volt a földigiliszták előfordulása (18. ábra). A fauna szerepe meghatározó a stabil és hatékony talajszerkezet és porozitás kialakításában. A kímélő művelés sokkal kevésbé károsítja a talajlakó élőlények élettevékenységét és az általuk kialakított struktúrát mely alapfeltétele az extrém csapadékok talajba fogadásának és eltárolásának (Birkás et al., 2004; Emmerling, 2001).



18. ábra A szántás alapú talajművelés hatása a földigiliszták számára (a) és összes tömegére (b) a Szentgyörgyvári kísérleti telepen 2016 októberében, $n=18$, a művelések közötti különbségek a $p < 0,01$ valószínűségi szinten szignifikánsak. CT – kímélő művelés; PT – szántás alapú művelés

Az alacsonyabb csapadék intenzitás tartományokban mindhárom talajállapot közel hasonlóan reagált a csapadék intenzitásának növekedésére. Ez a tartomány a kímélő művelés esetében a 10 mm h^{-1} alatti értékeket jelenti, míg a szántás alapú művelésnél 18 mm h^{-1} értékig tart. E különbség arra utalhat, hogy az éppen termesztett növény vagy a talaj pillanatnyi állapotának hatásaitól függetlenül a kímélő művelésnek van egy általános, hosszú távú hatása a vízbeszivárgás növelésében melyben a talajbiológiának lehet meghatározó szerepe. Az adatokból számított talaj vízáteresztési értékek ugyancsak ezt a hatást számszerűsítik (12. táblázat). A kímélő művelésű területen az év teljes hosszában magasabb beszivárgási értékek adódtak, holott az irodalmi adatok meghatározó része csak hosszú távon számol be a kímélő művelés szántást meghaladó vízbefogadó képességéről (Thierfelder és Wall, 2009; Zhang et al., 2007).

12. táblázat A talaj vízáteresztés értékei (mm h^{-1}) művelésmódok és talajállapotok szerint, az 1. egyenlet alapján számítva.

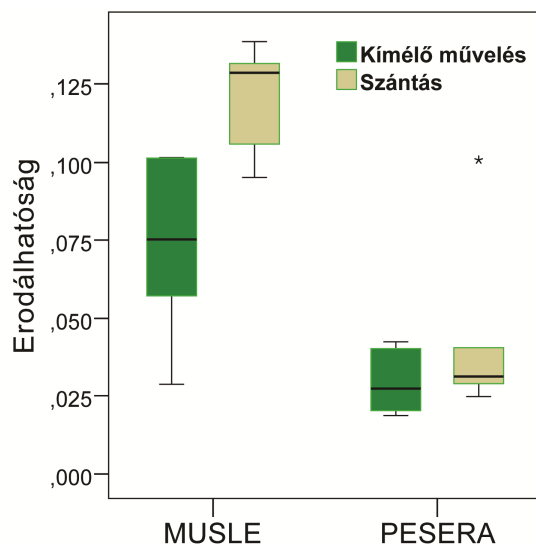
Hónap	Talaj állapot	Kímélő művelés	Szántás	Arány
Április	Takarónövény	73	44	1,62
Május	Magágy állapot	45	35	1,29
Október	Tarló	35	20	1,75

Meglepő módon, a magágykészítésből kifolyólag a kímélő művelésű terület mintegy 30%-kal magasabb volt a vízbefogadó képesség, holott maga a magágy készítésének módja megegyezett a két területen. A különbség feltehetően a kímélő művelésben a felszínen hagyott növényi maradványok hatásaként alakult ki. E maradványok akár jórészt eltemetett állapotban is képesek megvédeni a talajfelszínt a kérgesedéssel szemben, megőrizni a mokropóusok kapcsolatát a felszínnel és táplálékul szolgálni a makrofaunának és e hatásokon keresztül megnövelni a talajba szivárgás értékét. A szántás elhagyásával a növekvő mennyiségű szerves anyag, a kedvezőbb nedvességdinamika és a csökkent zavarás miatt a földigiliszták életfeltételei jelentősen javulnak (18. ábra). A két művelési rendszer közötti legnagyobb különbséget a talaj tarló állapotában találtuk. Hazánkban ez az időszak az egyik legveszélyesebb periódus a talajerózió szempontjából mert ekkor gyakoriak a heves csapadékok, míg a talaj sok esetben fedetlen és tömődött (Mueller és Pfister, 2011). Az ilyen körülmények között elérhető 75% vízbefogadás növekmény nagyon jelentős előnyöket jelent mind víztárolási mind talajvédelmi szempontból.

4.2.2. A változó agrotechnika hatása a talajpusztulásra a mesterséges esőztetések alapján

Összességében a vizsgált talaj komolyan ellenállt a felszíni lefolyás erodáló hatásának. A legnagyobb talajvesztéseget a legmagasabb csapadék intenzitás hatására, magágy állapotú talajon regisztráltuk de ez az érték sem haladta meg a tolerálható küszöbértéket (Duan et al., 2017). Az egyes esőztetések által erodált talaj mennyiségét a 11. táblázat számszerűsíti. A legnagyobb talajvesztés különbséget az alkalmazott intenzitások hatására a magágy állapotú talajok esetében találtuk műveléstől függetlenül. E különbség valószínűleg a porozitás művelések utáni jelenős területi heterogenitásból és a megnövekedett felszíni érdességéből adódik (Vermang et al., 2015). A talaj a legellenállóbbnak a takarónövények alatt bizonyult, míg a legkitettebb magágy állapotban volt a tarló állapot egy köztes értéket mutatott.

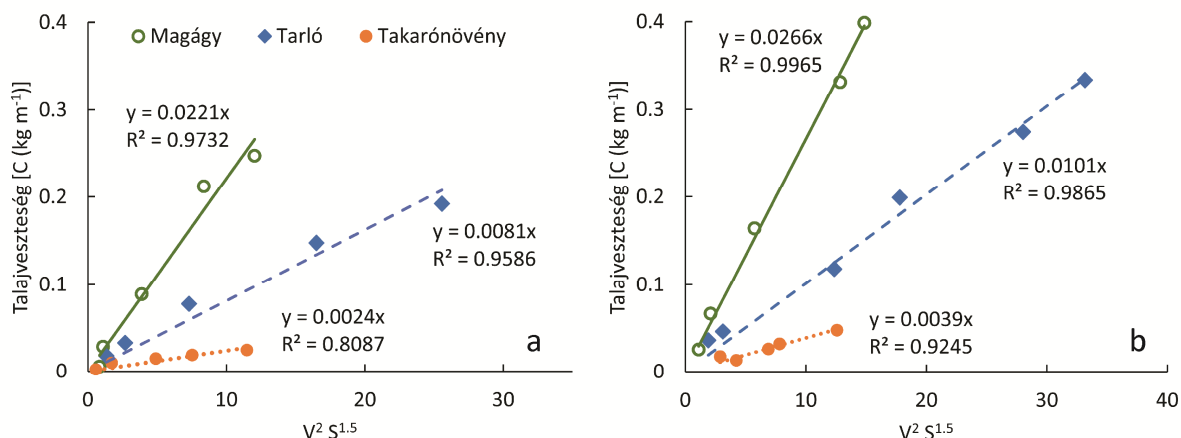
Elméletben a talaj erodálhatósága egy olyan érték mely egy adott talajszintre vonatkozik és független annak pillanatnyi fedettségétől, porozitásától vagy állapotától. Következésképpen az erodálhatóság értéke csak a talaj kémiai és fizikai összetételétől függ. A legelterjedtebb eróziót leíró modell, az USLE módszertana alapján a talaj erodálhatóságát magágy állapotban kell mérni (Wischmeier et al., 1978). A PESERA modell nem kezeli külön a talajállapotot ezért – a könnyebb összehasonlíthatóság érdekében – e modell esetében is a magágy állapotot vettük figyelembe. Majd a MUSLE és a PESERA modellek használatával meghatároztuk minden egyes magágy állapotú talajon végzett esőztetés alapján a talaj erodálhatóság értékét (19. ábra).



19. ábra A magágy állapotú talajon végzett esőztetésekből a Pan-European Soil Erosion Risk Assessment (Kirkby et al., 2008) és a Modified Universal Soil Loss Equation (Williams, 1975) modellek által számolt erodálhatóság értékek, $n=5$

Habár mindkét alkalmazott modell a talaj erodálhatóságát számszerűsíti az értékek értelmezésében különbséget kell tennünk. Ebből adódóan a kapott értékek összehasonlítása csak a használt modelleken belül lehetséges, a modellek között nem. A PESERA modell alapján nincs különbség a kímélő és szántás alapú művelést kapott talajok erodálhatósága között, míg a MUSLE modell szignifikánsan ($p < 0,05$) magasabb erodálhatóságot határozott meg a szántott talajra mint a kímélő művelés esetében. Mindkét modell a felszíni lefolyás mennyisége alapján közelíti a talaj erodálhatóságát habár a MUSLE figyelembe veszi a felszíni lefolyás intenzitását is, míg a PESERA modell kizárólag a lejtő meredekségével számol. Ebből kifolyólag, esetünkben a MUSLE modell alkalmasabb a talajállapot változásából adódó erodálhatóság értékek változékonyságának számszerűsítésére. Ugyanakkor egyes tulajdonságok, mint pl. az aggregátumstabilitás értékének megváltozása a modell alapján nem hat direkt módon a talaj pillanatnyi erodálhatóság értékére (Auerswald et al., 2014).

Egy másik megközelítés alapján a talaj pillanatnyi erodálhatóság értékét a talajvesztés és a felszíni lefolyás függvényeként is értelmezhetjük (9. egyenlet), ami alapján az egyes talajállapotok és művelési rendszerek eltérő erodálhatósági értékekkel jellemezhetőek (20. ábra). E megközelítés alapján is igaz, hogy a hosszú távú kímélő művelés minden vizsgált talajállapot esetében csökkentette az elvi erodálhatóság értékeket, a legkisebb különbség a takarónövényvel fedett talajon adódott. Ez nem meglepő, hiszen a növények által biztosított fizikai védelem miatt a talajok pillanatnyi fizikai tulajdonságai kevésbé határozzák meg a talajvesztés mértékét. Mindemellett, a kímélő műveléshez kapcsolódó, talajfelszínen hagyott növényi maradványok felszíni lefolyást szűrő hatása is egyértelműen tetten érhető, ahogy arról már Alliaume et al. (2014) is beszámolt. A legmagasabb különbséget a magágy állapotú talaj esetében tapasztaltuk mely feltehetően csak a relatíve magas erodálhatóság értékekből adódik.



20. ábra A mesterséges esőztetések okozta talajvesztés értékek a felszíni lefolyás mennyiségének (V) és a lejtés meredekségének (S) függvényében. A 9. egyenlet alapján a mért pontokra illesztett egyenes meredeksége a talaj erodálhatóságát számszerűsíti. Kímélő művelés (a), szántás alapú művelés (b).

4.2.3. A változó agrotechnika hatása a vízmegőrzésre és talajpusztulásra a természetes csapadékok alapján

A vizsgált időszakban kilenc olyan természetes csapadékesemény történt mely legalább egy parcelláról felszíni lefolyás okozott (13. táblázat). Általánosságban a kímélő művelésű parcellákról kevesebb felszíni lefolyást és kisebb mennyiségű talajvesztést mértünk, mint a szántáson alapuló talajművelésű parcellák esetében.

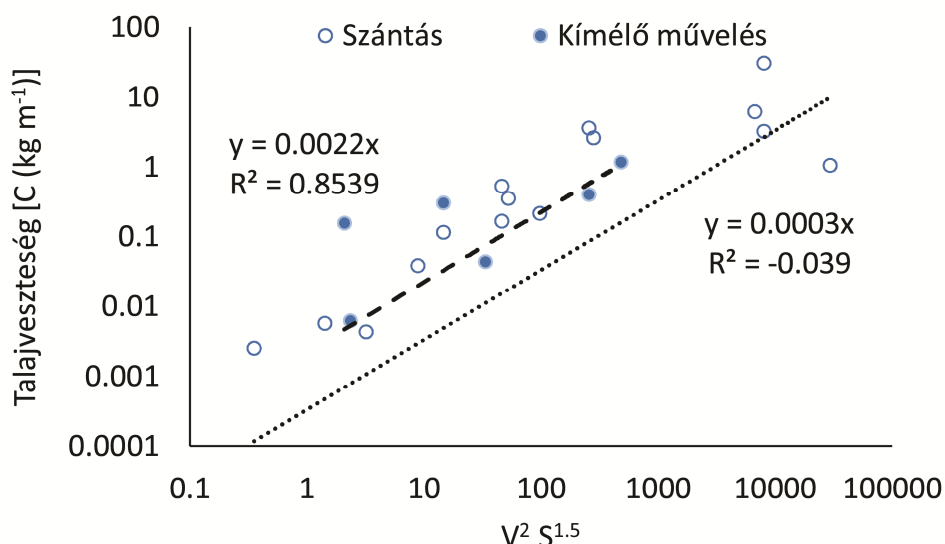
Ezekben a tábla léptékű adatokban is megjelenik a kímélő művelés magasabb átlagos talajba szivárgás értéke, habár a pillanatnyi, egyedi lefolyás értékek nagyban függenek a csapadékesemény és a talaj tulajdonságaitól valamint a felszíni fedettségtől. Jellemző, hogy a kímélő művelésű parcellák egy nagyságrenddel jobban tartották vissza a lehullott csapadékot a vizsgált tenyészidőszak folyamán.

13. táblázat Csapadék, felszíni lefolyás és talajveszteség adatok az 1200 m² –es, tábla léptékű parcellákról a Szentgyörgyvári Kísérlet Állomáson, 2016-ban. I₃₀ a legmagasabb fél órás csapadék intenzitás a csapadékeseményen belül, CT: kímélő művelés, PT: szántás alapú művelés

Időpont	(hónap.nap.)		3. 4.	6. 6.	6. 16.	6. 20.	7. 14.	7. 18.	8. 6.	8. 16.	1027..	Sum.
Csapadék	mennyiség	mm	17.2	38.8	10.0	9.4	58.6	9.8	35.0	20.0	36.4	
	I ₃₀	mm h ⁻¹	2.4	28.2	8.8	4.4	22.2	9.6	12.2	12.8	6.2	
	időtartam	h	14.0	6.7	5.5	7.8	11.1	0.7	8.9	2.7	7.83	
Felszíni lefolyás (mm)	CT	parc1		1.57	0.142		0.567	0.003				2.282
		parc2		2.16	0.375		0.150					2.685
	PT	parc1	0.058	8.02	1.571	0.292	16.796	0.117	0.375	0.292		27.521
		parc2		8.77	1.642	0.967	8.767	0.667	0.713	0.667	0.175	22.368
Talaj- veszteség (t ha ⁻¹)	CT	parc1		0.08	0.031		0.009					0.120
		parc2		0.23	0.061		0.001					0.292
	PT	parc1	0.001	1.23	0.720	0.008	0.208	0.001	0.023	0.008		2.199
		parc2		6.08	0.512	0.043	0.637	0.106	0.069	0.033	0.001	7.481
Hordalék koncent- ráció (g L ⁻¹)	CT	parc1		5.1	21.9		1.6					
		parc2		10.7	16.3		0.7					
	PT	parc1	1.7	15.4	46.0	2.8	1.2	0.9	6.2	2.8		
		parc2		69.6	31.3	4.5	7.3	16.0	9.7	5.0	0.6	

A talaj erodálhatósági értékét ebben a területi léptékben is meghatároztuk a PESERA modell segítségével (21. ábra). A kímélő művelés adataiból számított éves erodálhatóság érték alacsonyabbnak adódott mint a parcella léptékben végzett vizsgálatok legalacsonyabb értéke (takarónövénnyel fedett talajállapotban) egy elfogadható illeszkedés mellett. Ez utóbbi feltehetően annak köszönhető, hogy az összes talajveszteséget okozó csapadék azonos talajkörülmények között (fejlett kukorica állomány) történt (13. táblázat). Ez arra utalhat, hogy magas növényzeti fedettség és a kímélő talajművelés mellett a nettó talajveszteség a felszínen lefolyó víz függvénye és – legalábbis a vizsgált léptékeken belül – független a léptéktől tekintve, hogy az esőztetés eredményeként is ezt az erodálhatóság értéket mértük az említett körülmények között.

Másrészt a szántás alapú parcellákon néhány csapadékesemény extrém mennyiségű talajt erodált, miáltal a mért pontokra nem tudtunk elfogadható függvényt illeszteni (21. ábra). Ez megerősíti Stroosnijder (2005) kijelentését mi szerint az erózió kutatás egyik legnagyobb feladata a léptékek közötti váltás szabatos megoldása. Az esőztetett léptékkel szemben, tábla léptékben a hevesebb csapadékok hatására barázdák bevégyódását is megfigyeltük a szántott területen melyek hatására az adott mennyiségű felszíni lefolyás sokszoros mennyiségű talajt képes mozgatni jelentősen megnövelve ezzel a hordalék koncentrációt (Porto et al., 2014). Ebből fakadóan a szántott talajon a vizsgált időszak alapján az egységes erodálhatósági érték becslése nem volt lehetséges.



21. ábra Tábla léptékű talajveszteség és felszíni lefolyás, illetve az általuk meghatározott erodálhatóság (az illesztett egyenes meredeksége) értékek a 2016-ban hullott természetes csapadékok hatására.

Mind az USLE, mind a MUSLE modell figyelembe veszi a növényzeti fedettséget és agrotechnikát (C tényező), illetve a talajvédelmi intézkedések hatását (P tényező) a várható talajveszteség értékek meghatározásánál (Williams, 1975; Wischmeier et al., 1978). A modellek által használt C és P tényezők közelítő értékeinek meghatározását alapvetően tapasztalati úton végezték, különböző növényvel fedett, talajművelési rendszerrel művelt, ill. eltérő talajvédelmi beavatkozásokon átesett parcellákról származó talajveszteség adatok összehasonlításával. Ezek az adatok jól használhatóak nagyobb területi léptékben, de nem elég pontosak ahhoz, hogy alkalmazásukkal esetünkben becsülni tudjuk a talaj erodálhatóság értékét. Másrészt, ha a mesterséges esőztetéssel meghatározott erodálhatósági tényezőt alkalmazzuk, az USLE modell alapján, a tábla léptékű talajveszteség értékek ismeretében becsülni tudjuk a C és P tényezők értékeit. A tenyésztidőszakra vetített értékeket figyelembe véve a szántás alapú művelésnél (feltételezve, hogy nem volt talajvédelmi beavatkozás) a C tényező értéke 0,39-nek adódott ami összhangban van az adatbázisokban található értékekkel. Ha ezt a C értéket használjuk és talajvédelmi beavatkozásnak tekintjük a kímélő művelés egészét akkor, tekintve, hogy ez a szántás alapú művelés 7%-ára csökkentette a talajveszteséget 0,07 értéket jelent a P tényezőre. Ez a mértékű csökkenés egybevág Vogel et al. (2016) adataival, aki a kímélő művelést találta a leghatékonyabb talajvédelmi beavatkozásnak a gyepesített vízlevezető sávok és a szintvonal mentén kialakított puffer sávok kukorica kultúrában összehasonlításában. A konkrét érték meghatározásának nehézségét bizonyítja, hogy Panagos et al. (2015) Európa léptékben csak a rakott kőfalak, a gyepesített vízlevezetők és a szintvonalas művelés talajvédő hatásait tudta számszerűsíteni mert a kímélő művelés esetében ez nem volt lehetséges. E hatás meglehetősen összetett, hiszen a kímélő művelés fentebb is közölt talajveszteséget csökkentő hatása nem csak P tényező változásában, hanem az erodálhatósági tényező változásában (jobb talajszerkezet, nagyobb beszivárgás) is megjelenik.

4.3. Az eltérő talajművelési rendszerek hatása a talaj egészségére különös tekintettel a szervesanyag-tartalomra és összetételre mezősségi dinamikájú talajon

4.3.1. A teljes talaj főbb tulajdonságai az eltérő művelésmódok alatt

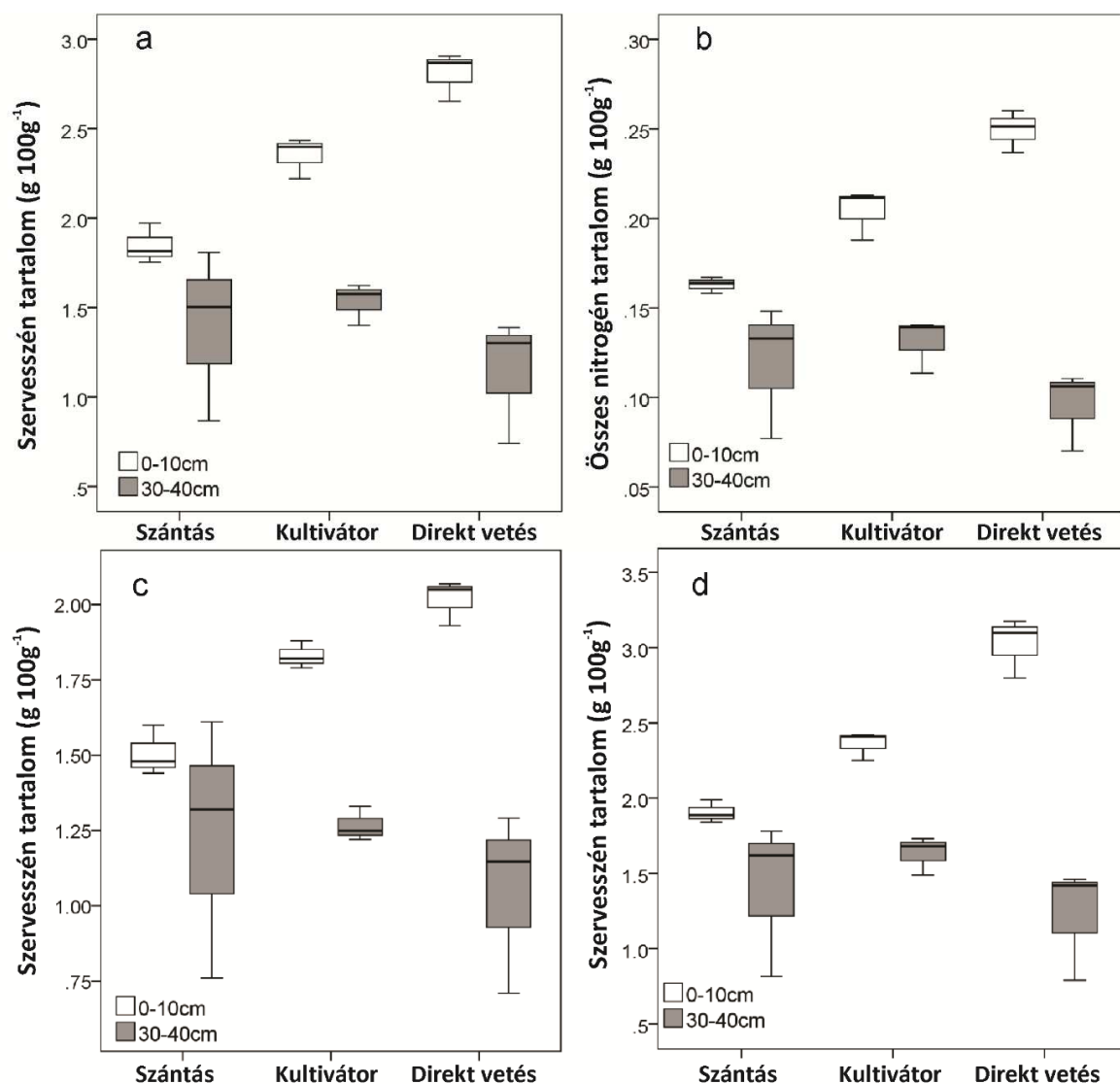
A talaj szervesszén és összes nitrogén tartalma magasabb volt a 0–10 cm rétegben mint az altalajban és a direktvetés > mély kultivátorozás > szántás sorrendben szignifikánsan ($p>0,05$) különbözött egymástól (14. táblázat). A 30–40 cm rétegben nem találtunk különbséget a művelésmódok között sem a szervesszén sem az összes nitrogén tekintetében (22a-b. ábra). A teljes talajban mért szén nitrogén arány ugyancsak egyformának adódott a művelésmódok és a mélység vonatkozásában.

14. táblázat Talaj szervesszén tartalom, térfogattömeg és szervesszén tőke eredmények, valamint a szervesanyag-frakciók megoszlása Józsefmajorban eltérő művelésmódok és talajréteg mélységek esetén.

SOC: talaj szervesszén; DV: direkt vetés; MK: mélykultivátoros művelés, Sz: szántás; POM: szerves törmelék; átlag $\pm$ szórás.

		SOC tartalom	Térf. tömeg	SOC tőke	Aggregá tumok ($>63\mu$)	POM	Finom frakció ($<63\mu$)	WSA ($>250\mu$)
	Mélység cm	%	$g\ cm^{-3}$	$t\ ha^{-1}\ 10\ cm^{-1}$	%	%	%	%
DV	0–10	2,81 $\pm$ 0,14 ^a	1,23 $\pm$ 0,06 ^a	2,89	53,7 $\pm$ 4,9	1,8 $\pm$ 0,7	44,5 $\pm$ 4,4	53,4 $\pm$ 3,4 ^{a*}
	30–40	1,14 $\pm$ 0,35 ^d	1,53 $\pm$ 0,03 ^d	2,35	49,2 $\pm$ 10,6	0,1 $\pm$ 0,0	50,7 $\pm$ 10,7	61,4 $\pm$ 5,9 ^b
MK	0–10	2,35 $\pm$ 0,11 ^b	1,12 $\pm$ 0,07 ^b	3,14	65,0 $\pm$ 3,2	0,8 $\pm$ 0,2	34,2 $\pm$ 3,2	67,6 $\pm$ 4,0 ^c
	30–40	1,53 $\pm$ 0,12 ^d	1,58 $\pm$ 0,08 ^d	1,81	71,4 $\pm$ 4,3	0,1 $\pm$ 0,0	28,5 $\pm$ 4,3	65,2 $\pm$ 7,5 ^b
Sz	0–10	1,85 $\pm$ 0,11 ^c	1,25 $\pm$ 0,04 ^b	2,31	70,4 $\pm$ 3,0	0,3 $\pm$ 0,2	29,2 $\pm$ 3,1	75,1 $\pm$ 2,1 ^d
	30–40	1,39 $\pm$ 0,48 ^d	1,37 $\pm$ 0,10 ^c	1,91	56,1 $\pm$ 7,4	0,7 $\pm$ 0,7	43,3 $\pm$ 6,7	61,8 $\pm$ 5,6 ^b

* Az eltérő betűk szignifikáns különbséget jelölnek a 95% konfidencia szinten.



22. ábra A teljes talaj szervesszén (a) és összes nitrogén (b) tartalmának valamint az ásványi fázishoz kötött, stabil szervesanyag-készlet (c) és az aggregátumokban tárolt, mobil szervesanyag-készlet (d) szervesszén tartalmának alakulása különböző művelésmódok alatt a felszíni és altalaj rétegekben.

A legmagasabb szervesszén tőkét a direktvetés 0–10 cm mély rétegében mértük melyet a szervesszén koncentráció alakulásához hasonlóan, a mély kultivátorozás, majd a szántás feltalajában mért töke követett. A 30–40 cm mély rétegek magasabb térfogattömeg értékeiből fakadóan a szervesszén töke kisebb eltérést mutatott a vizsgált mélységek között, mint azt a mért koncentrációk esetében találtuk, hasonló értékeket eredményezve a szántás feltalajában és a mélykultivátorozott terület altalajában (14. táblázat).

A művelésmód hatása a talaj aggregáltságra

Minden egyes vizsgált talaj esetében a stabil aggregátumok (WSA) aránya meghaladta az 50%-ot ezzel bizonyítva, hogy a talaj művelésmódtól és mélységtől függetlenül kedvező szerkezettel és következésképp jó hidrológiai tulajdonságokkal rendelkezik (Bartlová et al., 2015). Mindemellett a 0–10 cm talajrétegben az aggregátumstabilitás értékek szignifikánsan

($p > 0,05$) különböztek egymástól, a legmagasabb értéket a szántott feltalajban, a legalacsonyabbat a direktvetés feltalajában mértük, míg a mélykultivátorozott feltalaj értékei voltak középen. Az altalajban nem találtunk különbséget a művelésmódok között, mert az egyes művelésmódok alatt nagyon magas volt a stabil aggregátumok arányának szórása.

Hasonlóképpen, a szervesanyag-készletek elkülönítésére használt fizikai frakcionáció eredményeként magasabb talaj aggregáltság értékeket mértünk a kultivátorozott és szántott feltalajokban a direktvetéshez képest (14. táblázat). A szerves törmelék frakció (POM) legnagyobb arányban ($>1\%$) a direkt vetés feltalajában volt megtalálható, míg a nem forgatott, direkt vetés és mély kultivátorozás altalajában alig érte el a $0,1\%$ -ot. A szántott területen nem találtunk szignifikáns különbséget az eltérő mélységű talajrétegek szerves törmelék frakciói között, ami egyrészt utalhat a szántás intenzív mélybe keverő hatására ami még a művelésmélység alatt is éreztetheti hatását, másrészt az erős átlegevőzöttség miatt intenzív mikrobiális lebontást is indukálhat akár a mélyebb talajrétegekben is.

4.3.2. Az ásványi fázishoz kötött és az aggregátumokban tárolt szervesanyag-készletek közötti különbségek mezőiségi dinamikájú talajon

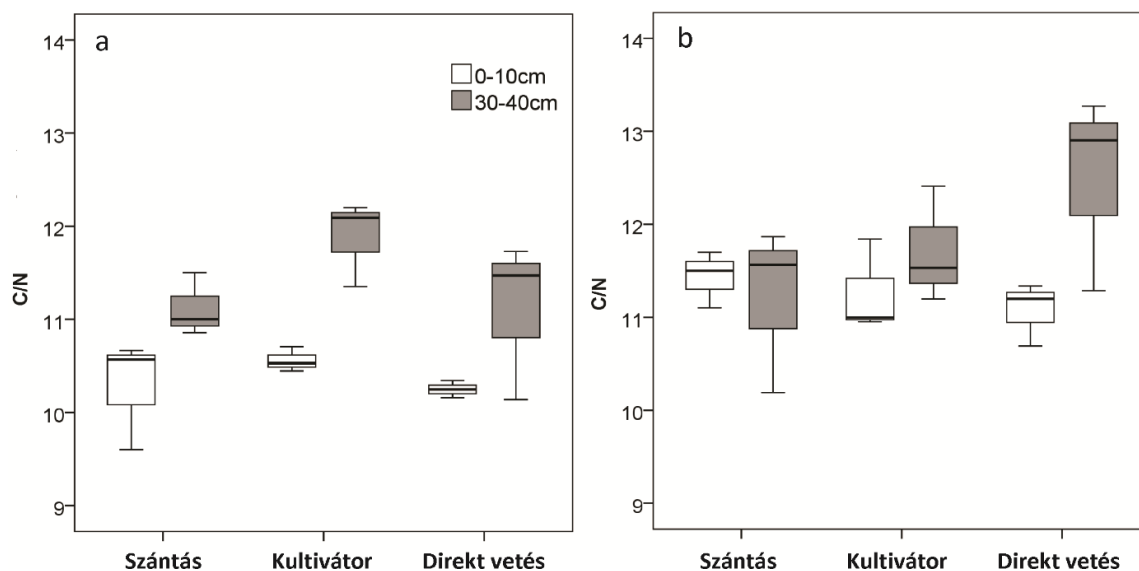
A legmagasabb szervesszén koncentrációt a szerves törmelék frakcióban mértük, ezt követte az aggregátumokban tárolt szervesszén koncentrációja, a legalacsonyabb koncentráció érték pedig az ásványi fázishoz kötődött, habár a szerves törmelék frakció csak nagyon csekély arányban volt jelen minden talajban (14. táblázat) ezért ezt a frakciót nem vizsgáltuk tovább. Mind az ásványi fázishoz kötött, mind az aggregátumokban tárolt szervesanyag-koncentrációja hasonlóan alakult az egyes művelésmódok között, mint azt a teljes talaj esetében mértük (22c-d ábra). Következésképpen, a talaj legfelső 10 cm-es rétegében, a művelés intenzitásának csökkenése miatt megnövekvő szervesanyag-tartalom nem szerves törmelék formájában került a talajba, hanem a mikrobiológiai átalakítás következtében mindkét vizsgált készlet szervesszén tartalmát egyformán növelte.

Az aggregátumokban tárolt nettó szervesszén, mely a másodlagosan, kisebb kötőerővel, ténylegesen az aggregáltság következtében tárolt szervesszén mennyisége különbözött a művelésmódok és a mélység függvényében. A szántott rétegben az összes eltárolt szervesszén 22% -a csak fizikailag kötődött az aggregátumok belső felületein. A szántás altalajában ez az érték csak 12% -nak adódott. A mélykultivátoros művelés, a szántáshoz képest nem változtatta meg a feltalajban az aggregátumokban ténylegesen fizikai kötéssel tárolt szerves anyag mennyiségét, azonban az altalajban 24% -ra növelte azt. A művelés teljes elhagyása a legfelső talajrétegben 36% -ra növelte az aggregátumok nettó szervesanyag-tartalmát de ezzel párhuzamosan az altalajban mért értéket 15% -ra csökkentette.

4.3.3. A szerves anyag összetételének változásai eltérő művelésmódok és raktárak között mezőiségi dinamikájú talajon

Az ásványi fázishoz kötött szerves anyag szén-nitrogén aránya a $9,9$ - $13,6$ intervallumban változott, az alacsonyabb értékeket a feltalajban mértük, az altalajban magasabbak voltak az arányok ($p < 0,05$). A művelésmódok szén-nitrogén arányai között azonban nem találtunk különbséget (23a ábra). Az aggregátumokban tárolt szerves anyag

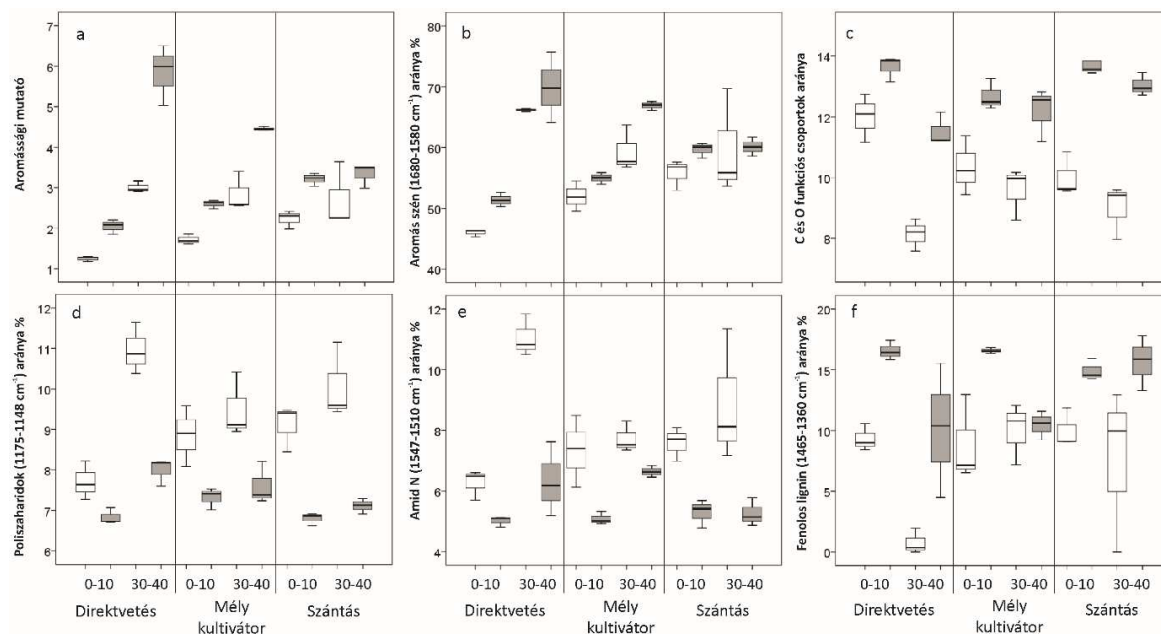
szén-nitrogén aránya sokkal kevésbé volt diverz, szinte homogénnek bizonyult, így nem is találtunk különbséget sem a mélység sem a művelésmódok alapján. Mindemellett az aggregátumok szerves anyagában mért szén-nitrogén arányok a feltalajban magasabbak voltak, mint ugyanazon talaj ásványi fázisához kötött szerves anyaga esetében (23b ábra). Ugyan ezeket a tendenciákat találtuk a direktvetés altalajában is, míg a művelt területek altalajában nem volt különbség az eltérő szervesanyag-készletek között (23b ábra).



23. ábra Az ásványi fázishoz kötött (a) és az aggregátumokban tárolt szerves anyag (b) szén-nitrogén arányának (C/N) megoszlása a vizsgált művelésmódok alatt és mélységekben.

A legtöbb infravörös spektroszkópiával közelített szerves összetevő arányai tekintetében nem találtunk különbséget az eltérő mélységű talajrétegek és művelésmódok között, azonban a szervesanyag-készletek ebből a szempontból is különböztek. Kivételként az aromás alkotókhoz köthető szerves anyag tulajdonságokat (az aromás alkotók aránya és az aromassági mutató) kell kiemelni, melyek eltérő értékeket mutattak az al- illetve feltalajban a csökkenő intenzitású talajművelés hatására (24a-b ábra). Az aromás alkotók aránya csökkent a feltalajban és növekedett az altalajban mindkét szervesanyag-készlet esetében. A direktvetésű területen továbbá az aromassági mutató szignifikánsan alacsonyabbnak adódott az aggregátumokban tárolt szerves anyag esetében mint az ásványi fázishoz kötött raktárnál. Az intenzív talajművelés, úgy tűnik, homogenizálta az aromassági mutató értékeit a talajrétegek és raktárak tekintetében, míg a csökkenő művelés intenzitással párhuzamosan csökkent. Ezzel szemben a szén-oxigén funkciós csoport aránya és a fenolos lignin relatív részesedése a szerves anyagból magasabb volt az ásványi fázishoz kötött szerves anyagban mint az aggregátumokban tároltak esetében függetlenül a művelésmódtól és a vizsgált réteg mélységétől. Ezzel szemben, a poliszacharidok és éterek (24d ábra) valamint az amid nitrogén aránya magasabb volt az aggregátumokban tárolt szerves anyagban mint az ásványi fázishoz kötött szerves anyag esetében megint csak függetlenül a vizsgált réteg mélységétől és a művelésmódtól. A legmagasabb értékeket a direktvetés altalajában az aggregátumokban tárolt szerves anyag esetében találtuk, ami arra utal, hogy

ez a szerves anyag tartalmazza arányaiban a legtöbb könnyen lebontható összetevőt vagyis ez a legsérülékenyebb.



24. ábra A talaj szerves anyag összetételének változásai a megváltozó talajművelés hatására eltérő szervesanyag-készletekben és mélységekben. A fehér dobozok az aggregátumokba zárt, a szürke dobozok az ásványi alkotók által direktben megkötött szerves anyagot szemléltetik

4.3.4. Az eltérő művelésmódok eredményeinek értékelése az irodalmi adatok tükrében

A művelés intenzitásának csökkenésével járó szervesanyag-tartalom növekedés

A csökkentett intenzitású talajművelés megnövelte mind a szervesszén, mind az összes nitrogén mennyiségét a feltalajban azonban nem okozott változást az altalajban ami alátámasztja a csökkentett művelés okozta rétegzettség kialakulásának elméletét (Kushwa et al., 2016). Eszerint a talajfelszínen hagyott nagymennyiségű szár maradvány sokkal inkább hatott a talaj szerves anyagának növekedésére, mint a művelés csökkentése által okozott korlátozott mikrobiális lebontás, ahogy arról már Paustian et al. (1997) is beszámolt. Ennek némileg ellentmond, hogy Gelybó et al. (2022) ugyanezen tartamkísérlet parcelláinak vizsgálata alapján magasabb talajnedvesség és talajlégzés (CO₂ kibocsátás) értékeket írt le a direktvetés alatt mint a szántott területen ezzel utalva az intenzívebb szerves anyag lebontásra mely a nem művelt területen adódott. E vizsgálat során szintén magasabb szervesszén koncentrációt találtak a direktvetésű talajokon, mint a szántott területen ezzel bizonyítva, hogy az intenzívebb mikrobiológiai lebontás és talajlégzés nem okoz szükségszerűen alacsonyabb szervesanyag-koncentrációt, sokkal inkább nagyobb intenzitású szerves anyag átalakulást. A szervesszén tartalom növekedésével párhuzamosan a talaj összes nitrogéntartalma is közel azonos arányban növekedett ezért a teljes feltalaj szén-nitrogén aránya nem változott a művelés intenzitásának csökkenésével. Ez bizonyíték arra, hogy esetünkben a csökkentett művelés okozta szervesanyag-növekmény nem nyers növényi maradványokból áll mint ahogy arról Cates et al. (2016) számolt be, hanem már átalakult, alacsony szén-nitrogén arányú szerves anyag.

Sok vizsgálat számol be a tényről miszerint a csökkentett intenzitású művelés hatására a talajban eltárolódó többlet szervesszén elsősorban friss szerves törmelék, vagy aggregátumokba zárt szerves anyag formájában jelenik meg (Laudicina et al., 2015; Motta et al., 2007) ezért e növekményt nagyon sérülékenynek vélték és nem vették figyelembe a talaj hosszú távú széntárolása szempontjából. Ezzel szemben az általunk nyert eredmények egyértelmű növekedést mutatnak mind az ásványi fázishoz kötött, mind az aggregátumokban tárolt szervesszén mennyiségében a direktvetés és a mélykultivátorozott terület feltalajában és a szerves-törmelék mennyisége csak a direktvetés feltalajában nőtt, de itt sem számottevő mértékben (22. ábra). A hatékony és hosszú távú szervesanyag-lekötés megvalósulásában feltehetően szerepe van a talaj CaCO_3 tartalmának is. Ennek eredményeként tizenhét év csökkentett intenzitású talajművelés és mulcsolás elégnak bizonyult, hogy érdemi növekedést okozzon a talaj stabil szén (ásványi fázishoz kötött) készletében a mélykultivátorozás és még inkább a direkt vetésű karbonátos talajon (Jakab et al., 2023).

Az aggregátumokban ténylegesen eltárolt többlet szerves anyag mennyisége a mélykultivátoros művelés altalajában nőtt a legnagyobb mértékben. Ez a növekmény feltehetően a művelt rétegből történő intenzív lefelé szivárgás eredménye lehet melynek során a víz jelentős mennyiségű oldott szerves anyagot szállít az alsóbb talajszintek irányába ahol a szerves anyag az aggregátumok belsejében fizikai kötések révén stabilizálódhat. Az altalajba szivárgással szállított szerves anyag elviekben akár közvetlenül, kémiai kötéssel is kötődhetne az ásványos fázishoz, ahogy arról már Kaiser és Kalbitz (2012) is beszámolt, habár a két stabilizációs mechanizmus közötti megoszlás miertje nem teljesen tisztázott, feltehetően meghatározó szerepe lehet az agyag frakció ásványos összetételének. Az intenzív mélybeszivárgás a mélykultivátor alkalmazásához kapcsolódik, tekintve, hogy másik művelésmód altalajában nem tapasztaltuk az aggregátumokban tényleges többletként eltárolt szerves anyag mennyiségének növekedését. A mélykultivátoros művelés altalajában mért magas, aggregátumok által tárolt szervesszén mennyiség és ezzel párhuzamosan az aggregátumok magas aránya ebben a rétegben (22. ábra) arra utal, hogy habár a szénmennyiség „csak” fizikailag kötött az aggregátumok belső felületein mégis hatékony és hosszú távú stabilizációs mechanizmus. A mélykultivátoros művelés feltalajában, az aggregátumokban tárolt szervesszén mennyiségének tekintetében nem tapasztaltunk változást a szántott talajréteghez képest. Habár az aggregátság egyik leggyakrabban említett kiváltója és fenntartója a szervesanyag-tartalom, Józsefmajorban nem találtunk összefüggést a talajok szervesanyag-tartalma és aggregátum stabilitása között, mint ahogy az aggregátumok szervesanyag-tartalma sem hatott stabilitásukra. A stabil aggregátumok aránya fordítottan volt arányos a bennük tárolt szerves anyag mennyiségével ahogy arról már Shahbaz et al. (2017) is közölt adatokat. Munkájukban azt is megállapították, hogy a földfelszín alatti (gyökerek általi) szervesanyag-pótlás kevésbé csökkentette az aggregátumok belsejébe zárt szerves anyag mennyiségét, mint a felszín feletti mulcsolás a feltalajban. Ez a kijelentés egybevág az általunk mért aggregátumokban tárolt nettó szerves anyag eredményekkel habár mi Józsefmajorban határozott növekedést találtunk az aggregátumok belsejébe zárt szerves anyag tekintetében az altalajban.

A legfelső talajrétegben mind a teljes, mind az ásványi fázishoz kötött, mind az aggregátumokban tárolt és az aggregátumokban ténylegesen többletként tárolt szervesszén tartalom a direktvetés alatt volt a legmagasabb, ami még a vizsgált szubhumid körülmények között is bizonyítja ennek a művelésmódnak a kiemelt szerepét a talajvédelemben.

A szerves anyag összetételének változásai a raktárak, mélység és művelésmódok függvényében

Az aromassági mutató hagyományosan a talaj szerves anyag átalakultsági fokának egyik mérőszáma (Baldock et al., 1992), habár, más megközelítés szerint, a szerves anyag stabilizációs mechanizmusok (pl. fizikai vagy kémiai kötődés az ásványi fázishoz) szelektivitását vagy preferenciáját is számszerűsítheti ha a talajba nagyobb mennyiségű szerves anyagot juttatunk (Lützow et al., 2006). Az aromasság általános érvényű csökkenése a művelés intenzitásának csökkenésével, ahogy arról már Gao et al. (2021) is beszámolt, Józsefmajorban csak az ásványi fázishoz kötött szerves anyag esetében, az altalajban volt kimutatható (24a-b ábra). Véleményünk szerint az eltérést a Józsefmajorban tapasztalt kiemelkedően magas aggregátum stabilitás és az aggregátumokban megkötött szerves anyag aránya okozhatja. A szántás esetében azt tapasztaltuk, hogy az intenzív forgatás homogenizálja a talaj aromasságát és ez az egységes aromassági érték még a művelésmélység alatti rétegben is megjelenik. A művelés intenzitásának csökkenése határozott elkülönülést okozott a feltalaj és az altalaj között az aromassági mutató tekintetében, csökkenő értékekkel a talaj felszínén és növekvőkkel az altalajban. Ez az elkülönülés megegyezik a Szentgyörgyváron, egy agyagbemosódásos erdőtalajon mért tendenciával és szintén egybevághat Ding et al. (2002) eredményeivel. Ez a tendencia arra utalhat, hogy felszínről nagyobb mértékben a talajba kerülő szerves anyag alifás alkotóelemei már a feltalajban stabilizálódnak mind az ásványos fázishoz történő közvetlen kémiai kötődés, mind az aggregátumok belsejében történő fizikai védelem által, míg az aromás alkotórészek a talaj mélyebb rétegeiben dúsulhatnak fel. Hagyományosan, az altalaj aromásabb és a lebontásnak jobban ellenálló szervesanyag-készlete a gyökértömegből származtatott (Klotzbücher et al., 2016), ugyanakkor jelentős lehet az aromás alkotórészek felszíni talajrétegből történő szelektív lemosódása is, ahogy azt Wang et al. (2018) is kimutatta.

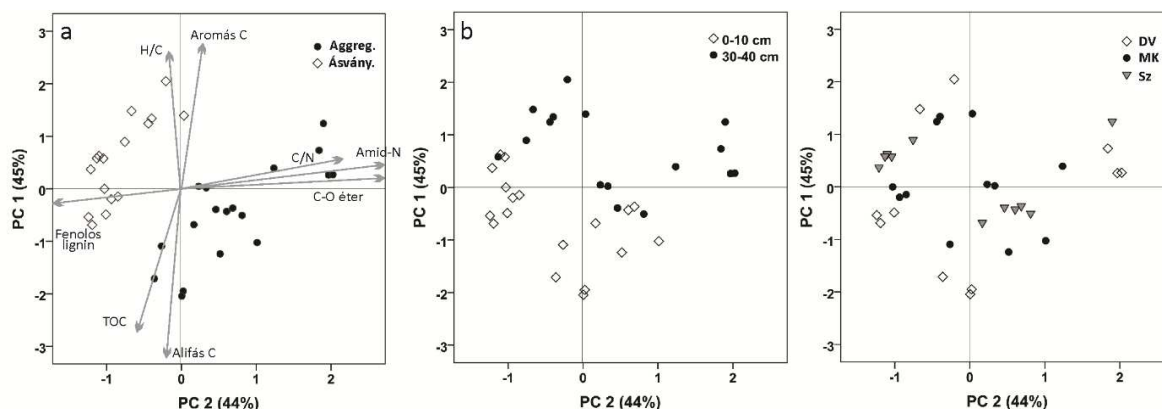
A feltalaj aggregátumaiban mért C/N arány magasabb volt, mint e réteg ásványos fázishoz kötött szerves anyagában (23a-b ábra) alátámasztva az általános képet miszerint az összetettebb, jobban átalakult szerves alkotók nagyobb arányban stabilizálódnak direkt módon az ásványi fázishoz kötődve. A már sokak által bemutatott jelenséget, miszerint az aggregátumok belsejében fizikailag tárolt szerves anyag kevésbé aromás és stabilabb szerkezetű (Malou et al., 2020; Ndzelu et al., 2021), mint az ásványi fázishoz kötött szerves anyag (Ding et al., 2002; Yeasmin et al., 2020) a spektroszkópiai eredmények szintén alátámasztották, hiszen magasabb poliszaharid és C/O funkcionális csoport és alacsonyabb fenolos lignin arányok adódtak az aggregátumokban. Mindazonáltal ezt a trendet a C/N arány értékei nem támasztották alá, ugyanakkor Ding et al. (2002) az általunk mérttel megegyező C/N értékekről számolt be az általa vizsgált szántott és csökkentett intenzitással művelt területekről. Ezen túlmenően a H/C arányban nem találtunk tendenciózus különbséget a vizsgált művelésmódok között és ez a mutató függetlennek adódott a többi vizsgált szerves anyag összetétel mutatótól.

A különálló függő változók úgymint mélység, szervesanyag-készlet és művelési rendszer által okozott eltéréseket a talaj szerves anyagának összetételére többváltozós variancia analízis módszerével is megvizsgáltuk, hogy feltárjuk az együttes hatásokat is (15. táblázat).

15. táblázat A mélység (0—10 cm vs. 30—40 cm), szervesanyag-készlet (aggregátumokban tárolt vs. ásványi fázishoz kötött) és művelésmód (direkt vetés, mélykultivátorozás, szántás) egyedi és kombinált hatása a talaj szervesszén és nitrogén tartalmára valamint szerves anyag összetételére TOC: szervesszén tartalom; TN: összes nitrogén; C/N> szén nitrogén arány; H/C: hidrogén szén arány; C/O: szén oxigén funkciók csoport arány

Függő változó:	TOC		TN		C/N		H/C		Éter		Fenolos lignin		Amid N		C/O		Aromaticitás	
	F	Sig.	F	Sig.	F	Sig.	F	Sig.	F	Sig.	F	Sig.	F	Sig.	F	Sig.	F	Sig.
Mélység	90.6	.000	136	.000	20.6	.000	36.8	.000	35.9	.000	12.9	.001	27.3	.000	41.9	.000	149	.000
Raktár	27.3	.000	16.7	.000	14.4	.001	28.0	.000	129	.000	39.3	.000	72.9	.000	165	.000	106	.000
Művelés	5.30	.012	5.98	.008	.206	.815	.278	.760	.111	.895	3.05	.066	.980	.390	.367	.697	.627	.543
Mélység × készlet	5.78	.024	4.09	.055	.590	.450	.303	.588	7.90	.010	.110	.743	4.12	.054	2.98	.097	10.2	.004
Mélység × Művelés	12.4	.000	17.6	.000	1.27	.298	3.68	.042	9.09	.001	4.00	.032	6.50	.006	10.7	.000	32.8	.000
Készlet × Művelés	1.08	.356	1.43	.259	.890	.424	.409	.669	2.30	.122	1.49	.246	2.15	.139	4.06	.030	5.60	.010
Mélység × Készlet × Művelés	1.60	.222	1.95	.165	.340	.715	.653	.530	2.17	.136	2.71	.087	5.06	.015	1.11	.347	7.68	.003

Az összes vizsgált szerves anyag tulajdonság csak a mélységek és raktárak tekintetében különbözött, a művelésmódnak nem volt kimutatható hatása a szerves anyag összetételére. A mélység szerinti szegregáció – többek között – a felszín feletti (szár, levél) és a felszín alatti (gyökér) biomasza eltérő kémiai összetételéből, és következésképp ezek eltérő lebomlási módjából fakadhat (Abiven et al., 2005). A területen alkalmazott vetésváltás (3. táblázat) miatt a talajba kerülő növényi maradványok kémiai összetétele évente jelentősen változik (pl. pillangósok vs. kukorica) ami sokkal nagyobb varianciát okoz, mint a művelésmódok hatása. Ennek ellenére, Zhao et al. (2012) eredményei szerint a talaj szerves anyagának molekula szerkezete sokkal összetettebb volt a direktvetett területen és kevésbé komplexnek adódott a szántott feltalajban egy Mollisol esetében, mely különbséget a szerző a talajművelés következményeként írt le. Habár a művelésmód Józsefmajorban, önmagában nem okozott szignifikáns különbséget a talaj szerves anyagának összetételében, a vizsgált mélységgel kombinálva már hatékonyan bizonyult a szervesszén- és nitrogéntartalom valamint a szerves anyag összetétel szabályozásában. A mélység alapvetően határozhatja meg a szerves anyaghoz köthető tulajdonságokat mert a szerves anyag gyakran mutat szintenként változó eloszlást (Kay és Vandenbygaart, 2002), elsősorban a felszínről történő alajba jutás és az oxigén jelenlétének változása miatt. Az általunk vizsgált, szerves anyag összetételét leíró mutatók közül a C/N arány volt a legkevésbé és az aromasság a leginkább érzékeny tulajdonság a változások számszerűsítésében. Ahhoz, hogy az összefüggéseket egy további megközelítés alapján is elemezhessük, az eredményeket főkomponens analízisnek is alávetettük (25. ábra).



25. ábra A talaj szerves anyag összetételének főkomponens analízis eredményei a különböző készletek (a), mélység (b), és művelésmód (c) felbontásában. Aggreg: aggregátumokban tárolt szerves anyag; Ásvány: ásványi fázishoz kötött szerves anyag; DV: direktvetés; MK: mélykultivátoros művelés; Sz: szántás

Az analízis alapján az elemi összetétel vizsgálatával és az infravörös spektroszkópia alkalmazásával nyert eredmények összhangban vannak egymással, ahogy arról már Haberhauer et al. (1998) is beszámolt és az összképből egyedül a C/N arány lóg ki. Az első főkomponens az összes variancia 45%-át magyarázta melyben az összes szerveszén tartalom, az aromás és a H/C arány mint változók szerepeltek a legmagasabb eigenvektor (–0,925, 0,957, és 0,937) értékekkel. Következésképp, az első főkomponens a szerveszén tartalom és a kapcsolódó szerves anyag összetétel alapján leginkább mélység szerinti különválást mutat, magasabb szerveszén tartalmat és nagyobb aromás tömeget a feltalajban és alacsonyabb szerveszén mennyiség mellett inkább alifás összetevőket az altalajban (25. ábra). Ez természetesen, egybecseng jelen munka korábbi megállapításaival és alátámasztja a feltalajból történő szelektív szerves anyag lefelé szivárgás elméletét (Kaiser és Kalbitz, 2012) minek következtében az altalajban relatíve feldúsulnak a mikrobiológiai lebontás számára könnyebben hozzáférhető szerves komponensek. Ezzel szemben, az amid nitrogén tartalom, a C-O funkcionális csoportok aránya, a fenolos lignin tartalom és az éter csoport aránya (0,966, –0,966, –0,937, 0,971 eigenvektor értékekkel) a második főkomponens értékeiben jelennek meg, mely további 44%-ot magyaráz az összes varianciából (25a. ábra). E második főkomponens a mintákat a szervesanyag-készletek alapján különítette el, magasabb amid nitrogén és éter csoport arányokkal az aggregátumokban tárolt szerves anyagok esetében és magasabb fenolos lignin aránnyal az ásványos fázishoz kötött, stabil szerves anyagban. Ez az összetétel jól tükrözi az irodalomban többször leírt jobban átalakult, nehezebben lebontható szerves anyag dominanciáját a talajásványok felületén és a kevésbé stabil szerves anyagot az aggregátumok belsejébe zárva (Helfrich et al., 2006).

A művelésmód azonban – a főkomponens analízis eredményei alapján – nem befolyásolta a talaj szerves anyag összetételét. Ez az eredmény ellentmond Ndzelu et al. (2021) eredményeinek melyek szerint egy savanyú Cambisol talajon az eltérő agrotechnika különbségeket okozott a talaj szerves anyag összetételében, és Malou et al. (2020) eredményeinek is, aki szintén eltéréseket talált egy homoktalaj esetében. Az első esetben a savanyú kémhatás, a második esettanulmányban pedig a talaj finom frakciójának hiánya miatt feltehetően felértékelődött az ásványos védelemmel nem rendelkező, nyers, partikuláris szerves anyag jelentősége a szerves anyag összetételében, miáltal e gyorsan változó raktár határozhatta meg az összes szerves anyag összetételét a teljes talajban

(Neufeldt et al., 2002). Ebből kifolyólag a művelésváltás hatása gyorsabban meg tudott jelenni a talaj szerves anyagában is. Józsefmajor esetében a finomfrakció ($<63\ \mu\text{m}$) magas aránya és a CaCO_3 jelenléte olyan szervesanyag-stabilizációs mechanizmusként játszhatott közre mely konzerválja a szerves anyagot így a változó körülmények okozta szerves anyag különbség az összes szervesanyag-tőke csak csekély részét érinti.

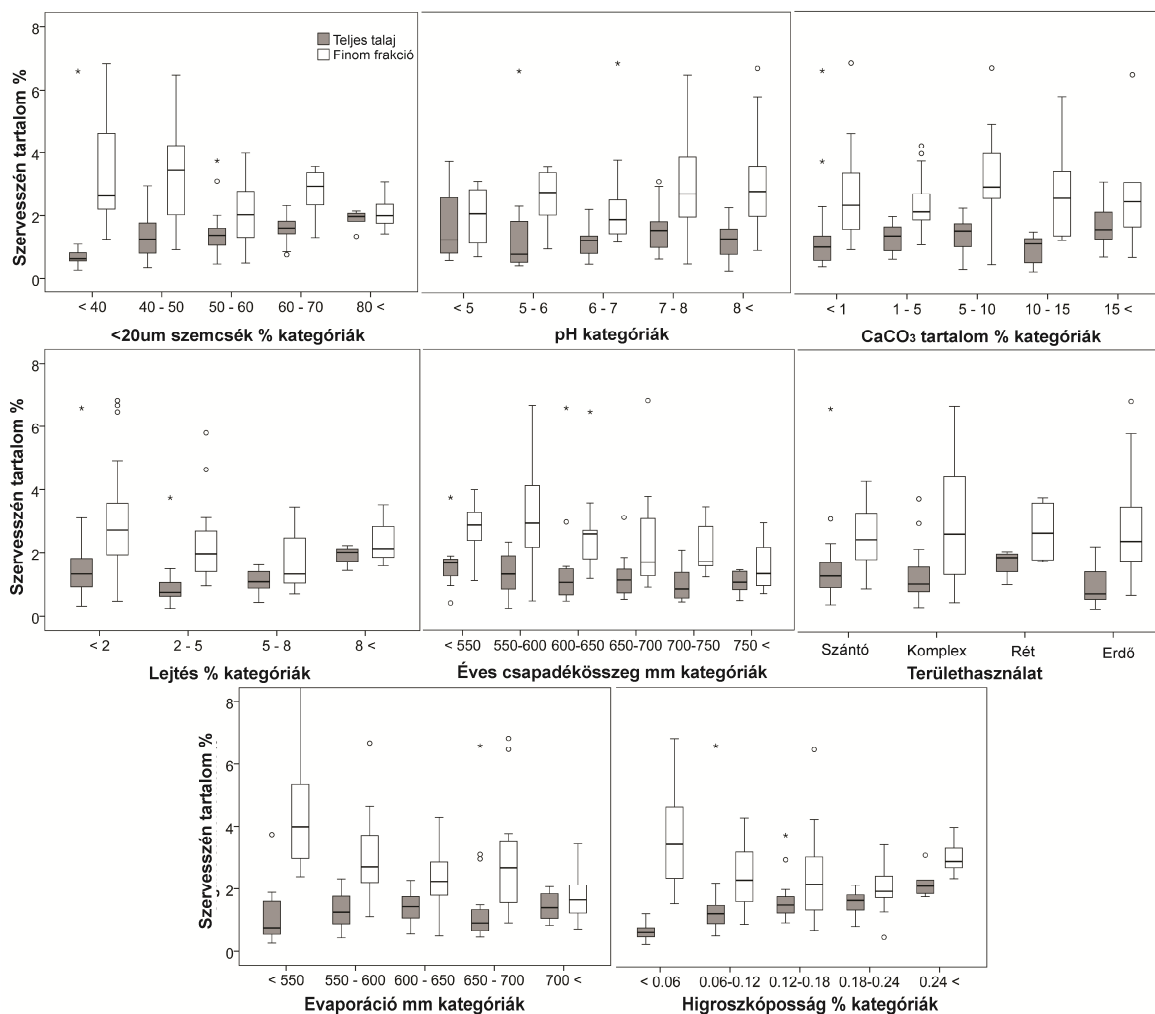
4.4. A feltalaj szervesanyag-tartalmának és összetételének változása országos léptékben

4.4.1. A szervesszén tartalom területi változékonysága Magyarország feltalajában

Az ország területét reprezentáló feltalajokban a szervesszén-tartalom széles skálán mozgott és átlagosan 1,38%-nak adódott (26. ábra). A vizsgált talajtulajdonságok és környezeti változók egyike sem magyarázta önmagában e változékonyságot de a legnagyobb befolyással a talaj finom frakciójának ($< 20\ \mu\text{m}$) aránya ($\rho=0,529$, $p > 0,01$) és a talaj fajlagos felülete ($\rho=0,704$, $p > 0,01$) voltak.

Az ásványi fázishoz kötött szervesszén tartalom szintén tág határok között (0,5–14,0%) változott és átlagosan 2,9%-nak adódott. Ez szignifikánsan magasabb érték mint amit a teljes talaj esetében mértünk ($\chi^2 = 58,3$; $p < 0,001$). Ebben a frakcióban sem találtunk direkt összefüggést a szervesszén tartalom és a vizsgált magyarázó változók között. Mitöbb, az ásványi fázishoz kötött szervesszén tartalom a teljes talaj szervesszén tartalmával sem korrelált ($\rho = 0,138$, $p = 0,20$). A legerősebb korrelációt a pH ($\rho=0,28$, $p < 0,01$) és a talaj fajlagos felülete ($\rho=-0,25$, $p < 0,05$) mutatta, ugyanakkor a finom frakció aránya sokkal kevésbé magyarázta a változékonyságot ($\rho = 0,19$; $p=0,08$).

A talaj egészének szervesszén-tartalma és a finom frakció szervesszén-tartalma leginkább alacsony fajlagos felületű homoktalajok, ill. a legalacsonyabb evaporációval rendelkező talajok esetében különbözött egymástól (26. ábra). Másrésről, a magas agyag tartalmú, ill. a magas éves csapadékösszeggel és párolgással rendelkező feltalajok a legmeredekebb lejtőkön, ill. magas CaCO_3 tartalom mellett szinte alig mutattak különbséget a finom frakció és a teljes talaj szervesszén-tartalmában. Az eltérő területhasználati módok között sem a teljes talaj (Kruskal-Wallis próba $p = 0,172$), sem a finom frakció (Kruskal-Wallis próba $p = 0,998$) esetében nem találtunk különbséget a szervesszén-tartalomban



26. ábra A vizsgált feltalajok és a feltalajok finom frakciójának (<20 μm) szervesszén-tartalom eloszlása egyes talajtulajdonságok és környezeti változók függvényében, $n=87$

4.4.2. A szervesanyag-tartalom összetételének területi változásai országos léptékben

A C/N arány kevésbé volt változatos a teljes talaj szerves anyagában (7,4–16,0, átlag = 10,5), mint az ásványi fázishoz kötött szerves anyagban (6,6–20,0, átlag = 9,3) és a két raktár csak nagyon gyengén korrelált egymással ($\rho = 0,32$; $p < 0,001$; $n = 84$). Illetve az ásványi fázishoz kötött szerves anyagban szignifikánsan alacsonyabb volt a C/N arány, mint a talaj egészében ($\chi^2 = 32,6$; $p < 0,001$). Ezzel szemben, sem az ásványi fázishoz kötött-, sem a talaj teljes szerves anyagának esetében nem találtunk különbséget a művelésmódok C/N arányai között. Szintén nem találtunk összefüggést sem a teljes talaj, sem az ásványi fázishoz kötött szerves anyag C/N aránya és a DRIFT vizsgálatok eredményei között. Nem voltak eltérések az egyes környezeti és talajtulajdonságok szerinti összehasonlítások esetében sem habár a talaj savanyúságának növekedésével a teljes talaj szerves anyagösszetételében az amidok aránya csökkent ($\rho = -0,60$; $p < 0,001$; $n = 84$). Illetve a teljes talaj szerves anyagának aromássága negatív kapcsolatot jelzett az ásványi fázishoz kötött szerves anyag mennyiségével ($\rho = -0,64$; $p < 0,001$; $n = 82$).

A teljes talaj szerves anyag összetételének átfogó elemzéséhez főkomponens analízist végeztünk (KMO = 0,65). Az eljárásban meghatározott három rotált főkomponens összesen az adatok varianciájának 87,3%-át magyarázta (16. táblázat).

16. táblázat A szervesanyaggal összefüggő tulajdonságok loading értékei a varimax rotált főkomponens analízishez

	rPC _{OM 1}	rPC _{OM 2}	rPC _{OM 3}
<i>Aromás alkotók aránya</i>	-0.845	-0.014	0.234
<i>Amidok aránya</i>	0.036	0.851	-0.312
<i>Alifás és fenolos lignin aránya</i>	0.168	-0.936	0.008
<i>Polialkoholos és éter csoportok aránya</i>	0.246	0.793	-0.414
<i>Ásványi fázishoz kötött szervesszén-tartalom</i>	0.938	-0.009	0.169
<i>Teljes talaj szervesszén tartalma</i>	0.012	-0.254	0.905
<i>Teljes talaj nitrogén tartalma</i>	0.106	-0.195	0.933
<i>Ásványi fázishoz kötött nitrogén-tartalom</i>	0.944	0.016	0.164

Az első rotált főkomponens (rPC_{OM1}) az ásványi fázis által kötött szerves anyag tulajdonságait összesíti és 40%-ot magyaráz az összes varianciából. E főkomponensben meghatározó a teljes talaj szerves anyagának aromássága azt sugallva, hogy az ásványi fázishoz kötött szerves anyag alapvetően alifás jellegű. A második rotált főkomponens (rPC_{OM2}) az infravörös spektroszkópia által becsült funkciós csoport arányok alapján írja le a szerves anyag összetételét a teljes talajban. Eszerint, a lignin becsült mennyisége fordítottan arányos az éter és az amid csoportok arányával, ezzel további 32% varianciát magyarázva. A harmadik rotált főkomponens (rPC_{OM3}) a teljes talaj szervesszén és összes nitrogén tartalmát számszerűsíti további 15%-ot magyarázva (16. táblázat). Általánosságban igaz, hogy az így nyert rotált főkomponensek egyike sem mutatott szoros korrelációt a vizsgált talajtulajdonságokkal és környezeti változókkal. A legmagasabb értéket a második rotált főkomponens és a talaj pH értékei (desztillált vizes $\rho = 0,79$, $p < 0,01$ és KCl $\rho = 0,74$, $p < 0,01$) között találtuk. Ez arra utal, hogy a pH az egyik legfontosabb talajtulajdonság amely meghatározza a szerves anyag összetételét a vizsgált mintakörön és pH tartományon belül. Mindemellett a CaCO₃ mennyisége ($\rho = -0.66$, $p < 0,01$) és az elektromos vezetőképesség ($\rho = 0,58$, $p < 0,01$) szintén közepes kapcsolatban volt a második rotált főkomponenssel, azaz a szerves anyag összetételével. A harmadik főkomponens által közelített teljes talaj szerves anyag mennyiség legerősebben a fajlagos felülettel ($\rho = 0,67$, $p < 0,01$) és a talaj térfogattömegével ($\rho = -0.68$, $p < 0.01$) állt kapcsolatban. Az ásványi fázishoz kötött szerves anyag (rPC_{OM1}) a vizsgált tulajdonságok egyikével sem mutatott erős összefüggést, a legmagasabb értéket a fajlagos felülettel való kapcsolat esetében mértük ($\rho = -0,41$, $p < 0,01$)

A környezeti- és talajváltozók dimenzió csökkentése

A vizsgált, nagyszámú környezeti- és talajváltozók információ tartalmát főkomponens analízis segítségével tömörítettük kezelhető számú változóba. A talajt leíró és a szerves anyagtól független hat változót két rotált, talajhoz kötődő főkomponensbe (rPC_t) redukáltuk (17. táblázat). A két rotált főkomponens az összes variancia 64%-át magyarázta (KMO=0.582). Az rPC_{t1} a talaj szemcseméretéhez és térfogattömegéhez kötődik és 38%-ot

magyaráz, míg a második rotált főkomponens (rPCt2) lényegében a pH változásait tükrözi, további 26%-ot magyarázva az összes varianciából.

17. táblázat A szerves anyagtól független talajtulajdonságok dimenziócsökkentésének (varimax rotált főkomponens analízis) eredményei

	rPCs1	rPCs2
pH (KCl)	-.176	.887
Karbonát tartalom	.133	.656
Térfogattömeg	-.879	.075
Elektromos vezetőképesség	.221	.686
Kationcsere kapacitás	.602	.416
Finom frakció aránya	.861	.101

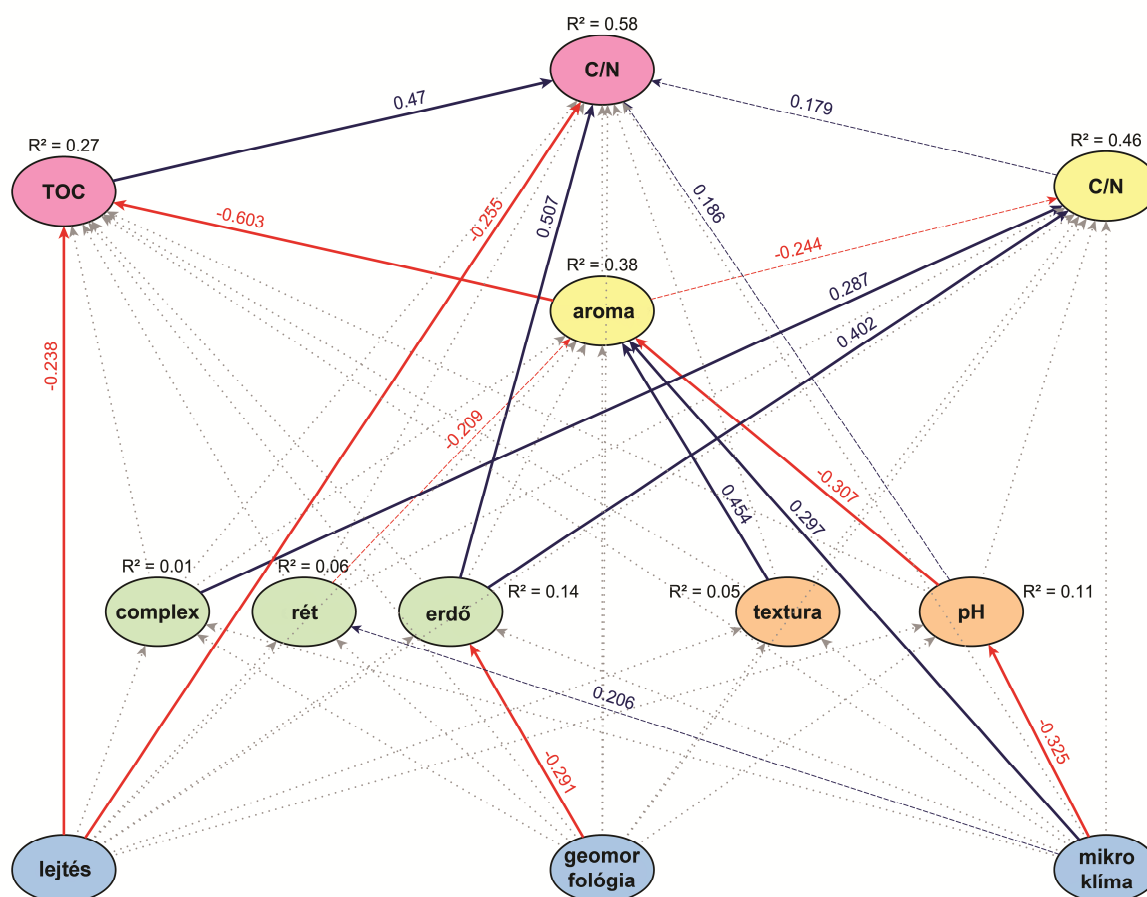
A vizsgált környezeti változók a domborzat a vízrajz és a klíma témakörében összesen 22 tulajdonságot öleltek fel melyeket három rotált főkomponensbe (rPCk) redukáltunk, ezzel 60% varianciát magyarázva (KMO=0.712). Az első rotált főkomponens a lejtő meredekségéhez kötődő tulajdonságokat összegzi és 32% varianciát magyaráz. A második rotált környezeti főkomponens (rPCk2) a geomorfológiához kötődő tulajdonságokat foglalja össze további 17%-ot magyarázva, míg a harmadik rotált főkomponens a (mikro)klimatikus viszonyokat tükrözi 11% varianciát magyarázva (18. táblázat).

18. táblázat A vizsgált környezeti változók dimenziócsökkentésének (varimax rotált főkomponens analízis) eredményei

	rPCk1	rPCk2	rPCk3	4	5	6
<i>Lejtő meredekség</i>	0,892	-0,037	0,015	0,231	-0,078	-0,192
<i>Profile_curvature</i>	0,040	0,820	0,012	-0,037	0,069	0,205
<i>Total_curvature</i>	0,375	-0,133	0,065	0,007	0,027	-0,656
<i>Multiscale_TPI</i>	-0,128	0,957	-0,023	-0,023	0,076	-0,002
<i>TPI</i>	-0,044	0,946	-0,050	-0,054	0,076	0,067
<i>TRI</i>	0,879	-0,057	0,091	0,350	-0,093	-0,166
<i>Surface_area</i>	-0,889	-0,041	0,012	-0,162	0,133	0,079
<i>MRVBF</i>	-0,289	-0,014	-0,276	-0,788	0,086	0,222
<i>MRRTF</i>	-0,263	0,149	0,034	-0,700	-0,117	0,036
<i>LS_factor</i>	0,687	-0,383	0,100	0,252	0,095	-0,112
<i>TWI</i>	-0,492	-0,429	-0,141	0,244	-0,325	0,440
<i>SAGA_WI</i>	-0,657	0,011	-0,251	-0,398	0,013	0,336
<i>Vertical_distance_to_channel_network</i>	0,121	0,346	0,215	0,691	-0,231	0,078
<i>Horizontal_distance_to_channel_network</i>	0,010	0,092	0,070	-0,120	0,218	0,724
<i>Channel_network_base_level</i>	0,461	-0,070	0,436	0,266	-0,443	-0,049
<i>Diurnal_anisotropic_heating</i>	0,675	-0,063	0,278	-0,162	-0,158	0,254
<i>Mass_balance_index</i>	-0,087	0,878	0,011	0,191	-0,069	-0,030
<i>Stream_power_index</i>	0,428	-0,468	-0,063	0,410	-0,206	0,075
<i>Precipitation_amount</i>	0,064	0,008	0,912	0,158	-0,103	-0,069
<i>Mean_temperature</i>	-0,103	0,055	-0,176	-0,026	0,919	0,126
<i>Evapotranspiration</i>	-0,220	0,196	-0,608	-0,033	0,626	0,137
<i>Evaporation</i>	0,102	0,046	0,901	0,073	-0,105	0,104

A strukturális modellezés eredményei

A pSEM szoros lineáris kapcsolatot jelzett a vizsgált változók öt szintje között (27. ábra). Az ásványi fázishoz kötött szervesszén mennyiségét csak kis mértékben határozták meg a vizsgált tulajdonságok, amik közül a teljes talaj szerves anyagának aromássága hatott a leginkább. A feltárt fordított arányosság csökkenő ásványi fázishoz kötött szervesszén tartalmat jelez ha a teljes talaj szerves anyagának aromássága növekszik. Emellett a felszíni lejtés növekedése gyengén de szignifikánsan csökkentette az ásványi fázishoz kötött szervesszén mennyiségét feltehetően a talajerózió hatásán keresztül mely nem csak a talaj egészének szerves anyag tartalmát csökkenti, hanem a stabil raktárra külön is hat. Mindemellett a területhasználat nem befolyásolta a stabil raktár szervesszén tartalmát.



27. ábra A piecewise structural equation model eredményei. A terjedelem sztenderdizált koefficiensek értékei a nyilak fölött jelennek meg ha a kapcsolat szignifikáns az $\alpha=0,05$ szinten (folytonos vonal) vagy marginálisan szignifikáns ($0,05 < \alpha < 0,1$; szaggatott vonal). A kék és piros vonal színek a kapcsolat pozitív ill. negatív voltát jelölik, míg a nem szignifikáns kapcsolatokat szürke pontozott nyilak jelzik. Az ellipszisekhez kapcsolódó R^2 értékek a lineáris modell jóságát számszerűsítik azaz, hogy a beérkező nyilak (változók) mennyiben határozzák meg a vizsgált változó értékét. A kék ellipszisek a dimenzió csökkentett környezeti változókat (PC_{K1-3}) jelölik. A barna ellipszisek a dimenzió csökkentett talaj változókat (PC_{T1-2}) jelölik. A zöld ellipszisek a szántóhoz viszonyított területhasználatot jelentik. A sárga ellipszisek a teljes talaj szerves anyagának tulajdonságait, míg a rózsaszínek az ásványi fázishoz kötött szerves anyag tulajdonságait írják le. aroma=aromásság, TOC=összes szervesszén tartalom, complex=komplex művelés

E modell is csak gyenge összhangot talált a szerves anyag összetétel kétféle vizsgálati módszere között. Az elemi összetételből számolt C/N arány és az infravörös spektrum alapján számított aromasság között a teljes talaj szerves anyagában gyenge de szignifikáns fordított arányosságot találtunk. Az aromasságot leginkább a talajtulajdonságok és a klimatikus viszonyok határozták meg, ezzel szemben a C/N arány elsősorban a területhasználat függvényének adódott (27. ábra).

A modell alsóbb szintjein álló változók mint a területhasználat és a talajtulajdonságok csak igen gyengén illeszkedtek a környezeti változók lineáris modelljeire ($R^2 < 0,15$) a magasabb szinteken ez az illeszkedés már elérte a $R^2 > 0,25$ értéket is. A C/N modelljei mutatták a legerősebb korrelációt (a teljes talaj szerves anyagára $R^2=0.46$; az ásványi fázishoz kötött szerves anyagra, $R^2=0.58$). Az ásványi fázishoz kötött szerves anyag C/N értékét számos változó befolyásolta a modell alsóbb szintjeiről melyek közül az erdőborítás (0,507) és e frakció szervesszén tartalma (0,470) volt a leginkább meghatározó. Emellett negatív korrelációt mértünk a lejtő meredekségével míg a talaj kémhatása és a teljes talaj szerves anyagának C/N értéke csak marginálisan hatott. Amíg az erdőborításnak egyértelmű hatása volt mind a teljes talaj, mind az ásványi fázishoz kötött szerves anyag összetételre addig a komplex mezőgazdasági területhasználat csak a teljes talaj szerves anyag összetételére hatott. A modell egészen elvégzett teszt igazolta, hogy a modell nem tud több, a vizsgált változók közötti kapcsolatot feltárni (Fisher's $C=31,043$, $p=0,095$, $df=22$) (27. ábra) (Jakab et al., 2024).

4.4.3. A feltalaj szerves anyagának eredményei Magyarországon az irodalmi adatok tükrében

A vizsgálat eredményei alapján a teljes talaj szerves anyag mennyisége első sorban a finom frakció arányától függ (Cai et al., 2016). Irodalmi adatok alapján az éghajlat szintén meghatározó tényező (Cui et al., 2019), még akkor is, ha ezt a kapott eredmények nem támasztják alá. Ennek oka valószínűleg az, hogy Magyarországon belül a klimatikus különbségek nem olyan mértékűek, hogy érdemben befolyásolni tudják a talajok szerves anyag dinamikáját. Ennek némileg ellent mond, hogy az ország feltalajainak szerves anyag telítettségét vizsgáló kutatásunkban bizonyítottuk az éves átlagos középhőmérséklet és az evapotranspiráció hatását a feltalajban potenciálisan eltárolható szerves anyag mennyiségére (Szatmári et al., 2023). Ezzel összhangban Luo et al. (2017) hangsúlyozta az egyes környezeti tényezők mint pl. az éghajlat szerepének relativitását a szerves anyag dinamikájában ezzel utalva a rendszer komplex természetére.

A területhasználat önmagában nem határozta meg a talaj szervesszén tartalmát, következésképpen a gyakran használt alapvetés miszerint a folyamatos erdőborítás alatt a talaj szervesszén tartalma magasabb mint a művelt területek talajaié félrevezető lehet. Ez csak akkor igaz, ha a vizsgált talaj és a környezeti feltételek azonosak. Hazánkban gyakoriak a homokterületekre telepített akácosok vagy akár a 100 évnél idősebb tölgyesek mely területek talajának szervesszén tartalma nem éri egyes, régóta szántott csernozjomok feltalajának szervesszén tartalmát, azaz e mutató nem direkt függvénye a

területhasználatnak, ahogyan erről már többen is beszámoltak (Dai et al., 2022; Singh et al., 2011; Winowiecki et al., 2016).

A talaj szervesszén tartalmát nagymértékben határozza meg az aggregátumok belsejébe zárt szerves törmelék mennyisége mely jelentős de sérülékeny összetevője az összes szervesszén tartalomnak (Rocci et al., 2021). A talaj szemcseméret összetételén túl a szerves törmelékek mennyiségének növekedése (a stabil aggregátumok által hosszú távon is védve a mikrobiális lebontástól) jelentősen megnövelheti a talaj teljes szervesszén tartalmát az ásványi fázishoz kötött szervesszén mennyiségéhez képest (Angst et al., 2023). Ezzel szemben, ebben a vizsgálatban az ásványi fázishoz kötött magasabb szervesszén tartalom a talaj egészéhez viszonyítva a szerves törmelékek kevésbé meghatározó voltára utal és valószínűleg a vizsgálat szántóföldi dominanciájából adódik, tekintve, hogy az intenzív talajművelés jelentősen csökkenti a szerves törmelék mennyiségét a feltalajban (Six és Paustian, 2014).

Habár e vizsgálatban a területhasználat nem határozta meg az ásványi fázishoz kötött szervesszén mennyiségét a korábbi kutatások eredményei arra utalnak, hogy az intenzív talajművelés a teljes szervesszén tartalom mellett az ásványi fázishoz kötött szervesszén tartalmat is csökkenti (Bailey et al., 2019; Jakab et al., 2023).

Az ásványi fázishoz kötött szerves anyag meghatározó mennyisége – a mért C/N arány értékek alapján – mikrobiális tevékenységhez kötött volt (Thevenot et al., 2010). Mindemellett, az elemi összetétel, és a kötéstípusok energiája alapján becsült szerves anyag összetétel nem egyirányba mutatott. Tfaily et al. (2014) arról számolt be, hogy tözegeken a C/N arány és az FTIR spektrum alapján számolt humifikációs index fordított arányosságban állt egymással. Ásványi talajok esetében Ludwig et al. (2008) írt le negatív korrelációt a C/N értékek és az aromaticitás között. E vizsgálatban a C/N értékek meglehetősen széles skálán (6–80) mozogtak ezért feltehetően a szélsőséges értékek javították az összefüggést egy olyan vizsgálathoz képest mely kizárólag ásványi talajok viszonylag szűk C/N arányát elemzi. Ennek ellenére, a pSEM eredményei alapján, a feltalajok C/N értéke az általunk vizsgált mintakörben is fordítottan volt arányos a szerves anyag aromasságával. Mindemellett, egy hasonló C/N tartományban elvégzett vizsgálatban nem találtak összefüggést az elemi összetétel és az infravörös spektrumból számolt értékek között (Cozzolino és Morón, 2006). Az ellentmondás feltehetően a talajművelés okozta szelektív SOM lebomlásból, illetve a szerves törmelék a talaj összes szerves anyagához mért változó részesedéséből adódhat. Az általunk feltárt összefüggések alapján a szerves anyag aromassága inkább a talajtulajdonságoktól és a klimatikus viszonyoktól függ, amely tulajdonságok alapjaiban határozzák meg a talaj mikrobiális viszonyait. Következésképp, az aromasság feltehetően szorosan összefügg a mikrobiális aktivitással. Ezzel szemben, a C/N arány vizsgálatunkban sokkal inkább a területhasználat függvényének adódott ami a számos hatótényező közül a talajba kerülő szerves anyag összetételének szerepét emeli ki.

A talaj CaCO_3 tartalma alapjaiban határozhatja meg a szerves anyag stabilizációjának mechanizmusát (Rowley et al., 2018), habár ez az összefüggés a bemutatott országos léptékű vizsgálat eredményei alapján nem bizonyítható. Ennek feltehetően, a vizsgált mintakörben igen magas arányban megjelenő savanyú feltalajok az okai melyek nem tartalmaznak CaCO_3 -ot. Emellett, a pH meghatározó módon hatott a talaj teljes szerves anyagának aromasságára de csak alárendelt szerepet játszott az ásványi fázishoz kötött szervesanyag

összetételének változásában. A teljes talaj szerves anyag magas aromássága általában magas lebomlottsági fokot és csökkent szervesanyag-tartalmat jelez. Intenzíven művelt talajok esetében a gazdálkodó gyakran műtrágyát használ a jelentős mértékben lecsökkent szervesanyag-tartalom miatt az elvárt hozam fenntartásához mely azonban hosszú távon a talajok savanyodásához vezethet (Tian és Niu, 2015). A negatív összefüggés tehát az aromásság és a pH között szántóföldeken visszavezethető a folyamatos és nagy mennyiségű nitrogén műtrágya alkalmazására, ahogy ezt Hui et al. (2022) is feltételezte. A szerves anyag magasabb lebomlottsági foka az ásványi fázishoz kötött szerves anyag esetében is jellemző volt amit a magasabb C/N arány jelzett, utalva rá, hogy az intenzív művelés okozta szelektív szerves anyag degradáció (oxidáció) a stabilan kötött raktárban is lejátszódik, ahogy azt a Józsefmajori művelési tartamkísérlet eredményei alapján is bizonyítottuk (Jakab et al., 2023).

Laboratóriumi vizsgálatok esetében az ásványi fázishoz kötött, stabil szerves anyag összetételét a területhasználathoz kötött növényi összetétel határozta meg (Córdova et al., 2018), habár ezt a kapcsolatot saját vizsgálatainkban, országos léptékben nem tudtuk igazolni, és kontinentális léptékben sem bizonyított (Yu et al., 2022). Irodalmi adatok alapján, a területhasználat hatása leginkább az eltérő kémiai összetételű növényi maradványok talajba kerülésén keresztül nyilvánul meg. Ugyanakkor, egy bizonyos szántóterület szerves anyag bevételeként nyerhet akár magas C/N arányú, gyengébb szerves anyag összetételű kukoricát adott évben, illetve jó minőségű, pillangósokból származó szerves anyagot másik évben. Emellett a N tartalmú műtrágyák használata szintén befolyásolja a szerves anyag összetételét szántóföldi körülmények között (Gillespie et al., 2014). Ebből kifolyólag, szántóföldeken a pillanatnyi növényi maradványok összetétele nem lehet közvetlen oka a szerves anyag összetétel változásának. Vagyis a szántóföldet a többi, viszonylag állandó növényi összetételű területtől külön érdemes vizsgálni ha a talaj szerves anyag összetételét elemezzük.

Több tanulmány számolt be a talaj teljes szerves anyag kémiai összetételének és az ásványi fázishoz kötött szerves anyag összetételének függetlenségéről (Angst et al., 2021). Ezzel egyhangzóan, többen számoltak be az ásványi fázishoz kötött szerves anyag alacsonyabb aromásságáról (Six et al., 2001). Másrészt, eredményeink alapján a talaj teljes szerves anyagának aromássága fordított arányosságban állt az ásványi fázishoz kötött szervesanyag-koncentrációjával. Ez feltehetően a stabil szervesanyag-készletet is érintő intenzív mikrobiológiai lebontásnak is köszönhető, tekintve, hogy a talajban nincs tökéletesen ellenálló kémiai szerkezet vagy stabilizációs mechanizmus amely biztos védelmet nyújtana (Dungait et al., 2012). A talaj összes szerves anyagának növekvő aromássága ugyanakkor egyre nehezebben hozzáférhető tápanyagforrást jelent a mikrobiótának ezzel relatíve növelve a stabil, ásványi fázishoz kötött raktárban tárolt szerves anyag lebontását és csökkentve ennek a raktárnak a szervesanyag-koncentrációját. Minthogy ez a folyamat akár meghatározó mennyiségű kötő helyet szabadíthat fel az ásványok felületén ezen talajok esetében a talajba kerülő szerves anyag tömegének növelésével (takarónövény vetés vagy zöldtrágyák alkalmazása) vagy a művelés intenzitásának csökkentésével (csökkentett vagy minimum művelés, direktvetés) gyors növekedés érhető el akár az ásványi fázishoz kötött szerves anyag esetében is, ahogy arról a Józsefmajori eredmények kapcsán is beszámoltunk (Jakab et al., 2023).

A lejtő meredeksége az egyik leghatékonyabb domborzattal összefüggő környezeti változó mely meghatározza a teljes talaj szervesanyag-tartalmát (Ayoubi et al., 2012). A teljes talaj szervesanyag-veszteségén túl a modell eredmények rámutattak a szervesanyag-koncentráció csökkenésére és összetételének változására az ásványi fázishoz kötött készletben is meredek lejtők esetében. A stabil készlet szervesanyag-koncentrációjának csökkenése nem a szelektív erózió következménye mert ez utóbbi folyamat során a felszíni lefolyás ugyan a talaj egészéhez képest felülreprezentált mértékben hordja el a szerves anyagot de ez az elhordás a finom ásványi fázist is érinti, vagyis a szervesanyag-koncentrációja ebben a frakcióban nem csökken (Quijano et al., 2020). Következésképp, a lejtő meredekség hatására csökkenő, ásványi fázishoz kötött szervesanyag-tartalom az erózió túl sokkal inkább a gátolt biomassza produkciónak és az ehhez képest is tovább csökkenő szervesanyag-bevitelnek lehet a következménye (Su et al., 2010). Emellett elképzelhető a lejtők okozta speciális környezeti feltételek hatására bekövetkező jelentős változékonyság a szerves anyag lebontás dinamikájában is. Meredekebb lejtőkön alacsonyabb C/N arányokat mértünk az ásványi fázishoz kötött szerves anyagok esetében, de nem találtunk változást a teljes talaj szervesanyag-tartalmának összetételében, ami az előbbi raktár szoros mikrobiális kapcsolatára utalhat.

Mindazonáltal az általunk használt megközelítésnek vannak korlátai is. A vizsgált talajok ásványos összetételének változékonyságát nem vettük figyelembe holott ennek meghatározó szerepe lehet a szerves anyag stabilizációjában (Zacháry et al., 2022). Ugyanakkor az ásványos összetétel egzakt numerikus leírása és statisztikai elemzése a mai napig nem teljes mértékben megoldott probléma. Vizsgálatunkban a <20 μm méretű szemcséket tekintettük az ásványi fázishoz kötött, stabil frakció hordozóinak habár az irodalomban e határérték mellett az <53 μm és a <63 μm értékek is rendszeresen megjelennek. A változó szemcseméretű frakciók szisztematikus összehasonlítása még várat magára, de minden valószínűség szerint a durva por frakció (20–63 μm) alapvetően befolyásolja a szervesanyag-koncentrációját és összetételét az ásványi fázishoz kötött készletben (Angst et al., 2021). A vizsgálat ugyancsak nem terjedt ki a mikrobiomra, következésképpen az élő és élettelen szerves anyag aránybeli eltérésekből adódó esetleges hatásokat (Angst et al., 2021) nem vettük figyelembe.

4.5. Magyarország feltalajának szervesszén telítettsége

A szerves talajszén tartalom szempontjából telített, erdő borítású Talajinformációs Monitoring rendszer talajszelvények legfontosabb tulajdonságait, a felső 30 cm-es rétegre vonatkozóan a 19. táblázat mutatja be. A kutatás során e talajtulajdonságok szolgátak prediktorként a talaj telített szervesszén tartalmának meghatározásához. A cubist alapú pedotranszfer függvény megalkotását kiegészítendő ötször ismételt tízszeres kereszt validációt alkalmaztunk. Ennek eredményeként 0,56 R^2 érték adódott, azaz a megalkotott pedotranszfer függvény csaknem 60%-át magyarázta a szaturált szervesszén adatok összes varianciájának. A 20. táblázat a pedotranszfer függvény modell szerkezetét mutatja be. Ez nem csak összegzi az egyes tulajdonságokat és az egyes talaj szervesszén tartalom részhalmozokra illesztett, többváltozós lineáris regressziós modell adatokat, hanem a szabályok számozásával egy hierarchikus sorrendet is felállít (20. táblázat első oszlopa).

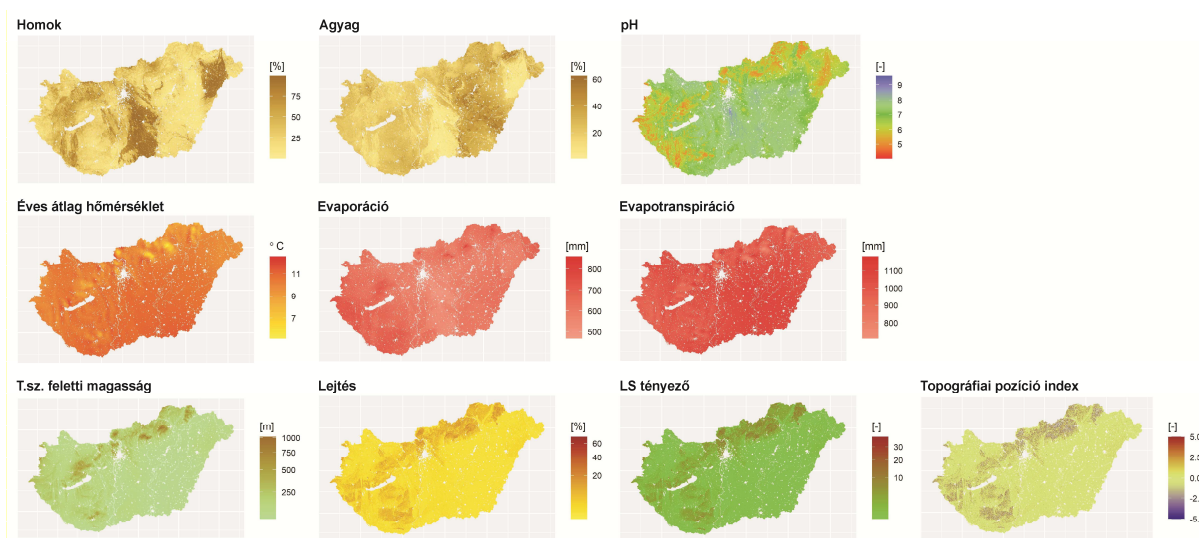
19. táblázat A telítettnék tekintett minták (n=183) szervesszén tartalma és további tulajdonságai a 0-30cm rétegre

Tulajdonság	Mérték egység	Minimum	Maximum	Átlag	Medián	Szórás
Szervesszén tart.	[%]	0.16	6.87	2.17	1.72	1.41
pH	[-]	3.73	8.09	5.72	5.35	1.18
CaCO ₃ tart.	[%]	0.00	20.96	4.83	4.05	3.83
Homok	[%]	2	99	49	44	29
Iszap	[%]	0	80	35	35	21
Agyag	[%]	0	56	17	16	12

20. táblázat A cubist alapú pedotranszfer függvény szerkezete, mellyel Magyarország talajtakarójának (0-30 cm) potenciális szervesszén tartalom becslését végeztük

Szabály	Feltétel	Többváltozós lineáris regressziós modell
1	HA <i>Homok</i> > 61.69	AKKOR $SOC_{sat} = 0.58804 + 0.113 \text{ Clay} - 0.0008 \text{ Homok} - 0.02 \text{ Hőmérséklet} + 0.01 \text{ pH}$
2	HA <i>pH</i> ≤ 6.24 és <i>Homok</i> ≤ 61.69 és <i>Lejtés</i> ≤ 13.96	AKKOR $SOC_{sat} = 7.6349 - 0.0087 \text{ Evaporáció} + 0.022 \text{ LS faktor} + 0.0004 \text{ Altitude} - 0.0013 \text{ Homok} - 0.03 \text{ Hőmérséklet} + 0.02 \text{ pH}$
3	HA <i>pH</i> > 6.24 és <i>Homok</i> ≤ 61.69	AKKOR $SOC_{sat} = 31.6689 - 0.0217 \text{ Evapotranspiráció} - 0.8 \text{ pH} - 0.139 \text{ Lejtés}$
4	HA <i>pH</i> ≤ 6.24 és <i>Homok</i> ≤ 61.69 és <i>Lejtés</i> > 13.96	AKKOR $SOC_{sat} = 0.7695 + 0.0966 \text{ Homok} + 0.27 \text{ Topographic position index}$

A 28. ábra azokat a területileg jellemző talaj- és környezeti változókat mutatja be, amelyek szignifikánsnak bizonyultak a magyarországi telített szervesszén-tartalom becslésében, az illesztett cubist alapú pedotranszfer függvény alapján.

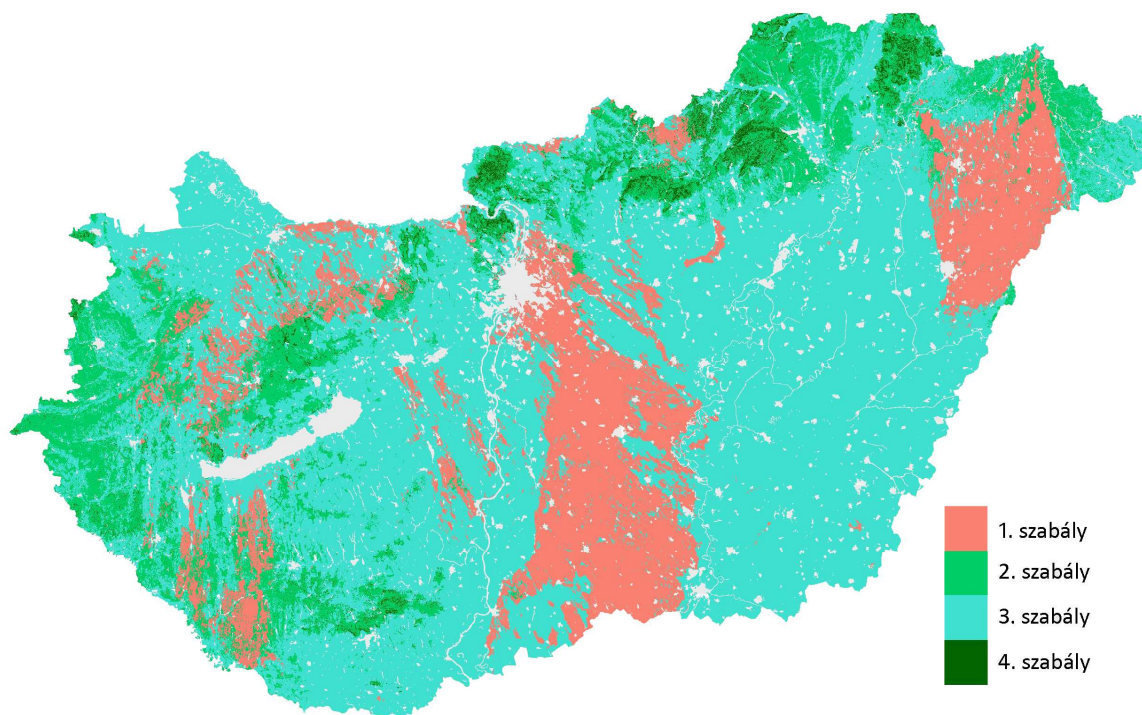


28. ábra A területileg teljes talaj (első sor) és környezeti változók (második sor: éghajlati változók, harmadik

sor: geomorfológiai változók) melyek magyarázó erejének bizonyultak a talaj telített szerves széntartalmának előrejelzésében Magyarországon. Megjegyzés: A települések és a nyílt víztestek nem színezettek.

A 20. táblázatban felsorolt szabályok és a vonatkozó többváltozós lineáris regressziós modellek területi érvényességéről, vagyis, hogy hazánk egyes területein melyik összefüggés által közelíthető a talajban potenciálisan eltárolható szervesszén mennyisége, a 29. ábra tájékoztat. Szembetűnő, hogy a szabályok Magyarország jól definiált területeire vonatkoznak:

1. szabály: Hazánk alacsony szervesszén tartalmú homok területeit fedi le.
2. szabály: Magyarország hegy és dombvidéki savanyú talajaira vonatkozik.
3. szabály: A mély fekvésű, semleges vagy alkalikus, nem homok területekre vonatkozik
4. szabály: Hazánk legmagasabban fekvő, jellemzően savas talajait számszerűsíti.



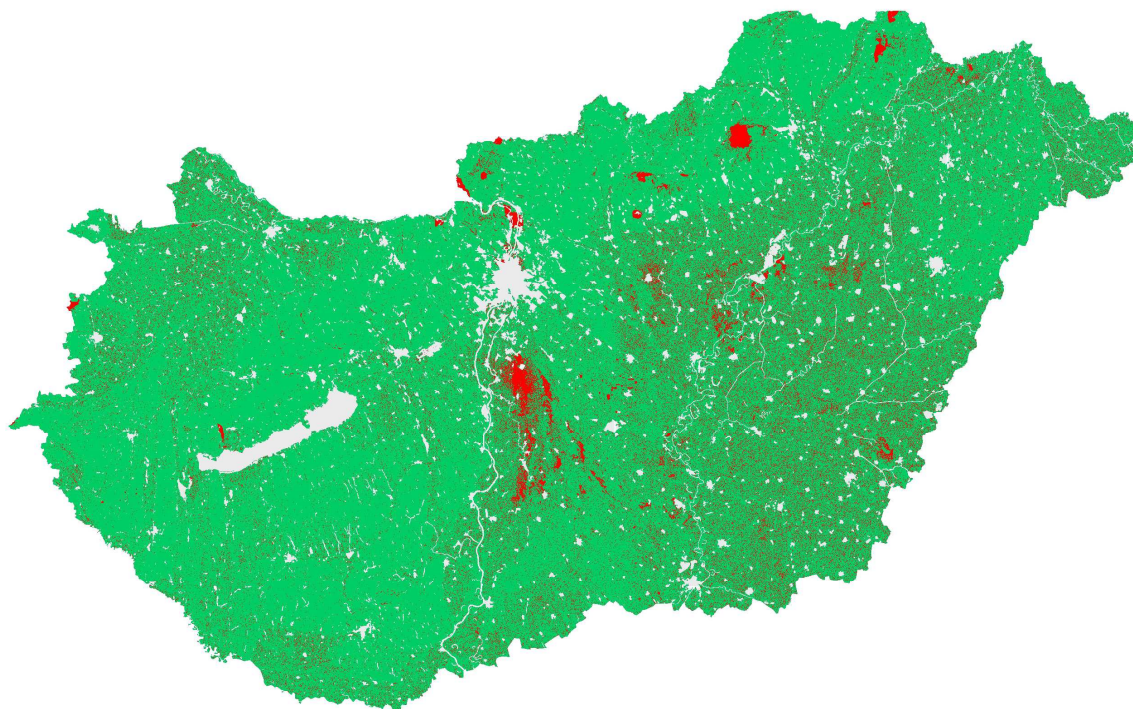
29. ábra A pedotranszfer függvény által definiált szabályok területi eloszlása.

A szabályok emelkedő számértéke egyre növekvő potenciálisan eltárolható talaj szervesszén tartalmat prognosztizál (20. táblázat). Az 1. szabály hazánk homokterületein érvényes, ahol a homok frakció magas és következésképp a finom frakció alacsony aránya miatt a legalacsonyabb a talajban potenciálisan megköthető szervesszén mennyisége. Az agyagfrakció aránya és a talaj pH értéke tehát egyenesen, míg a homoktartalom és az éves átlagos középhőmérséklet értéke fordítottan arányos a várhatóan potenciálisan megköthető szerves talajszén mennyiségével. A 2. szabály azon alacsonyabb homok tartalmú, savanyú területeken érvényes ahol a lejtés értéke $<14\%$ (29. ábra). Ezen területeken a növekvő agyag

tartalom, tengerszint feletti magasság, pH, lejtő meredekség és lejtőhossz értékek magasabb eltárolható szervesszén mennyiséget jeleznek előre, míg az evaporáció, a homok tartalom és az éves középhőmérséklet növekedése csökkenti a talaj potenciális szervesszén tartalmát. A 3. szabály alapján olyan területeken becsülhetjük a maximális szervesszén tartalmat a talaj legfelső rétegében melyek nem homoktalajok és kémhatás tekintetében semlegesek vagy alkalikusak (29. ábra). A négy közül ez az egyetlen olyan osztály melyben a homok tartalom nem meghatározó a várható szervesszén maximum előrejelzésében. Ezzel szemben, e területeken az evapotranspiráció, a pH és a lejtő meredeksége egyaránt csökkenti a talajban eltárolható szervesszén mennyiségét. A 4. szabály a meredek területek savanyú talajaira adja meg a várható maximális szervesszén tartalmat a feltalajban. E területeken mind a homok tartalom, mind a topographic position index értéke egyenesen arányos a várható szaturált talaj szervesszén tartalommal.

4.5.1. A telített szervesszén tartalom meghatározását célzó pedotranszfer függvény alkalmazhatóságának korlátai

Hangsúlyoznunk kell, hogy a cubist alapú pedotranszfer függvény olyan talaj monitoring pontok eredményei alapján született melyek Magyarország hosszabb ideje erdővel borított területein találhatóak ezért joggal merül fel a kérdés, hogy vannak-e az országnak olyan területei melyeken az összefüggés nem alkalmazható. Ahogy azt már korábban láthattuk az alkalmazott pedotranszfer függvény tulajdonképpen több többváltozós lineáris regressziós modellből tevődik össze. Minden egyes modellnek következképpen megvan az az alkalmazhatósági tartománya melyen belül elfogadható pontosságú becsléssel tud szolgálni a feltalaj maximális szervesszén tartalmáról. Ezen tartományokon kívül azonban a modell alkalmazása nem ajánlott, hiszen ezekre a területekre csak extrapolálni lehetne, a várható értékeket, vagyis azok megbízhatósága megkérdőjeleződik. Például ha a modellek megalkotásához felhasznált erdő alatti talajszelvények feltalajában a pH 5–8 értékek között változott, akkor 8,5 pH talajra a modell nem fog tudni kellően megalapozott becslést adni, tekintve, hogy az kívül esik a vizsgált tartományon.



30. ábra A megalkotott cubist alapú pedotranszfer függvény alkalmazhatósága (zöld) és az extrapolációs becslés miatt alkalmazásra nem javasolt területek (piros). A beépített területek és a nyílt vízfelszínek üresen maradtak.

Következésképpen megvizsgáltuk, hogy az ország mely területein kell a modelleknek extrapolációval becsülniük a telített talaj szerveszén mennyiségét (30. ábra). Összesen 7922,7 km² terület adódott melyen a fentiek miatt nem ajánlott a cubist alapú pedotranszfer függvény alkalmazása. E terület Magyarország 93.030 km² területéhez képest 8%-ot tesz ki. Habár ezen, alkalmazásra nem javasolt területek jellemzően elszórtan helyezkednek el hazánk területén, mégis egyes tájegységek jól azonosíthatóak. Az érintett területek majdnem 90%-a sós talajokhoz köthető (pl. Duna-Tisza Köze; Hortobágy) ahol az alkalmazhatóság nem csak az extrém alkalinitás, szodicitás vagy sótartalom miatt nem lehetséges, hanem a nagyon erős vízhatás (magas talajvízszint, időszakos vagy akár folyamatos vízborítás) miatt sem, mely alapjaiban határozza meg a talaj szerves anyagának lebomlását. Hasonlóan erősen érintett, vízhatású talajokkal találkozunk a nagyobb folyók (Duna, Tisza, Dráva) közelében, a keleti országrészben (30. ábra). E területek kiesése a telített szervesanyag-tartalom becsléséből elfogadható, tekintve, hogy az alapvetés szerint a becslést ásványi talajokra kívántuk elvégezni. A vízhatású és a víz által befolyásolt talajokban a szervesanyag-lebontás és -raktározás mechanizmusa szélsőségesen tér el egymástól így a két folyamat együttes modellezése komoly kihívás.

4.5.2. A telített talaj szervesszén tartalmának területi eloszlása és a Magyarország feltalajában pótlólagosan eltárolható szervesszén tartalom

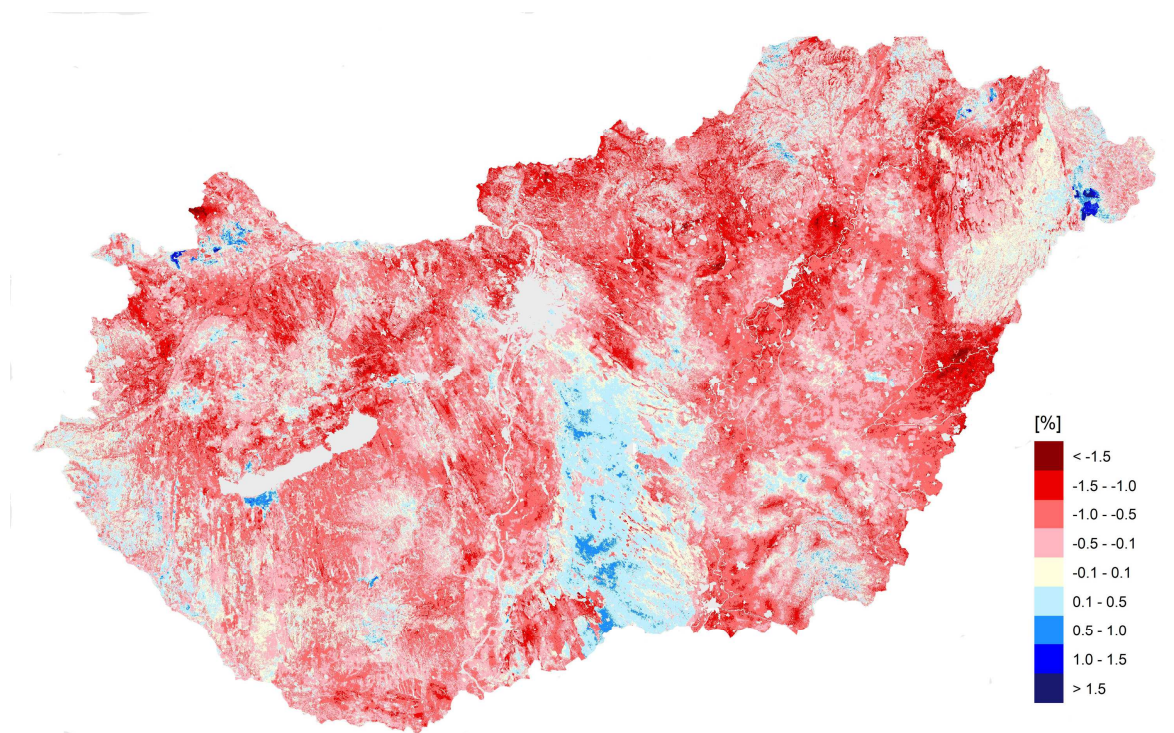
Az 31. ábra mutatja be a talaj felső 30 cm-es rétegében a cubist alapú pedotranszfer függvény által becsült maximálisan eltárolható szervesszén mennyiségét országos eloszlásban.



31. ábra Magyarország feltalajában (0-30 cm) maximálisan eltárolható szervesszén mennyiség cubist alapú pedotranszfer függvény alapján. A települések és a nyílt vízfelületek üresen maradtak.

A potenciálisan eltárolható talaj szervesszén adatbázist összehasonlítottuk a hazánk feltalajáról készült tényleges szervesszén tartalom adatokkal (Szatmári et al., 2019). Ez utóbbi adatbázis szintén a talaj legfelső 0–30 cm-es rétegére vonatkozik és geostatistikai eljárások és a gépi tanulás módszereinek kombinálásával állították elő. A talaj tényleges szervesszén tartalmának térbeli megoszlását bemutató adatbázist, a felhasznált környezeti változók és az alkalmazott digitális talajtérképezés részletes módszertanát Szatmári et al. (2019) ismertette. A tényleges szervesszén tartalom adatokból kivonva a potenciálisan eltárolható szervesszén tartalom adatokkal megszerkesztettük az ország feltalajának szervesszén-hiány térképét (32. ábra). Az adatbázisban a negatív (az ábrán pirossal jelölt) értékek jelölik a szervesszén hiányos területeket, míg a modell alapján telített vagy túltelített területek pozitív értékeit kék színnel jelöltük. A térkép arra utal, hogy Magyarország meghatározó részén a feltalaj szervesszénben telítetlen és ez a telítetlenség komoly térbeli heterogenitást mutat. Megjegyezzük, hogy a telített szervesszén tartalom bizonytalansága egy nagyságrenddel nagyobb, mint ugyan ez az érték az aktuális szervesszén tartalom esetében, miből kifolyólag a hiánytérkép is örökli e magas bizonytalanság értéket. Ennek eredményeképp az adatbázisban nem tudunk elkülöníteni szignifikánsan eltérő szervesszén

hiánnyal jellemezhető területeket. Mindemellett, a mintázat elemzésével jellemezhetőek a feltalaj szervesszén telítettségének térbeli változásai.



32. ábra Magyarország feltalajának szervesszén telítetlensége százalékban. A pozitív értékek túltelített talajokat, a negatívok szervesszén hiányt jelölnek.

4.5.3. Hazánk feltalajának szervesszén telítetlensége az irodalmi adatok tükrében

A talaj telített szerveszén tartalmának meghatározásában a homok tartalom volt a legmeghatározóbb tulajdonság, mely a négy lineáris regressziós modellből háromban szerepelt. Két esetben, az irodalmi adatokkal egybehangzóan fordított arányosságot mutatott a szerves talajszén telítettség értékével, de a negyedik szabályban, az ország legmeredekebb területein a homoktartalom egyenes arányosságban állt a várható telített talaj szervesszén tartalommal. Ez a látszólagos ellentmondás nem magyarázható minden kétséget kizáróan de feltehetően az erózióhoz kapcsolódhat, amennyiben a magasabb homok-tartalmú területeken a durvább textúra miatt magasabb vízbeszivárgás és ezzel alacsonyabb felszíni lefolyás, talajpusztulás és szén veszteség várható (Nagy et al., 2020). A másik nagyon széles körben ható tulajdonság a talaj pH értéke, mely az első három regressziós modellben hat a várható telített szerveszén tartalomra. Emelkedésével nő az eltárolható szerves anyag mennyisége homok talajokon és savas és semleges körülmények között. Ezzel szemben, alkalikus területeken a pH növekedésének nagyon erős negatív hatása van a talaj telített szervesszén tartalmára. Ez a szikes területek csökkent szervesszén megkötő képességére utalhat (Rasmussen et al., 2018; Wong et al., 2010), még akkor is, ha a bemutatott munkában a becslési eljárás a szikes talajokra az extrapoláció miatt nem értelmezhető eredményeket adott.

A klimatikus környezeti változók tekintetében mind a potenciális evaporáció, mind a potenciális evapotranspiráció csökkentette a telített szervesszén-tartalmat az ország sík és nem homok területein. Az éves átlagos középhőmérséklet fordított arányosságban állt a várható telített szervesszén tartalommal, feltehetően a magasabb hőmérséklet okozta megnövekedett mikrobiális lebontás miatt, ahogy arról már többen beszámoltak (Wiesmeier et al., 2014; Zhang et al., 2015). A domborzathoz kapcsolódó környezeti változók nem mutattak egyértelmű trendet a maximális talaj szervesszén előrejelzésében. A lejtő meredekségének növekedésével például csökkent az eltárolható szervesszén tartalom az ország kevésbé meredek területein. Ezzel szemben a topográfiai pozíció index és az LS faktorok értékei egyenes kapcsolatban álltak a telített szervesszén tartalommal. Feltételezhetően, a tájban lejátszódó eróziós és szedimentációs folyamatok (Ghosh et al., 2021) térbeli mintázata jóval részletesebb (Centeri et al., 2014), mint a jelen vizsgálatban használt térbeli felbontás (100 m), ezért e folyamatokat ez a megközelítés nem adja pontosan vissza. Ismét hangsúlyoznunk kell, hogy habár a 30. ábrán bemutatott térkép az ország egész területére ad becslést a várható telített talaj szervesszén tartalomról ez csak a becslés jóságának ismeretében értelmezhető, tekintve, hogy hazánk mintegy 8%-án a pedotranszfer függvény extrapolációjára van szükség a becslés elvégzéséhez. Következésképpen, ezeken a területeken a becslést nem vagy csak nagyon erős fenntartásokkal fogadhatjuk el. Általános érvényű trendként leszűrhető, hogy a legnagyobb deficit azokon a területeken jelentkezik melyeknek aktuális szervesszén tartalma közepes vagy magas. Egyes bázistelített csernozjomok és kasztanozjomok, melyek többnyire az Alföldön találhatóak és aktuális szervesszén tartalmuk meghaladja a 2%-ot, további 1% szervesszén megkötésére és eltárolására lennének képesek a feltalajukban. Az ország hegyvidéki területein és a savanyú talajokban kisebb addicionális szervesszén megkötő kapacitást prognosztizáltunk, noha ez még mindig 0,1-0,5% szervesszén tartalmat jelentene.

A becsült feltalaj szervesszén deficit értékek tehát meglehetősen teoretikusak, ugyanakkor nem elhanyagolható gyakorlati hasznuk lehet. A szervesszén telített erdő felszínborítás alatti feltalajokat nem művelik, ellenben gyakorlatilag korlátlan a talajba kerülő szerves anyag utánpótlása. Ezzel szemben a szántóterületeken a szervesanyag-termék meghatározó részét betakarítjuk mint termést sőt még a szalmát sem juttatjuk vissza a talajba, vagyis az utánpótlás jóval szerényebb, sok esetben a gyökértömegre korlátozódik. Mindemellett a művelés fokozza a talaj szerves anyagának lebontását. Következésképpen a fenti módszerrel közelített elvi szaturációs értékek nem érhetőek el a jelenlegi területhasználati struktúra mellett (Stewart et al., 2007). Az egyre növekvő népesség élelmiszer igénye nem teszi lehetővé, hogy jelentősebb méretű művelésbe vont területeket erdősítsünk vagy gyepesítsünk vissza, azaz a fentebb számított szervesszén telítettség értékeket a gyakorlatban sosem fogjuk elérni. Mindazonáltal a regeneratív mezőgazdasági termelés által alkalmazott technikák segítségével a szántóterületek feltalajának szervesszén tartalma is jelentősen növelhető (Gelybó et al., 2022; Jakab et al., 2023; Madarász et al., 2021; Rieder et al., 2018). Ebből kifolyólag, a feltalaj szervesszén tartalmának telítetlensége egy jól alkalmazható mutató lehet annak meghatározásában, hogy hazánk mely területein lehetne a talajművelési rendszer megváltoztatásával a legnagyobb növekedést és a hozzá kapcsolódó talajminőség/egészség javulást elérni.

Másrészről az ország meghatározó területein a feltalajt szervesszénben telítettnek vagy túltelítettnek találtuk. A leginkább túltelített területek a tőzegekhez (mint például a Nagyberek területe), vagy más erősen vízhatású területekhez kötődnek, mert e területeken

nagyon magas a feltalaj pillanatnyi szervesszén tartalma. Ahogy azt már említettük a megalkotott modell csak az ásványi talajok esetében képes becsülni a telített szervesszén tartalmat a feltalajban, a vízhatást, illetve az általa okozott szervesanyag-konzervációt nem képes figyelembe venni. További jelentős túltelített feltalajokat találunk hazánk homokterületein első sorban a Duna-Tisza-közén. E talajoknak a finom frakció hiánya miatt alacsony a szervesszén tartalmuk ezért csekély mértékű változások is túltelítettséget okozhatnak. Ilyen körülmények között növényi maradványokból származó szerves törmelék megléte vagy hiánya komoly változékonyságot okoz a vizsgált talaj szervesszén tartalmában ezzel indukálva esetenként a túltelítettséget. E szerves törmelékek a hagyományos felfogás szerint nem részei a talajban hosszan eltárolt szerves anyagnak azonban egyre több munka utal rá, hogy hiába nagyon rövid tartózkodási idejű készletekről van szó, mégis a bennük tárolt szén mennyisége hosszú távon is jelentős lehet (Angst et al., 2023) különösen a fent említett homoktalajok esetében.

Habár a referenciaként szereplő telített talaj szervesszén tartalom értékek a Talajinformációs Monitoring rendszer pontjaiból származnak, melyekből egységesített mintavétel és vizsgálati módszertan alapján határozzák meg a tulajdonságokat, a pontok száma limitált. Kíváncsús lenne, ha ezen, folyamatos erdőborítás alatti pontok számát meg tudnánk növelni, így nemcsak stabilabb függvényt állíthatnánk fel, hanem a jelenlegi becslés során szükséges extrapolált területek arányát is csökkenteni tudnánk. Mindemellett, hangsúlyoznunk kell, hogy a „folyamatos erdőborítás” kritériumon belül jelentős eltérések lehetnek az erdőborítás hosszában, a faállomány korában és összetételében melyek elméletileg mind befolyásolhatják a feltalaj pillanatnyi szervesszén tartalmát, habár az erdőművelés módja nem hat a talaj szervesszén tartalmára (Wäldchen et al., 2013).

A telített feltalaj szervesszén tartalom területi becslésének bizonytalansága egy nagyságrenddel meghaladta a pillanatnyi feltalaj szervesszén tartalom területi becslésének bizonytalanságát ami miatt nem volt lehetséges statisztikailag szignifikáns deficittel bíró területek lehatárolása. E jelenség nem egyedi az irodalomban, többen beszámoltak már róla, hogy a magas bizonytalansággal rendelkező becslések korlátozhatják a digitális talajtérképezés hatékonyságát (Heuvelink, 2014; Szatmári et al., 2021). Mindazonáltal a használt becslési eljárás és a készült térképek hasznos előzetes eredményt szolgáltatnak hazánk szervesszénben telítetlen feltalajainak azonosításához, melyet a későbbiekben további telített talajszelvények vizsgálatba vonásával finom hangolhatunk. A cubist algoritmus ismét egy hasznos gépi tanuláson alapuló technikának bizonyult mellyel nem csak a pedotranszfer függvényt állítottuk elő, de a felhasználók számára sokkal átláthatóbbá is tettük azt ami napjaink kutatásaiban központi kérdés (Szatmári et al., 2020; Wadoux et al., 2020). A modell szerkezetének átláthatósága nem csak abban segít, hogy jobban megértsük a talajtani és környezeti változók hatását a feltalaj maximálisan eltárolható szerveszén tartalmára, hanem abban is, hogy optimalizáljuk a még szükséges mintavételek számát és helyét és ezzel minimalizáljuk az ezzel járó költségeket. A közelmúltban számos tanulmány számot be róla, hogy a mintavétel rendszerének optimalizálása az ismert modellszerkezet révén kivitelezhető és egyszersmind a bizonytalanság csökkenthető (Ließ, 2015; Pásztor et al., 2015; Wadoux et al., 2020).

5. Összefoglalás

A Magyarország feltalajában megkötött, hosszú távon is stabil az ásványokhoz szorosan kapcsolódó szerves anyag mennyisége tág határok között változik. Ezt a változékonyságot nem kizárólagosan a területhasználat határozza meg. Erdő borítás alatti talajokban is találunk olyat, ahol csekély a stabilan kötött szerves anyag mennyisége és hosszú ideje szántott, degradált talajoknak is lehet esetenként magas a stabil szervesanyag tartalma. A fenti eredmények arra engednek következtetni, hogy a területhasználaton és a textúrán túl, a domborzat és a talaj egészének szervesanyag-tartalma ugyancsak meghatározó szerepet játszik a stabil szervesszén készlet méretében. A domborzaton keresztül a talajerózió hatása érhető tetten mely fokozott mértékben érinti a talaj finom frakciójához kötődő stabil szervesanyag-készletet. Az eredmények arra is felhívják a figyelmet, hogy az erózió hatása a folyamatosan erdővel borított területeken sem hanyagolható el, különösen ha ezek az erdők meredek hegyoldalakat borítanak. A teljes talaj szerves anyag összetételében a mikrobiális lebontás szerepét érhetjük tetten. Kémiai értelemben minél stabilabb a szerves anyag a talajban, annál kevésbé hozzáférhető a mikroorganizmusok számára, ezért azok annál inkább rákényszerülnek az ásványok által kötött szerves anyag lebontására is. Vagyis a kevés és már lebomlott szerves anyagot tartalmazó területeken a stabil raktárban lévő szervesszén készlet sem állandó, a lebontás elleni védelem tehát relatív.

Eredményeink arra is rámutatnak, hogy a feltalajban tárolt stabil szerves anyag mennyisége érdemben növelhető hazánk területének több mint felén. A legnagyobb növekedést nem a csekély szervesanyag-tartalmú talajokon, hanem a már jelen pillanatban is közepes vagy magas ellátottságú területeken várhatjuk, mert e területeknek a szervesszén raktározó kapacitása jóval nagyobb, mint a szerves anyagban telített sovány homoktalajoké. Tekintve, hogy ezen területek jelentős része egybevág az élelmiszer termelés szempontjából legértékesebb szántó területekkel, a szervesszén tartalom növelése és ezáltal a várható időjárási és egyéb szélsőségekkel szembeni ellenálló képességük növelése alapvető feladat.

A szervesanyag-tartalom növelésének hazánkban is jól alkalmazható eszköze lehet a kímélő mezőgazdasági művelés mely a területhasználat megváltoztatása (erdősítés, gypesítés) nélkül képes a talaj egészségének javítására szántóföldi körülmények között. A kímélő művelés során a talajon hagyott növényi maradványok és a szántás elhagyásának együttes hatására már rövid távon (10–20 év) érdemi szervesanyag-tartalom növekedést találtunk. A növekedés hazánk két legelterjedtebb, mezőgazdaságilag művelt talaj típusán egyaránt kifejezett. Mind savanyú erdőtalajon, mind bázistelített mezősegi talajon növekedett a feltalaj szerves széntartalma, a növekedés pedig nem csak a gyorsan változó mobil szénkészletet érintette, hanem az ásványokhoz kötött, stabil szervesszén készletben is jelentkezett. A kímélő művelés hatására a talajba jutó és ott addicionálisan–megkötődő szerves anyag azonban nem okozott változást a készletek kémiai összetételében ami arra utal, hogy a megkötődés az egyes talajok esetében specifikus és szelektív.

Ugyanakkor, a vizsgált savanyú és meszes talajon az egyes szervesanyag-készletek kémiai összetétele különbözött egymástól. Míg a mezősegi talajon a stabil szervesanyag-készlet bizonyult aromás alkotókban gazdagabbnak addig az erdőtalajon az aggregátumokba zárt, mobil szervesanyag-készlet volt aromásabb. Ez a tárolási mechanizmusok közötti eltérés sokkal markánsabbnak bizonyult, mint a talajművelés módjának hatása. További

mintaterületek vizsgálatával tisztáztuk azt is, hogy a különbség nem a CaCO_3 jelenlétéből vagy hiányából adódik, mert más mezőszégi talajokon a mobil raktár szerves anyagai bizonyultak aromásabbnak, jobban átalakultnak. Az eltérés okának pontos megállapításában és a következmények értelmezésében figyelembe kell venni a talajok közötti további különbségeket az aggregátság mértékében, az ásványos összetételben és a szerves anyag mennyiségében is.

A megemelkedő szervesanyag mennyiségnek jelentős hatása van a talaj funkcionalitására és egészségére. Kimutattuk, hogy a kímélő művelésű területeknek magasabb a porozitása, szerkezetesebbek és a szerkezeti elemek állékonysága is magasabb, mint a szántáson alapuló technológia alatti talajoké. Ez a jobb szerkezet független a talajállapottól, a különbség egyértelmű a frissen művelt talajon, a tömörödött tarlón és takarónövényrel fedett felszín esetében is. Ebből következőleg a kímélő művelésű területek vízbefogadó képessége és erózióval szembeni állékonysága érdemben javult, ami a jövőben várható egyre rendszertelenebb és hevesebb csapadékesemények szempontjából alapvető fontosságú.

A módszertani kérdések tekintetében az eredmények arra utalnak, hogy a talaj pillanatnyi vízdoldható szervesanyag-tartalma és összetétele szorosan összefügg a talaj teljes szervesanyag-tartalmával és összetételével. Ugyanakkor ez nem feltétlenül mondató el a napjainkban is széles körben használt alkalikus kioldású szervesanyag frakcióról. Ezen túlmenően a vízdoldható frakció gyorsan és jobban reagál a műveléstechnika megváltozása okozta szerves anyag átalakulásokra. Mintavétele és a minták vizsgálata is egyszerűbb az alkalikusan kivont szerves anyag mintákhoz viszonyítva. Következésképp a vízdoldható szerves anyag mennyisége és összetétele potenciálisan jó indikátorai lehetnek a talajegészségnek és akár egy ehhez kapcsolódó támogatási rendszer létrehozásának.

Szintén módszertani eredményként értékelem, hogy a nagyparcellás eső-szimulátor által elvégzett, eltérő csapadék intenzitású mérések eredményei alapján meghatározhatóvá vált egy adott talajállapothoz köthető tényleges, hatékony vízáteresztő képesség. Lényeges, hogy ez az érték nem konstans, hanem a csapadék intenzitásának függvényében változik. E területi heterogenitás szempontjából is reprezentatív mérési eredményeknek kulcsszerepük van a hidrológiai modellalkotás és validálás folyamatában.

Összességében az az elért eredmények alapján egy olyan területhasználati alternatíva körvonalazódik, mely hazai klimatikus és környezeti viszonyok mellett is képes a talaj degradációját csökkenteni, víztároló képességét és egészségét növelni úgy, hogy közben a termőképesség is javul. Az egészségesebb talaj pedig alapja a változó környezeti viszonyok okozta szélsőségek tompításának és a hosszú távon is élhető környezetnek.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm Csepinszky Bélának és Csiszár Bélának, hogy az egyetemi diploma megszerzése után egy olyan talajeróziót vizsgáló kutatásnak lehettem aktív részese, mely, mint később kiderült, egész későbbi pályámat meghatározta. E kutatás keretében vettem rész egy nagyparcellás, terepi esőszimulátor fejlesztésében és a Balaton vízgyűjtő területén, illetve az ország több pontján történt mesterséges esőztetésekben, majd az adatok feldolgozásában. Ez az időszak alapvetően határozta meg tudományos érdeklődésemet és gondolkodásmódomat is.

Köszönöm Kertész Ádámnak a doktori témavezetését és a felhőtlen munkahelyi légkört mely a Földrajztudományi Intézetben körülvelt és segített. Köszönöm az Intézet mindenkori vezetőségének támogatását és a lehetőségeket melyekkel igyekeztem élni. Sokat tanultam az itteni kutatótársaktól, elsősorban Szalai Zoltántól akivel számos terepi és tudományos megbeszélést folytattunk melyek szélesítették a látókörömet. Másodsorban Madarász Balázstól, aki a Szentgyörgyvári Kísérleti Állomás gazdjaként fáradhatatlanul küzd a tartamkísérlet fenntartásáért és a kímélő talajművelés népszerűsítéséért. Köszönet illeti Centeri Csabát akivel huszonöt éve vizsgáljuk a talajok vízgazdálkodásával és eróziójával összefüggő problémakört. Köszönöm szerzőtársaimnak a közös munkát. Az évek során sokat tanultam tőlük is többek között az adatelemzés és közleményírás rejtelmeiről. Közülük név szerint is kiemelem Filep Tibort, Szatmári Gábort, Bede-Fazekas Ákost és Hatvani Istvánt. Hálás vagyok BSc, MSc és PhD hallgatóimnak akik nem csak fizikailag vállaltak oroszlánrészt a labor és terepmunkából, hanem meglátásaikkal, kételyeikkel és ötleteikkel is jelentősen hozzájárultak a dolgozatban közölt eredményekhez. Közülük név szerint is köszönöm Szabó Judit Alexandrának, Zacháry Dórának és Vancsik Annának a segítséget. Az elért eredmények nem jöhettek volna létre a lelkiismeretes és odaadó labormunka nélkül, ezért külön köszönöm a segítséget DiGléria Máriának, Fehér Katalinnak, Gáspár Lillának, Kiss Klaudiának, Horváth Zsófiának, Nagy Annának és Szávai Péternek, valamint Király Csillának Karlik Máténak és Vona Viktóriának. Hálás vagyok Kondor Attilának a környezettan terén végzett együtt gondolkodásért, vitákért és publikálásért mely számos területen szélesítette a látókörömet. Szintén köszönet illeti a támogatási forrásokat melyek anyagilag biztosították a kutatási háttérrel. Ezen belül is köszönöm az MTA Bolyai ösztöndíj, az NKFIH PD-100929 és a K-123953 támogatását. Nem utolsó sorban köszönöm családomnak a türelmet, a támogatást és a stabil és felemelő háttérrel mely minden elért eredmény alapja.

Irodalom

- Abiven, S., Recous, S., Reyes, V., Oliver, R., 2005. Mineralisation of C and N from root, stem and leaf residues in soil and role of their biochemical quality. *Biol. Fertil. Soils* 42, 119–128. <https://doi.org/10.1007/S00374-005-0006-0/FIGURES/6>
- Adhikari, K., Hartemink, A.E., Minasny, B., Bou Kheir, R., Greve, M.B., Greve, M.H., 2014. Digital mapping of soil organic carbon contents and stocks in Denmark. *PLoS One* 9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105519>
- Aide, M.T., Aide, C., Braden, I., 2021. Soil Genesis of Histosols and Gelisols with a Emphasis on Soil Processes Supporting Carbon Sequestration, in: *Environmental Issues and Sustainable Development*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.94399>
- Akagi, J., Zsolnay, Á., 2008. Effects of long-term de-vegetation on the quantity and quality of water extractable organic matter (WEOM): Biogeochemical implications. *Chemosphere* 72, 1462–1466. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2008.05.009>
- Al-Graiti, T., Jakab, G., Ujházy, N., Vancsik, A., Fodor, N., Árendás, T., Madarász, B., Barcza, Z., Márialigeti, K., Szalai, Z., 2022. The Composition of Dissolved Organic Matter in Arable Lands: Does Soil Management Practice Matter? *Agronomy* 12, 2797. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY12112797/S1>
- Alliaume, F., Rossing, W.A.H., Tiftonell, P., Jorge, G., Dogliotti, S., 2014. Reduced tillage and cover crops improve water capture and reduce erosion of fine textured soils in raised bed tomato systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 183, 127–137. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2013.11.001>
- Angst, G., Kögel-Knabner, I., Kirfel, K., Hertel, D., Mueller, C.W., 2016. Spatial distribution and chemical composition of soil organic matter fractions in rhizosphere and non-rhizosphere soil under European beech (*Fagus sylvatica* L.). *Geoderma* 264, 179–187. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2015.10.016>
- Angst, G., Mueller, K.E., Castellano, M.J., Vogel, C., Wiesmeier, M., Mueller, C.W., 2023. Unlocking complex soil systems as carbon sinks: multi-pool management as the key. *Nat. Commun.* 2023 14, 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38700-5>
- Angst, G., Mueller, K.E., Nierop, K.G.J., Simpson, M.J., 2021. Plant- or microbial-derived? A review on the molecular composition of stabilized soil organic matter. *Soil Biol. Biochem.* 156, 108189. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2021.108189>
- Auerswald, K., Fiener, P., Martin, W., Elhaus, D., 2014. Use and misuse of the K factor equation in soil erosion modeling: An alternative equation for determining USLE nomograph soil erodibility values. *CATENA* 118, 220–225. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2014.01.008>
- Ayoubi, S., Mokhtari Karchegani, P., Mosaddeghi, M.R., Honarjoo, N., 2012. Soil aggregation and organic carbon as affected by topography and land use change in western Iran. *Soil Tillage Res.* 121, 18–26. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2012.01.011>
- Bailey, V.L., Pries, C.H., Lajtha, K., 2019. What do we know about soil carbon destabilization? *Environ. Res. Lett.* 14, 083004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AB2C11>

- Baker, A., Tipping, E., Thacker, S.A., Gondar, D., 2008. Relating dissolved organic matter fluorescence and functional properties. *Chemosphere* 73, 1765–1772.
<https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2008.09.018>
- Baldock, J.A., Oades, J.M., Waters, A.G., Peng, X., Vassallo, A.M., Wilson, M.A., 1992. Aspects of the chemical structure of soil organic materials as revealed by solid-state ^{13}C NMR spectroscopy. *Biogeochem.* 1992 161 16, 1–42.
<https://doi.org/10.1007/BF00024251>
- Barendrecht, M.H., Matan, A., Mendoza, H., Weesie, R., Rohse, | Melanie, Koehler, J., De Ruiter, M., Garcia, M., Mazzoleni, M., Jeroen, |, Aerts, C.J.H., Ward, P.J., Giuliano, |, Baldassarre, D., Day, R., Van Loon, A.F., 2024. Exploring drought-to-flood interactions and dynamics: A global case review. *Wiley Interdiscip. Rev. Water* e1726. <https://doi.org/10.1002/WAT2.1726>
- Barré, P., Denis, A., Basile-Doelsch, I., Bispo, A., Lauric, C., Claire, C., Tiphaine, C., Delphine, D., Thomas, E., Sylvain, P., Angers, D.A., Cécillon, L., Chenu, C., Chevallier, T., Derrien, D., Eglin, T.K., Pellerin, S., 2017. Ideas and perspectives: Can we use the soil carbon saturation deficit to quantitatively assess the soil carbon storage potential, or should we explore other strategies? *Biogeosciences Discuss.* 1–12. <https://doi.org/10.5194/bg-2017-395i>
- Bartholy, J., Pongrácz, R., 2007. Regional analysis of extreme temperature and precipitation indices for the Carpathian Basin from 1946 to 2001 57, 83–95.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.11.002>
- Bartlová, J., Badalíková, B., Pospíšilová, L., Pokorný, E., Šarapatka, B., 2015. Water stability of soil aggregates in different systems of Tillage. *Soil Water Res.* 10, 147–154. <https://doi.org/10.17221/132/2014-SWR>
- Bashfield, A., Keim, A., 2011. Continent-wide DEM Creation for the European Union, in: 34th International Symposium on Remote Sensing of Environment - The GEOSS Era: Towards Operational Environmental Monitoring.
- Bashfield, A., Keim, A., 2011. Continent-wide DEM Creation for the European Union, in: 34th International Symposium on Remote Sensing of Environment - The GEOSS Era: Towards Operational Environmental Monitoring.
- Battin, T.J., Kaplan, L.A., Findlay, S., Hopkinson, C.S., Marti, E., Packman, A.I., Newbold, J.D., Sabater, F., 2008. Biophysical controls on organic carbon fluxes in fluvial networks. *Nat. Geosci.* 1, 95–100. <https://doi.org/10.1038/ngeo101>
- Beare, M.H., McNeill, S.J., Curtin, D., Parfitt, R.L., Jones, H.S., Dodd, M.B., Sharp, J., 2014. Estimating the organic carbon stabilisation capacity and saturation deficit of soils: A New Zealand case study. *Biogeochemistry* 120, 71–87.
<https://doi.org/10.1007/s10533-014-9982-1>
- Berényi, A., Pongrácz, R., Bartholy, J., 2021. Csapadékszélsőségek változása Európa déli alföldi régióiban az 1951–2019 időszakban. *Mod. Geográfia* 16, 85–101.
<https://doi.org/10.15170/MG.2021.16.04.05>
- Bertelkamp, C., van der Hoek, J.P., Schoutteten, K., Hulpiau, L., Vanhaecke, L., Vanden Bussche, J., Cabo, A.J., Callewaert, C., Boon, N., Löwenberg, J., Singhal, N., Verliefde, A.R.D., 2016. The effect of feed water dissolved organic carbon concentration and composition on organic micropollutant removal and microbial

- diversity in soil columns simulating river bank filtration. *Chemosphere* 144, 932–939.
<https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2015.09.017>
- Bhattacharyya, R., Tuti, M.D., Kundu, S., Bisht, J.K., Bhatt, J.C., 2012. Conservation Tillage Impacts on Soil Aggregation and Carbon Pools in a Sandy Clay Loam Soil of the Indian Himalayas. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76, 617–627.
<https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0320>
- Birkás, M., Jolánkai, M., Gyuricza, C., Percze, A., 2004. Tillage effects on compaction, earthworms and other soil quality indicators in Hungary. *Soil Tillage Res.* 78, 185–196. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2004.02.006>
- Bishop, T.F.A., McBratney, A.B., Laslett, G.M., 1999. Modelling soil attribute depth functions with equal-area quadratic smoothing splines. *Geoderma* 91, 27–45.
[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(99\)00003-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00003-8)
- Borisover, M., Lordian, A., Levy, G.J., 2012. Water-extractable soil organic matter characterization by chromophoric indicators: Effects of soil type and irrigation water quality. *Geoderma* 179–180, 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.02.019>
- Borreli, P., Robinson, D.A., Fleischer, L.R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., Meusburger, K., Modugno, S., Schütt, B., Ferro, V., Bagarello, V., Oost, K. Van, Montanarella, L., Panagos, P., 2017. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nat. Commun.* 8, 2013.
<https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
- Bossard, J.M., Feranec, J.O., 2000. CORINE land cover technical guide – Addendum 2000. Copenhagen.
- Briedis, C., de Moraes Sá, J.C., Lal, R., Tivet, F., Franchini, J.C., de Oliveira Ferreira, A., da Cruz Hartman, D., Schimiguel, R., Bressan, P.T., Inagaki, T.M., Romaniw, J., Gonçalves, D.R.P., 2018. How does no-till deliver carbon stabilization and saturation in highly weathered soils? *Catena* 163, 13–23.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.12.003>
- Bruun, T.B., Elberling, B., Christensen, B.T., 2010. Lability of soil organic carbon in tropical soils with different clay minerals. *Soil Biol. Biochem.* 42, 888–895.
<https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2010.01.009>
- Cai, A., Feng, W., Zhang, W., Xu, M., 2016. Climate, soil texture, and soil types affect the contributions of fine-fraction-stabilized carbon to total soil organic carbon in different land uses across China. *J. Environ. Manage.* 172, 2–9.
<https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2016.02.009>
- Calderón, F.J., Reeves, J.B., Collins, H.P., Paul, E.A., 2011. Chemical Differences in Soil Organic Matter Fractions Determined by Diffuse-Reflectance Mid-Infrared Spectroscopy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75, 568–579.
<https://doi.org/10.2136/SSSAJ2009.0375>
- Carbonetto, B., Rascovan, N., Álvarez, R., Mentaberry, A., Vázquez, M.P., 2014. Structure, composition and metagenomic profile of soil microbiomes associated to agricultural land use and tillage systems in Argentine Pampas. *PLoS One* 9.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099949>
- Cardinael, R., Chevallier, T., Barthès, B.G., Saby, N.P.A., Parent, T., Dupraz, C., Bernoux,

- M., Chenu, C., 2015. Impact of alley cropping agroforestry on stocks, forms and spatial distribution of soil organic carbon - A case study in a Mediterranean context. *Geoderma* 259–260, 288–299. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.06.015>
- Cates, A.M., Ruark, M.D., Hedtcke, J.L., Posner, J.L., 2016. Long-term tillage, rotation and perennialization effects on particulate and aggregate soil organic matter. *Soil Tillage Res.* 155, 371–380. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2015.09.008>
- Centeri, C., Szabó, B., Jakab, G., Kovács, J., Madarász, B., Szabó, J., Tóth, A., Gelencsér, G., Szalai, Z., Vona, M., 2014. State of soil carbon in Hungarian sites: Loss, pool and management, *Soil Carbon: Types, Management Practices and Environmental Benefits*.
- Centeri, C., Szalai, Z., Jakab, G., Barta, K., Farsang, A., Szabó, S., Bíró, Z., 2015. Soil erodibility calculations based on different particle size distribution measurements. *Hungarian Geogr. Bull.* 64. <https://doi.org/10.15201/hungeobull.64.1.2>
- Chantigny, M.H., 2003. Dissolved and water-extractable organic matter in soils : a review on the influence of land use and management practices 113, 357–380. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00370-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00370-1)
- Chen, S., Arrouays, D., Angers, D.A., Chenu, C., Barré, P., Martin, M.P., Saby, N.P.A., Walter, C., 2019. National estimation of soil organic carbon storage potential for arable soils: A data-driven approach coupled with carbon-landscape zones. *Sci. Total Environ.* 666, 355–367. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.02.249>
- Chen, S., Arrouays, D., Angers, D.A., Martin, M.P., Walter, C., 2018. Soil carbon stocks under different land uses and the applicability of the soil carbon saturation concept. *Soil Tillage Res.* 0–1. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.001>
- Chen, Y., Senesi, N., Schnitzer, M., 1977. Information Provided on Humic Substances by E4/E6 Ratios¹. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41, 352–358. <https://doi.org/10.2136/sssaj1977.03615995004100020037x>
- Chenu, C., Angers, D.A., Barré, P., Derrien, D., Arrouays, D., Balesdent, J., 2019. Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. *Soil Tillage Res.* 188, 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.011>
- Cheval, S., Dumitrescu, A., Birsan, M.V., 2017. Variability of the aridity in the South-Eastern Europe over 1961–2050. *CATENA* 151, 74–86. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2016.11.029>
- Chimento, C., Almagro, M., Amaducci, S., 2016. Carbon sequestration potential in perennial bioenergy crops: the importance of organic matter inputs and its physical protection. *GCB Bioenergy* 8, 111–121. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12232>
- Coble, P.G., 1996. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy. *Mar. Chem.* 51, 325–346. [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(95\)00062-3](https://doi.org/10.1016/0304-4203(95)00062-3)
- Córdova, S.C., Olk, D.C., Dietzel, R.N., Mueller, K.E., Archontoulis, S. V., Castellano, M.J., 2018. Plant litter quality affects the accumulation rate, composition, and stability of mineral-associated soil organic matter. *Soil Biol. Biochem.* 125, 115–124. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2018.07.010>
- Cotrufo, M.F., Ranalli, M.G., Haddix, M.L., Six, J., Lugato, E., 2019. Soil carbon storage

- informed by particulate and mineral-associated organic matter. *Nat. Geosci.* 12, 989–994. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0484-6>
- County, S., Pásztor, L., Körösparti, J., Bozán, C., Laborczi, A., 2015. Spatial risk assessment of hydrological extremities : Inland excess water hazard , Szabolcs-. *J. Maps* 0, 1–9. <https://doi.org/10.1080/17445647.2014.954647>
- Cozzolino, D., Morón, A., 2006. Potential of near-infrared reflectance spectroscopy and chemometrics to predict soil organic carbon fractions. *Soil Tillage Res.* 85, 78–85. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2004.12.006>
- Cui, Y., Fang, L., Deng, L., Guo, X., Han, F., Ju, W., Wang, X., Chen, H., Tan, W., Zhang, X., 2019. Patterns of soil microbial nutrient limitations and their roles in the variation of soil organic carbon across a precipitation gradient in an arid and semi-arid region. *Sci. Total Environ.* 658, 1440–1451. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.12.289>
- Cuss, C.W., Guéguen, C., 2015. Characterizing the Labile Fraction of Dissolved Organic Matter in Leaf Leachates: Methods, Indicators, Structure, and Complexity. *Labile Org. Matter—Chemical Compos. Funct. Significance Soil Environ.*, SSSA Special Publications. <https://doi.org/doi:10.2136/sssaspecpub62.2014.0043>
- Czigány, S., Pirkhoffer, E., Lóczy, D., Balatonyi, L., 2013. Flash flood analysis for Southwest-Hungary, in: Lóczy, D. (Ed.), *Geomorphological Impacts of Extreme Weather*. Springer, Dordrecht, pp. 67–82. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6301-2_5
- Dai, L., Ge, J., Wang, L., Zhang, Q., Liang, T., Bolan, N., Lischeid, G., Rinklebe, J., 2022. Influence of soil properties, topography, and land cover on soil organic carbon and total nitrogen concentration: A case study in Qinghai-Tibet plateau based on random forest regression and structural equation modeling. *Sci. Total Environ.* 821, 153440. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.153440>
- Dekemati, I., Simon, B., Vinogradov, S., Birkás, M., 2019. The effects of various tillage treatments on soil physical properties, earthworm abundance and crop yield in Hungary. *Soil Tillage Res.* 194, 104334. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104334>
- Delprat, L., Chassin, P., Linères, M., Jambert, C., 1997. Characterization of dissolved organic carbon in cleared forest soils converted to maize cultivation. *Dev. Crop Sci.* 25, 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0378-519X\(97\)80026-8](https://doi.org/10.1016/S0378-519X(97)80026-8)
- Demyan, M.S., Rasche, F., Schulz, E., Breulmann, M., Müller, T., Cadisch, G., 2012. Use of specific peaks obtained by diffuse reflectance Fourier transform mid-infrared spectroscopy to study the composition of organic matter in a Haplic Chernozem. *Eur. J. Soil Sci.* 63, 189–199. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2011.01420.x>
- Ding, G., Novak, J.M., Amarasiriwardena, D., Hunt, P.G., Xing, B., 2002. Soil Organic Matter Characteristics as Affected by Tillage Management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 429, 421–429. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.4210>
- Duan, X., Shi, X., Li, Y., Rong, L., Fen, D., 2017. A new method to calculate soil loss tolerance for sustainable soil productivity in farmland. *Agron. Sustain. Dev.* 37, 1–13. <https://doi.org/10.1007/S13593-016-0409-3/FIGURES/5>

- Dungait, J.A.J., Hopkins, D.W., Gregory, A.S., Whitmore, A.P., 2012. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance. *Glob. Chang. Biol.* 18, 1781–1796. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2486.2012.02665.X>
- Eckard, R.S., Pellerin, B.A., Bergamaschi, B.A., Bachand, P.A.M., Bachand, S.M., Spencer, R.G.M., Hernes, P.J., 2017. Dissolved Organic Matter Compositional Change and Biolability During Two Storm Runoff Events in a Small Agricultural Watershed. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 122, 2634–2650. <https://doi.org/10.1002/2017JG003935>
- Egli, M., Mavris, C., Mirabella, A., Giaccari, D., 2010. Soil organic matter formation along a chronosequence in the Morteratsch proglacial area (Upper Engadine, Switzerland). *Catena* 82, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.05.001>
- Eleftheriadis, A., Lafuente, F., Turrión, M.-B., 2018. Effect of land use, time since deforestation and management on organic C and N in soil textural fractions. *Soil Tillage Res.* 183, 1–7. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2018.05.012>
- Embacher, A., Zsolnay, A., Gatterer, A., Munch, J.C., 2008. The dynamics of water extractable organic matter (WEOM) in common arable topsoils: II. Influence of mineral and combined mineral and manure fertilization in a Haplic Chernozem. *Geoderma* 148, 63–69. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.09.006>
- Embacher, A., Zsolnay, A., Gatterer, A., Munch, J.C., 2007. The dynamics of water extractable organic matter (WEOM) in common arable topsoils: I. Quantity, quality and function over a three year period. *Geoderma* 139, 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.12.002>
- Emmerling, C., 2001. Response of earthworm communities to different types of soil tillage. *Appl. Soil Ecol.* 17, 91–96. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00132-3](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00132-3)
- Farsang, A., 2016. A víz- és szélerózió szerepe a talaj humusz- és elemtartalmának horizontális átrendeződésében - MTA doktori értekezés.
- Fekete, I., Berki, I., Lajtha, K., Trumbore, S., Francioso, O., Gioacchini, P., Montecchio, D., Várbíró, G., Béni, Á., Makádi, M., Demeter, I., Madarász, B., Juhos, K., Kotrocó, Z., 2021. How will a drier climate change carbon sequestration in soils of the deciduous forests of Central Europe? *Biogeochemistry* 152, 13–32. <https://doi.org/10.1007/s10533-020-00728-w>
- Feng, W., Plante, A.F., Six, J., 2013. Improving estimates of maximal organic carbon stabilization by fine soil particles. *Biogeochemistry* 112, 81–93. <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9679-7>
- Filep, T., Draskovits, E., Szabó, J., Koós, S., László, P., Szalai, Z., 2015. The dissolved organic matter as a potential soil quality indicator in arable soils of Hungary. *Environ. Monit. Assess.* 187, 1–12. <https://doi.org/10.1007/S10661-015-4700-6/METRICS>
- Filep, T., Rékási, M., 2011. Factors controlling dissolved organic carbon (DOC), dissolved organic nitrogen (DON) and DOC/DON ratio in arable soils based on a dataset from Hungary. *Geoderma* 162, 312–318. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2011.03.002>
- Filep, T., Zacháry, D., Jakab, G., Szalai, Z., 2022. Chemical composition of labile carbon fractions in Hungarian forest soils: Insight into biogeochemical coupling between

- DOM and POM. *Geoderma* 419, 115867.
<https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2022.115867>
- Forman, R.T.T., 1995. Land mosaics: the ecology of landscapes and regions. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.2307/2261341>
- Fowler, H.J., Kilsby, C.G., 2003. Implications of changes in seasonal and annual extreme rainfall. *Geophys. Res. Lett.* 30, 1720. <https://doi.org/10.1029/2003GL017327>
- Gao, Q., Ma, L., Fang, Y., Zhang, A., Li, G., Wang, J., Wu, D., Wu, W., Du, Z., 2021. Conservation tillage for 17 years alters the molecular composition of organic matter in soil profile. *Sci. Total Environ.* 762, 143116.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.143116>
- Garcia-Franco, N., Albaladejo, J., Almagro, M., Martínez-Mena, M., 2015. Beneficial effects of reduced tillage and green manure on soil aggregation and stabilization of organic carbon in a Mediterranean agroecosystem. *Soil Tillage Res.* 153, 66–75.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2015.05.010>
- Gelybó, G., Barcza, Z., Dencső, M., Potyó, I., Kása, I., Horel, Pokovai, K., Birkás, M., Kern, A., Hollós, R., Tóth, E., 2022. Effect of tillage and crop type on soil respiration in a long-term field experiment on chernozem soil under temperate climate. *Soil Tillage Res.* 216. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105239>
- Gelybó, G., Tóth, E., Farkas, C., Horel, Kása, I., Bakacsi, Z., 2018. Potential impacts of climate change on soil properties. *Agrokémia és Talajt.* 67, 121–141.
<https://doi.org/10.1556/0088.2018.67.1.9>
- Ghosh, A., Singh, A.K., Kumar, S., Manna, M.C., Jha, P., Bhattacharyya, R., Sannagoudar, M.S., Singh, R., Chaudhari, S.K., Kumar, R. V., 2021. Do moisture conservation practices influence stability of soil organic carbon and structure? *Catena* 199, 105127.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105127>
- Gillespie, A.W., Diochon, A., Ma, B.L., Morrison, M.J., Kellman, L., Walley, F.L., Regier, T.Z., Chevrier, D., Dynes, J.J., Gregorich, E.G., 2014. Nitrogen input quality changes the biochemical composition of soil organic matter stabilized in the fine fraction: A long-term study. *Biogeochemistry* 117, 337–350. <https://doi.org/10.1007/S10533-013-9871-Z/FIGURES/4>
- Gómez, J.A., 2017. Sustainability using cover crops in Mediterranean tree crops, olives and vines – Challenges and current knowledge. *Hungarian Geogr. Bull.* 66, 13–28.
<https://doi.org/10.15201/hungeobull.66.1.2>
- Graeber, D., Gelbrecht, J., Pusch, M.T., Anlanger, C., von Schiller, D., 2012. Agriculture has changed the amount and composition of dissolved organic matter in Central European headwater streams. *Sci. Total Environ.* 438, 435–446.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2012.08.087>
- Grandy, A.S., Robertson, G.P., 2007. Land-Use Intensity Effects on Soil Organic Carbon Accumulation Rates and Mechanisms. *Ecosystems* 10, 59–74.
<https://doi.org/10.1007/s10021-006-9010-y>
- Guimarães, D.V., Gonzaga, M.I.S., da Silva, T.O., da Silva, T.L., da Silva Dias, N., Matias, M.I.S., 2013. Soil organic matter pools and carbon fractions in soil under different land uses. *Soil Tillage Res.* 126, 177–182.

<https://doi.org/10.1016/j.still.2012.07.010>

- Haberhauer, G., Gerzabek, M.H., 1999. Drift and transmission FT-IR spectroscopy of forest soils: an approach to determine decomposition processes of forest litter. *Vib. Spectrosc.* 19, 413–417. [https://doi.org/10.1016/S0924-2031\(98\)00046-0](https://doi.org/10.1016/S0924-2031(98)00046-0)
- Haberhauer, G., Rafferty, B., Strebl, F., Gerzabek, M.H., 1998. Comparison of the composition of forest soil litter derived from three different sites at various decompositional stages using FTIR spectroscopy. *Geoderma* 83, 331–342. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00008-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00008-1)
- Hanegraaf, M.C., Hoffland, E., Kuikman, P.J., Brussaard, L., 2009. Trends in soil organic matter contents in Dutch grasslands and maize fields on sandy soils. *Eur. J. Soil Sci.* 60, 213–222. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2389.2008.01115.X>
- Hassink, J., 1997a. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant Soil* 191, 77–87. <https://doi.org/10.1023/A:1004213929699>
- Hassink, J., 1997b. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with silt and clay particles. *Plant Soil* 191, 77–87.
- Helfrich, M., Ludwig, B., Buurman, P., Flessa, H., 2006. Effect of land use on the composition of soil organic matter in density and aggregate fractions as revealed by solid-state ¹³C NMR spectroscopy. *Geoderma* 136, 331–341. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2006.03.048>
- Heuvelink, G., 2014. Uncertainty quantification of GlobalSoilMap products, in: *GlobalSoilMap*. CRC Press, pp. 335–340. <https://doi.org/10.1201/b16500-62>
- Hrachová, J., Komadel, P., Chodák, I., 2009. Natural rubber nanocomposites with organo-modified bentonite. *Clays Clay Miner.* 57, 444–451. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2009.0570405>
- Hsiao, C.J., Sassenrath, G.F., Zeglin, L., Hettiarachchi, G., Rice, C., 2019. Changes in Soil Microbiology Under Conventional and No-Till Production During Crop Rotation. *Kansas Agric. Exp. Stn. Res. Reports* 5. <https://doi.org/10.4148/2378-5977.7746>
- Hu, X., Næss, J.S., Iordan, C.M., Huang, B., Zhao, W., Cherubini, F., 2021. Recent global land cover dynamics and implications for soil erosion and carbon losses from deforestation. *Anthropocene* 34, 100291. <https://doi.org/10.1016/J.ANCENE.2021.100291>
- Huang, M., Chai, L., Jiang, D., Zhang, M., Jia, W., Huang, Y., Zhou, J., 2021. Dissolved organic matter (DOM) quality drives biogeographic patterns of soil bacterial communities and their association networks in semi-arid regions. *FEMS Microbiol. Ecol.* 97. <https://doi.org/10.1093/FEMSEC/FIAB083>
- Huguet, A., Vacher, L., Relexans, S., Saubusse, S., Froidefond, J.M., Parlanti, E., 2009. Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary. *Org. Geochem.* 40, 706–719. <https://doi.org/10.1016/J.ORGGEOCHEM.2009.03.002>
- Hui, K., Xi, B., Tan, W., Song, Q., 2022. Long-term application of nitrogen fertilizer alters the properties of dissolved soil organic matter and increases the accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environ. Res.* 215, 114267. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2022.114267>

- Huo, C., Liang, J., Zhang, W., Wang, P., Cheng, W., 2022. Priming effect and its regulating factors for fast and slow soil organic carbon pools: A meta-analysis. *Pedosphere* 32, 140–148. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(21\)60064-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60064-4)
- Inagaki, T.M., Possinger, A.R., Grant, K.E., Schweizer, S.A., Mueller, C.W., Derry, L.A., Lehmann, J., Kögel-Knabner, I., 2020. Subsoil organo-mineral associations under contrasting climate conditions. *Geochim. Cosmochim. Acta* 270, 244–263. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.11.030>
- Jakab, G., Bede-Fazekas, Á., Vona, V., Madarász, B., Karlik, M., Zacháry, D., Filep, T., Dévény, Z., Centeri, C., Masoudi, M., Bidló, A., Al-Graiti, T., Szatmári, G., Vancsik, A., Király, C., Darabos, G., Angyal, Z., Szalai, Z., 2024. Beyond land use: Understanding variations in topsoil bulk versus recalcitrant organic matter. *CATENA* 244, 108232. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2024.108232>
- Jakab, G., Bíró, T.B., Kovács, Z., Papp, Á., Sarawut, N., Szalai, Z., Madarász, B., Szabó, S., 2019a. Spatial analysis of changes and anomalies of intense rainfalls in Hungary. *Hungarian Geogr. Bull.* 68, 241–253. <https://doi.org/10.15201/hungeobull.68.3.3>
- Jakab, G., Filep, T., Király, C., Madarász, B., Zacháry, D., Ringer, M., Vancsik, A., Gáspár, L., Szalai, Z., 2019b. Differences in Mineral Phase Associated Soil Organic Matter Composition due to Varying Tillage Intensity. *Agron.* . <https://doi.org/10.3390/agronomy9110700>
- Jakab, G., Hegyi, I., Fullen, M., Szabó, J., Zacháry, D., Szalai, Z., 2018a. A 300-year record of sedimentation in a small tilled catena in Hungary based on $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, and C/N distribution. *J. Soils Sediments* 18. <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1908-9>
- Jakab, G., Madarász, B., Masoudi, M., Karlik, M., Király, C., Zacháry, D., Filep, T., Dekemati, I., Centeri, C., Al-graiti, T.A.J., Szalai, Z., 2023. Soil organic matter gain by reduced tillage intensity : Storage , pools , and chemical composition 226. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105584>
- Jakab, G., Madarász, B., Szabó, J.A., Tóth, A., Zacháry, D., Szalai, Z., Kertész, Á., Dyson, J., 2017. Infiltration and soil loss changes during the growing season under ploughing and conservation tillage. *Sustain.* 9. <https://doi.org/10.3390/su9101726>
- Jakab, G., Németh, T., Csepinszky, B., Madarász, B., Szalai, Z., Kertész, A., 2013. The influence of short term soil sealing and crusting on hydrology and erosion at balaton uplands, hungary. *Carpathian J. Earth Environ. Sci.* 8.
- Jakab, G., Rieder, Á., Vancsik, A.V., Szalai, Z., 2018b. Soil organic matter characterisation by photometric indices or photon correlation spectroscopy: Are they comparable? *Hungarian Geogr. Bull.* 67. <https://doi.org/10.15201/hungeobull.67.2.1>
- Jakab, G., Vancsik, A., Filep, T., Madarász, B., Zacháry, D., Ringer, M., Ujházy, N., Szalai, Z., 2022. Soil organic matter characterisation using alkali and water extraction, and its relation to soil properties. *Geoderma Reg.* 28, e00469. <https://doi.org/10.1016/J.GEODRS.2021.E00469>
- Juhos, K., Madarász, B., Kotroczó, Z., Béni, Á., Makádi, M., Fekete, I., 2021. Carbon sequestration of forest soils is reflected by changes in physicochemical soil indicators — A comprehensive discussion of a long-term experiment on a detritus manipulation. *Geoderma* 385, 114918. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114918>

- Kaiser, K., Kalbitz, K., 2012. Cycling downwards - dissolved organic matter in soils. *Soil Biol. Biochem.* 52, 29–32. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.04.002>
- Kalbitz, K., Kaiser, K., 2008. Contribution of dissolved organic matter to carbon storage in forest mineral soils § 1090, 52–60. <https://doi.org/10.1002/jpln.200700043>
- Kalbitz, K., Solinger, S., Park, J.-H., Michalzik, B., Matzner, E., 2000. CONTROLS ON THE DYNAMICS OF DISSOLVED ORGANIC MATTER IN SOILS: A REVIEW. *Soil Sci.* 165.
- Kallenbach, C.M., Frey, S.D., Grandy, A.S., 2016. Direct evidence for microbial-derived soil organic matter formation and its ecophysiological controls. *Nat. Commun.* 7, 1–10. <https://doi.org/10.1038/ncomms13630>
- Kan, Z.R., Virk, A.L., He, C., Liu, Q.Y., Qi, J.Y., Dang, Y.P., Zhao, X., Zhang, H.L., 2020. Characteristics of carbon mineralization and accumulation under long-term conservation tillage. *Catena* 193, 104636. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104636>
- Kassam, A., Basch, G., Friedrich, T., Gonzalez, E., Trivino, P., Mkomwa, S., 2017. Mobilizing greater crop and land potentials sustainably. *Hungarian Geogr. Bull.* 66, 3–11. <https://doi.org/10.15201/hungeobull.66.1.1>
- Kay, B.D., Vandenbygaart, A.J., 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil Tillage Res.* 66, 107–118. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00019-3](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00019-3)
- Kemper, W.D., Koch, E.J., 1966. Aggregate stability of soils from western United States and Canada. *United States Dep. Agric.* 1–57.
- Kertész, Á., Gergely, J., 2011. Gully erosion in Hungary, review and case study. *Procedia - Soc. Behav. Sci.* 19, 693–701. <https://doi.org/10.1016/J.SBSPRO.2011.05.187>
- Keuskamp, J.A., Dingemans, B.J.J., Lehtinen, T., Sarneel, J.M., Hefting, M.M., 2013. Tea Bag Index: A novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems. *Methods Ecol. Evol.* 4, 1070–1075. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12097>
- Kirkby, C.A., Kirkegaard, J.A., Richardson, A.E., Wade, L.J., Blanchard, C., Batten, G., 2011. Stable soil organic matter: A comparison of C:N:P:S ratios in Australian and other world soils. *Geoderma* 163, 197–208. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2011.04.010>
- Kirkby, M.J., Irvine, B.J., Jones, R.J.A., Govers, G., Boer, M., Cerdan, O., Daroussin, J., Gobin, A., Grimm, M., Le Bissonnais, Y., Kosmas, C., Mantel, S., Puigdefabregas, J., Van Lynden, G., 2008. The PESERA coarse scale erosion model for Europe. I. – Model rationale and implementation. *Eur. J. Soil Sci.* 59, 1293–1306. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2389.2008.01072.X>
- Klotzbücher, T., Kalbitz, K., Cerli, C., Hernes, P.J., Kaiser, K., 2016. Gone or just out of sight? the apparent disappearance of aromatic litter components in soils. *SOIL* 2, 325–335. <https://doi.org/10.5194/SOIL-2-325-2016>
- Kögel-Knabner, I., 2000. Analytical approaches for characterizing soil organic matter. *Org. Geochem.* 31, 609–625. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(00\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(00)00042-5)

- Kögel-Knabner, I., Guggenberger, G., Kleber, M., Kandeler, E., Kalbitz, K., Scheu, S., Eusterhues, K., Leinweber, P., 2008. Organo-mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* <https://doi.org/10.1002/jpln.200700048>
- Kononova, M.M., 1961. Soil organic matter, its nature, its role in soil formation and in soil fertility. *Soil Org. matter, its nature, its role soil Form. soil Fertil.*
- Kotroczó, Z., Juhos, K., Biró, B., Kocsis, T., Pabar, S.A., Varga, C., Fekete, I., 2020. Effect of detritus manipulation on different organic matter decompositions in temperate deciduous forest soils. *Forests* 11, 1–14. <https://doi.org/10.3390/f11060675>
- Kramberger, B., Gselman, A., Kristl, J., Lešnik, M., Šuštar, V., Muršec, M., Podvršnik, M., 2014. Winter cover crop: the effects of grass–clover mixture proportion and biomass management on maize and the apparent residual N in the soil. *Eur. J. Agron.* 55, 63–71. <https://doi.org/10.1016/J.EJA.2014.01.001>
- Kruskal, W.H., Wallis, W.A., 1952. Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *J. Am. Stat. Assoc.* 47, 583–621. <https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441>
- Kuhn, M., Johnson, K., 2013. *Applied predictive modeling, Applied Predictive Modeling.* Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6849-3>
- Kukuļs, I., Kļaviņš, M., Nikodemus, O., Kasparinskis, R., Brūmelis, G., 2019. Changes in soil organic matter and soil humic substances following the afforestation of former agricultural lands in the boreal-nemoral ecotone (Latvia). *Geoderma Reg.* 16, e00213. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00213>
- Kushwa, V., Hati, K.M., Sinha, N.K., Singh, R.K., Mohanty, M., Somasundaram, J., Jain, R.C., Chaudhary, R.S., Biswas, A.K., Patra, A.K., 2016. Long-term Conservation Tillage Effect on Soil Organic Carbon and Available Phosphorous Content in Vertisols of Central India. *Agric. Res.* 5, 353–361. <https://doi.org/10.1007/s40003-016-0223-9>
- Kuzyakov, Y., Friedel, J.K., Stahr, K., 2000. Review of mechanisms and quantification of priming effects. *Soil Biol. Biochem.* 32, 1485–1498. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00084-5](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00084-5)
- Laborczi, A., Szatmári, G., Kaposi, A.D., Pásztor, L., 2019. Comparison of soil texture maps synthesized from standard depth layers with directly compiled products. *Geoderma* 352, 360–372. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.01.020>
- Lal, R., 2015. Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. *Sustain.* 2015, Vol. 7, Pages 5875–5895. <https://doi.org/10.3390/SU7055875>
- Lal, R., 2004a. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123, 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>
- Lal, R., 2004b. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science* (80-.). 304, 1623–1627.
- László, E., Salavec, P., 2018. Relationship between weather conditions advantageous for the development of urban heat island and atmospheric macrocirculation changes. *Int. J. Climatol.* 38, 3224–3232. <https://doi.org/10.1002/JOC.5496>
- Laudicina, V.A., Novara, A., Barbera, V., Egli, M., Badalucco, L., 2015. Long-Term

- Tillage and Cropping System Effects on Chemical and Biochemical Characteristics of Soil Organic Matter in a Mediterranean Semiarid Environment. *L. Degrad. Dev.* 26, 45–53. <https://doi.org/10.1002/LDR.2293>
- Lefcheck, J.S., 2021. Composite variables.
- Lefcheck, J.S., 2016. piecewiseSEM: Piecewise structural equation modelling in r for ecology, evolution, and systematics. *Methods Ecol. Evol.* 7, 573–579. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12512>
- Lehmann, J., Bossio, D.A., Kögel-Knabner, I., Rillig, M.C., 2020. The concept and future prospects of soil health. *Nat. Rev. Earth Environ.* 2020 110 1, 544–553. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>
- Lehmann, J., Kleber, M., 2015. The contentious nature of soil organic matter. *Nature* 528, 60–68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>
- Lehmann, J., Solomon, D., 2010. Organic carbon chemistry in soils observed by synchrotron-based spectroscopy, *Developments in Soil Science*. Elsevier. [https://doi.org/10.1016/s0166-2481\(10\)34010-4](https://doi.org/10.1016/s0166-2481(10)34010-4)
- Leirós, M.C., Trasar-Cepeda, C., Seoane, S., Gil-Sotres, F., 1999. Dependence of mineralization of soil organic matter on temperature and moisture. *Soil Biol. Biochem.* 31, 327–335. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(98\)00129-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(98)00129-1)
- Li, W.T., Xu, Z.X., Li, A.M., Wu, W., Zhou, Q., Wang, J.N., 2013. HPLC/HPSEC-FLD with multi-excitation/emission scan for EEM interpretation and dissolved organic matter analysis. *Water Res.* 47, 1246–1256. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.11.040>
- Ließ, M., 2015. Sampling for regression-based digital soil mapping: Closing the gap between statistical desires and operational applicability. *Spat. Stat.* 13, 106–122. <https://doi.org/10.1016/j.spasta.2015.06.002>
- Liu, H., Yuan, P., Qin, Z., Liu, D., Tan, D., Zhu, J., He, H., 2013. Thermal degradation of organic matter in the interlayer clay–organic complex: A TG-FTIR study on a montmorillonite/12-aminolauric acid system. *Appl. Clay Sci.* 80–81, 398–406. <https://doi.org/10.1016/J.CLAY.2013.07.005>
- Loch, R.J., Robotham, B.G., Zeller, L., Masterman, N., Orange, D.N., Bridge, B.J., Sheridan, G., Bourke, J.J., 2001. A multi-purpose rainfall simulator for field infiltration and erosion studies. *Soil Res.* 39, 599–610.
- Ludwig, B., Nitschke, R., Terhoeven-Urselmans, T., Michel, K., Flessa, H., 2008. Use of mid-infrared spectroscopy in the diffuse-reflectance mode for the prediction of the composition of organic matter in soil and litter. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 171, 384–391. <https://doi.org/10.1002/JPLN.200700022>
- Lugato, E., Lavallee, J.M., Haddix, M.L., Panagos, P., Cotrufo, M.F., 2021. Different climate sensitivity of particulate and mineral-associated soil organic matter. *Nat. Geosci.* 14, 295–300. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00744-x>
- Luo, Z., Feng, W., Luo, Y., Baldock, J., Wang, E., 2017. Soil organic carbon dynamics jointly controlled by climate, carbon inputs, soil properties and soil carbon fractions. *Glob. Chang. Biol.* 23, 4430–4439. <https://doi.org/10.1111/GCB.13767>

- Lützow, M. V., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., Flessa, H., 2006. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review. *Eur. J. Soil Sci.* 57, 426–445. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2389.2006.00809.X>
- Madarász, B., Jakab, G., Szalai, Z., Juhos, K., Kotroczó, Z., Tóth, A., Ladányi, M., 2021. Long-term effects of conservation tillage on soil erosion in Central Europe: A random forest-based approach. *Soil Tillage Res.* 209, 104959. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2021.104959>
- Madarász, B., Jakab, G., Tóth, A., 2018. Facing to real sustainability—conservation agricultural practices around the world. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-1040-9>
- Malone, B.P., Minasny, B., McBratney, A.B., 2017. Using R for Digital Soil Mapping, *Progress in Soil Science*. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44327-0>
- Malou, O.P., Sebag, D., Moulin, P., Chevallier, T., Badiane-Ndour, N.Y., Thiam, A., Chapuis-Lardy, L., 2020. The Rock-Eval® signature of soil organic carbon in arenosols of the Senegalese groundnut basin. How do agricultural practices matter? *Agric. Ecosyst. Environ.* 301, 107030. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2020.107030>
- Mann and Whitney, 1947. On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other Author (s): H . B . Mann and D . R . Whitney Source. *Ann. Math. Stat. , Vol . 18 , No . 1 (Mar ., 1947)*, pp . 50-60 18, 50–60.
- Manzoni, S., Porporato, A., 2009. Soil carbon and nitrogen mineralization: Theory and models across scales. *Soil Biol. Biochem.* 41, 1355–1379. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.02.031>
- Marcela, Q., Nicholas B, C., 2013. Effects of conservation tillage on total and aggregated soil organic carbon in the Andes. *open J. soil Sci.* 3, 361–373. <https://doi.org/10.4236/ojss.2013.38042>
- Marinari, S., Liburdi, K., Fliessbach, A., Kalbitz, K., 2010. Effects of organic management on water-extractable organic matter and C mineralization in European arable soils. *Soil Tillage Res.* 106, 211–217. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.12.010>
- Maxin, C.R., Kögel-Knabner, I., 1995. Partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) to water-soluble soil organic matter. *Eur. J. Soil Sci.* 46, 193–204. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1995.tb01827.x>
- McKnight, D.M., Boyer, E.W., Westerhoff, P.K., Doran, P.T., Kulbe, T., Andersen, D.T., 2001. Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity. *Limnol. Oceanogr.* 46, 38–48. <https://doi.org/10.4319/lo.2001.46.1.0038>
- Mehra, P., Baker, J., Sojka, R.E., Bolan, N., Desbiolles, J., Kirkham, M.B., Ross, C., Gupta, R., 2018. A Review of Tillage Practices and Their Potential to Impact the Soil Carbon Dynamics, 1st ed, *Advances in Agronomy*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2018.03.002>
- Miller, B.A., Koszinski, S., Wehrhan, M., Sommer, M., 2015. Comparison of spatial association approaches for landscape mapping of soil organic carbon stocks. *SOIL* 1,

217–233. <https://doi.org/10.5194/soil-1-217-2015>

- Milošević, D.D., Savić, S.M., Pantelić, M., Stankov, U., Žiberna, I., Dolinaj, D., Leščesen, I., 2016. Variability of seasonal and annual precipitation in Slovenia and its correlation with large-scale atmospheric circulation. *Open Geosci.* 8, 593–605. <https://doi.org/10.1515/GEO-2016-0041/MACHINEREADABLECITATION/RIS>
- Minasny, B., Malone, B.P., McBratney, A.B., Angers, D.A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z.S., Cheng, K., Das, B.S., Field, D.J., Gimona, A., Hedley, C.B., Hong, S.Y., Mandal, B., Marchant, B.P., Martin, M., McConkey, B.G., Mulder, V.L., O'Rourke, S., Richer-de-Forges, A.C., Odeh, I., Padarian, J., Paustian, K., Pan, G., Poggio, L., Savin, I., Stolbovoy, V., Stockmann, U., Sulaeman, Y., Tsui, C.C., Vågen, T.G., van Wesemael, B., Winowiecki, L., 2017. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>
- Minasny, B., McBratney, A.B., 2008. Regression rules as a tool for predicting soil properties from infrared reflectance spectroscopy. *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 94, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2008.06.003>
- Minasny, B., McBratney, A.B., 2006. A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. *Comput. Geosci.* 32, 1378–1388. <https://doi.org/10.1016/J.CAGEO.2005.12.009>
- Mohammadshirazi, F., Brown, V.K., Heitman, J.L., McLaughlin, R.A., 2016. Effects of tillage and compost amendment on infiltration in compacted soils. *J. Soil Water Conserv.* 71, 443–449. <https://doi.org/10.2489/JSWC.71.6.443>
- Motta, A.C. V., Reeves, D.W., Burmester, C., Feng, Y., 2007. Conservation Tillage, Rotations, and Cover Crop Affecting Soil Quality in the Tennessee Valley: Particulate Organic Matter, Organic Matter, and Microbial Biomass. <http://dx.doi.org/10.1080/00103620701663065> 38, 2831–2847. <https://doi.org/10.1080/00103620701663065>
- Mueller, E.N., Pfister, A., 2011. Increasing occurrence of high-intensity rainstorm events relevant for the generation of soil erosion in a temperate lowland region in Central Europe. *J. Hydrol.* 411, 266–278. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2011.10.005>
- Nagy, G., Lóczy, D., Czigány, S., Pirkhoffer, E., Fábián, S.Á., Ciglič, R., Ferk, M., 2020. Soil moisture retention on slopes under different agricultural land uses in hilly regions of Southern Transdanubia. *Hungarian Geogr. Bull.* 69, 263–280. <https://doi.org/10.15201/HUNGEOBULL.69.3.3>
- Ndzelu, B.S., Dou, S., Zhang, X., Zhang, Y., Ma, R., Liu, X., 2021. Tillage effects on humus composition and humic acid structural characteristics in soil aggregate-size fractions. *Soil Tillage Res.* 213, 105090. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2021.105090>
- Nebbioso, A., Piccolo, A., 2013. Molecular characterization of dissolved organic matter (DOM): A critical review. *Anal. Bioanal. Chem.* <https://doi.org/10.1007/s00216-012-6363-2>
- Neufeldt, H., Resck, D.V.S., Ayarza, M.A., 2002. Texture and land-use effects on soil organic matter in Cerrado Oxisols, Central Brazil. *Geoderma* 107, 151–164. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00145-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00145-8)

- Novak, J.M., Frederick, J.R., Bauer, P.J., Watts, D.W., 2009. Rebuilding Organic Carbon Contents in Coastal Plain Soils Using Conservation Tillage Systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73, 622–629. <https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0193>
- Novák, T.J., Incze, J., Spohn, M., Glina, B., Giani, L., 2014. Soil and vegetation transformation in abandoned vineyards of the Tokaj Nagy-Hill, Hungary. *CATENA* 123, 88–98. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2014.07.017>
- O'Rourke, S.M., Angers, D.A., Holden, N.M., McBratney, A.B., 2015. Soil organic carbon across scales. *Glob. Chang. Biol.* 21, 3561–3574. <https://doi.org/10.1111/gcb.12959>
- Ohno, T., 2002. Fluorescence Inner-Filtering Correction for Determining the Humification Index of Dissolved Organic Matter. *Environ. Sci. Technol.* 36, 742–746. <https://doi.org/10.1021/es0155276>
- Ostrowska, A., Porębska, G., 2015. Assessment of the C/N ratio as an indicator of the decomposability of organic matter in forest soils. *Ecol. Indic.* 49, 104–109. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2014.09.044>
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., van der Zanden, E.H., Poesen, J., Alewell, C., 2015. Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale. *Environ. Sci. Policy* 51, 23–34. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2015.03.012>
- Panettieri, M., Knicker, H., Berns, A.E., Murillo, J.M., Madejón, E., 2013. Moldboard plowing effects on soil aggregation and soil organic matter quality assessed by ¹³C CPMAS NMR and biochemical analyses. *Agric. Ecosyst. Environ.* 177, 48–57. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2013.05.025>
- Parfitt, R.L., Theng, B.K.G., Whitton, J.S., Shepherd, T.G., 1997. Effects of clay minerals and land use on organic matter pools. *Geoderma* 75, 1–12. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(96\)00079-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(96)00079-1)
- Pásztor, L., Laborczi, A., Takács, K., Illés, G., Szabó, J., Szatmári, G., 2020. Progress in the elaboration of GSM conform DSM products and their functional utilization in Hungary. *Geoderma Reg.* <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00269>
- Pásztor, L., Laborczi, A., Takács, K., Szatmári, G., Bakacsi, Z., Szabó, J., Illés, G., Laborczi, A., Takács, K., Szatmári, G., Bakacsi, Z., Szabó, J., Illés, G., 2018. DOSoReMI as the national implementation of GlobalSoilMap for the territory of Hungary, in: Arrouays, D., Savin, I., Leenaars, J.G.B., McBratney, A.B. (Eds.), *GlobalSoilMap - Digital Soil Mapping from Country to Globe*. CRC Press, pp. 17–22. <https://doi.org/10.1201/9781351239707-4>
- Pásztor, L., Laborczi, A., Takács, K., Szatmári, G., Dobos, E., Illés, G., Bakacsi, Z., Szabó, J., 2015. Compilation of novel and renewed, goal oriented digital soil maps using geostatistical and data mining tools. *Hungarian Geogr. Bull.* 64, 49–64. <https://doi.org/10.15201/hungeobull.64.1.5>
- Paul, E.A., 2016. The nature and dynamics of soil organic matter: Plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization. *Soil Biol. Biochem.* 98, 109–126. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2016.04.001>
- Paustian, K., Andrén, O., Janzen, H.H., Lal, R., Smith, P., Tian, G., Tiessen, H., Van Noordwijk, M., Woomer, P.L., 1997. Agricultural soils as a sink to mitigate CO₂

- emissions. *Soil Use Manag.* <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1997.tb00594.x>
- Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G.P., Smith, P., 2016. Climate-smart soils. *Nature* 532, 49–57. <https://doi.org/10.1038/nature17174>
- Peuravuori, J., Pihlaja, K., 1997. Molecular size distribution and spectroscopic properties of aquatic humic substances. *Anal. Chim. Acta* 337, 133–149. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(96\)00412-6](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(96)00412-6)
- Pinke, Z., Decsi, B., Demeter, G., Kalicz, P., Kern, Z., Acs, T., 2024. Continental lowlands face rising crop vulnerability: structural change in regional climate sensitivity of crop yields, Hungary (Central and Eastern Europe), 1921–2010. *Reg. Environ. Chang.* 24. <https://doi.org/10.1007/S10113-024-02192-W>
- Poeplau, C., Don, A., Dondini, M., Leifeld, J., Nemo, R., Schumacher, J., Senapati, N., Wiesmeier, M., 2013. Reproducibility of a soil organic carbon fractionation method to derive RothC carbon pools. *Eur. J. Soil Sci.* 64, 735–746. <https://doi.org/10.1111/ejss.12088>
- Porto, P., Walling, D.E., Capra, A., 2014. Using ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pbex measurements and conventional surveys to investigate the relative contributions of interrill/rill and gully erosion to soil loss from a small cultivated catchment in Sicily. *Soil Tillage Res.* 135, 18–27. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2013.08.013>
- Quijano, L., Kuhn, N.J., Navas, A., 2020. Effects of interrill erosion on the distribution of soil organic and inorganic carbon in different sized particles of Mediterranean Calcisols. *Soil Tillage Res.* 196, 104461. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2019.104461>
- Quinlan, J.R., 1993. Combining Instance-Based and Model-Based Learning. Morgan Kaufmann.
- Quinlan, J.R., 1992. LEARNING WITH CONTINUOUS CLASSES. World Scientific.
- Quinlan, J.R., 1987. Simplifying decision trees. *Int. J. Man. Mach. Stud.* 27, 221–234. [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(87\)80053-6](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(87)80053-6)
- R Core Team, 2022. R: A language and environment for statistical computing. [WWW Document]. R Found. Stat. Comput. URL <https://www.r-project.org/>
- Rasmussen, C., Heckman, K., Wieder, W.R., Keiluweit, M., Lawrence, C.R., Berhe, A.A., Blankinship, J.C., Crow, S.E., Druhan, J.L., Hicks Pries, C.E., Marin-Spiotta, E., Plante, A.F., Schädel, C., Schimel, J.P., Sierra, C.A., Thompson, A., Wagai, R., 2018. Beyond clay: towards an improved set of variables for predicting soil organic matter content. *Biogeochemistry* 137, 297–306. <https://doi.org/10.1007/s10533-018-0424-3>
- Rieder, Á., Madarász, B., Szabó, J.A.J.A., Zacháry, D., Vancsik, A., Ringer, M., Szalai, Z., Jakab, G., 2018. Soil organic matter alteration velocity due to land-use change: A case study under conservation agriculture. *Sustain.* 10. <https://doi.org/10.3390/su10040943>
- Rinot, O., Levy, G.J., Steinberger, Y., Svoray, T., Eshel, G., 2019. Soil health assessment: A critical review of current methodologies and a proposed new approach. *Sci. Total Environ.* 648, 1484–1491. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.08.259>
- Rocci, K.S., Lavalley, J.M., Stewart, C.E., Cotrufo, M.F., 2021. Soil organic carbon response to global environmental change depends on its distribution between mineral-

- associated and particulate organic matter: A meta-analysis. *Sci. Total Environ.* 793, 148569. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.148569>
- Romero, C.M., Engel, R.E., Andrilli, J.D., Chen, C., Zabinski, C., Miller, P.R., Wallander, R., D'Andrilli, J., Chen, C., Zabinski, C., Miller, P.R., Wallander, R., 2017. Bulk optical characterization of dissolved organic matter from semiarid wheat-based cropping systems. *Geoderma* 306, 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.06.029>
- Römkens, P.F.A.M., van der Plicht, J., Hassink, J., 1999. Soil organic matter dynamics after the conversion of arable land to pasture. *Biol. Fertil. Soils* 28, 277–284. <https://doi.org/10.1007/s003740050494>
- Rose, C.W., 2004. *An Introduction to the Environmental Physics of Soil, Water and Watersheds*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Rowell, D.L., 2014. *Soil science Methods & Applications*. Routledge, New York.
- Rowley, M.C., Grand, S., Verrecchia, É.P., 2018. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon. *Biogeochemistry* 137, 27–49. <https://doi.org/10.1007/S10533-017-0410-1/FIGURES/3>
- Sanderman, J., Farquharson, R., Baldock, J., 2010. *Soil Carbon Sequestration Potential : A review for Australian agriculture A report prepared for Department of Climate Change and Energy Efficiency*. CSIRO Rep.
- Sauvadet, M., Lashermes, G., Alavoine, G., Recous, S., Chauvat, M., Maron, P.-A., Bertrand, I., 2018. High carbon use efficiency and low priming effect promote soil C stabilization under reduced tillage. *Soil Biol. Biochem.* 123, 64–73. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2018.04.026>
- Schmeller, G., Nagy, G., Sarkadi, N., Cséplő, A., Pirkhoffer, E., Geresdi, I., Balogh, R., Ronczyk, L., Czigány, S., 2022. Trends in extreme precipitation events (SW Hungary) based on a high-density monitoring network. *Hungarian Geogr. Bull.* 71, 231–247. <https://doi.org/10.15201/HUNGEOBULL.71.3.2>
- Schmidt, M.W.I., Torn, M.S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I.A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D.A.C., Nannipieri, P., Rasse, D.P., Weiner, S., Trumbore, S.E., 2011. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature* 478, 49–56. <https://doi.org/10.1038/nature10386>
- Shahbaz, M., Kuzyakov, Y., Heitkamp, F., 2017. Decrease of soil organic matter stabilization with increasing inputs: Mechanisms and controls. *Geoderma* 304. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.05.019>
- Sharma, P., Laor, Y., Raviv, M., Medina, S., Saadi, I., Krasnovsky, A., Vager, M., Levy, G.J., Bar-tal, A., Borisover, M., 2017. Compositional characteristics of organic matter and its water-extractable components across a profile of organically managed soil. *Geoderma* 286, 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.014>
- Shipley, B., 2009. Confirmatory path analysis in a generalized multilevel context. *Ecology* 90, 363–368. <https://doi.org/10.1890/08-1034.1>
- Singh, S., Dash, P., Silwal, S., Feng, G., Adeli, A., Moorhead, R.J., 2017. Influence of land use and land cover on the spatial variability of dissolved organic matter in multiple aquatic environments. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24, 14124–14141.

<https://doi.org/10.1007/s11356-017-8917-5>

- Singh, S.K., Pandey, C.B., Sidhu, G.S., Sarkar, D., Sagar, R., 2011. Concentration and stock of carbon in the soils affected by land uses and climates in the western Himalaya, India. CATENA 87, 78–89.
<https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2011.05.008>
- Six, J., Conant, R.T., Paul, E. a, Paustian, K., 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturatin of soils. Plant Soil 241, 155–176.
<https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
- Six, J., Elliott, E.T., Paustian, K., 1999. Aggregate and Soil Organic Matter Dynamics under Conventional and No-Tillage Systems. Soil Sci. Soc. Am. J. 63, 1350–1358.
<https://doi.org/10.2136/SSSAJ1999.6351350X>
- Six, J., Guggenberger, G., Paustian, K., Haumaier, L., Elliott, E.T., Zech, W., 2001. Sources and composition of soil organic matter fractions between and within soil aggregates. Eur. J. Soil Sci. 52, 607–618. <https://doi.org/10.1046/J.1365-2389.2001.00406.X>
- Six, J., Paustian, K., 2014. Soil Biology & Biochemistry Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool q. Soil Biol. Biochem. 68, A4–A9. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.06.014>
- Smith, P., 2008. Land use change and soil organic carbon dynamics. Nutr. Cycl. Agroecosystems 81, 169–178. <https://doi.org/10.1007/S10705-007-9138-Y/METRICS>
- Somogyi, Z., Bidló, A., Csiha, I., Illés, G., 2013. Country-level carbon balance of forest soils: A country-specific model based on case studies in Hungary. Eur. J. For. Res. 132, 825–840. <https://doi.org/10.1007/S10342-013-0718-X/METRICS>
- Stevenson, B.A., Sarmah, A.K., Smernik, R., Hunter, D.W.F., Fraser, S., 2016. Soil carbon characterization and nutrient ratios across land uses on two contrasting soils: Their relationships to microbial biomass and function. Soil Biol. Biochem. 97, 50–62.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.02.009>
- Stewart, C.E., Paustian, K., Conant, R.T., Plante, A.F., Six, J., 2007. Soil carbon saturation: Concept, evidence and evaluation. Biogeochemistry 86, 19–31.
<https://doi.org/10.1007/s10533-007-9140-0>
- Stewart, R.D., Jian, J., Gyawali, A.J., Thomason, W.E., Badgley, B.D., Reiter, M.S., Strickland, M.S., 2018. What we talk about when we talk about soil health. Agric. Environ. Lett. 3, 180033. <https://doi.org/https://doi.org/10.2134/ael2018.06.0033>
- Stroosnijder, L., 2005. Measurement of erosion: Is it possible? CATENA 64, 162–173.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.08.004>
- Stumpe, B., Weihermüller, L., Marschner, B., 2011. Sample preparation and selection for qualitative and quantitative analyses of soil organic carbon with mid-infrared reflectance spectroscopy. Eur. J. Soil Sci. 62, 849–862.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2011.01401.x>
- Su, Z.A., Zhang, J.H., Nie, X.J., 2010. Effect of Soil Erosion on Soil Properties and Crop Yields on Slopes in the Sichuan Basin, China. Pedosphere 20, 736–746.
[https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(10\)60064-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(10)60064-1)

- Suleymanov, A., Gabbasova, I., Suleymanov, R., Abakumov, E., Polyakov, V., Liebelt, P., 2021. Mapping soil organic carbon under erosion processes using remote sensing. *Hungarian Geogr. Bull.* 70, 49–64. <https://doi.org/10.15201/hungeobull.70.1.4>
- Sun, H.Y., Koal, P., Gerl, G., Schroll, R., Joergensen, R.G., Munch, J.C., 2017. Response of water extractable organic matter and its fluorescence fractions to organic farming and tree species in poplar and robinia-based alley cropping agroforestry systems. *Geoderma* 290, 83–90. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.12.014>
- Sun, W., Canadell, J.G., Yu, Lijun, Yu, Lingfei, Zhang, W., Smith, P., Fischer, T., Huang, Y., 2020. Climate drives global soil carbon sequestration and crop yield changes under conservation agriculture. *Glob. Chang. Biol.* 26, 3325–3335. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/gcb.15001>
- Swift, R.S., 1996. Organic matter characterization, in: Sparks, D.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*. Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI, pp. 1018–1020.
- Szabó, J., Jakab, G., Szabó, B., 2015. Spatial and temporal heterogeneity of runoff and soil loss dynamics under simulated rainfall. *Hungarian Geogr. Bull.* 64. <https://doi.org/10.15201/hungeobull.64.1.3>
- Szabó, J.A., Keller, B., Centeri, C., Hatvani, I.G., Kovács, J., Szalai, Z., Jakab, G., 2023. Varying particle size selectivity of soil erosion along a cultivated catena. *Open Geosci.* 15. <https://doi.org/10.1515/GEO-2022-0585>
- Szatmári, G., Bakacsi, Z., Laborczi, A., Petrik, O., Pataki, R., Pásztor, L., 2020. Elaborating Hungarian segment of the Global Map of Salt-affected Soils (GSSmap): national contribution to an international initiative. *Remote Sens.*
- Szatmári, Gábor, Bakacsi, Z., Laborczi, A., Petrik, O., Pataki, R., Tóth, T., Pásztor, L., 2020. Elaborating Hungarian segment of the Global Map of Salt-affected Soils (GSSmap): National contribution to an international initiative. *Remote Sens.* 12, 1–19. <https://doi.org/10.3390/rs12244073>
- Szatmári, G., Pásztor, L., Heuvelink, G.B.M., 2021. Estimating soil organic carbon stock change at multiple scales using machine learning and multivariate geostatistics. *Geoderma* 403, 115356. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2021.115356>
- Szatmári, G., Pásztor, L., Laborczi, A., Illés, G., Bakacsi, Z., Zacháry, D., Filep, T., Szalai, Z., Jakab, G., 2023. Countrywide mapping and assessment of organic carbon saturation in the topsoil using machine learning-based pedotransfer function with uncertainty propagation. *CATENA* 227, 107086. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2023.107086>
- Szatmári, G., Pirkó, B., Koós, S., Laborczi, A., Bakacsi, Z., Szabó, J., Pásztor, L., 2019. Spatio-temporal assessment of topsoil organic carbon stock change in Hungary. *Soil Tillage Res.* 195, 104410. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104410>
- Szentimrey, T., Bihari, Z., 2007a. Mathematical background of the spatial interpolation methods and the software MISH (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis), in: *Proceedings from the Conference on Spatial Interpolation in Climatology and Meteorology*. Budapest, pp. 17–27.
- Szentimrey, T., Bihari, Z., 2007b. Mathematical background of the spatial interpolation

- methods and the software MISH (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis), in: Proceedings from the Conference on Spatial Interpolation in Climatology and Meteorology. pp. 17–27.
- Tfaily, M.M., Cooper, W.T., Kostka, J.E., Chanton, P.R., Schadt, C.W., Hanson, P.J., Iversen, C.M., Chanton, J.P., 2014. Organic matter transformation in the peat column at Marcell Experimental Forest: Humification and vertical stratification. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 119, 661–675. <https://doi.org/10.1002/2013JG002492>
- Thevenot, M., Dignac, M.F., Rumpel, C., 2010. Fate of lignins in soils: A review. *Soil Biol. Biochem.* 42, 1200–1211. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2010.03.017>
- Thierfelder, C., Wall, P.C., 2009. Effects of conservation agriculture techniques on infiltration and soil water content in Zambia and Zimbabwe. *Soil Tillage Res.* 105, 217–227. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2009.07.007>
- Tian, D., Niu, S., 2015. A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition. *Environ. Res. Lett.* 10, 024019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/2/024019>
- Tipping, E., Chamberlain, P.M., Fröberg, M., Hanson, P.J., Jardine, P.M., 2012. Simulation of carbon cycling, including dissolved organic carbon transport, in forest soil locally enriched with ¹⁴C. *Biogeochemistry* 108, 91–107. <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9575-1>
- Tivet, F., de Moraes Sá, J.C., Lal, R., Milori, D.M.B.P., Briedis, C., Letourmy, P., Pinheiro, L.A., Borszowski, P.R., da Cruz Hartman, D., 2013. Assessing humification and organic C compounds by laser-induced fluorescence and FTIR spectroscopies under conventional and no-till management in Brazilian Oxisols. *Geoderma* 207–208, 71–81. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2013.05.001>
- Tóth, B., Makó, A., TÓTH, G., 2014. Role of soil properties in water retention characteristics of main Hungarian soil types. *J. Cent. Eur. Agric.* 15, 137–153. <https://doi.org/10.5513/JCEA.V15I2.2634>
- Tóth, E., Gelybó, G., Dencso, M., Kása, I., Birkás, M., Horel, Á., 2018. Soil CO₂ Emissions in a Long-Term Tillage Treatment Experiment, in: *Soil Management and Climate Change: Effects on Organic Carbon, Nitrogen Dynamics, and Greenhouse Gas Emissions*. pp. 293–307. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812128-3.00019-7>
- Ujvári, G., Borsodi, A.K., Megyes, M., Mucsi, M., Szili-Kovács, T., Szabó, A., Szalai, Z., Jakab, G., Márialigeti, K., 2020. Comparison of soil bacterial communities from juvenile maize plants of a long-term monoculture and a natural grassland. *Agronomy* 10, 1–15. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030341>
- Vance, E.D., Brookes, P.C., Jenkinson, D.S., 1987. Microbial biomass measurements in forest soils: The use of the chloroform fumigation-incubation method in strongly acid soils. *Soil Biol. Biochem.* 19, 697–702. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90051-4](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90051-4)
- Vermang, J., Norton, L.D., Huang, C., Cornelis, W.M., Silva, A.M. da, Gabriels, D., 2015. Characterization of Soil Surface Roughness Effects on Runoff and Soil Erosion Rates under Simulated Rainfall. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 79, 903–916. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ2014.08.0329>
- Vesterdal, L., Ritter, E., Gundersen, P., 2002. Change in soil organic carbon following

- afforestation of former arable land. *For. Ecol. Manage.* 169, 137–147.
[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00304-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00304-3)
- Veum, K.S., Goynes, K.W., Kremer, R.J., Miles, R.J., Sudduth, K.A., 2014. Biological indicators of soil quality and soil organic matter characteristics in an agricultural management continuum. *Biogeochemistry* 117, 81–99.
<https://doi.org/10.1007/s10533-013-9868-7>
- Viscarra Rossel, R.A., Webster, R., 2012. Predicting soil properties from the Australian soil visible-near infrared spectroscopic database. *Eur. J. Soil Sci.* 63, 848–860.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2012.01495.x>
- Vogel, E., Deumlich, D., Kaupenjohann, M., 2016. Bioenergy maize and soil erosion — Risk assessment and erosion control concepts. *Geoderma* 261, 80–92.
<https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2015.06.020>
- Vona, V., Sarjant, S., Tomczyk, B., Vona, M., Kalocsai, R., Kulmány, I.M., Jakab, G., Ver, A., Milics, G., Centeri, C., 2022. The effect of local samples in the accuracy of mid-infrared (MIR) and X-ray fluorescence (XRF) -based spectral prediction models. *Precis. Agric.* 23, 2027–2039. <https://doi.org/10.1007/S11119-022-09942-Y>
- Wadoux, A.M.J.-C., Minasny, B., McBratney, A.B., 2020. Machine learning for digital soil mapping: Applications, challenges and suggested solutions. *Earth-Science Rev.* 210, 103359. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103359>
- Wäldchen, J., Schulze, E.D., Schöning, I., Schrumpf, M., Sierra, C., 2013. The influence of changes in forest management over the past 200 years on present soil organic carbon stocks. *For. Ecol. Manage.* 289, 243–254.
<https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2012.10.014>
- Wang, Y., Xu, Y., Spencer, R.G.M., Zito, P., Kellerman, A., Podgorski, D., Xiao, W., Wei, D., Rashid, H., Yang, Y., 2018. Selective Leaching of Dissolved Organic Matter From Alpine Permafrost Soils on the Qinghai-Tibetan Plateau. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 123, 1005–1016. <https://doi.org/10.1002/2017JG004343>
- Wattel-Koekkoeck, E.J.W., Van Genuchten, P.P.L., Buurman, P., Van Lagen, B., 2001. Amount and composition of clay-associated soil organic matter in a range of kaolinitic and smectitic soils. *Geoderma* 99, 27–49. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00062-8)
- Weishaar, J.L., Aiken, G.R., Bergamaschi, B.A., Fram, M.S., Fujii, R., Mopper, K., 2003. Evaluation of Specific Ultraviolet Absorbance as an Indicator of the Chemical Composition and Reactivity of Dissolved Organic Carbon. *Environ. Sci. Technol.* 37, 4702–4708. <https://doi.org/10.1021/es030360x>
- White, R.E., Davidson, B., Lam, S.K., Chen, D., 2018. A critique of the paper ‘Soil carbon 4 per mille’ by Minasny et al. (2017). *Geoderma* 309, 115–117.
<https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2017.05.025>
- Wiesmeier, M., Hübner, R., Spörlein, P., Geuß, U., Hangen, E., Reischl, A., Schilling, B., von Lützow, M., Kögel-Knabner, I., 2014. Carbon sequestration potential of soils in southeast Germany derived from stable soil organic carbon saturation. *Glob. Chang. Biol.* 20, 653–665. <https://doi.org/10.1111/gcb.12384>
- Williams, C.J., Yamashita, Y., Wilson, H.F., Jaffe, R., Xenopoulos, M.A., 2010.

- Unraveling the role of land use and microbial activity in shaping dissolved organic matter characteristics in stream ecosystems. *Limnol. Oceanogr.* 55, 1159–1171. <https://doi.org/10.4319/lo.2010.55.3.1159>
- Williams, J.R., 1975. SEDIMENT ROUTING FOR AGRICULTURAL WATERSHEDS. *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.* 11, 965–974. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1975.tb01817.x>
- Wilson, H.F., Xenopoulos, M.A., 2009. Effects of agricultural land use on the composition of fluvial dissolved organic matter. *Nat. Geosci.* 2, 37–41. <https://doi.org/10.1038/ngeo391>
- Winowiecki, L., Vågen, T.G., Huising, J., 2016. Effects of land cover on ecosystem services in Tanzania: A spatial assessment of soil organic carbon. *Geoderma* 263, 274–283. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2015.03.010>
- Wischmeier, H., Dwight, D., Smith, D., 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning - Walter H. Wischmeier, Dwight David Smith - Google Libros, United States Department of Agriculture.
- Witzgall, K., Vidal, A., Schubert, D.I., Höschen, C., Schweizer, S.A., Buegger, F., Pouteau, V., Chenu, C., Mueller, C.W., 2021. Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon. *Nat. Commun.* 2021 121 12, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24192-8>
- Wong, V.N.L., Greene, R.S.B., Dalal, R.C., Murphy, B.W., 2010. Soil carbon dynamics in saline and sodic soils: a review. *Soil Use Manag.* 26, 2–11. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00251.x>
- Wright, A.L., Dou, F., Hons, F.M., 2007. Soil organic C and N distribution for wheat cropping systems after 20 years of conservation tillage in central Texas. *Agric. Ecosyst. Environ.* 121, 376–382. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.11.011>
- Yang, X., Ren, W., Sun, B., Zhang, S., 2012. Effects of contrasting soil management regimes on total and labile soil organic carbon fractions in a loess soil in China. *Geoderma* 177–178, 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.01.033>
- Yeasmin, S., Singh, B., Smernik, R.J., Johnston, C.T., 2020. Effect of land use on organic matter composition in density fractions of contrasting soils: A comparative study using ¹³C NMR and DRIFT spectroscopy. *Sci. Total Environ.* 726, 138395. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138395>
- Yu, W., Huang, W., Weintraub-Leff, S.R., Hall, S.J., 2022. Where and why do particulate organic matter (POM) and mineral-associated organic matter (MAOM) differ among diverse soils? *Soil Biol. Biochem.* 172, 108756. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2022.108756>
- Zacháry, D., 2019. Az ásványi fázis hatása a talaj szervesszén forgalmára. ELTE Eötvös Loránd University.
- Zacháry, D., Filep, T., Jakab, G., Ringer, M., Balázs, R., Németh, T., Szalai, Z., 2022. The effect of mineral composition on soil organic matter turnover in temperate forest soils. *J. Soils Sediments*. <https://doi.org/10.1007/S11368-022-03393-8>
- Zhang, G.S., Chan, K.Y., Oates, A., Heenan, D.P., Huang, G.B., 2007. Relationship between soil structure and runoff/soil loss after 24 years of conservation tillage. *Soil*

- Tillage Res. 92, 122–128. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2006.01.006>
- Zhang, K., Dang, H., Zhang, Q., Cheng, X., 2015. Soil carbon dynamics following land-use change varied with temperature and precipitation gradients: Evidence from stable isotopes. *Glob. Chang. Biol.* 21, 2762–2772. <https://doi.org/10.1111/gcb.12886>
- Zhao, H., Lv, Y., Wang, X., Zhang, H., Yang, X., 2012. Tillage impacts on the fractions and compositions of soil organic carbon. *Geoderma* 189–190, 397–403. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2012.06.001>
- Zimmermann, M., Leifeld, J., Schmidt, M.W.I., Smith, P., Fuhrer, J., 2007. Measured soil organic matter fractions can be related to pools in the RothC model. *Eur. J. Soil Sci.* 58, 658–667. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00855.x>
- Zsolnay, Á., 2003. Dissolved organic matter: artefacts, definitions, and functions. *Geoderma* 113, 187–209. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00361-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00361-0)
- Zsolnay, A., Baigar, E., Jimenez, M., Steinweg, B., Saccomandi, F., 1999. Differentiating with fluorescence spectroscopy the sources of dissolved organic matter in soils subjected to drying. *Chemosphere* 38, 45–50. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(98\)00166-0](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(98)00166-0)