

**Doktori (PhD) értekezés tézisei**

**Tóth József Attila**

**Gödöllő**

**2024**



**MAGYAR AGRÁR- ÉS ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM**

**A SZERVESANYAG FELVÉTELEZÉS ÉS MÉRÉS  
MÓDSZERTANI VIZSGÁLATAI**

Tóth József Attila

Gödöllő

2024

## **A doktori iskola**

**megnevezése:** Környezettudományi Doktori Iskola

**tudományága:** környezettudomány

**vezetője:** Csákiné Dr. Michéli Erika  
tanszékvezető, egyetemi tanár, az MTA levelező tagja, DSc  
MATE Környezettudományi Intézet, Talajtani Tanszék

**Témavezető(k):** Csákiné Dr. Michéli Erika  
tanszékvezető, egyetemi tanár, az MTA levelező tagja, DSc  
MATE Környezettudományi Intézet, Talajtani Tanszék

Dr. Csorba Ádám  
egyetemi docens, PhD  
MATE Környezettudományi Intézet, Talajtani Tanszék

.....  
Az iskolavezető jóváhagyása

.....  
A témavezető(k) jóváhagyása

## BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉSEK

A növénytermesztés (hazai, európai és globális szinten) aktuális tendenciáinak középpontjában talajaink szervesszén-viszonyainak megismerése és annak hosszútávú környezeti céljainkkal harmonikus kezelése áll. Jelen kutatás gyakorlati megközelítésű, így célja részben a kutatásban alkalmazott módszertan közelítése a termelésben való felhasználhatóság irányába. Annak érdekében, hogy a művelés megválasztása tudatos döntési folyamattá válhasson, szükség van olyan módszerekre, amikkel lehetővé válik a talaj szervesanyag állapotát, illetve változásának irányát és mértékét nyomonkövetni, ésszerű vizsgálati költség, idő- és eszközszükséglet mellett.

A műveléssel történő szervesanyag-kezelésben kiemelt szerepe van az állati eredetű szerves- és istállótrágyáknak. A célzottan kijuttatott szervestrágya hasznosulásának vizsgálatával a jövőben valóssággá válhat a rendelkezésre álló szervestrágyák precíziós felhasználása, a legnagyobb potenciális hasznosulás érdekében.

A művelt területek szervesszén-felmérése során alkalmazott módszertan fejlesztésével, annak pontosításával, erőforrás- és időigénycsökkentésével kapcsolatos tézisek:

- A vizsgált mintapont-kijelölési eljárások (Véletlenszerű, Rácsháló, Latin Hypercube Sampling) közül melyik a leghatékonyabb egy heterogén talajadottságú, művelt terület szervesszén-viszonyainak felmérésére, több mélységben? Hogyan változik az említett módszerek reprezentativitása/teljesítménye a mintapontsűrűség függvényében?
- Milyen becslési teljesítmény várható infravörös spektrális adatokra épülő szervesszén-predikciós modelltől, az alkalmazott mintakiválasztási módszertől (Kennard-Stone sampling, k-means sampling, Latin Hypercube sampling) függően, eltérő kalibrációs/validációs mintaarány esetén?

A művelt talajok szervesszén-mérlegének javítását célzó, illetve az abban zajló folyamatok – növénytermesztési gyakorlatba építhető – nyomonkövetésére irányuló tézisek:

- Milyen becslési pontossággal alkalmazható az előző szakaszban tesztelt predikciós módszertan nagyobb mintaszámnál, a terület szervesszén-viszonyainak térképezésére?
- Milyen hatással van rövidtávon (2 év) eltérő dózisban kijuttatott pelletált baromfitrágya a talaj szervesszén-tartalmára, illetve milyen mértékben térül meg az eltérő talajadottságokkal rendelkező területrészekben?
- Alkalmas-e a közép infravörös (MIR) sugárzási tartomány a talajba került szervesanyag fennmaradásának nyomonkövetésére, továbbá ez a szervesszén-nyomonkövetési módszertan beilleszthető-e a termesztési gyakorlatban működő talajfelvételezési rendszerbe?

A kutatás szervesszén-felmérési módszertanának tesztelése összetett probléma megoldására:

- Alkalmazható-e a kutatásban alkalmazott módszertan nagyterjedésű (~1500 km<sup>2</sup>) művelt terület erősen heterogén talaj 1 m mélységig terjedő szervesszénkészletének feltérképezéséhez? Milyen mértékben javítható további függő tényezőkkel (magasság, lejtőszög, növényborítottság, etc.) a szóban forgó térkép megbízhatósága?

## ANYAG ÉS MÓDSZER

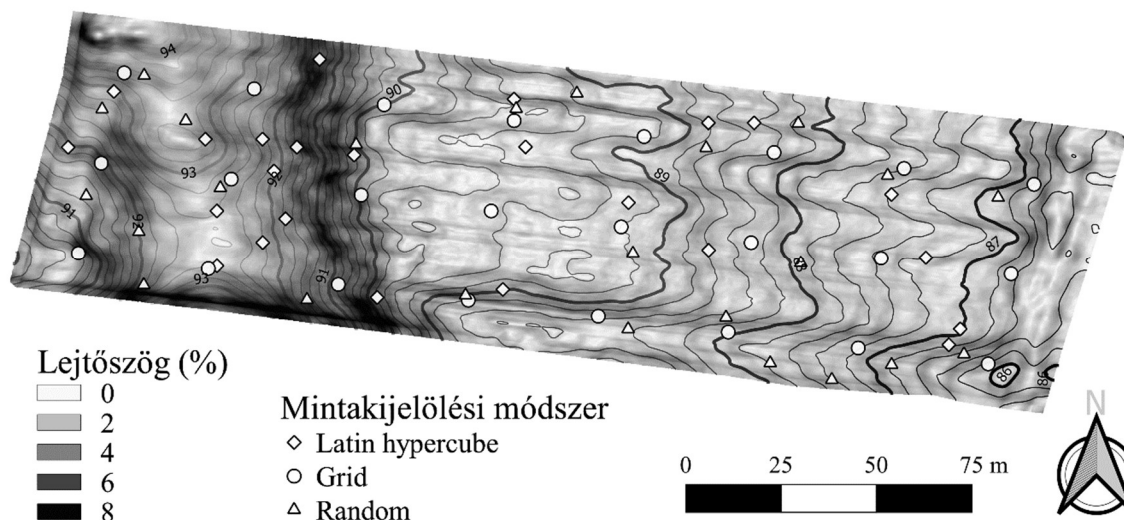
A kísérletek és felmérések 3 helyszínen történtek. A kutatás szakaszaiként is értelmezett helyszínek módszertana egymásra épülő, így bemutatásuk is e szerint a logika szerint történik.

### 1. Érsekcsanád – Kanális

Az első mintaterület Érsekcsanád külterületén található, művelés alatt álló szántó, mérete 4,62 ha. Talajviszonyainak kialakításában az egyik meghatározó tényező a Duna egykori kiöntései voltak, így alakultak ki az egyértelmű öntés bélyegek (gyakori mélységi és horizontális textúraváltások). A tengerszint feletti magasság a terület keleti oldalán 85 m, a nyugati oldalon 87 m. A terület talajviszonyaira kis területen belül is erős heterogenitás jellemző, amely leginkább a talaj fizikai féleségének gyakori változásán utolérhető. Az alacsonyabb tengerszint feletti magasságon található nyugati oldalnál a Duna-völgyi fűcsatorna közelsége miatt a talajvíz a felszín viszonylagos közelségében helyezkedik el (1-2 m, vízállástól és időjárási körülményektől függően), így a másik meghatározó tényező a kialakult reduktív viszonyok 1 m mélység környékén (1. ábra).



1. ábra. A mintaterület keleti végében feltárt talajszelvényen jól láthatóak a mélységi reduktív viszonyok, illetve a felszíntől 1 m-en belüli talajvízszint.



2. ábra. A teljes mintavételi stratégia ábrázolása, a különböző mintavételi megközelítések elkülönítésével.

A mintavételi stratégia kialakítása során cél volt az eltérő mintázatot követő mintavétel befolyását vizsgálni a szervesszén-térképezés eredményére. A felmérés során 3 mintavételi módszert választottunk, egyenként 24-24 mintaponttal (2. ábra):

- (1) Véletlenszerű (RANDOM, vagy RND),
- (2) Rács (GRID),
- (3) Latin Hypercube Sampling (LHS).

A mintavételek során minden mintavételi ponton 100 cm<sup>3</sup>-es bolygatatlan mintát (Eijkelkamp 07.53.SC) vettem, három mélységből: 0-20 cm, 20-50 cm és 50-100 cm. A bolygatatlan minták az adott mintavételi mélységtartomány közepéből származtak.

A mintavételt követő mintaelőkészítés a kísérletek mindegyikében megegyező módon történt. A mintaelőkészítés során a látható növényi és állati maradványokat eltávolítottam, majd a mintákat szárítószekrényes, gravimetriás térfogattömeg mérést követően 0,2 mm-es szitán törtem át.

Elsőként Walkley-Black eljárással mértem a minták szervesszén-tartalmát, illetve kalciméteres vizsgálattal a CaCO<sub>3</sub> tartalmat. Ezt követően a középínfravörös (MIR) reflektancia spektrum felvétele következett.

A becslési modellekhez szükséges kalibrációs minták kiválasztása során cél volt olyan mintakiválasztási algoritmus alkalmazása, amely segítségével az adott mintasokaság heterogenitását legjobban kifejező minták kiválaszthatóak. A mintavételi algoritmusok közül a leggyakrabban alkalmazottak a KSS (Kennard-Stone sampling – Kennard-Stone mintavétel), KMS (K-means sampling – K-közép mintavétel) és az LHS (Latin Hypercube sampling – Latin hiperkocka mintavétel), ezek teljesítményét hasonlítottam össze a vizsgálat során.

A **középínfravörös (MIR) spektrum felvételezés** a Bruker Optics által gyártott Bruker Alpha II Fourier-transzformációs infravörös spektrométerrel történt. A műszerre csatlakoztatott DRIFT modul kimondottan szilárd, por állagú minták vizsgálatára alkalmas. A vizsgálat során alkalmazott protokoll alapja a World Agroforestry Center Soil-Plant Spectral Diagnostics Lab által kidolgozott Standard Operation Procedures dokumentum (Ateku, 2014). A mérések során a minták diffúz spektrális reflektanciáját vettem fel 400 és 4000 1/cm hullámszám közötti spektrális tartományban. A háttérsugárzás mérésekhez ismert spektrális karakterisztikájú arany vakot mértem be, melyet minden vizsgált mintát megelőzően megismétltem. A mintákat három ismétlésben mértem, melynek során minden ismétlést 48 besugárzás átlagából alakítja ki a méréshez használt szoftver.

A spektrális mérések eredményeként kapott **spektrális reflektancia görbék előfeldolgozása** során első lépésként a mérések ismétléseiből származó eredmények átlagolását végeztem el, amit követően már a további lépésekben mérésenként csak az átlagspektrumot használtam. Ezt követően a spektrumokon mutatkozó, a lokális hullámszám-tartományon belüli érzékelési szórás miatt kialakuló fűrészfog-jelenség csökkentése következett, a spektrumon elvégzett, mozgó átlag számítására alapozott simító eljárással. A spektrális előfeldolgozást követően a valamely okból (mérési hiba, mintafelcserélés etc.) jelenlévő kiugró értékek kiszűrése következett, amihez a Mahalanobis és H távolság értékeket használtam.

Az alkalmazott **kemometriai modell felállításhoz** a PLSR (Partial Least Squares Regression – Parciális legkisebb négyzetek regresszió) regressziós módszert használtuk, mely a kvantitatív célú meghatározások esetén a leggyakrabban alkalmazott modell.

A felállított modell általi becslés validációjának elvégzésére egy összegzett statisztikai mutatót hoztunk létre, kifejezetten jelen dolgozat számára. A mutatóhoz a becslések statisztikai paramétereit használtuk fel, RMSE – Root Mean Squared Error – Átlagos négyzetes gyökeltérés, illetve R<sup>2</sup> – Determinációs együttható). A mutató összegzi az R<sup>2</sup> és RMSE értékeit egy változóban, normalizált skálán, az NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – Normalizált vegetációs index) számítása során alkalmazott képlet alapján:

$$(R2-RMSE) / (R2+RMSE)$$

A képlet alapján az R2 növekedése, illetve az RMSE csökkenése növeli a mutató értékét, így az összegzett statisztikai mutató értéke egyenes arányosságban van a tesztelt modell pontosságával.

## 2. Érsekcsanád – Érréve



3. ábra. Érréve területen fúrt talajszelvények és elhelyezkedésük.

A precíziós trágyázási kísérlet 24,3 ha méretű szántón Érsekcsanád külterületén helyezkedik el. Talajviszonyainak kialakításában szintén meghatározóak a Duna folyam korábbi elöntései, melynek megfelelően durva és finom textúrájú talajrétegek váltakoznak horizontálisan és vertikálisan (3. ábra).

A területben a művelésre merőlegesen, északkelet-kelet-nyugat irányban húzódnak elöntési talajsávok, amik nagyobb tengerszint feletti magassággal, illetve alacsonyabb agyag- és porfrakciót tartalmazó talajanyaggal jellemezhetőek. Ezek a gyengébb agronómiai adottságú talajfoltok, illetve a közöttük húzódó finomszemcsés hordalékból létrejött talajfoltok szolgáltak a kísérlet alapjaként és fő fókuszaként is.

A szervesztrágyázási kísérletben felhasznált szervesztrágya tápelemtartalma, 100 kg szárazanyagra vonatkoztatva: 4:4:4 kg NPK, illetve 7 kg Ca.

A vizsgálati területen a kísérletet megelőző évben szója, a kísérlet első évében kukorica növényt termesztettünk. A kezelést leszámítva a parcellák alaptechnológiájában (talajművelés, vetés, növényápolás) különbség nem volt, a kísérletben alkalmazott technológia kiegészítő jelleggel adódott a növénytermesztési alaptechnológiához.

Kétféle kezelés szerepel a kísérletben, foltkezelés (FK), illetve teljes kezelés (TK). A foltkezelés során a parcellán belül csak egyes célzott, gyenge adottságú talajsávok kezelése történt, míg a teljes kezelésben a kísérleti parcella teljes területén egyenletesen került kijuttatásra a pelletált trágya. Kétféle dózist alkalmaztam, 250 kg/ha, illetve 500 kg/ha. Az így kialakított (FK250, FK500, TK250, TK500, Kontroll) parcellák ábrázolása az 4. ábrán látható.



4. ábra. A szervestrágyázás során felvett parcellák, a kezelések feltüntetésével (Forrás: Google Earth, 2022).

A kezelés és mintavételezések rendje a következőképpen történt:

Megelőző felvételezés – 2018. október;

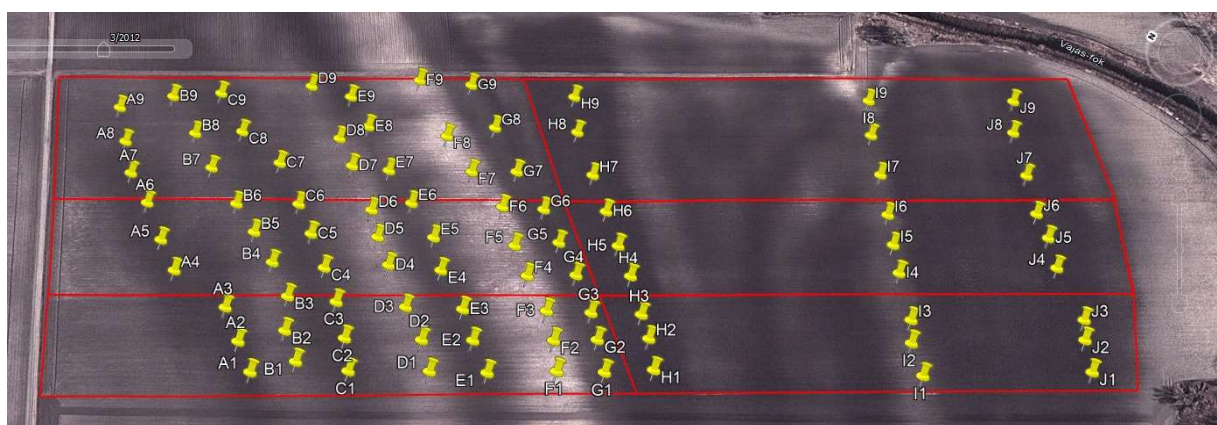
Kezelés – 2018. október;

1. felvételezés – 2019. május;

2. felvételezés – 2019. szeptember;

3. felvételezés – 2020. augusztus.

A talajmintavételi pontok pozícionálása az egyes talajsávok mentén történt, a 5. ábra szerint. Ezen változó tulajdonságú talajsávok szervesviszonyainak változását kívántam nyomon követni, így a betűkkel jelölt mintapontsorokat ezeken a sávokon belül helyeztem el.



5. ábra. A mintavételi sorok és az azon belüli pontok elhelyezkedése a kísérleti parcellákon belül (Forrás: Google Earth, 2022).

Az egyes parcellákba 3-3 mintapont került, mintavételezés során minden esetben GPS szerint az előre kijelölt pont 2 méteres körzetében jelöltem ki a mintavételezés helyét olyan módon, hogy a mintavétel reprezentatív legyen. 0-10, 10-20 és 20-30 cm mélységekből vettem mintákat, ami a 90 mintapont esetében összesen 270 minta, mintavételeként. A talajmintázáson felül hozammérést is végeztem a szervestrágyázást követő évben.

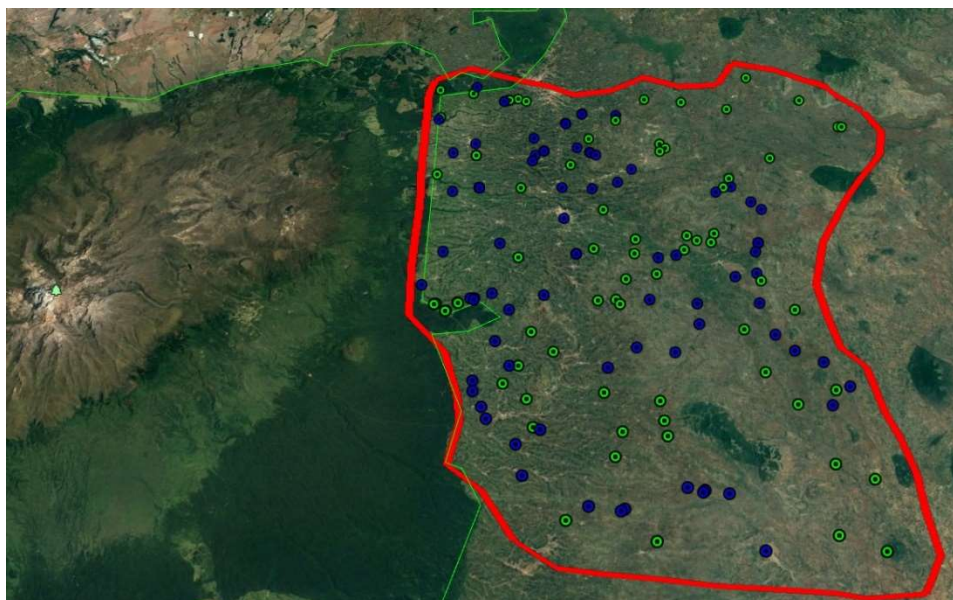
A mintáknak előkészítést követően felvételeztem azok MIR spektrumát. A mintákból LHS algoritmussal kiválasztásra kerültek a mintasokaság spektrális varianciáját legjobban kifejező 10%. A kiválasztott minták széntartalmát elemanalizátorral mértem, illetve kalciméterrel a  $\text{CaCO}_3$  tartalmukat. A mérések alapján PLSR modell állítottunk a MIR spektrumok felhasználásával a fennmaradó minták C és mésztartalmának becslésére.

Az **elemanalizist** az Elementar cég VarioMAX Cube CNS automata analizátorával végeztem. A bemért minták tömege 800 és 1000 mg között változott. Az eszközt CNS üzemmódban használtam, TCD (hővezetőképesség-detektor) méri a gázelegyben lévő C relatív koncentrációját.

A magasságpontok előkészítése és kezelése a „fields” R csomag TPS (Thin Plate Spline regresszió) funkciójával történt. A magasságadatokat interpolációját követően, az eredményül kapott DTM-ből (Digital Terrain Model - digitális terepmodell) a lejtőszög és lejtőirány változókat a SAGA GIS szoftverrel nyertük ki. A modellben felhasznált kovariánsok: Tengerszint feletti magasság, lejtőirány, lejtőszög.

### 3. Kenya – Kenya hegy keleti oldala

A Kenya hegy Afrika második legmagasabb hegye, inaktív rétegvulkán, legmagasabb pontja 5199 m. Lejtői számos mély völgygel szabdalnak, melyek gleccserek munkája során alakultak ki. Alapkőzete meghatározóan vulkanikus kőzet és hamu, kisebb területen metamorf kőzet.



6. ábra. A Kenya hegy keleti lejtője, a vizsgálati területtel, illetve mintavételi pontokkal. Zöld jelzők: 2015, kék jelzők: 2019 (Forrás: Google Earth, 2024).

A mintavétel megközelítőleg 1500 km<sup>2</sup>-t ölel fel (6. ábra). A terület klimatikus adottságait jelentősen befolyásolja az Egyenlítő közvetlen közelsége, azonban a Kenya hegy egy önálló klimatikus egységként áll a Kelet-afrikai arid és szemi-arid tájon belül. Keleti lejtője csapadékosabb a nyugatinál, kiemelt fontosságú vízgyűjtő terület, így a természetes vegetáció gazdag és komplex. A Kenya hegy adottságainak köszönhetően a keleti lejtő relatív kis területén figyelhető meg a magasság és a csapadék csökkenésével az ahhoz kapcsolódóan kialakult növénytakarulás, illetve talajfejlődés változása. Ez az igazán intenzíven változó táj ideális a csapadék- és klimatikus viszonyok változatos hatásának modellezésére a talajok szerveszéntartalmára. Talajviszonyait tekintve a száraz területen (évi 600 mm csapadék) főleg Nitisolok és Regosolok, az intenzíven művelt területeken Nitisolok és Phaeozemek, a csapadékos régióban (évi 1800-2000 mm csapadék) pedig megjelennek a Histosolok, az ott található felföldi mohalapos területeken.

Az összesített szervesanyagterképhez felhasznált adathalmaz 2 különböző felmérésből származó adatcsoport összegzése. A 2015-ös, illetve a 2019-es felmérés mintavételi pontjai a felvételezett területtel együtt az 6. ábrán láthatóak.

Az első felmérés 2015 decembere és 2016 januárja között zajlott, melynek során a Kenya hegy keleti lejtőjén a művelt talajok előzetes felmérése történt (1). A felvételezés mintavételi pontjait CLHS (Conditioned Latin Hypercube Sampling – Kondicionált Latin Hiperkocka mintázás) által kerültek kijelölésre, a bevitt függő változók: csapadék, hőmérséklet, vegetációs index, topográfiai nedvesség index, lejtőszög, illetve a kalkulálható mintavételi költség (lejtőadatok, illetve az úthálózat összefésüléséből készült „ellenállás” térkép) voltak.

Az így kijelölt mintavételi pontok közül a mintázott pontok száma 77, melyből 28 nyitott talajszelvény, 49 pedig fűrt szelvény volt. A talajszelvények mintavétele a genetikai szintek alapján történt, a fűrt szelvényekben a mintavétel 0-20, 20-50, 50-100 cm mélységekből történt, összesen 269 minta. Mintaelőkészítést követően a mintasokaság egy részének szervesszén értéke száraz égetéssel eljárással került meghatározásra. Ezt követően a mintasokaságból fennmaradó minták szervesszén értékének meghatározása a felvett MIR spektrum segítségével, becslési modell alkalmazásával történt.

2019 januárjában sor került a Kenya hegy keleti lejtőjén található farmgazdaságok által művelt talajok szervesanyagának felmérésére (2). A mintavétel a korábbi évhez hasonlóan, CLHS szerinti mintavételi stratégia mentén történt, az algoritmusba bevitt adatok megegyeznek a 2015-ös felmérés során felhasználtakkal. Az így kijelölt pontok száma 100, melyből mintázásra 69 pont került (7. ábra). A mintázás során minden mintavételi ponton 3 mélységből származó mintákat gyűjtöttünk, 0-20, 20-50 és 50-100 cm-es mélységből. Az így keletkezett, összesen 207 mintát ezt követően előkészítettük, majd Walkley-Black eljárással mértük a szervesszén tartalmuk.

A 0-100 cm-es szervesszén koncentráció térkép elkészítése során elkészült R kódot a kutatócsoport korábbi munkáit alapul véve alkottuk meg, amiben ehhez a feladathoz specifikus módosításokat eszközöltünk. A kiindulási módszertan, illetve az ahhoz tartozó parancssor elérhető, a pontos parancssor egy benyújtás alatt álló publikáció részét képezi.

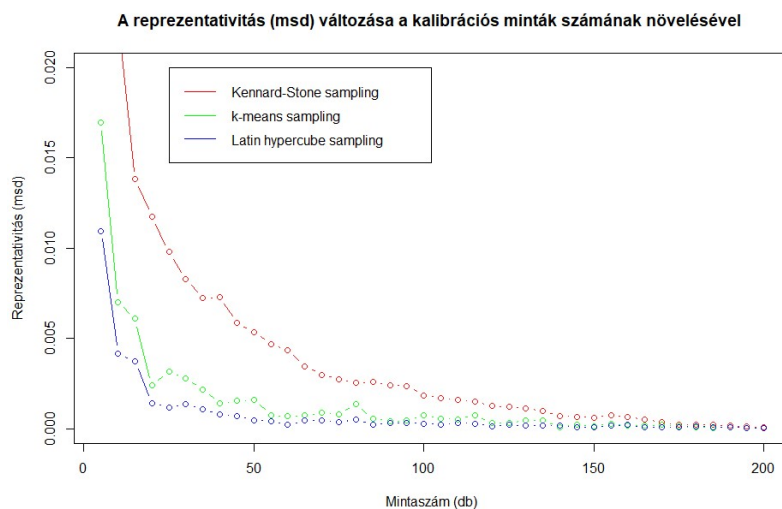
A modellhez használt, fontosabb kovariánsok, fontossági sorrendben:

- DEM (Digital Elevation Model – Digitális domborzatmodell),
- SR-B6: A Landsat 8-9 által felvételezett felszíni visszaverődést érzékelő SWIR (Short-wave Infrared – Rövidhullámú infravörös) sugárzási tartomány értéke,
- SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index): Az NDVI olyan Landsat 8-9 műholdak által használt módosított változata, ami javítja az alacsony vegetációval rendelkező területek talajának torzító hatását, talaj-fényesség korrekciós faktor segítségével,
- Éves csapadékösszeg,
- SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) felmérésből származó domborzati változatosság (Topographic diversity),
- Lejtőszög,
- Talajborítottság,
- TPI (Topographic Position Index – Topográfiai index).

## EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉS

### Mintakiválasztási módszerek által kalibrált modellek reprezentativitásának vizsgálata (Kanális)

A mintakiválasztási algoritmusok teljesítményének vizsgálatához kellően heterogén mintasokaság szükséges. A különböző mélységek szervesszén értékeinek változatossága megmutatkozik az eltérő átlagokban, illetve mediánokban. A 0-20 és 20-50 cm mintacsoportok szórása közel azonos, ettől tér el az 50-100 cm-es minták szórása, 1%-os szignifikancia intervallum mellett.



7. ábra. A különböző mintakiválasztási algoritmusok reprezentativitásának (msd) lefutása, a vizsgálatba bevont minták függvényében.

A mintakiválasztási módszerek reprezentativitását bemutató iterációs algoritmus eredménye a 7. ábrán látható. Az ábra bemutatja, hogy adott mintapontszámok esetén mekkora az az msd (reprezentativitási biztonság) érték, amellyel az adott mintaszám esetén a modell rendelkezik.

A mintakiválasztási eljárások reprezentativitás görbéje információt szolgál az adott algoritmus reprezentativitásának telítődéséről a kalibrációra felhasznált mintaszám függvényében. A reprezentativitás vizsgálat eredménye alapján a leglaposabb telítődési görbével az LHS mintavétel jellemezhető, a legtöbb minta esetén telítődő algoritmus a KSS, az adott mintasokaság esetében.

A reprezentativitás-vizsgálatot követően a különböző mintaszámmal történő mintakiválasztással és mintaszámmal történő kalibrációs-validációs sor ad információt a mintakiválasztási modellek teljesítményéről. A 3 mintakiválasztási módszer mindegyikéhez 9-9 kalibráció és validáció tartozik. Az elkészült modellek keresztvalidációját követően azok  $R^2$  és RMSE értékeit vizsgáltam. Tovább, az  $R^2$  és RMSE értékek összevont, normalizált értékének kifejezéséhez létrehoztuk az összegzett statisztikai mutatót, melyhez az NDVI számítást vettük alapul:

$$(R^2 - RMSE) / (R^2 + RMSE)$$

Az összegzett statisztikai mutató -1 és 1 közötti értéket vehet fel, a magasabb érték a modell magasabb megbízhatóságát jelenti.

A bemutatott validációk alapján a felállított modellek sikerességének statisztikai mutatóit (RMSE és  $R^2$ ) a 1. táblázat részletezi, melyeket az összegzett statisztikai mutató kombinál (8. ábra). Az eredmények alapján elmondható:

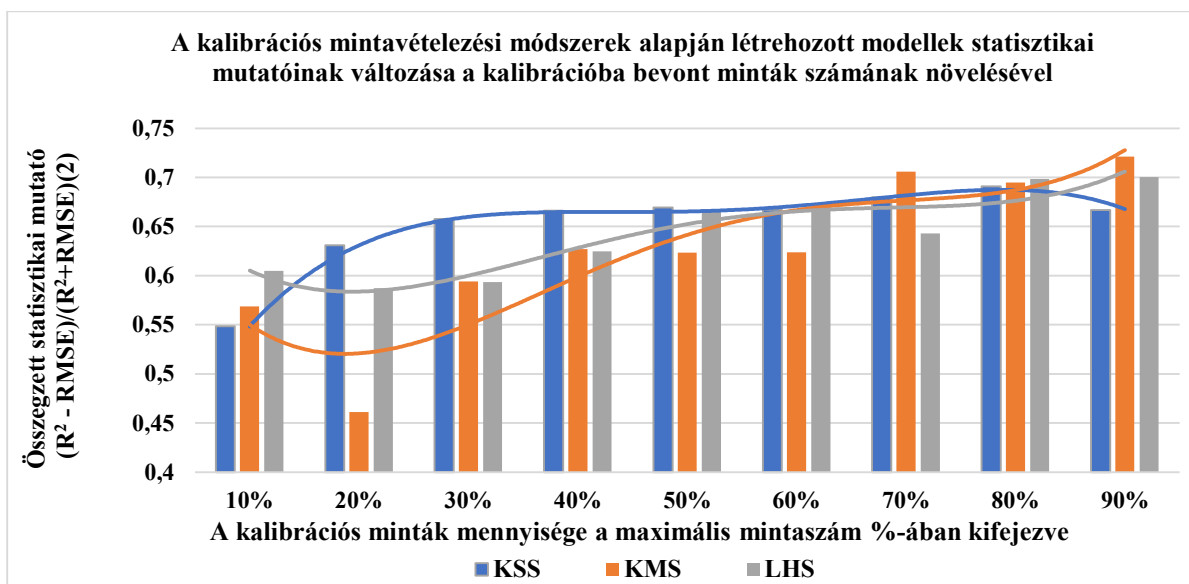
- A modellek determinációs együtthatója kizárólag a KMS 10% és 20% mintaszámú, illetve a KSS 10% mintaszámú kalibrációinál volt alacsonyabb 0,9-nél, így a becslések pontossága a jelentős heterogenitás ellenére általánosan magas,
- Az RMSE értékek a kalibrációhoz felhasznált mintaszám növelésével együtt csökkennek, így az értékek között negatív korrelációt igazolnak az eredmények,
- A KSS és az LHS esetében a determinációs együttható maximális értéket 80%-os kalibráció, a KMS esetében a minták 90%-val történő kalibráció esetén vett fel,
- Az  $R^2$  és az RMSE értékek összegzéséből látható, hogy bár a legnagyobb becslési pontosság 80, illetve 90%-os mintafelhasználásnál érhető el, mind a 10-20%-os, mind a 80-90%-os mintafelhasználású kalibráció esetén megjelenhet a predikció

inkonzisztenciája, amit előbbi esetben a kalibráció pontatlansága, utóbbi esetben a validáció pontatlansága okoz,

- A legalacsonyabb (0,46) és a legmagasabb (0,72) értékű összegzett statisztikai mutató is a KMS mintakiválasztás esetén volt mérhető,
- Az eltérő mintakiválasztási módszerek által felépített modellek teljesítménye között a minták 40-60%-nak kiválasztása esetén van a legnagyobb hasonlóság,
- Hasonló módon, a minták 40 és 60%-nak felhasználása esetén változik a modellek teljesítménye a legkisebb mértékben,
- A KSS által kiválasztott mintákkal kalibrált modell statisztikai mutatóinak görbéje 30%-os kalibrációs mintaszámnál telítődik, a LHS esetében ez az érték 50%, a KMS esetében 70%,
- A LHS és a KMS algoritmusok esetében a 10 és 30% közötti mintaszám, illetve a 70 és 80% esetén tapasztalt ingadozás a becslés pontosságában a KSS mintavétel esetén egyedül a 90%-os mintaarányú kalibrációnál tapasztalható.

1. táblázat. A kalibrációs/validációs sorozatban felállított modellek statisztikai mutatói.

|                          | A kalibrációban részt vevő minták száma a teljes mintaszám %-ában kifejezve |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                          | 10%                                                                         | 20%   | 30%   | 40%   | 50%   | 60%   | 70%   | 80%   | 90%   |
| <b>KSS R<sup>2</sup></b> | 0,885                                                                       | 0,924 | 0,934 | 0,938 | 0,939 | 0,936 | 0,944 | 0,952 | 0,93  |
| <b>KSS RMSE</b>          | 0,258                                                                       | 0,209 | 0,193 | 0,188 | 0,186 | 0,187 | 0,18  | 0,174 | 0,186 |
| <b>KMS R<sup>2</sup></b> | 0,895                                                                       | 0,835 | 0,907 | 0,92  | 0,927 | 0,906 | 0,957 | 0,944 | 0,969 |
| <b>KMS RMSE</b>          | 0,246                                                                       | 0,308 | 0,231 | 0,211 | 0,215 | 0,21  | 0,165 | 0,17  | 0,157 |
| <b>LHS R<sup>2</sup></b> | 0,914                                                                       | 0,904 | 0,901 | 0,922 | 0,937 | 0,939 | 0,93  | 0,951 | 0,948 |
| <b>LHS RMSE</b>          | 0,225                                                                       | 0,235 | 0,23  | 0,213 | 0,187 | 0,187 | 0,202 | 0,169 | 0,167 |



8. ábra. A különböző arányú kalibrációval épített modellek becslési pontosságának összegzett statisztikai mutatói.

### Tábla szintű szervesszén-felmérés eredményei (Kanális)

A különböző mintapont-kiválasztási módszerek összehasonlítása során a szervesszén eredményekből C denzitás értékeket kalkuláltam, ami megadja az adott pontra vonatkoztatott, 1 m<sup>2</sup> területen található szerves szén mennyiségét, 1 m mélységig. A C denzitástérképek elkészítése során „krieg” interpolációt alkalmaztam. A C denzitás, illetve dimenziójának képlete a következő:

$$C_{DENZ} = T_t * C_{org\%} * h_{TALAJ} = [t/m^3 * kg/t * m] = [kg/m^2]$$

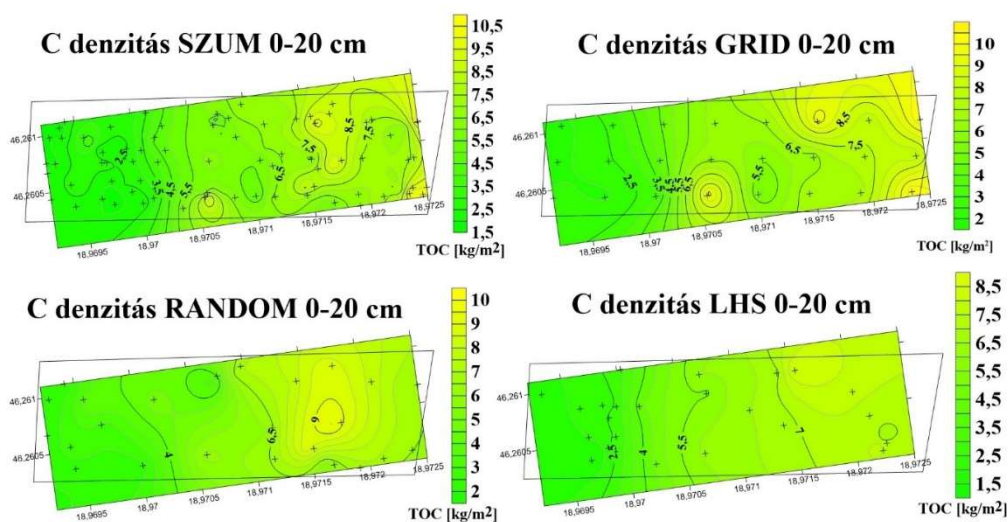
$T_t$  = Térfogattömeg [t/m<sup>3</sup>],

$C_{org\%}$  = Talaj szervesszén tartalma [%],

$h_{TALAJ}$  = A kalkulált talajoszlop mélysége [m].

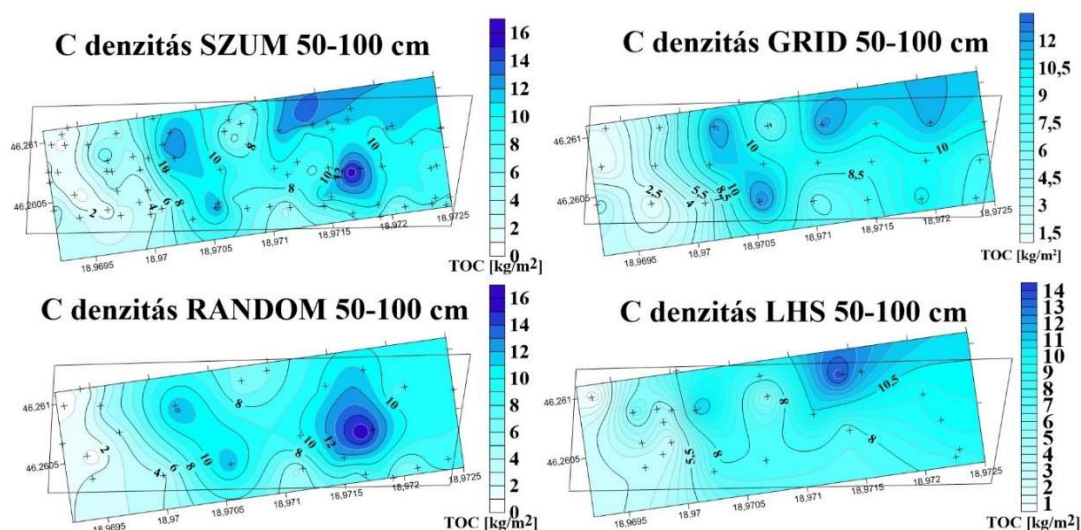
A legnagyobb információsűrűségű, ezáltal legpontosabb interpolációt eredményező térképek a mindhárom mintavétel összesen 72 pontjából készült „SZUM” térképek, amik az összehasonlítás során viszonyítási alapként szolgálnak. Az ábrák TOC [kg/m<sup>2</sup>] színskálájának kódolása egységes az egyes mélységek ábrázolása során, a jobb összehasonlíthatóság érdekében.

Az 0-20 cm mélység (9. ábra) interpolációi esetében a SZUM térképen megjelenő egyes talajfoltok többsége felismerhető a különböző térképeken is, azonban kiterjedésük és az interpoláció értéke jelentős eltéréseket mutat.



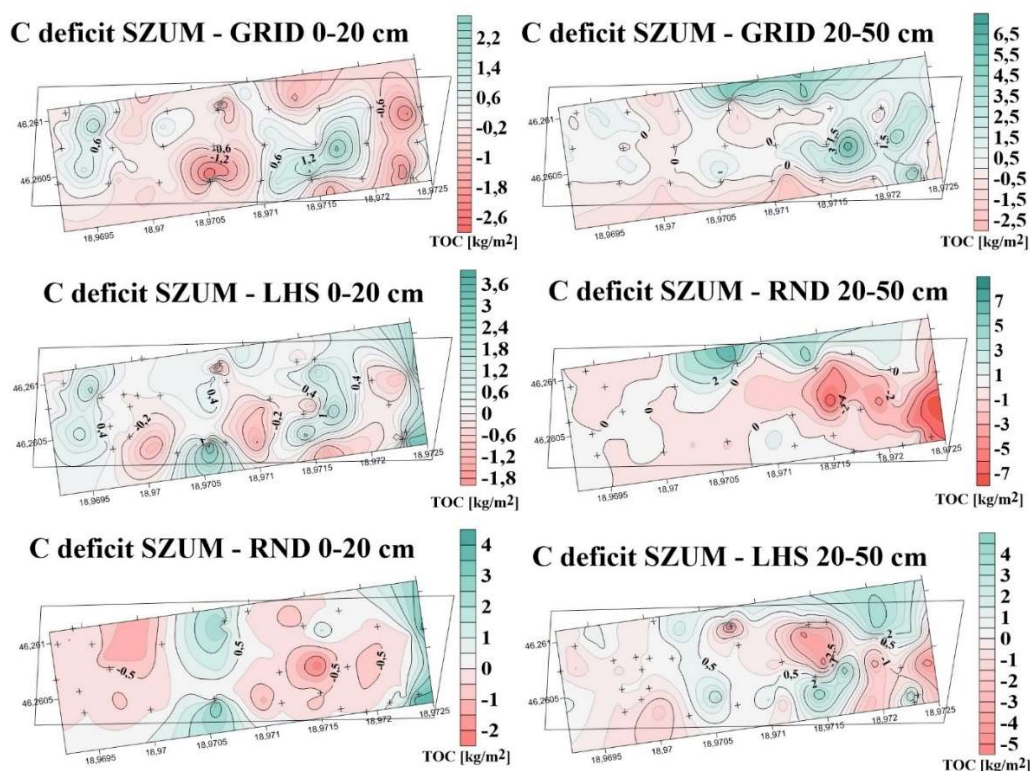
9. ábra. Az összesített, illetve a különböző mintapont-kijelölési eljárásokból származó pontok felhasználásával készült C denzitás-térkép, a mintaterület 0-20 cm-es mélységére. A térképek színskálájának minimum értéke 0, maximum értéke 20 kg/m<sup>2</sup>.

A legjelentősebb eltérések az egyes egyedülálló mintavételek térképei és a SZUM térkép között az 50-100 cm-es mélységben láthatóak (10. ábra). A talajfoltok elhelyezkedését, illetve az általános talajviszonyokat leginkább a GRID térkép tükrözi leghűbben.



10. ábra. Az összesített, illetve a különböző mintapont-kijelölési eljárásokból származó pontok felhasználásával készült C denzitás-térkép, a mintaterület 50-100 cm-es mélységére. A térképek színskálájának minimum értéke 0, maximum értéke 20 kg/m<sup>2</sup>.

A különböző interpolációk közötti különbségek jobb szemléltetésére **különbségtérképeket készítettem**, melynek során a 72 pontot tartalmazó (legnagyobb információsűrűségű) térkép interpolációjából vontuk ki az egyes különálló mintavételekből készült interpolációk eredményét (11. és 12. ábra).

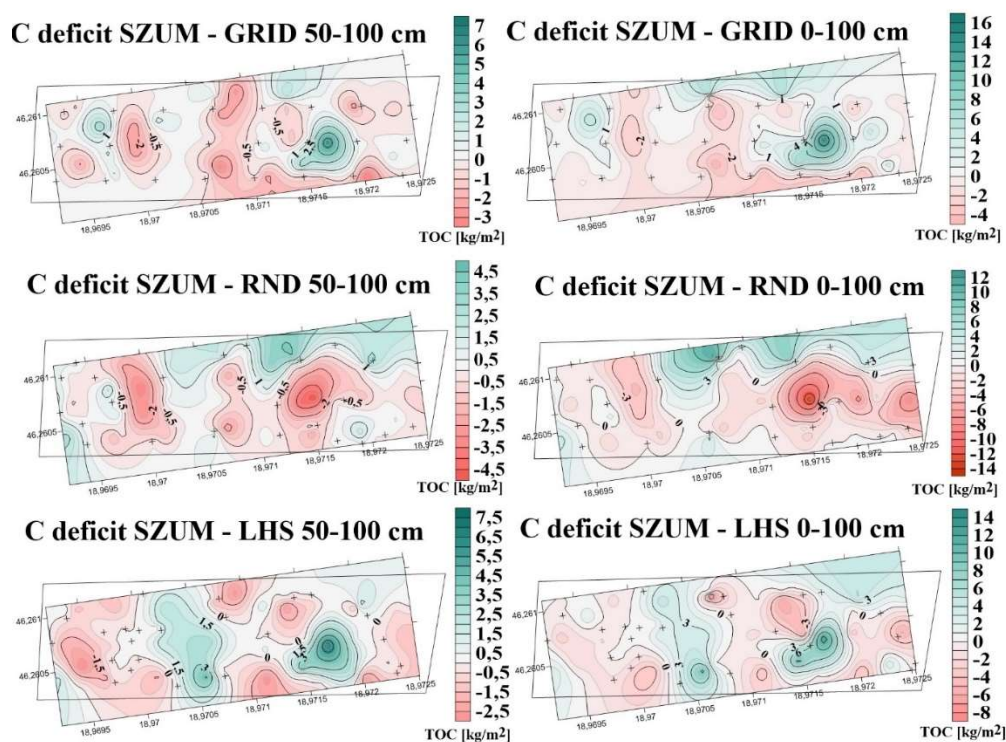


11. ábra. Az összesített pontokból készített, illetve az eltérő pontkijelölési módszerekből származó pontokból készített interpolációk különbsége, térképként ábrázolva.

A deficittérkép negatív értéket a kivonásra került interpoláció magasabb értéke esetén (piros színnel jelölve), pozitív értéket a kivont interpoláció alacsonyabb értéke esetén vesz fel (zöld színnel jelölve). A vizuális interpretáció segít a mintapont-kiválasztási módszerek

tulajdonságainak jobb bemutatásában, az eredményül kapott interpoláció általános értékelésén túl. Az egyes mélységek deficit térképeinek ábrázolása során a színskála értékei azonosak.

A 0-20 cm-es mélységről készült deficit térképek (11. ábra) közül a SZUM-GRID térképen, illetve a SZUM-RND térképen főleg a negatív értékek dominálnak, ami a GRID és RANDOM térképek túl magas értékeit jelzi. Ugyanezen ábrán található 20-50 cm-es mélység különbség térképei, amelyekben a GRID és LHS térképek eltérései alacsonyabbak, a SZUM-RANDOM térkép értékeihez viszonyítva, ami a legnagyobb deficit értékekkel rendelkezik a három különbség térkép közül. Az 50-100 cm-es mélység különbség térképein látható, hogy a RANDOM egyenlő nagyságban tér el negatív és pozitív irányba a SZUM térképétől (12. ábra). A GRID, illetve az LHS esetében is elmondható, hogy nagyobb értékben pozitív irányba tér el, azonban az összterületet tekintve dominál a negatív irányú eltérés.



12. ábra. Az összesített pontokból készített, illetve az eltérő pontkijelölési módszerekből származó pontokból készített interpolációk különbsége, térképként ábrázolva.

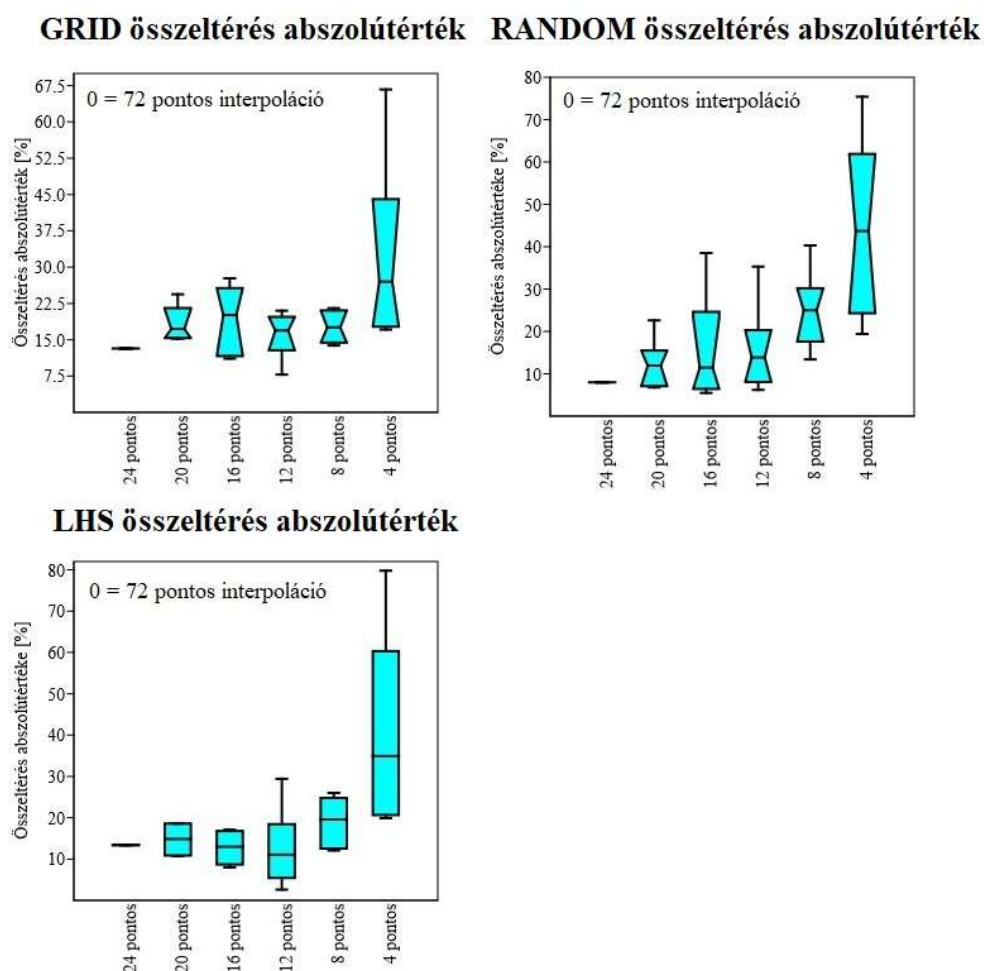
A 0-100 cm-es különbség térképen összesítve látható az interpoláció összesített hibája, a mintavétel teljes mélységére vonatkozóan (13. ábra). A legnagyobb negatív értékű eltérés a SZUM-RND esetében jelentkezett, a legnagyobb pozitív értékű eltérés pedig a SZUM-GRID esetében. A maximum negatív, illetve a maximum pozitív deficit értékek közötti legnagyobb különbség (a különbségek abszolútértékeinek összege) azonban a SZUM-RND esetében volt, tehát az interpolációból történő adott pontra vonatkozó torzítás ebben az esetben vehette fel a legnagyobb értéket. Ugyanezen érték a SZUM-GRID esetében volt a legkisebb, tehát a GRID térkép esetében van legkisebb esélye magas értékű hibával terhelt mintavételnek.

#### Mintavételi pontok számának vizsgálata az interpoláció volumenjére

Az egyes mintavételek szervesszén-viszonyok felmérésére való alkalmazhatóságának vizsgálatára tovább teszteltem azokat, ennek során cél volt a mintavételek közötti különbség számszerűsítése. Ehhez olyan sorozatot készítettem, minek során az interpolációhoz felhasznált pontok számát folyamatosan csökkentettem (24-20-16-12-8-4 mintapont), majd az adott mintaszámmal készített interpolációnak számoltam integrálszámítással a volumenjét. Ez a volumen a teljes területen megtalálható szénkészlet mennyiségét jelenti, a vizsgált mélységben. Az így számított

volumeneket hasonlítottam össze az összes, 72 pontot tartalmazó interpoláció (legmagasabb információsűrűség) volumenjével.

Az eredmények ábrázolása során annak érdekében, hogy a különböző mélységek eltérései összehasonlíthatóak legyenek, százalékos eltérés értéket számoltam, a 72 pontos interpolációhoz viszonyítva (13. ábra). A mintapontok csökkentése során a GRID módszer eredményezte a legkisebb változást (legnagyobb megbízhatóságot). A 20, illetve a 16 pontos interpolációk esetében az LHS eredményezte a legkisebb hibaszázalékokat, a legkisebb szórással is.



13. ábra. Összesítő ábra a különböző mintaszámú interpolációkból készült térfogatszámítások eltéréseiből.

Következő lépésben az egyes mintapontcsökkentések során létrejött csoportonként (mintakijelölési módszerenként, mintapontszámoként, mélységenként, például: GRID 12 pontos, 0-20 cm) kialakult 6-6 interpoláció volumenértékeinek szórását, átlagát, illetve szórásnégyzetét számoltam ki. A csoportokon belüli szórásviszonyok megismerésére módosított relatív szórást (relatív variancia) számítottam, melynek képlete:

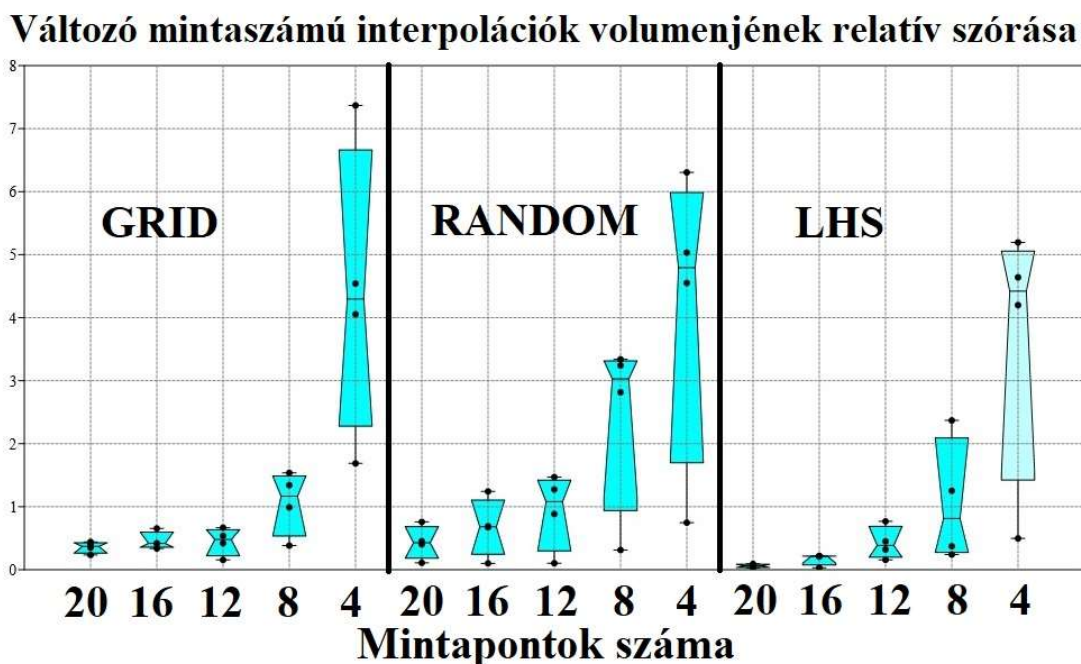
$$D = (\sigma^2 / V_{SZUM}) * 100$$

Ahol

$\sigma$ , illetve  $\sigma^2$  : Szórás, illetve szórásnégyzet (variancia),

$V_{SZUM}$  : Az adott csoportnak megfelelő mélységű 72 pontos interpoláció volumenértéke.

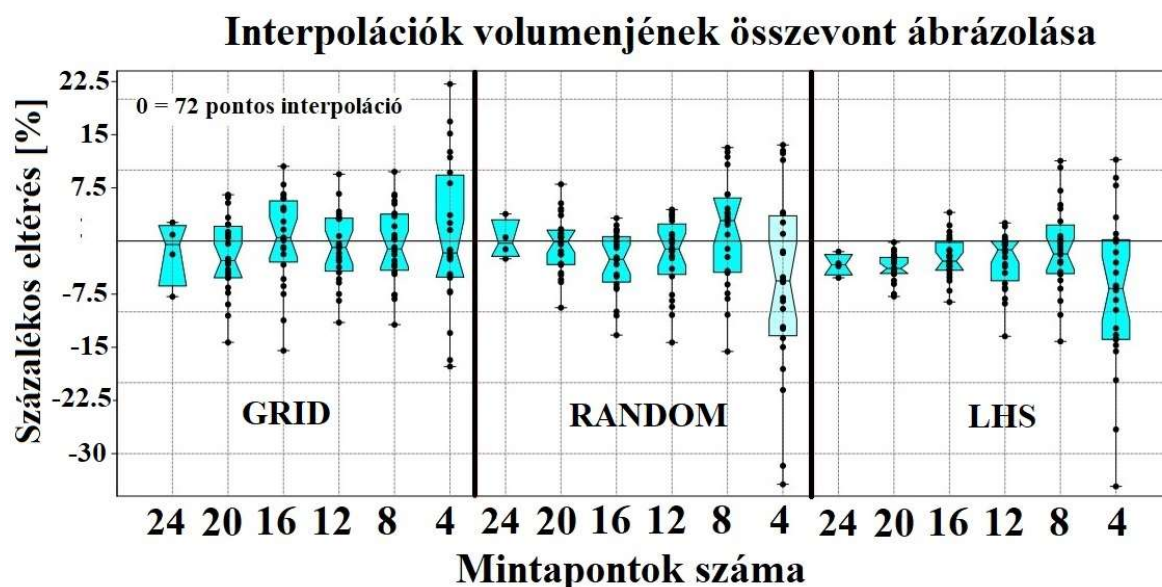
A relatív variancia dimenzió nélküli mutató, 100-zal való szorzást követően százalékos értéket jelent. A mintaszámcsökkentés által számolt interpolációs eredmények szórásviszonyainak jobb értelmezhetősége érdekében a módosított relatív varianciaértékek is ábrázolásra kerültek (14. ábra).



14. ábra. Az egyes mintavételek különböző mintaszámain belül a 4 eltérő mélység (0-20, 20-50, 50-100, 0-100 cm) interpolációinak módosított relatív varianciája.

Az ábrázolt eredmények összegzéseként elmondható, hogy a GRID és LHS esetében az interpoláció bizonytalansága – feltételezett alkalmazás az adott terület szerveszén-készletének felmérése – leginkább a 8 mintapontból 4 mintapontra való csökkentés esetén nő meg szignifikáns mértékben, míg a RANDOM pontok esetében már a 16-12-8 pontos térképek esetében is jelentős mértékű a szórás.

A különböző mintavételi módszerek csökkentett mintaszámú csoportjaiból készült interpolációk azonos skálán való összehasonlítása látható a 15. ábrán. Az ábra alapján az LHS mintavétel rendelkezik a legkisebb szórással, a 4 pontos interpoláció kivételével, ami a GRID esetén a legkisebb szórású. Az interpolációk középértékei (medián és átlag) a GRID esetében állnak legközelebb a 0 értéknek tekintett 72 pontos interpolációhoz. Az LHS esetében minden mintaszámú csoport interpoláció középértéke 0 alatti, a RANDOM mintavétel esetében pedig 20 pontos interpolációt követően ingadozva közelíti alulról és felülről a 0 értéket. A GRID esetében a 20, 16, 12 és 8 pontos interpolációk szórása magas, azonban a mintapontok csökkentésével keveset változik, így a mintavétel információvesztesége magas és állandó értékű. A RANDOM és LHS esetében elmondható, hogy a szórás a mintapontok csökkentésével nő, minden lépésben. A RANDOM esetében már a 20 pontos interpolációk értékeinek szórása is magas, a további lépésekben pedig ez nem változik, illetve nő. Az LHS esetében a 24 pont esetében alacsony szórás lépésenként kismértékben nő. Az ábrát tekintve elmondható, hogy az alacsony szórás nem minden esetben jelenti az alacsony eltérést a 0 értékhez viszonyítva. Például az LHS20 szórása alacsony, azonban a RANDOM20 értékei a nagyobb szórás ellenére is többnyire a 0 köré csoportosulnak, így az interpolációk eltéréseinek abszolútértéke lényegesen nem különböző (14. ábra).



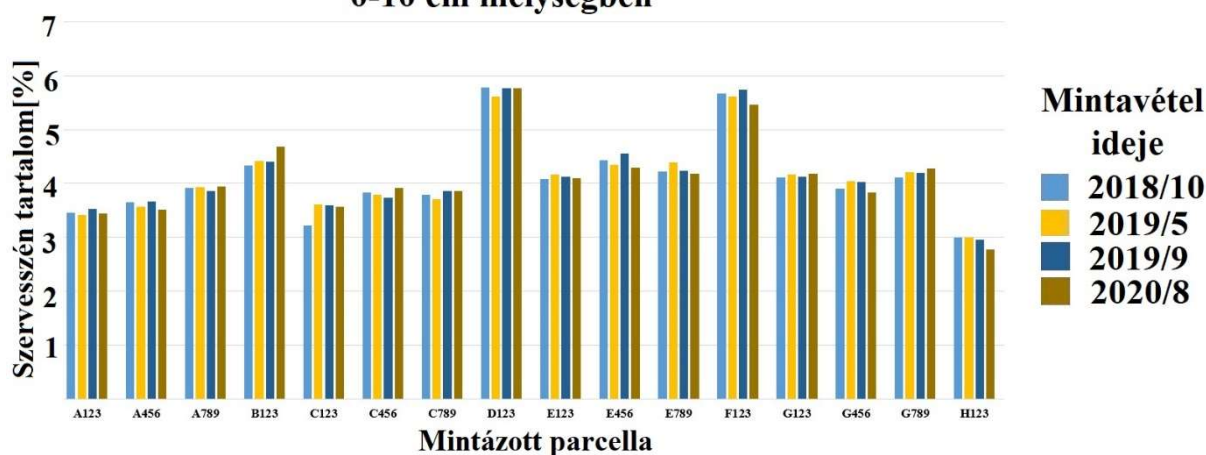
15. ábra. A különböző mintaszámú interpolációk százalékos eltéréseinek egységes skálán történő ábrázolása.

#### Precíziós szervestrágyázás hatásának nyomonkövetése, eltérő talajadottságok esetén (Érréve)

A pellettált szervestrágyázás hatásainak bemutatása során a bedolgozás mélysége miatt a szervesszén-adatoknak mindössze a felső, 0-10 cm-es mélységét vettem tekintetbe, a szervestrágyázás hatásai várhatóan itt mérhetőek a legnagyobb mértékben.

Elsőként a mennyiségi változásokat vizsgáltam. Ennek során az adatokat három csoportba osztottam szét, (1) Kontroll és a két dózisú kezelés, (2) 500 kg/ha és (3) 250 kg/ha. Kontrollnak tekintem minden olyan parcellát, amely nem kapott kezelést, illetve a megelőző felmérés esetén minden parcellát. A dózisok fordított sorrendje a parcellák fizikai elrendezéséből fakad. A 16. ábrán azon eredmények láthatók, amelyek mind a folt-, mind a teljes területű kezelésből kihagyottak, ezáltal kontrollnak tekinthettem azokat.

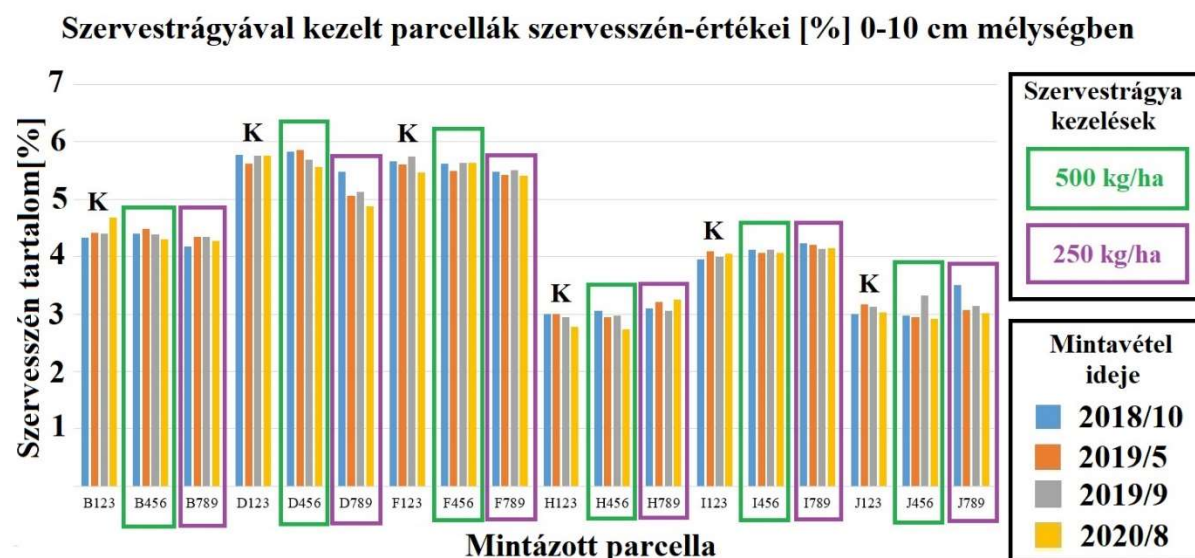
#### **Szervestrágyával nem kezelt parcellák szervesszén értékei [%] 0-10 cm mélységben**



16. ábra. A kezelésben nem részesült (Kontroll) területrészek szervesszén-változása.

Az egyes parcellaértékek mindegyike 3 mintavételi pontból származó adatok átlagértéke. Az egyes parcellák talajának szervesszén-tartalom változása nem konzekvens a mintavételek során, az adatok természetes szórást mutatnak.

A következőkben vizsgálva a szervesztrágyával kezelt parcellák eredményeit, figyelembe véve az adatok szórását, nem mutatkozik szemmel látható, vagy statisztikailag igazolható mennyiségi különbség, a kezelések hatására (17. ábra).



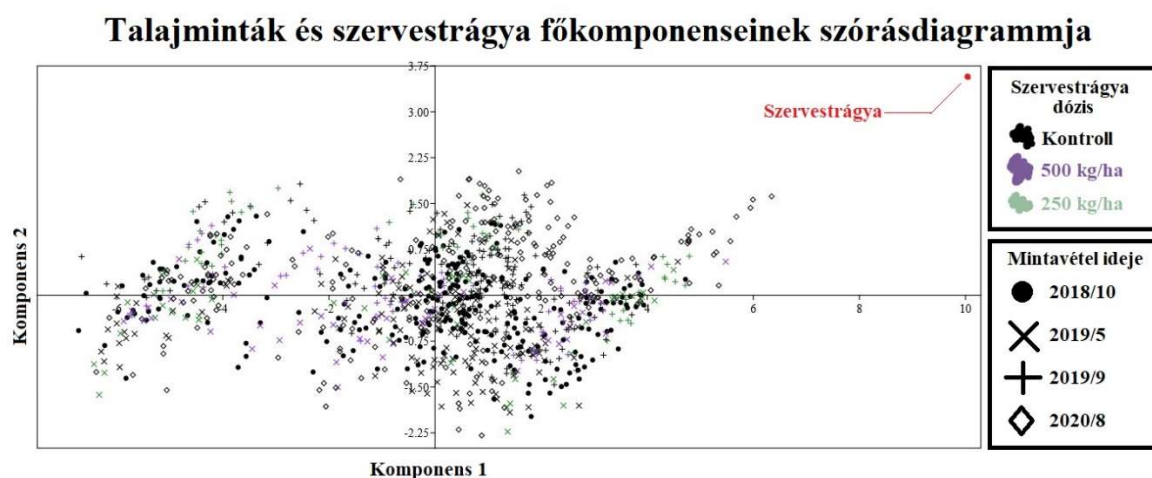
17. ábra. A kezelt parcellák, összehasonlításban ábrázolva az azonos talajfoltban elhelyezkedő kontrollparcellával.

A szervesszén értékekből ezt követően elkészítettük a különböző felvételezések és mélységek szerinti szervesszén-térképezést. Az eredményül elkészült térképeket, azok kiterjedésére való tekintettel, a dolgozat mellékletébe helyeztem, azok determinációs együtthatói a 2. táblázatban láthatóak.

2. táblázat. Az elkészült térképek determinációs együtthatója (Érréve).

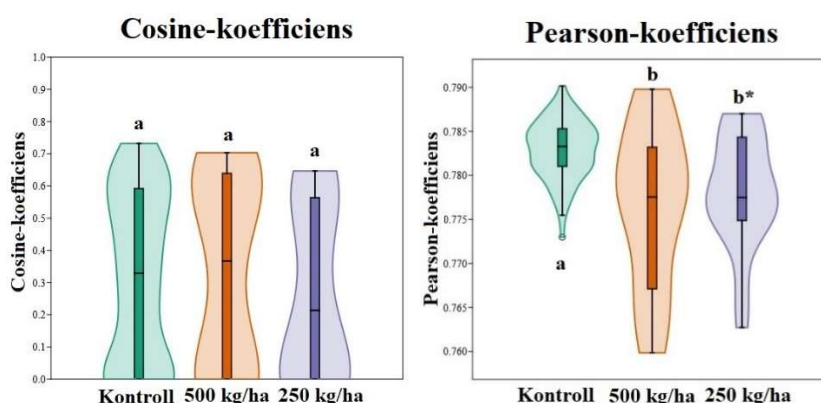
| R2 értékek – Érréve          | 0-10 cm | 10-20 cm | 20-30 cm |
|------------------------------|---------|----------|----------|
| <b>Keresztvalidáció</b>      | 0,838   | 0,825    | 0,834    |
| <b>Külső validáció (20%)</b> | 0,90    | 0,90     | 0,91     |

A mennyiségi szervesszén eredményeket követően az előkészített spektrális adatokat vizsgáltam, a trágyázás hatásainak nyomonkövetése érdekében. A felvételezett spektrumok nyers adatpontok formájában főkomponens-analízisnek vettem alá, a kezelés során kijuttatott szervesztrágyával együtt (18. ábra).



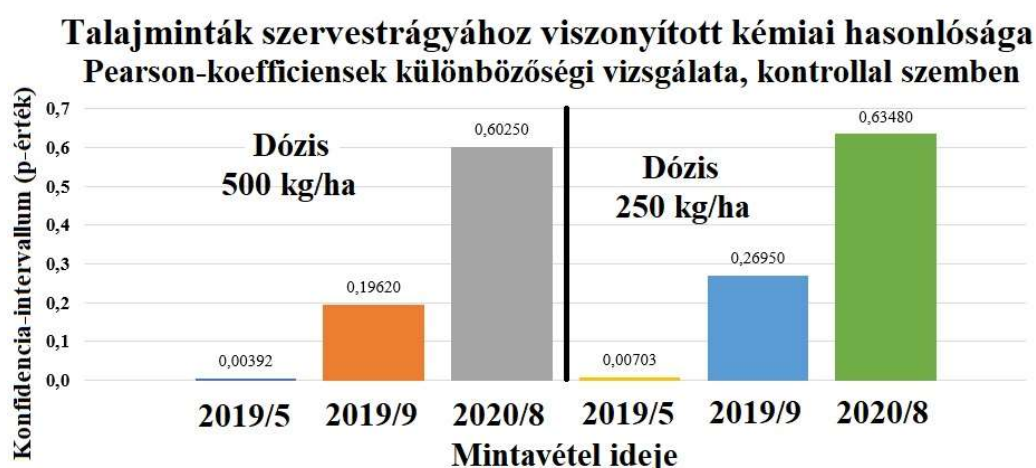
18. ábra. A felvételezett spektrum főkomponens analíze, szórásdiagrammon ábrázolva.

A főkomponenseket vizsgálata során elsődleges szempont, hogy megállapítsuk, hogy a főkomponensek közül mennyi fejezi ki az adatok varianciáját. Az adatpontok közötti különbségek alacsony mértéke, illetve az adatok alapvetően magas dimenzionalitása miatt az alapján került kiválasztásra a használt főkomponensek száma, hogy melyik főkomponens esetében szűnt meg a komponensek értékein belül a szervezetrágya, illetve a talajminták spektrumai közötti nagyságrendbeli különbség. Ennek megfelelően 11 főkomponenst vittem tovább a következő lépcsős vizsgálatokra. Cél volt a főkomponensek olyan módon történő összehasonlítása, amelyben a talajminták és a kijuttatott szervezetrágya közötti hasonlóságot tudjuk vizsgálni. A főkomponensek esetében olyan hasonlósági indexre volt szükség, amely spektrális adatokra alkalmazható és alkalmas az egészen kismértékű strukturális/kémiai hasonlóság kimutatására. A Cosine-, illetve a Pearson- koeficiensek alkalmasak főkomponensek összehasonlítására, kémiai szerkezetek esetében (19. ábra).



19. ábra. A talajminták, illetve a kijuttatott szervezetrágya spektrum főkomponens értékeinek hasonlósági vizsgálatai.

A Cosine hasonlósági vizsgálat nem adott értékelhető eredményt, azonban a Pearson-koeficiens szignifikáns ( $p < 0,05$ ) különbséget mutatott ki a kezeletlen és a kezelt parcellák talajai között. A Pearson-koeficiens használva a továbbiakban a különbözőségeket további, évenkénti bontásban is szerettem volna vizsgálni. A kontroll, illetve a kezelt parcellák Pearson koeficiensei közötti különbségek méréséhez különbözőségi számítást végeztem és a különbözőség konfidencia-intervallumait hasonlítottam össze (20. ábra).



20. ábra. A kezelések Pearson koeficienseinek különbözőség-értékei, kontrollhoz viszonyítva, oszlopdiagrammon ábrázolva.

Az ábrákból kiderül, hogy a talajminták szervezetrágyához való spektrális hasonlósága a kezelést követő mintázáskor a legnagyobb a kezelt parcellákban, ekkor szignifikáns a különbözőség ( $p < 0,05$ ), ami különbség konfidencia-intervalluma minden mintázás alkalmával fokozatosan

csökkent. A kezelések okozta kezdeti szignifikáns különbség már fél év elteltével sem igazolható, azonban még nem túl magas a konfidencia-intervallum ( $p \sim 0,2$ ) tartomány. Másfél év elteltével a konfidencia-intervallum meghaladja a 0,6-ot, így a különbözőség tovább csökken.

A precíziós szervesztrágyázás eredményeit (3. táblázat) tekintve fontos a szegélyhatást kiszűrni az adatokból, ezért a különböző parcellákon belül kijelölésre kerültek részterületek, amelyeken belül a kezeléseket torzító hatások nélkül lehetett vizsgálni. Ezek alapján mind a foltkezelés, mind a teljes területes kezelés megtérülő módon növelte meg a bevételt, azonban az általánosan kedvezőbb agronómiai tulajdonságú talajfoltok kezelése esetén igazolható a legnagyobb megtérülés/befektetés arány.

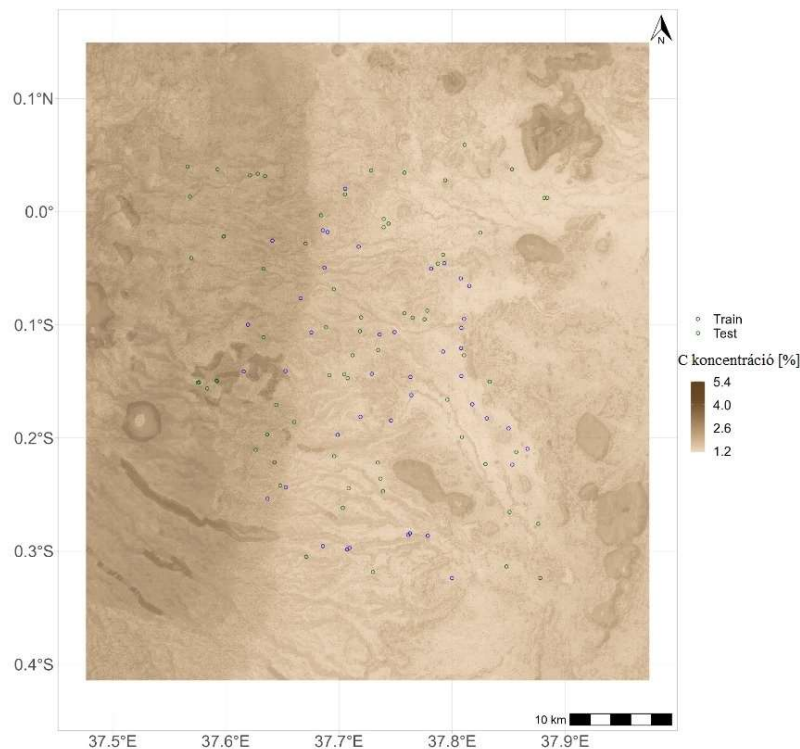
3. táblázat. A szervesztrágyázás megtérülési számításai.

| Foltkezelt                     | Kontroll |       |       |       | 500 kg/ha |        |        |        | 250 kg/ha |       |       |       |
|--------------------------------|----------|-------|-------|-------|-----------|--------|--------|--------|-----------|-------|-------|-------|
| Termés [t]                     | 1,46     | 1,03  | 1,45  | 1,38  | 1,68      | 1,54   | 1,66   | 1,48   | 1,51      | 1,43  | 1,55  | 1,64  |
| Terület [ha]                   | 0,176    | 0,179 | 0,185 | 0,185 | 0,203     | 0,204  | 0,206  | 0,206  | 0,203     | 0,198 | 0,192 | 0,192 |
| Termésátlag [t/ha]             | 8,32     | 5,76  | 7,83  | 7,42  | 8,23      | 7,52   | 8,03   | 7,16   | 7,40      | 7,19  | 8,08  | 8,53  |
| Trágyázott terület [ha]        | 0        | 0     | 0     | 0     | 0,077     | 0,078  | 0,077  | 0,077  | 0,076     | 0,075 | 0,073 | 0,073 |
| Trágyázott terület aránya [%]  |          |       |       |       | 38        | 38     | 37     | 37     | 38        | 38    | 38    | 38    |
| Trágyázás költsége [HUF]       |          |       |       |       | 3 582     | 3 634  | 3 556  | 3 556  | 1 772     | 1 729 | 1 686 | 1 686 |
| Parcellaátlag [t/ha]           | 7,33     |       |       |       | 7,74      |        |        |        | 7,80      |       |       |       |
| Átlagos trágyaköltség [HUF/ha] | 0        |       |       |       | 17 615    |        |        |        | 8 807     |       |       |       |
| Bevétel - trágyázás [HUF]      | 476 629  |       |       |       | 502 845   |        |        |        | 506 926   |       |       |       |
|                                |          |       |       |       |           |        |        |        |           |       |       |       |
| Teljes területen kezel         | Kontroll |       |       |       | 500 kg/ha |        |        |        | 250 kg/ha |       |       |       |
| Termés [t]                     | 1,25     | 1,12  | 1,29  | 1,32  | 1,75      | 1,68   | 1,73   | 1,67   | 1,69      | 1,70  | 1,84  | 1,68  |
| Terület [ha]                   | 0,21     | 0,21  | 0,22  | 0,22  | 0,22      | 0,22   | 0,22   | 0,22   | 0,23      | 0,23  | 0,24  | 0,24  |
| Termésátlag [t/ha]             | 5,88     | 5,20  | 5,87  | 6,01  | 8,11      | 7,62   | 7,76   | 7,51   | 7,47      | 7,32  | 7,78  | 7,12  |
| Trágyázott terület [ha]        | 0        | 0     | 0     | 0     | 0,216     | 0,220  | 0,222  | 0,222  | 0,226     | 0,231 | 0,236 | 0,236 |
| Trágyázás költsége [HUF]       |          |       |       |       | 10 003    | 10 214 | 10 305 | 10 305 | 5 243     | 5 363 | 5 469 | 5 469 |
| Parcellaátlag [t/ha]           | 5,74     |       |       |       | 7,75      |        |        |        | 7,42      |       |       |       |
| Átlagos trágyaköltség [HUF/ha] | 0        |       |       |       | 10 207    |        |        |        | 5 386     |       |       |       |
| Bevétel - trágyázás [HUF/ha]   | 372 992  |       |       |       | 493 637   |        |        |        | 477 133   |       |       |       |

#### Szervesszén-viszonyok térképezése heterogén domborzaton (Kenya)

A két felmérés (2015 és 2019) során a Kenya hegy keleti oldalán gyűjtött mintákból kapott szervesszén-koncentráció eredményeket egy adatsokaságként kezelve végeztem el az alapvető, leíró statisztikai mutatók számítását, szervesszén-koncentrációra vonatkoztatva. A különböző mélységek között statisztikailag igazolható különbség nincs. A vizsgált területen a tengerszint feletti magasság csökkenés értéke 1400 m (2100 tszfm – 700 tszfm), amelyen belül a mintapontok térbeli kiterjedése jelentős. A legnagyobb mintapontsűrűség 1400 m és 1100 m tengerszint feletti magasság között van. A 0-20 cm-es és 50-100 cm-es minták között statisztikailag igazolható a különbség ( $p < 0,001$ ), a 0-20 cm és a 20-50 cm közötti minták esetében a  $p$  értéke 0,09362, így az 5%-os konfidencia-intervallumhoz közeli. A 20-50 cm-ről és 50-100 cm-ről származó minták esetében a  $p$  értéke 0,1764, így a statisztikailag igazolható különbség itt a legkisebb valószínűségű.

A predikcióból létrejött szervesszén-adatokból elkészített térkép az 21. ábrán látható. A szervesszén értékek topográfiai változókkal történő súlyozásának köszönhetően a térkép statisztikai megbízhatósága jelentősen nőtt. A további kovariánsokkal nem optimalizált térképek átlagos  $R^2$  értéke 0,59, a predikció pontosságának további paraméterekkel való javítását követően az  $R^2$  értéke 0,82.



21. ábra. A vizsgált terület szerveszén-koncentrációját bemutató talajtérkép.

## KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

### Mintakiválasztási módszerek által kalibrált modellek reprezentativitásának vizsgálata (Kanális)

A MIR spektrális adatokból felépített becslési modellek vizsgálata során, változó kalibrációs/validációs arányú modellek teljesítményének statisztikai mutatói ( $R^2$  és RMSE) alapján a következők a javaslataim:

- 10%-os kalibrációs mintaarány esetén az LHS mintakiválasztás nyújtja a legnagyobb reprezentativitást,
- Mindhárom mintakiválasztási módszerrel felállított modell esetén a becslés általános megbízhatósága jó ( $R^2 \geq 0,9$ ),
- A legkisebb kalibrációs mintaszám (30%) mellett telítődő statisztikai görbe alapján, alacsony mintaszámú kalibráció esetén a KSS alkalmazása javasolt,
- A legnagyobb becslési pontosság a KMS mintakiválasztással érhető el.

Amennyiben cél a költségcsökkentés, a pontosság megtartása mellett, javasolható a KSS mintakiválasztás, 30%-os kalibrációs aránnyal. Azon vizsgálatok esetén, ahol a mintáknak mindössze 10%-át van lehetőség bevizsgálni, az LHS mintakiválasztás javasolt. Ahol a költségektől függetlenül a predikció pontossága az elsődleges szempont, ott a KMS mintakiválasztás javasolt, 70%-os kalibrációs mintaszámmal.

### Tábla szintű szerveszén-felmérés eredményei (Kanális)

A területről származó minták szerveszén-értékek térbeli és vertikális eloszlása biztosítja a vizsgálathoz szükséges, nagyfokú heterogenitást. Az 50-100 cm közötti mélység eredményei szignifikáns módon eltérőek a felszínközeli értékektől, ami által a vizsgált módszerek mélységi szerveszén-állapotok felmérésére való alkalmasságát is vizsgáltuk.

**A rácshálós mintavételi stratégia** legfontosabb előnye az állandó pontsűrűség. Egyenletes pontsűrűsége okán az egy minta értékéből interpolált terület mérete egyenlő, így az esetleges

kiugró értékek (pontoszerű talajfoltok vagy esetleges mérési hiba) interpolációt módosító hatása azonos térbeli kiterjedésű az egész területen. Ennek köszönhetően a kiugró értékek lokalizációja szabályos forma szerint történik. Ezáltal a terület általános reprezentációja a GRID esetében követi legkevesebb kiugró hibával az összesített interpolációt. Ez elmondható mindegyik mélység esetén, a rácshálós mintavételből készült térképek tükrözik a terület mélységi talajviszonyait (a szervesszén táblán belüli megoszlását, illetve a kiugró pontoszerű értékeket) a leghűebben. Ezt a következtetést a különbségtérképek összehasonlítása is megerősítette, a rácshálós mintavételből származó interpoláció esetén voltak a legalacsonyabbak a különbségértékek.

A **véletlenszerű mintavétel** változatos pontsűrűsége okán az egyes pontok interpolációt befolyásoló hatása nem egyenlő. Azon pontok, amiktől nagyobb távolságban nincs további mintavételi pont, nagyobb hatással vannak az interpolációra, mint a sűrűbben elhelyezkedő pontok egyike. Ennek eredménye az a jelenség is, hogy a RANDOM pontokból interpolált térképek esetén a kiugró értékek elhúzódó „nyelveken” és nagy kiterjedésű foltokban okozhatják az interpoláció hibáját, az alkalmazott interpoláció típusától függően.

Az **LHS mintavétel** mintapontsűrűségének egyenletességét a kalibrációhoz felhasznált beviteli adat határozza meg. Annak lokális, nagymértékű változása a mintapontok nagyobb sűrűségét fogja eredményezni. A módszer hiányossága ezáltal, hogy így a kisebb kiterjedésű talajfoltok, amik a beviteli adattól (tengerszint feletti magasság) függetlenül alakultak ki, nem, vagy nem valós kiterjedésükben jelentek meg az LHS interpolációkon. A következő feltételek fennállása esetén alkalmazható jó teljesítménnyel szervesszén-készlet felmérésre:

- Az algoritmushoz rendelkezésre álló beviteli adat feltételezhetően szoros kapcsolatban áll a talaj szervesszén-értékével, és
- a mintázási területen jellemző talajtípus pedometriai összefüggései együttállnak a talajszintek tulajdonságainak talajgenetika szerinti vertikális lefutásával, illetve
- alacsony az előfordulási valószínűsége, illetve gyakorisága olyan mélységi talajfoltoknak, amelyek kiugró értéket képviselnek a területen belül.

Ezt követően vizsgáltuk az alkalmazott mintapontok számának hatását az interpoláció információtartalmának minőségére. A felmérés során a mintakijelölési módszerek teljesítményének – önmagukkal és más módszerekkel összevetett – relatív vizsgálatát tűztük ki célul.

- A rácsháló, illetve az LHS alapú mintavételezés esetén minimálisan 8 pont/4,62 ha mintasűrűség szükséges volt a becslési pontatlanság kiküszöbölésére,
- A legnagyobb pontosság 0-100 cm-es szervesszén-felmérés esetén a LHS alapú mintázástól várható,
- kivétel az 50-100 cm-es mintázási mélység, ahol a rácsháló alapú mintavétel adta igazoltan a legkisebb interpolációs hibát, az interpoláció hibája 8 pontos mintasűrűség esetén fele az LHS és RANDOM interpolációk hibájának, hasonló mintasűrűség esetén.

Elmondható, hogy az eredmények második szakasza is igazolta a korábbi konklúziót. Az 1 méteres szervesszénkészlet felmérése esetén a következő esetekben ajánlott az LHS alapú mintavétel:

- sekély, vagy fejletlen talajoknál,
- olyan esetben, ahol a domborzat, vagy más távérzékeléssel felvételezhető változó szoros összefüggésben áll a kialakult talajjal.

Illetve ajánlható a rácsháló alapú mintavétel:

- Olyan talajok esetében, ahol a talajfelszín, illetve az az alatt húzódó talajszintek/rétegek közötti kapcsolat valamilyen talajgenetikai folyamat által megszakított: öntés- és lejtőhordalék talajok, illetve antropogén talajok,

- Ahol a mélységi viszonyok meghatározóak a szervesszén-készlet szempontjából: szerves talajok.

#### Precíziós szerveszén-tartalom hatását nyomonkövetése, eltérő talajadottságok esetén (Érre)

Az eredmények alapján a szerveszén-tartalom nem okozott kimutatható változást a talaj szerveszén-tartalmában. A MIR spektrális adatok főkomponens-analízisének szórásdiagrammján a szerveszén-tartalom egyértelműen elkülönül a talajmintáktól, így az összehasonlításhoz szükséges kellő különbség megvalósult. Ezt követően a főkomponens adatok különbségének vizsgálatára a Pearson-koefficiens bizonyult a legalkalmasabbnak. Ezzel szignifikáns különbség volt kimutatható a szerveszén-tartalomhoz való hasonlóságban a kontroll, illetve a kezelt talajminták főkomponens értékei között. Ez a különbség a trágyázást követő mintázáskor még szignifikánsan különbözik a kontrolltól, azonban a konfidencia-intervallum 2 év alatti fokozatos csökkenése jelzi a szerveszén-tartalom bejuttatott szerveszén-tartalom megszűnését, feltehetőleg annak átalakulásával és oxidációjával.

A megtérülési számításból kiderül, hogy mind a földkezelés, mind a teljes terület kezelése megtérülő, ami alapján következő technológiai javaslatokat teszem, precíziós szerveszén-tartalom alkalmazására:

- A precíziós talajjavítás (a kedvezőtlenebb adottságú talajfoltok kezelése) kisebb mértékben, de megtérülő és ajánlható,
- A legnagyobb megtérülés a teljes terület kezelésével érhető el,
- Optimalizált technológiaként ajánlható a kedvezőbb adottságú (agronómiai tulajdonságok tekintetében) talajfoltok kezelése, alacsonyabb költség- és kockázat melletti megtérüléssel.

#### Szerveszén-viszonyok térképezése heterogén domborzaton (Kenya)

A Kenya hegy északi oldalán végzett felmérésből származó talajminták szerveszén értékei jelentős heterogenitást mutatnak, relatív kis területen belül. Számos topográfiai és klimatikus tényező befolyásolja a talaj szerveszén-tartalmát, így a terület talajviszonyainak pontos térképezése kifejezetten komplex feladatnak bizonyult. Az elsőként elkészült szerveszén-térképek  $R^2$  értékét jelentősen ( $0,59 \rightarrow 0,82$ ) lehetett növelni a becslési modell további változókkal történő optimalizálásával. Az elkészített szerveszén-térkép interpolált pontjainak magas determinációs együttható értéke alapján kijelenthető, hogy az itt felállított interpolációs becslési modell kiindulási alap lehet más, hasonlóan heterogén topográfiával és klimatikus viszonyokkal jellemezhető területek esetén is.

### **ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK**

Megállapítottam, hogy:

- 7.1. Szerveszén-készlet felmérése során a topológiai adatokkal, illetve felszíni tulajdonságokkal kondicionált Latin Hypercube Sampling alapú talajmintavétel helytelen eredményre vezethet hordalék- és antropogén talajok (talajrétegek okán), illetve szerves talajok esetén (meghatározó mélységi viszonyok okán). Ezen talajok esetében javasolt a rácsháló alapú mintavételi stratégia.
- 7.2. A három vizsgált mintapont-kijelölési eljárás mindegyikénél a mintavételi sűrűség 66%-os csökkentése ( $1900 \text{ m}^2/\text{mintapont} \rightarrow 5800 \text{ m}^2/\text{mintapont}$ ) a reprezentativitás maximum 7%-os csökkenését okozta, szerveszén-készlet felmérés során. Továbbá az LHS és rácsháló alapú mintavétel az eredeti mintaszám 84%-os csökkentése ( $1900 \text{ m}^2/\text{mintapont} \rightarrow 11600 \text{ m}^2/\text{mintapont}$ ) mellett is legfeljebb 15%-os eltérést mutat, az eredeti információtartalomhoz képest.
- 7.3. A dolgozatban szereplő mindhárom szakaszban alkalmazott, közép infravörös spektrális adatokat felhasználó, szerveszén-becslési modellek alkalmazásával 90% felett becslési

pontosság (Keresztvalidációval  $R^2=0,9$  és  $0,97$ ) várható, a dolgozatban alkalmazott mintakiválasztási módszereket (Kennard-Stone sampling, k-means sampling, Latin Hypercube sampling) alkalmazva, már 10%-os kalibrációs mintahányad esetében is, a mintasokaság számától és heterogenitásától függetlenül.

- 7.4. A kijuttatott pellettált baromfitrágya a talajhoz köthető szerves vegyületek között megjelent, egy évig kimutatható volt ( $p<0,01$ ), második évre mindössze statisztikai mutatókban megjelenő lenyomatait lehetett kimutatni ( $p\leq 0,2$  és  $p\leq 0,6$ ), a kijuttatott dózistól függetlenül.
- 7.5. A dolgozatban bemutatott módszertan a növénytermesztési gyakorlatba beépíthető, felhasználásával – évenkénti talajmintavétel esetén – a növényi szerves maradványok, szervesstrágyák fennmaradási ideje nyomonkövethető.
- 7.6. A kutatásban vizsgált összes szervesstrágyázási eljárás megtérülő volt, terméseredmény tekintetében, azonban az adott körülmények között, a jobb adottságú talajfoltok szervesstrágyázása mind gazdaságilag, mind a légköri C megkötése szempontjából a kedvezőbb eljárás lehet, a teljes terület kezeléséhez viszonyítva. Ezek alapján javaslom a szervesstrágyák célzottan történő, precíziós kijuttatását a kedvező adottságú területekre.
- 7.7. A kutatásban használt módszertan (hozzáadott változókkal optimalizált interpoláció) felhasználásával nagy pontosságú ( $R^2=0,82$ ) szerveszén-koncentráció térképet sikerült létrehozni egy magas topográfiai és klimatikus heterogenitással jellemezhető, nagy kiterjedésű ( $\sim 1500 \text{ km}^2$ ) terület talajviszonyaira.

### AZ ÉRTEKEZÉSHEZ KÖTHETŐ FONTOSABB PUBLIKÁCIÓK

Csorba Á., **Tóth J.A.**, Dobos E., Fuchs M., Szegi T., Michéli E. (2018): A hazai talajok felszíni szintjeinek kategorizálása szerves anyag tartalmuk szerint (2018), In: Bakacsi Zs., Kovács Zs., Koós S.: Talajtani Vándorgyűlés: Absztrakt és program füzet: Talajhasználat – funkcióképesség. Magyar Talajtani Társaság pp. 81.

**Tóth J.A.** (2018): Tudatos talajhasználat és a talajok szervesanyaggazdálkodása rovat (1-6. rész). Agroforum, 2018/4-10.

**Tóth, J.A.**, Döbröntey, R., Szegi, T., Michéli, E. and Csorba, Á. (2020): Középső-infravörös spektroszkópia alapú szervesanyag-tartalom becslés tábla szintű reprezentativitás-vizsgálata kemometriai módszerekkel. Agrokémia és Talajtan 70 (1). pp. 65-82. ISSN 0002-1873.

Wawire A.W., Csorba Á., **Tóth J.A.**, Michéli E. (2020): Integration of manure and mineral fertilizers among smallholder farmers in Kenya: A pathway to sustainable soil fertility management and agricultural intensification. International Journal of Agricultural Extension and Rural Development Studies, 7(2): pp 1-20.

Wawire A.W., Csorba Á., **Tóth J.A.**, Michéli E., Szalai M., Mutuma E., Kovács E. (2021): Soil fertility management among smallholder farmers in Mount Kenya East region. Heliyon, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06488>

Wawire A.W., Csorba Á., Kovács E., Mairura F.S., **Tóth J.A.**, Michéli E. (2021): Comparing farmers soil fertility knowledge systems and scientific assessment in Upper Eastern Kenya. Geoderma 396, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115090>

**Tóth J.A.**, Nagy G., Várszegi G., Michéli E., Csorba Á. (2022): A talajvizsgálatok modernizálásának jövőbeli lehetőségei a magyarországi mezőgazdasági gyakorlatban. Agroforum, 2022/12, 114-116.