szatmarigabor_464_26

A HAZAI TALAJOKBAN RAKTÁROZOTT SZERVES SZÉNKÉSZLETEK TÉR- ÉS IDŐBELI VÁLTOZÉKONYSÁGÁNAK ORSZÁGOS SZINTŰ MODELLEZÉSE ÉS TÉRKÉPEZÉSE PEDOMETRIAI MÓDSZEREKKEL

MTA doktori értekezés tézisei

Szatmári Gábor

Budapest
2026

„*The soil varies from place to place,*
and many of its properties vary in time too.
This is what makes the soil so fascinating."
(Heuvelink & Webster, 2001)*

BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS

A talaj a legnagyobb szárazföldi szerves szénrezervoár, így megkülönböztetett szereplője a szén biogeokémiai körforgásának. A talaj szervesszén-raktározó képessége a talaj egyik legfontosabb funkciója, mely számos talajtulajdonságot, -funkciót és -szolgáltatást aktívan befolyásol, úm. mezőgazdasági termékenység, talajok vízgazdálkodása, növényi tápanyagok visszatartása és felszabadulása, toxikus vegyületekkel és elemekkel szembeni pufferkapacitás, ill. a talajok biodiverzitása. Ezek nélkülözhetetlenek az egészséges élelmiszer, a tiszta ivóvíz, ill. az élhető környezet biztosításához, melyek az emberi jóllét alapjai. A talajok multifunkcionalitásának előtérbe kerülését követően nyilvánvalóvá vált a talaj és rajta keresztül a talajban raktározott szerves szén szerepe az emberiség előtt álló környezeti kihívások és krízisek kezelésében, ill. megoldásában, úm. a talaj és tájdegradáció csökkentése, a vízbiztonság megteremtése, a klímaváltozás mérséklése, ill. a biodiverzitás fenntartása.

Ezeknek köszönhető, hogy napjainkban folyamatosan növekvő érdeklődést tapasztalunk a talajokban raktározott szerves szén tér- és időbeli változékonyságára vonatkozó információk iránt. Az érdeklődés nem kizárólag a társtudományok (pl.: hidrológia, konzervációbiológia, meteorológia) kutatói, ill. a gyakorlati szakemberek (pl.: erdészek, vízügyi dolgozók) részéről, hanem a politikai döntéshozók és a társadalom részéről is egyre jobban felerősödött. A politika részéről példaként hozhatók fel azok a kezdeményezések és jogalkotási folyamatok, melyek explicite a talajok szerves széntartalmára, -készletére támaszkodnak, mint például: az ENSZ „*az elsivatagosodás elleni küzdelemről*" szóló egyezménye, az Európai Parlement és Tanács 691/2011/EU rendelete „*az európai környezeti-gazdasági számlákról*", a 2024/1991 rendelete „*a természet helyreállításáról*", valamint a 2025/2360 irányelve a „*talajmonitoringról és -rezilienciáról*". Ugyanakkor a talajokban raktározott szerves szénnel kapcsolatos információs igények nemcsak

* Heuvelink G.B.M., Webster, R., 2001: Modelling soil variation: past, present, and future. Geoderma 100, 269-301.

szignifikánsan megnövekedtek az utóbbi években, hanem természetükben is jelentősen megváltoztak. Egyre változatosabb időszakokra (pl.: 1, 2, ill. 4 éves periódusok), térbeli léptékekre (pl.: teljes ország, gyepterületek, szántóföldek, talajkörzetek), valamint felbontásokra (pl.: 100×100 m, 1×1 km, 10×10 km) szükséges átfogó, megbízható, térben és időben referált információt szolgáltatni a talajokban raktározott szerves szén készletére és változásra vonatkozóan.

Ezen sokrétű információs igények kielégítése a leghatékonyabban a digitális talajtérképezés és a pedometria eszköztárával tehető meg, mely nagyban támaszkodik a klasszikus statisztika, ill. a geostatisztika koncepcióira és eszköztárára, valamint – az elmúlt években – a gépi tanulásra. Ugyanakkor számos olyan módszertani kérdés és kihívás áll jelenleg a digitális talajtérképezés és pedometria homlokterében, melyek megválaszolása és megoldása explicit hozzájárulhat a talajokban raktározott szerves szén tér- és időbeli változékonyságának mind pontosabb modellezéséhez és térképezéséhez. Példaként említhetjük a bizonytalanság modellezését befolyásoló tényezők azonosítását, a direkt, ill. indirekt térképezési módszerek előnyeinek és hátrányainak feltárását, a talajokban bekövetkezett változások modellezését időben csekély számú megfigyelés mellett, valamint a térben aggregált becslésekhez kapcsolódó bizonytalanság megbízható számszerűsítését.

A fentiek alapján a dolgozatomban az alábbi kérdések megválaszolását tűztem ki célul:

1. Milyen hatással vannak a digitális talajtérképezés során tett különböző feltételezések, valamint szakmai és módszertani döntések a bizonytalansági modellekre?
2. Milyen hatással vannak a különböző térképezési megközelítések a lokális és térbeli bizonytalansági modellekre?
3. Hogyan modellezhetők a talajokban raktározott szerves szénkészletekben bekövetkezett változások, ha időben csekély számú megfigyelés áll rendelkezésünkre (pl.: két időpontra)?
4. Hogyan modellezhető a talajokban raktározott szerves szénkészletek tér- és időbeli változékonysága, ha mind térben, mind időben megfelelő számosságú megfigyelés áll rendelkezésünkre?
5. Hogyan hat a térbeli aggregáció a szerves szénkészlet, ill. szénkészlet-változás becslésekhez kapcsolódó bizonytalanságra?

6. A fenti kérdések megválaszolásával létrehozható-e egy olyan országos szintű kezdeményezés, mely képes átfogó, megbízható, nagyfelbontású tér- és időbeli információt szolgáltatni hazánk talajaiban raktározott szerves szénkészletek változásairól?
7. Hogyan változtak hazánk talajaiban a szerves szénkészletek az elmúlt, mintegy 30 évben? Milyen változások voltak megfigyelhetők a főbb felszínfedettségi kategóriákban?

A TALAJOK VÁLTOZÉKONYSÁGÁNAK SZTOCHASZTIKUS MEGKÖZELÍTÉSE

Kutatásaim sarokkövét a talajok térbeli, ill. tér- és időbeli változékonyságának sztochasztikus megközelítése jelentette. Habár a talajokban lejátszódó folyamatok és jelenségek determinisztikusak, mégis a talajok tér- és időbeli változékonyságát meghatározó fizikai, kémiai és biológiai folyamatok és történések oly komplexek és változékonyak a talajképződés előrehaladtával, hogy a talajokkal kapcsolatos ismereteink korántsem mondhatók teljesnek. Továbbá a talajok fejlődését és heterogenitását mind térben, mind időben csupán elenyésző számú földrajzi ponton, ill. időpillanaton keresztül tudjuk „szemlélni". Így a talajokat érintő ismereteink hiánya, ill. a megismerhetőségük korlátai miatt a talajok térbeli, ill. tér- és időbeli változékonysága sztochasztikus folyamatként közelíthető és modellezhető.

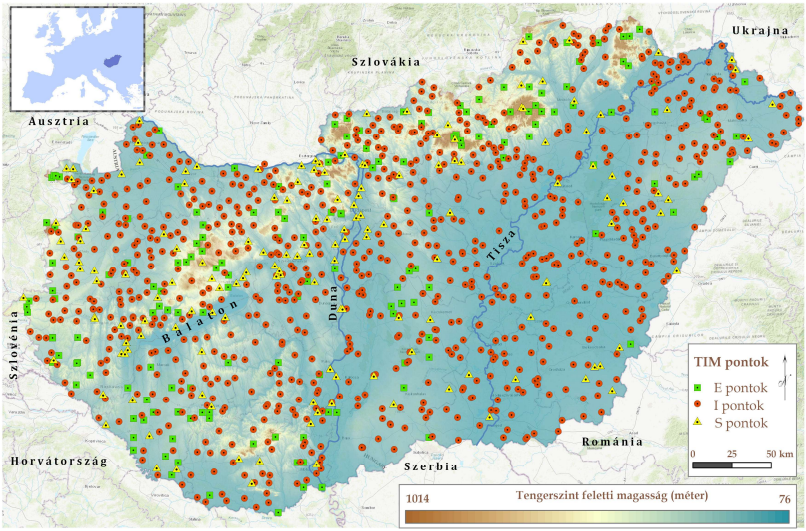
FELHASZNÁLT ADATOK ÉS MÓDSZEREK KÖRE

A kutatásaimban alkalmazott digitális talajtérképezési és pedometriai módszerek három pillérre támaszkodnak:

1. Pontszerű talajtani megfigyelések,
2. Teljes térbeli, ill. tér- és időbeli lefedettséggel rendelkező környezeti segédváltozók,
3. A térbeli, ill. tér- és időbeli becslést lehetővé tevő geostatisztikai, ill. gépi tanulási technikák, valamint ezek kombinációi.

Kutatásaim során a Talajvédelmi Információs és Monitoring Rendszer (TIM) (1. ábra) idősoros szervesanyag-tartalom megfigyeléseit (azaz 1992, 1995, 1998, 2000, 2004, 2007, 2010, 2013, 2016, 2019 és 2022), valamint a bázisévben (azaz 1992-ben) felmért térfogattömeg adatokat, ill. a durva

vázrészek genetikai szintekben megfigyelt arányait használtam fel. Ezen talajtani adatok alapján meghatároztam a hazai feltalajokban (0–30 cm) raktározott szerves szénkészletek értékeit, melyekből adatbázist készítettem.



1. ábra: A Talajvédelmi Információs és Monitoring Rendszer (TIM) monitoring pontjainak elhelyezkedése hazánk területén. Magyarázat: E: erdészeti pontok, I: törzshálózat és S: speciális pontok

Számos, a talajképződési tényezőkhöz (pl.: klíma, domborzat, bioszféra és talajképző kőzet) kapcsolódó környezeti segédváltozó összegyűjtésére került sor 100×100 méteres térbeli felbontással. Mivel kutatásaim a talajokban raktározott szerves szénkészletek térbeli, ill. tér- és időbeli változékonyságát célozták, ezért fontos volt különválasztani, mely környezeti segédváltozók tekinthetők statikusnak és mely segédváltozók tekinthetők dinamikusnak a vizsgálataim szempontjából. Statikus segédváltozóként tekintettem a domborzatra, a talajképző kőzetre, valamint a talajok típusára; míg időben dinamikus segédváltozóként tekintettem a klímára és a bioszférára. Ez utóbbiak esetében szükség volt az ezekhez kapcsolódó környezeti segédváltozók éves szintű adatainak összegyűjtésére 1992 és 2023 között.

A kutatásaim során egy-, ill. többváltozós geostatisztikai módszereket (pl.: egyszerű (ko-)krigelés, tér-idő krigelés), gépi tanulási algoritmusokat (pl.: véletlen erdő), valamint ezek kombinációit alkalmaztam (pl.: regresszió

krigelés, véletlen erdő (ko-)krigelés és tér-idő krigelés) a szerves szénkészletek térbeli, ill. tér- és időbeli változékonyságának modellezésére és térképezésére. A bizonytalanság modellezéséhez és értékeléséhez szintén változatos geostatisztikai (pl.: szekvenciális (ko-)szimuláció és LU szimuláció), ill. gépi tanulási (pl.: kvantilis regressziós erdő, bootstrap technika) megközelítéseket alkalmaztam, míg a bizonytalanság terjedésének vizsgálatára a Taylor módszert használtam.

A felépített térbeli, ill. tér- és időbeli modelleket és a belőlük származtatott térképeket minden esetben validáltam. A hiba értékelésére kiszámítottam az átlagos hibát, a négyzetes középértékhibát, valamint a modell hatékonysági együtthatót. A bizonytalansági modellek értékelésére pontossági ábrákat, G-statisztikát, kvantilis lefedettségi valószínűségi ábrákat, ill. intervallum pontszámokat alkalmaztam.

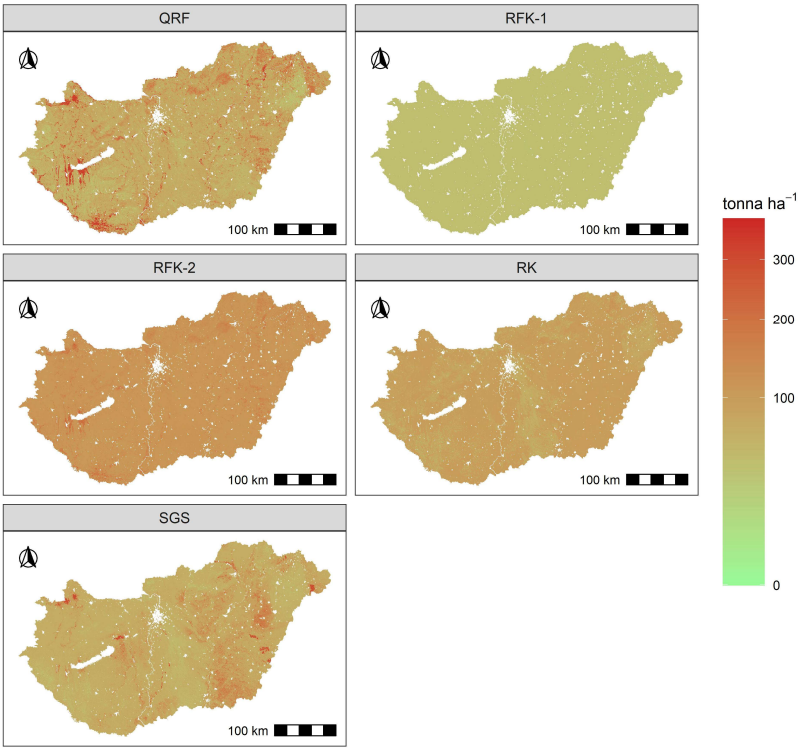
AZ ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

1. Kimutattam, hogy a digitális talajtérképezés során tett feltételezések, valamint a szakmai és módszertani döntések szignifikáns hatással vannak a bizonytalansági modellekre.

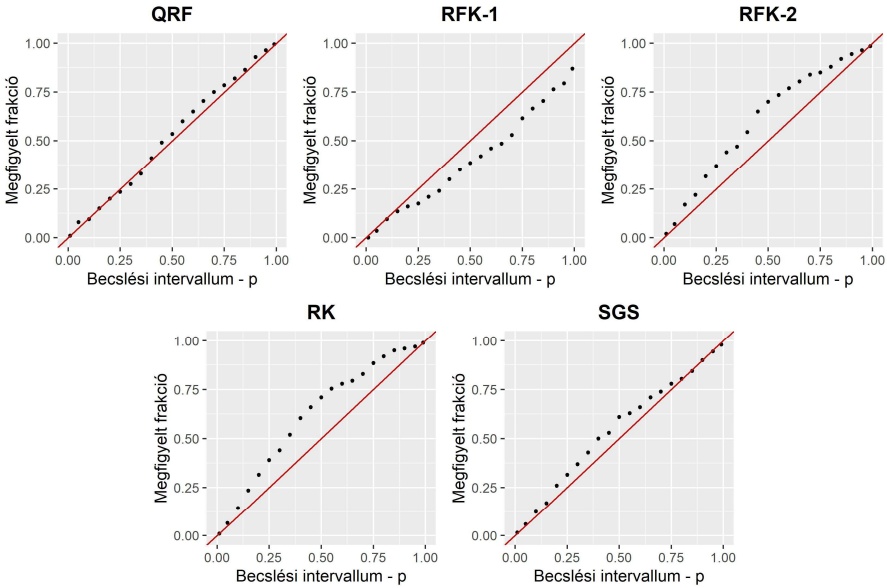
a) Számos, a digitális talajtérképezésben gyakran alkalmazott bizonytalanság modellezési megközelítést és technikát hasonlítottam össze kvantitatív alapon a talajok szerves szénkészletének, ill. szénkészlet-változásának példáján keresztül, mely során arra a következtetésre jutottam, hogy a hibák eloszlására és természetére (pl.: normalitás, szóráshomogenitás) vonatkozó feltételezések nagyban meghatározzák a bizonytalansági modelleket (2. ábra). Emellett a bizonytalansági modellek validációja és értékelése arra engedett következtetni, hogy ezek a feltételezések jelentős hatással vannak ezeknek a modelleknek a pontosságára, ill. realisztikus voltára (3. ábra). Emellett kimutattam, hogy habár a digitális talajtérképezés során megfogalmazott módszertani és szakmai döntések (pl.: adat-transzformáció szükségessége, változók közötti korrelációk figyelembevétele) kevés figyelmet kapnak a szakirodalomban, hatásuk meghatározó a bizonytalansági modellek és számszerűsítések szempontjából. Ezt a szerves szénkészlet-változások modellezésének példáján mutattam be, ahol, ha nem vettük számításba az elsődleges talajtulajdonságok közötti korrelációt, a felépített bizonytalansági modell irreálisnak bizonyult.

b) A talajokban raktározott szerves szénkészletekre vonatkozóan kimutattam, hogy a hibák normalitásának, ill. szóráshomogenitásának feltételezése nem reális. Az elvégzett validáció eredményei alapján kijelenthető, hogy az ezeken a feltételezéseken alapuló lokális bizonytalansági modellek irreálisak, sőt félrevezethetik a potenciális felhasználókat (2 és 3. ábra). Kimutattam, hogy a szerves szénkészletek esetén az átlag és a variancia között pozitív kapcsolat áll fent, amit a geostatisztika arányos hatásnak nevez. Ezért kiemelt fontosságú a szerves szénkészlet adatok normalizációja a geostatisztikai alapú modellezések megkezdése előtt.

Publikációk: Szatmári és Pásztor (2019, 2025)



2. ábra: A 90%-os becslési intervallum szélességét bemutató térképek az 1992-es szerves szénkészletek példáján. Rövidítések: QRF: kvantilis regresszió erdő, RFK-1: véletlen erdő krigelés – krigelési variancia, RFK-2: véletlen erdő krigelés – bootstrap, RK: regresszió krigelés és SGS: szekvenciális gaussi szimuláció.

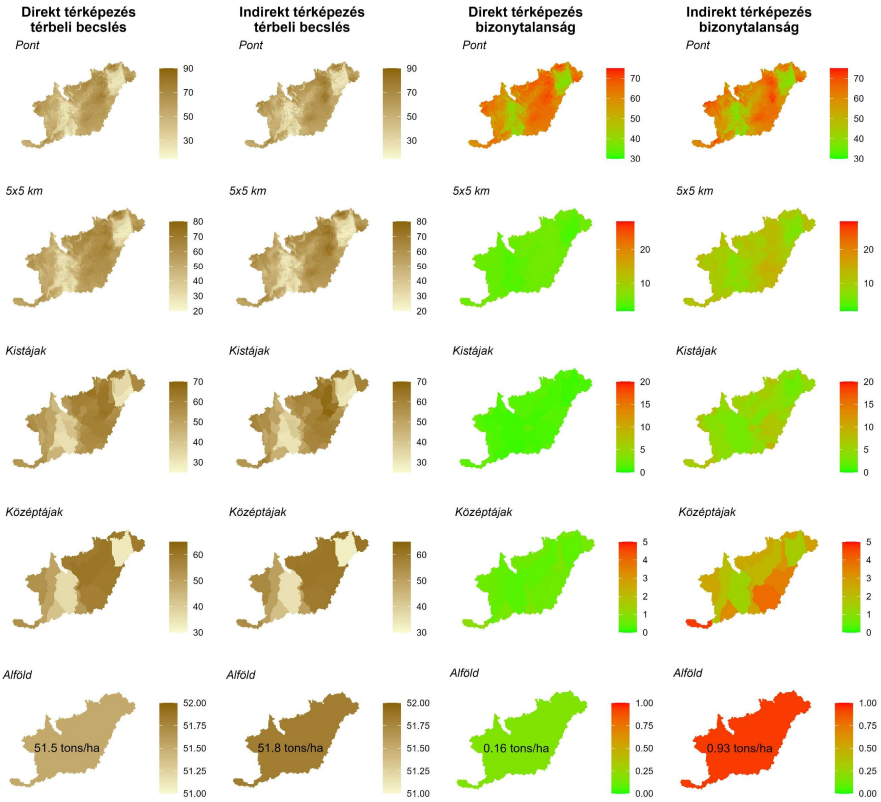


3. ábra: Az elkészített pontossági ábrák Rövidítések: QRF: kvantilis regresszió erdő, RFK-1: véletlen erdő krigelés – krigelési variancia, RFK-2: véletlen erdő krigelés – bootstrap megközelítés, RK: regresszió krigelés és SGS: szekvenciális gaussi szimuláció.

2. Empirikusan bizonyítottam, hogy a különböző térképezési megközelítések szignifikáns hatással vannak mind a lokális, mind a térbeli bizonytalanságra vonatkozóan.

a) A talajok szerves szénkészletét, ill. szénkészlet-változását célzó direkt és indirekt térképezési megközelítéseket hasonlítottam össze kvantitatív módon mind a térbeli becslések, mind a hozzájuk kapcsolódó bizonytalanság szempontjából, különböző térbeli aggregációs szintek mellett. Eredményeimmel kimutattam, hogy habár a direkt és indirekt térképezési megközelítések a becslési pontosság szempontjából nem feltétlenül nyújtanak statisztikailag szignifikáns különbségeket az alkalmazott hibametrikák alapján, az általuk szolgáltatott lokális és térbeli bizonytalanság modellek szignifikánsan különböznek egymástól (4. ábra), ami közvetlen hatással lehet az eredmények alkalmazhatóságára, például:

környezeti modellezésben vagy térbeli döntéstámogatásban. Ezek mellett arra is rámutattam, hogy habár az eredményül kapott bizonytalanság modellek szignifikánsan különböznek egymástól, az alkalmazott értékelési módszerek által nyújtott eredmények mégsem mutatnak szignifikáns különbségeket a modellek pontosságára, realisztikus voltára vonatkozóan.



4. ábra: Direkt (első oszlop) és indirekt (második oszlop) térképezési megközelítéssel kapott pont-, ill. térben aggregált becslések a feltalaj (0–30 cm) szerves szénkészletére vonatkozóan 2016-ban. A becslésekhez kapcsolódó bizonytalanság (harmadik és negyedik oszlop) a 90%-os becslési intervallum szélességével került kifejezésre. Mértékegység: [tonna·ha^{-1}].

b) Eredményeimmel rámutattam arra, hogy a talajokban raktározott szerves szénkészletek esetén a direkt térképezés nemcsak, hogy egyszerű

megoldást nyújt azok térbeli modellezésére és térképezésére, hanem pontos eredményekre is vezet mind a becslés, mind a bizonytalanság szempontjából (4. ábra). Ezek alapján ezt a térképezési megközelítést tekintem optimálisnak a szerves szénkészletek térbeli, ill. tér- és időbeli változékonyságának modellezésére, még akkor is, ha az indirekt térképezési megközelítés lehetőséget biztosít a bizonytalansági források explicit elemzésére. Ez utóbbi fontosságát a bizonytalanság értékelés szempontjából tartom fontosnak, ahol cél a bizonytalanság forrásainak feltárása, ill. csökkentési lehetőségeinek elemzése.

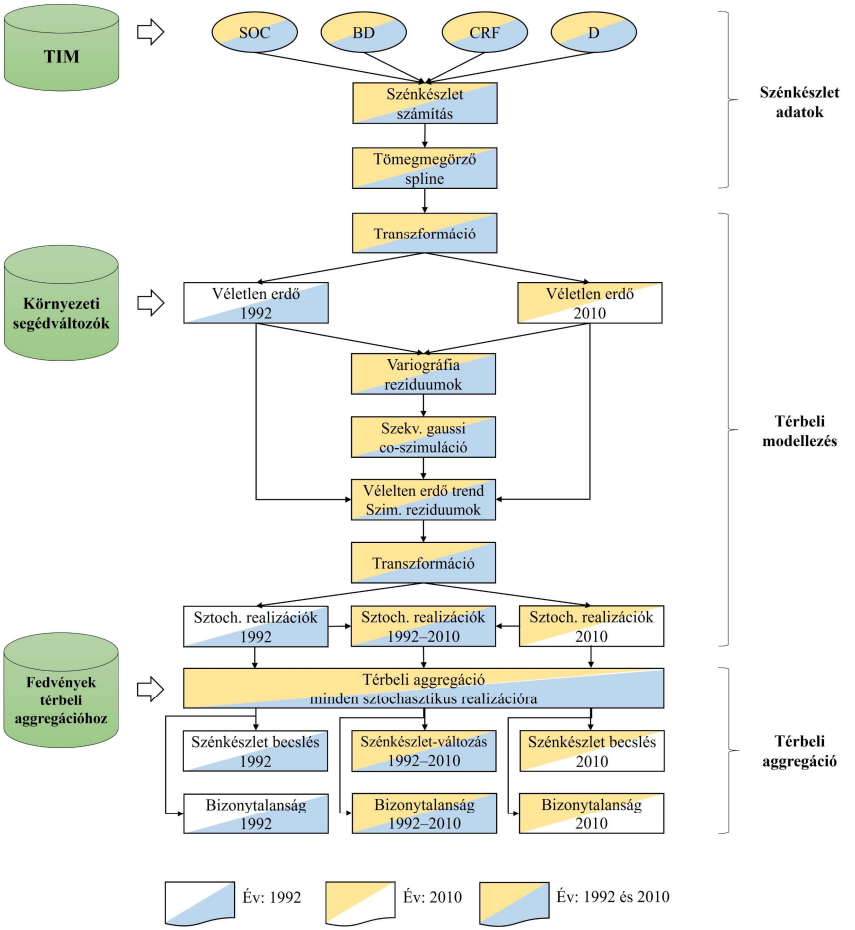
Publikáció: Szatmári és Pásztor (2025)

3. Módszertant dolgoztam ki a talajok szerves szénkészlétben bekövetkezett változások modellezésére két időpont között fejlett gépi tanulási algoritmusokra és többváltozós geostatisztikai megközelítésekre alapozva.

Kutatásaim során kidolgoztam egy olyan módszertant, mely alkalmas arra, hogy két időpont között – melyekre rendelkezésünkre állnak szerves szénkészlet megfigyelések – modellezzük és térképezzük a talajok szerves szénkészletében bekövetkezett változásokat, tetszőlegesen megválasztott térbeli aggregációs szintek mellett (5. ábra). A módszertan alapját a fejlett gépi tanulási technikák mellett a többváltozós geostatisztika jelenti, melynek szerepe nem másodlagos, hiszen rajta keresztül vagyunk képesek számításba venni a két időpont közötti kereszt-korrelációt, ami elengedhetetlen a szénkészlet-változás becslésekhez kapcsolódó bizonytalanság megbízható modellezéséhez és számszerűsítéséhez. Másrészt a többváltozós geostatisztikán keresztül vagyunk képesek számításba venni az interpolációs hibák közötti térbeli auto- és kereszt-korrelációt, mely elengedhetetlen a térben aggregált szerves szénkészlet, ill. szénkészlet-változás becslésekhez kapcsolódó bizonytalanság megbízható számszerűsítéséhez.

Publikációk: Szatmári et al. (2019, 2021)

szatmarigabor_464_26



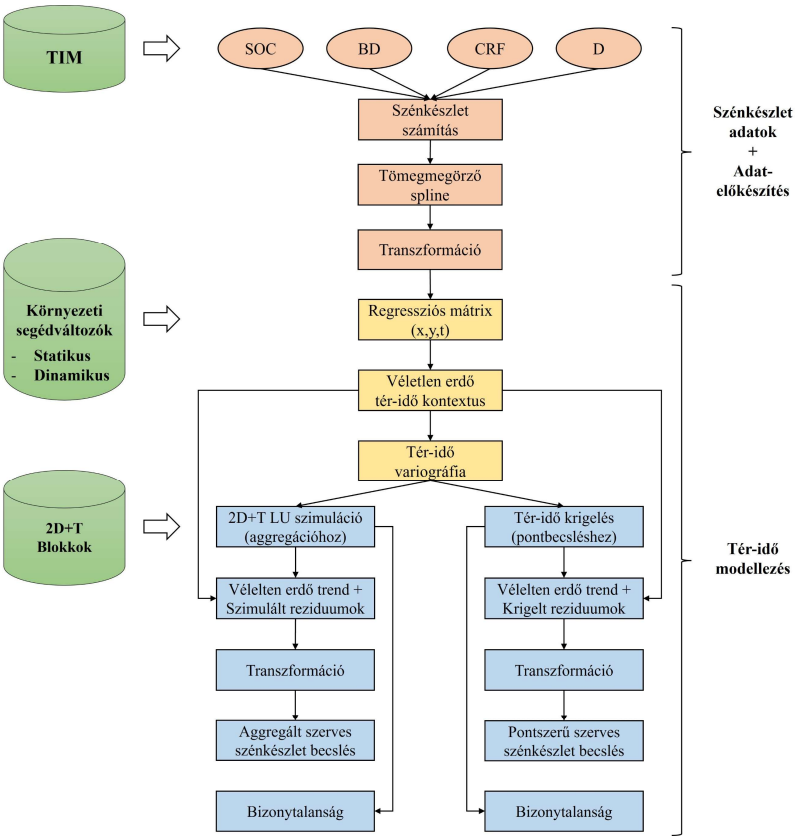
5. ábra: A kidolgozott módszertan folyamatábrája. Rövidítések: TIM: Talajvédelmi Információs és Monitoring Rendszer, SOC: szerves széntartalom, BD: térfogattömeg, CRF: durva vázrészek aránya és D: talajmélység.

4. Módszertant dolgoztam ki a talajokban raktározott szerves szénkészletek tér- és időbeli változékonyságának modellezésére fejlett gépi tanulási algoritmusokra és tér-idő geostatisztikai megközelítésekre alapozva.

Kutatásaim során kidolgoztam egy olyan módszertant, mely alkalmas arra, hogy térben és időben modellezze a talajokban raktározott szerves szénkészletek tér- és időbeli változékonyságát (6. ábra). A módszertan alapját

fejlett gépi tanulási algoritmusok, ill. tér-idő geostatisztikai megközelítések kombinált alkalmazása jelenti. Ez utóbbi, módszertanba történő beillesztése nem másodlagos, hiszen rajta keresztül vagyunk képesek modellezni az adatok közötti tér- és időbeli korrelációt, mely elengedhetetlen a szerves szénkészlet-változásokhoz kapcsolódó lokális és térbeli bizonytalanság modellezéséhez és számszerűsítéséhez. Ugyanakkor a módszertan feltételezi, hogy mind térben, mind időben megfelelő mennyiségű szerves szénkészlet adat áll rendelkezésünkre, mely elsősorban a tér-idő geostatisztikai elemzések és modellalkotások szempontjából fontos.

Publikációk: Szatmári et al. (2024a,b)

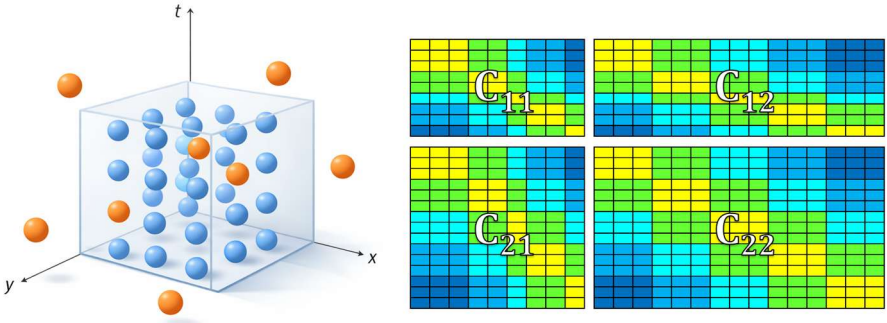


6. ábra: A kidolgozott módszertan folyamatábrája. Rövidítések: TIM: Talajvédelmi Információs és Monitoring Rendszer, SOC: szerves széntartalom, BD: térfogattömeg, CRF: durva vázrészek aránya és D: talajmélység.

5. Kidolgoztam egy, ún. 2D+T LU szimulációs algoritmust, mely révén modellezhető és számszerűsíthető a bizonytalanság tetszőlegesen megválasztott időszakra, ill. területegységre.

Kutatásaim során kiterjesztettem az LU szimulációs algoritmust, mely alapvetően 2D, ill. 3D alkalmazásokra lett kidolgozva a geostatisztikában. Az új, általam kiterjesztett 2D+T LU szimulációs algoritmus alkalmas arra, hogy azonos valószínűségű, nagyfelbontású sztochasztikus képeit (ún. realizációit) hozza létre a vizsgált tér- és időbeli jelenségnek, melyek átlagukban reprodukálják a globális statisztikákat, valamint kondicionáltak az adatpontokra vonatkozóan. A szimulációs algoritmus hátterében a tér- és időbeli kovariancia mátrix Cholesky felbontása áll (7. ábra). A 2D+T LU szimulációs algoritmus által létrehozott realizációk halmaza a tér- és időbeli bizonytalanság egyik modellje. A hazai szerves szénkészletek, ill. szénkészlet-változások példáján demonstráltam a kidolgozott szimulációs algoritmus alkalmazhatóságát különböző térbeli aggregációs szintek mellett (8. ábra).

Publikáció: Szatmári et al. (2024a)



7. ábra: A 2D+T elrendezés sematikus ábrája (bal oldal), ill. az LU szimuláció alapját jelentő tér-idő kovariancia mátrix sematikus ábrája (jobb oldal). Megjegyzés: A bal oldali ábrán a kék gömbök a 2D+T blokkot diszkretizáló pontokat, míg a narancssárga gömbök a tér- és időbeli szerves szénkészlet megfigyeléseket jelölik.

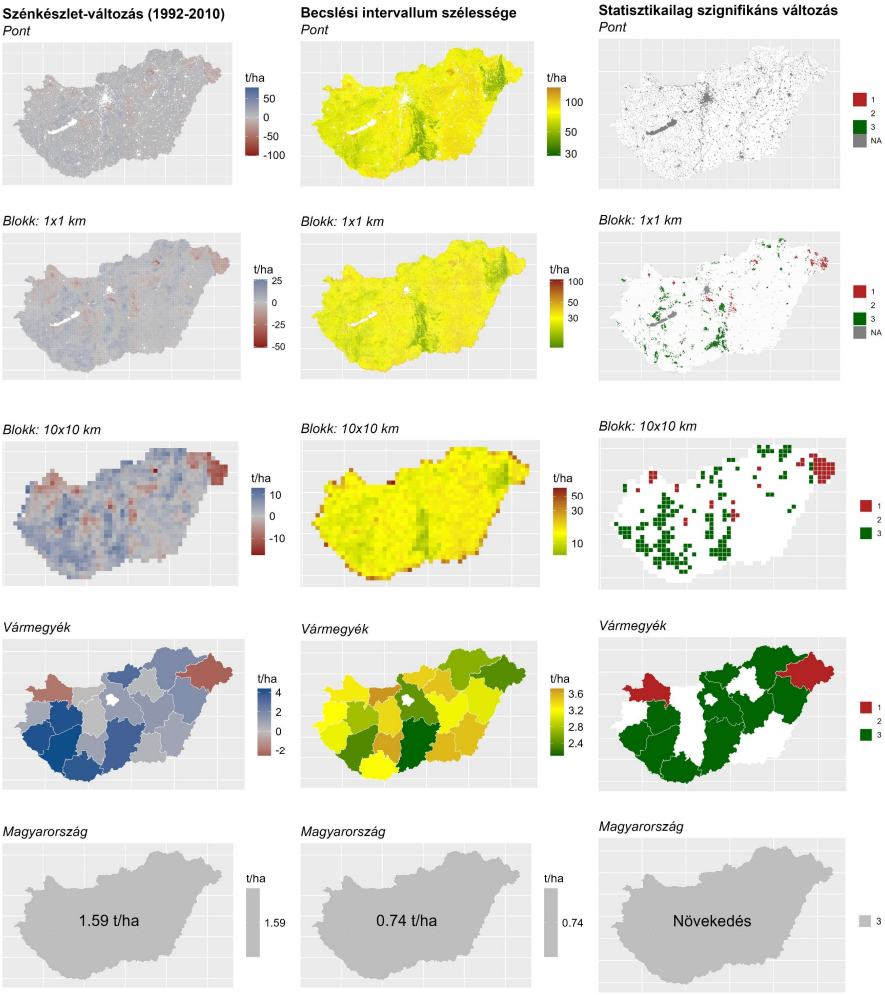


8. ábra: A szignifikáns szénkészlet-változással jellemezhető területek évről évre történő változása 10×10km-es rácshálóra aggregálva. Jelkulcs: Piros – szignifikáns csökkenés, Szürke – nincs szignifikáns változás, ill. Zöld – szignifikáns növekedés.

6. Empirikusan bizonyítottam, hogy térbeli aggregáció révén csökkenthető a szerves szénkészlet, ill. szerves szénkészlet-változás becslésekhez kapcsolódó bizonytalanság.

Kutatásaimmal bebizonyítottam, hogy térbeli aggregáció révén csökkenthető a szerves szénkészletek, ill. szénkészlet-változásokhoz kapcsolódó becslési bizonytalanság (9. ábra), melynek hátterében az áll, hogy a pozitív és negatív interpolációs hibák a térbeli aggregáció során kiegyenlítik egymást, ezáltal csökkentve a térben aggregált becslésekhez kapcsolódó bizonytalanságot. Bebizonyítottam, hogy ez a jelenség tér- és időbeli modellezések során is fennáll és nagyságrendekkel csökkentheti a térben aggregált becslésekhez kapcsolódó bizonytalanságot. Szintén kimutattam, hogy a csökkenő bizonytalanság következtében nagyobb területek azonosíthatók és határolhatók le szignifikáns szénkészlet-változással (9. ábra), mely mind hazai, mind nemzetközi szinten módszertani problémát jelentett. Az eredmények jól tudnak hasznosulni a gyakorlatban, ahol kifejezett elvárás a szén megőrzését célzó stratégiákkal, kezelésekkel szemben, hogy kimutatható legyen azok statisztikailag szignifikáns hatása.

Publikációk: Szatmári et al. (2021, 2024a), Szatmári és Pásztor (2025)

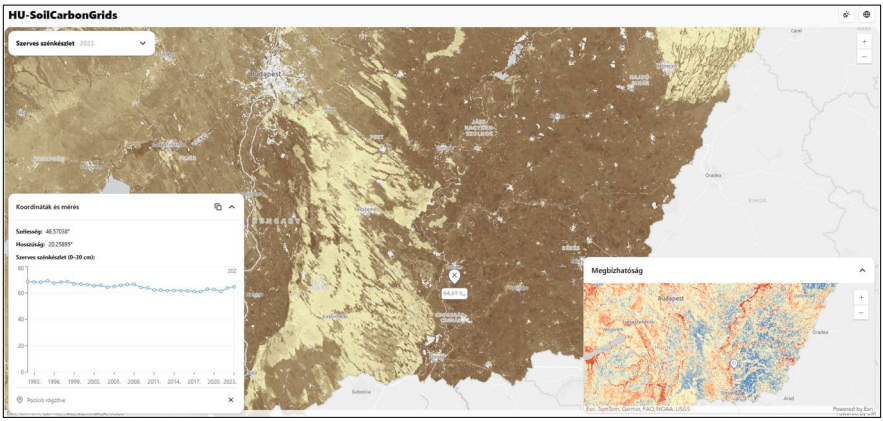


9. ábra: Szerves szénkészlet-változás (1992–2010) becslése különböző aggregációs szintek mellett (bal oldali oszlop), a hozzá kapcsolódó bizonytalanság (középső oszlop), valamint a statisztikailag szignifikáns változással jellemezhető területek (jobb oldali oszlop). Jobb oldali oszlop kódjai: 1 – szignifikáns csökkenés, 2 – nincs szignifikáns változás és 3 – szignifikáns növekedés.

7. Kidolgoztam a HU-SoilCarbonGrids alapjait, mely Magyarország teljes területére átfogó, megbízható és dinamikus információt szolgáltat a talajokban raktározott szerves szénkészletek tér- és időbeli változékonyságáról.

Kutatásaim során kidolgoztam a HU-SoilCarbonGrids alapjait, mely a Talajvédelmi Információs és Monitoring Rendszer idősoros megfigyelésein, országos lefedettségű, időben statikus, ill. dinamikus környezeti segédváltozókon, valamint fejlett digitális talajtérképezési megközelítéseken alapszik. A HU-SoilCarbonGrids országos szintű, átfogó és dinamikus információt szolgáltat a hazai feltalajokban (0–30 cm) raktározott szerves szénkészletek tér- és időbeli változékonyságáról 1992-től éves szinten, 100×100 méteres térbeli felbontással (10. ábra). Emellett kvantitatív információt nyújt a becslés bizonytalanságáról, ill. globális, regionális és lokális mutatókon keresztül objektíven értékeli az eredmények pontosságát mind térben, mind időben, mely jól támogatja a HU-SoilCarbonGrids nyújtotta információk gyakorlati alkalmazhatóságát. A HU-SoilCarbonGrids unikális hazánk szempontjából, továbbá példaértékű nemzetközi szinten is.

Publikáció: Szatmári et al. (2026)

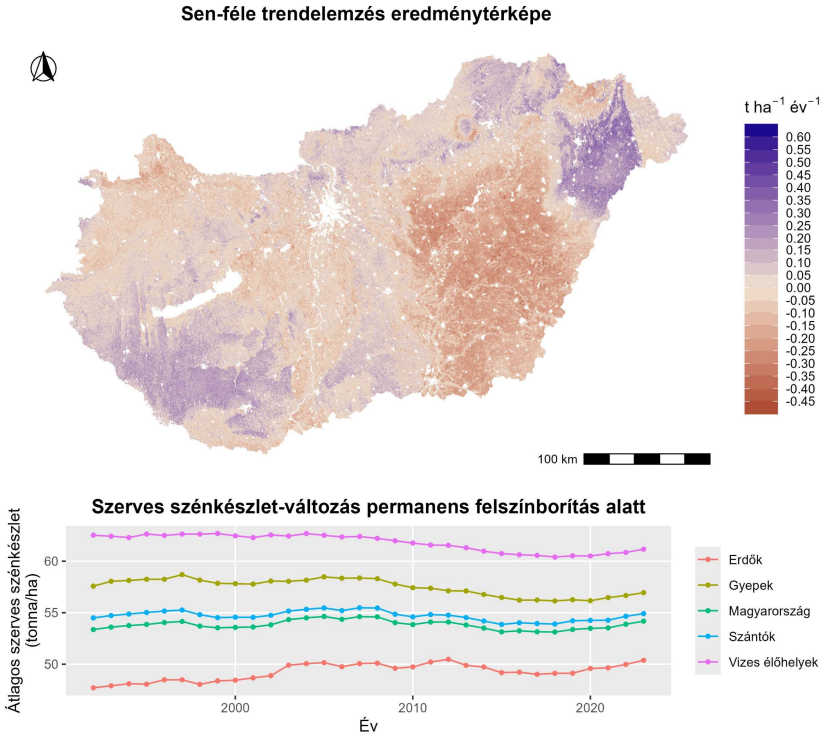


10. ábra: Pillanatfelvétel a HU-SoilCarbonGrids honlapján található interaktív térképről (https://husoilcarbongrids.hu/).

8. Trendanalízissel igazoltam, hogy Magyarország feltalaja 1992 és 2023 között nettó szénveszteséget mutatott, továbbá a változások iránya a permanens felszínborítási kategóriák között markánsan eltért.

A HU-SoilCarbonGrids eredménytérképein elvégzett pixel szintű trendanalízis alapján kimutattam, hogy hazánk területének mintegy kétharmadán szignifikáns trend figyelhető meg, továbbá a szénveszteségi trenddel jellemezhető területek kiterjedése (3,5 millió ha) meghaladja a széngyarapodással jellemezhető területekét (2,7 millió ha) (11. ábra, felső térkép). Igazoltam továbbá, hogy a csökkenő trenddel jellemezhető területeken az átlagos éves szénveszteség mértéke nagyobb, mint a növekvő trenddel jellemezhető területeken megfigyelt átlagos széngyarapodás, ami országos szinten a feltalaj nettó szénveszteségére utal a vizsgált időszakban. Eredményeim révén feltártam a változások térbeli mintázatát: a legnagyobb szénveszteség az intenzív mezőgazdasági művelés alatt álló régiókban (különösen az Alföld keleti részén, ill. a Mezőföldön) jelentkezett, míg széngyarapodás elsősorban a felhagyott mezőgazdasági területeken és természetközeli felszínborítás mellett volt kimutatható. A permanens felszínborítási kategóriák elemzése alapján kimutattam (11. ábra, alsó grafikon), hogy az erdők alatt fokozatos szénkészlet-növekedés volt tapasztalható, ami megerősíti azok szénmegkötő képességét. A vizes élőhelyek és lápok, mint a legnagyobb egységnyi területre vonatkoztatott szénrezervoárok, a vizsgált időszakban csökkenő trendet mutattak, ami különösen aggasztó a klímaváltozás által fokozott szárazodási folyamatok fényében. A gyepterületek jelentős fluktuációt mutattak a vizsgált időszakban, míg a szántóterületeken jelentkezett a legnagyobb mértékű és területű szénveszteség, különösen az intenzív mezőgazdasági művelés alatt álló régiókban.

Publikáció: Szatmári et al. (2026)



11. ábra: A teljes időszakra vonatkozó (1992–2023) trendelemzés eredménytérképe (felső ábra), ill. az átlagos szerves szénkészlet-változás a permanens felszínborítási kategóriák alatt (alsó grafikon).

TÉZISEK ALAPJÁT JELENTŐ PUBLIKÁCIÓK

[1] **Szatmári, G.**, Pásztor, L. (2019): Comparison of various uncertainty modelling approaches based on geostatistics and machine learning algorithms. **Geoderma 337**, 1329-1340. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.008

[2] **Szatmári, G.**, et al. (2019): Spatio-temporal assessment of topsoil organic carbon stock change in Hungary. **Soil and Tillage Research 195**, 104410. https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104410

[3] **Szatmári, G.**, Pásztor, L., Heuvleink, 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

[4] **Szatmári, G.**, et al. (2024a): Space-time modelling of soil organic carbon stock change at multiple scales: Case study from Hungary. **Geoderma 451**, 117067. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117067

[5] **Szatmári, G.**, et al. (2024b): Gridded, temporally referenced spatial information on soil organic carbon for Hungary. **Scientific Data 11**, 1312. https://doi.org/10.1038/s41597-024-04158-3

[6] **Szatmári, G.**, Pásztor, L. (2025): The impact of direct and indirect digital soil mapping approaches on spatial uncertainty. **Geoderma 460**, 117448. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117448

[7] **Szatmári, G.**, et al. (2026): HU-SoilCarbonGrids: An initiative for providing comprehensive information on soil organic carbon changes in Hungary. **European Journal of Soil Science 77**, e70292. https://doi.org/10.1111/ejss.70292

TOVÁBBI, A DIGITÁLIS TALAJTÉRKÉPEZÉS ÉS A PEDOMETRIA TÉMAKÖRÉBEN MEGJELENT FONTOSABB PUBLIKÁCIÓK A Ph.D. FOKOZAT MEGSZERZÉSÉT (2017) KÖVETŐEN

[1] **Szatmári, G.**, et al., 2019. Optimization of second-phase sampling for multivariate soil mapping purposes: Case study from a wine region, Hungary. **Geoderma 352**, 373-384. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.02.030

[2] Szabó, B., **Szatmári, G.**✉, et al. 2019. Mapping soil hydraulic properties using random-forest-based pedotransfer functions and geostatistics. **Hydrology and Earth System Sciences 23**, 2615-2635. https://doi.org/10.5194/hess-23-2615-2019

[3] Laborczi, A., **Szatmári, G.**, et al., 2019. Comparison of soil texture maps synthetized from standard depth layers with directly compiled products. **Geoderma 352**, 360-372. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.01.020

[4] Illés, G., Sutikno, S., **Szatmári, G.**✉, et al., 2019. Facing the peat CO2 threat: digital mapping of Indonesian peatlands – a proposed methodology and its application. **Journal of Soils and Sediments 19**, 3663-3678. https://doi.org/10.1007/s11368-019-02328-0

[5] **Szatmári, G.**, et al., 2020. Elaborating Hungarian Segment of the Global Map of Salt-Affected Soils (GSSmap): National Contribution to an International Initiative. **Remote Sensing 12**, 4073.

https://doi.org/10.3390/rs12244073

[6] Pásztor, L., …, **Szatmári, G.**, 2020. Progress in the elaboration of GSM conform DSM products and their functional utilization in Hungary. **Geoderma Regional 21**, e00269. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00269

[7] Bakacsi, Zs., Laborczi, A., **Szatmári, G.**, et al., 2020. Compiling C/N and total-N dataset to support countrywide soil nutrient emission models for Hungary. **Studies in Agricultural Economics 122**, 86-95. https://doi.org/10.7896/j.2037

[8] Hateffard, F., …, **Szatmári, G.**, 2022. High-Resolution Mapping and Assessment of Salt-Affectedness on Arable Lands by the Combination of Ensemble Learning and Multivariate Geostatistics. **Agronomy 12**, 1858. https://doi.org/10.3390/agronomy12081858

[9] **Szatmári, G.**, et al., 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

[10] Hateffard, F., **Szatmári, G.**, Novák, T.J., 2023. Applicability of machine learning models for predicting soil organic carbon content and bulk density under different soil conditions. **Soil Science Annual 74**, 165879. https://doi.org/10.37501/soilsa/165879

[11] Wadoux, A., …, **Szatmári, G.**, et al., 2024. On soil districts. **Geoderma 452**, 117065. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117065

[12] Sohrab, S., …, **Szatmári, G.**, 2025. Adjusting Bulk Density Observations in the Hungarian Soil Information and Monitoring System Using Pedotransfer Functions. **European Journal of Soil Science 76**, e70245. https://doi.org/10.1111/ejss.70245

[13] Schillaci, C., …, **Szatmári, G.**, et al., 2025. Empirical estimation of saturated soil-paste electrical conductivity in the EU using pedotransfer functions and Quantile Regression Forests: A mapping approach based on LUCAS topsoil data. **Geoderma 454**, 117199. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117199