



Szent István Egyetem
Környezettudományi Doktori Iskola

Reflektancia spektroszkópia alkalmazása talajtulajdonságok és
talajosztályozási egységek meghatározásában

Doktori (Ph.D) értekezés tézisei

Csorba Ádám

Gödöllő

2017

A doktori iskola

megnevezése: Szent István Egyetem Környezettudományi Doktori Iskola

tudományága: Környezettudomány

vezetője: Csákiné Dr. Michéli Erika
Egyetemi tanár
Szent István Egyetem
Mezőgazdaság-, és Környezettudományi Kar
Környezettudományi Intézet

Témavezető Csákiné Dr. Michéli Erika
Egyetemi tanár
Szent István Egyetem
Mezőgazdaság-, és Környezettudományi Kar
Környezettudományi Intézet
Talajtani és Agrokémiai Tanszék

Az iskolavezető jóváhagyása

A témavezető jóváhagyása

1. Bevezetés, célkitűzések

Az elmúlt évtizedek környezeti változásai, az energiagazdálkodás új igényei, és a fenntartható fejlődés érdekében megfogalmazott követelmények rávilágítottak talajaink mezőgazdaságban betöltött kiemelt szerepére, illetve számos más környezeti funkciójának jelentőségére. Ennek köszönhető, hogy napjainkban eddig soha nem látott igény mutatkozik megbízható, hozzáférhető, megfelelő mennyiségű talajadatra és információra. Ezek az igények tükröződnek abban a világszintűnek is nevezhető tendenciában, amely környezetünk és talajaink gyors, költséghatékony és környezetbarát vizsgálatát lehetővé tevő új technológiák és módszerek kidolgozását sürgeti (VISCARRA ROSSEL és CHEN, 2011). Ezeket az igényeket szolgálja a VIS–NIR reflektancia spektroszkópia, mely az elektromágneses (EM) spektrum 350 és 2500 nm közötti, azaz a látható (visible – VIS) és közeli infravörös (near-infrared – NIR) tartományában végzett reflektancia mérésekre épül.

Az elmúlt évtizedek, talajok spektrális tulajdonságainak vizsgálatát célzó kutatásai nyilvánvalóvá tették, hogy az EM spektrum VIS – NIR tartományában végzett reflektancia mérések a talajok kvalitatív és kvantitatív jellemzésére egyaránt alkalmasak (VISCARRA ROSSEL et al., 2006). A technológia talajosztályozásban betöltött szerepe annak ellenére háttérben maradt, hogy a modern talajosztályozási rendszerekben alapkövetelmény a standard mérések és számszerű adatok bevonása a szigorú definíciókkal meghatározott diagnosztikai szintek és tulajdonságok meghatározásába (MICHÉLI, 2011). Mivel a spektrális mérések számos olyan talajparaméterről és tulajdonságról nyújtanak egyidejűleg információt, amelyek kulcsfontosságúak egyes diagnosztikus talajosztályozási egységek definiálásában, a technológiának jelentős potenciálja van az osztályozási törekvések támogatásában.

A fent említett követelmények alapján munkámban a következő célkitűzéseket fogalmaztam meg:

1. A Gödöllői-dombságban kijelölt mintaterületen gyűjtött talajmintákról felvett spektrális reflektancia, valamint hagyományos laboratóriumi mérési módszerekkel meghatározott referenciaadatok alapján olyan többváltozós matematikai-statisztikai (kemometriai) modellek létrehozása, melyek alkalmazásával a talajok szervesszén, kalcium-karbonát tartalma, valamint kémhatása, a spektrális adatok alapján származtatható.
2. Talajszelvények mélységgel változó talajparamétereinek és spektrális tulajdonságainak vizsgálata kiválasztott talajszelvények alapján.
3. A spektrális reflektancia adatok alkalmazása diagnosztikai talajosztályozási egységek meghatározására, valamint generált spektrális változók mélység szerinti eloszlásának összevetése hagyományos laboratóriumi módszerekkel meghatározott referencia talajparaméter értékek mélység menti lefutásával.
4. A spektroszkópiai technológia diagnosztikai talajosztályozásban betöltött lehetséges szerepének vizsgálata. A vizsgált talajszelvények taxonómiai rokonságának feltárása taxonómiai távolságszámítási módszerek alkalmazásával. A Világ Talaj Referencia Bázis (World Reference Base for Soil Resources, WRB) (IUSS Working Group WRB, 2015) egységek, és a taxonómiai távolságszámítás alapján meghatározott talajcsoportok összevetése.

2. Anyag és módszer

2.1 A spektrális alapú talajparaméter becslés módszertana

Kutatásom e részében célkitűzésem a VIS – NIR reflektancia spektroszkópiai mérések talajparaméter becslés alkalmazási lehetőségeinek tesztelése volt. A vizsgálat elvégzését a Gödöllői-dombságban kijelölt mintaterületen a talajok szerves szénkészletének térképezését célzó mintavételi projekt során gyűjtött nagy mennyiségű talajminta szerves szén és karbonáttartalmának, valamint kémhatásának a meghatározási igénye indokolta. A spektrális adatok alapján történő talajparaméter-becsléshez a spektrális mérések mellett laboratóriumi referencia elemzések elvégzése is szükséges. A teljes mintasorozat fizikai/kémiai tulajdonságait reprezentáló „kalibrációs” minták kiválasztásával, és azokon elvégzett szerves szén, karbonáttartalom és kémhatás mérések alapján, valamint a mintákról felvett reflektancia spektrumok ismeretében olyan többváltozós matematikai-statisztikai alapokon nyugvó kemometriai modelleket hozhatunk létre, amelyek alkalmazásával a többi mintára vonatkozó tulajdonságok becslése a spektrális információ ismerete alapján lehetséges. Tudományterülettől függetlenül a kemometriai módszerek alkalmazásának célja, hogy hagyományos laboratóriumi módszereket egyszerű és gyors eljárással részben vagy egészben helyettesítsük. Ezzel lehetővé válik adott mennyiségű minta tulajdonságainak olcsóbb és gyorsabb meghatározása, vagy adott idő- és költségegység alatt több minta elemzése.

2.1.1 A mintaterület bemutatása, mintavételi módszer

A kutatás során a meghatározott 10×10 km-es mintaterületen 16 db, egyenként $6,25 \text{ km}^2$ ($2,5 \times 2,5$ km) területű klaszterben 10 db random – az Africa Soil Information System (AfSIS) projektben alkalmazott Land Degradation Surveillance Framework (LDSF) – módszerrel (VÅGEN et al., 2015), összesen 160 db kiválasztott mintázási pont került kijelölésre. A kutatás alatt végül felkeresett 154 mintaponton fűrt szelvényekből 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 és 80-100 cm-es mélység intervallumokból vettünk bolygatott talajmintát, melyeket légszáraz állapotig szárítottunk, megdaráltunk és megőröltünk, majd 2 mm lyukátmérőjű szitán leszitáltuk.

2.1.2 Spektrális és laboratóriumi referenciamérések

A VIS – NIR reflektancia spektroszkópiai méréseket a Nemzeti Agrárkutatási és Innovációs Központ (NAIK) Mezőgazdasági Gépesítési Intézetének (MGI) tulajdonában lévő Analytical Spectral Devices (ASD) FieldSpec 3 MAX hordozható spektrométerrel végeztem el a 350 és 2500 nm közötti spektrális tartományban. A műszer 2151 csatornán rögzíti a spektrumokat. A mérések során, a mintaterületen gyűjtött összesen 770 db talajminta kétirányú reflektanciáját rögzítettem az ASD High Intensity Contact Probe (HICP) szondával, amely a mérés során lehetővé teszi a mintával való közvetlen érintkezést. E szonda használatával a méréseket negatívan befolyásoló környezeti tényezők (pl. légköri pára, por) hatásának minimalizálása biztosítva volt. A HICP-t használva egy mérés alkalmával 10 mm átmérőjű területről kaptam spektrális információt.

Laboratóriumi referenciaelemzések céljából a minták ~10 %-át (80 db-ot) választottam ki random módszerrel. A véletlenszerűen kiválasztott mintákon felül további mintákat jelöltem ki, amelyek bevonását a spektrális görbék vizuális interpretációja, valamint a kemometriai elemzés során felmerülő – további

minták bevonását igénylő – részeredmények indokolták. Mindezek alapján szerves széntartalom mérést a Walkey-Black módszerrel 135, CaCO₃ tartalom meghatározást Scheibler módszerrel 140, míg pH mérést elektrokémiai módszerrel 160 talajmintán végeztem el a Talajtani és Agrokémia Tanszék laboratóriumában.

2.1.3 Spektroszkópiai transzformációk

Első lépésként a reflektancia spektrumok abszorbanciává számítását végeztem el a következő egyenlet szerint:

$$Abszorbanca = \log\left(\frac{1}{Reflektancia}\right)$$

Következő lépésként az abszorbanca spektrumokon Multiplicative Scatter Correction (MSC) (GELADI et al., 1985) és Standard Normal Variate (SNV) (BARNES et al., 1989) transzformációt végeztem el. Mindkét eljárásnak a hullámhossztól függő szóródási jelenségek hatásának csökkentésében van nagy jelentősége. Az SNV módszerrel korrigált spektrumokon elvégeztem az első, illetve másodrendű deriváltak kiszámítását a Savitzky-Golay módszerrel (SAVITZKY and GOLAY, 1964). E lépésnek elsősorban a zajcsökkentésben, illetve az átfedő abszorpciós sávok felbontásában van jelentős szerepe.

2.1.4 Kemometriai elemzések

A kemometria, mint gyűjtőfogalom, olyan többváltozós matematika-statisztikai alapokra épülő módszereket foglal magába, melyek alkalmazása lehetővé teszi független (X) változók (pl. talajmintákról felvett reflektancia spektrumok) és függő (Y) változók (pl. talajparaméterek) közötti statisztikai kapcsolat megállapítását (DUCKWORTH, 1998). A spektrális tulajdonságoknak anyagi jellemzőkhöz való kvantitatív hozzárendelése lehetővé teszi számos olyan talajparaméter becslését a reflektancia mérések alapján, amelyeknek a hagyományos laboratóriumi eljárásokkal történő meghatározása idő- és költségigényes, és sok esetben környezetre káros kémiai anyagok alkalmazását igényli.

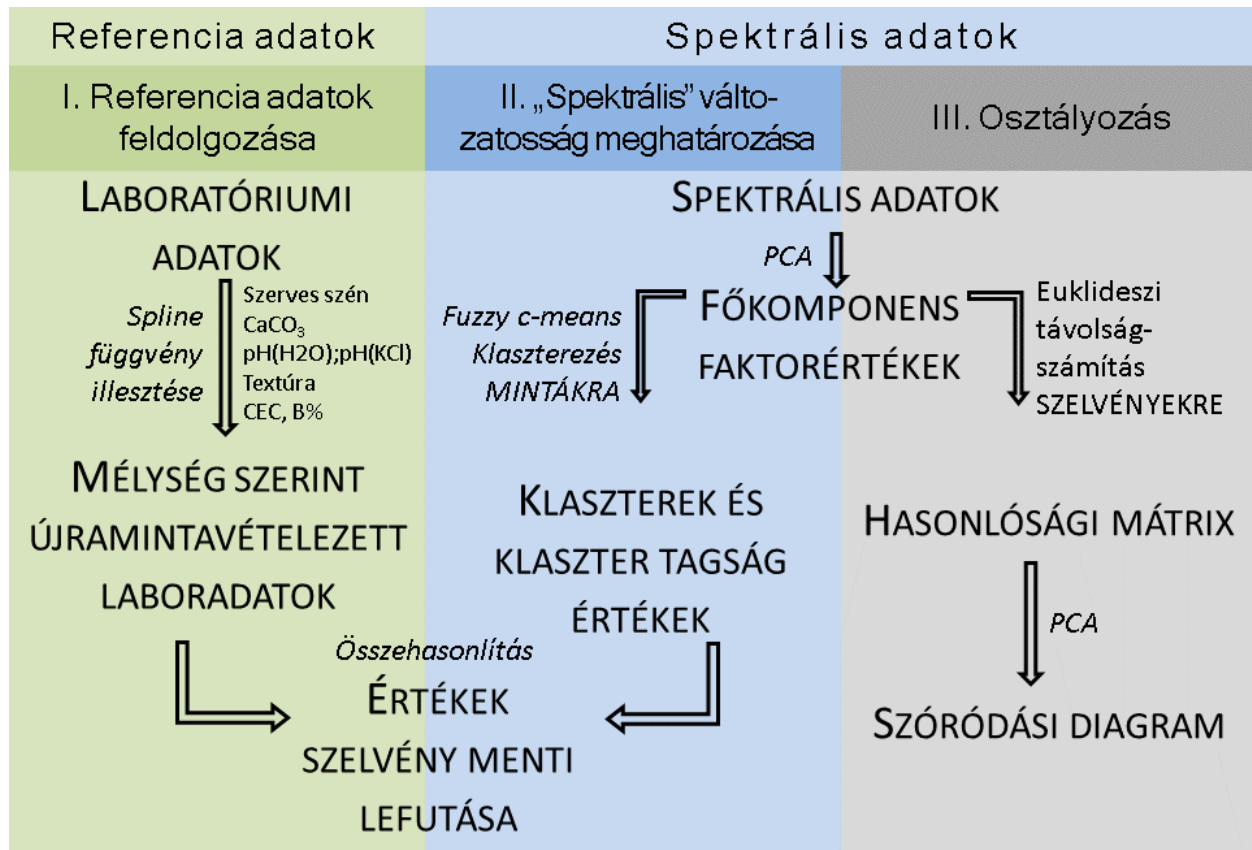
2.1.5 Az alkalmazott kemometriai módszer - Partial Least Squares Regression

A kemometriai gyakorlatban a Partial Least Squares Regression (PLSR) az egyik leggyakrabban alkalmazott modellezési eljárás. A számos kemometriai módszer közül a PLSR alkalmazható a leghatékonyabban prediktív modellek létrehozására, amikor a független (X) változók (a spektrum hullámhosszain mutatkozó spektrális értékek) száma meghaladja a minták számát, és változók között jelentős multikollinearitás mutatkozik.

2.2 A spektrális tulajdonságokon alapuló talajosztályozás módszertana

Doktori kutatásomnak e részében a VIS – NIR spektroszkópiai mérések talajosztályozásban betöltött lehetséges szerepét vizsgáltam. A vizsgálat alapja, hogy a görbékben számos olyan talajalkotó spektrális ujjlenyomata megjelenik, melyek az osztályozás szempontjából kulcsfontossággal bírnak, és a mintákról felvett spektrumok alapján ezekről az összetevőkről és tulajdonságokról egyidejűleg nyerünk kvantitatív és kvalitatív információt. A talajok leírása és osztályozása során pedig ezeknek a talajtulajdonság-értékeknek mélység menti lefutása alapján jelöljük ki a talajszinteket. A talajok hasonlóságát (vagy különbözőségét)

pedig az határozza meg, hogy ezeknek a tulajdonságoknak a mélység szerinti lefutása alapján milyen mértékben különböznek vagy hasonlítanak a vizsgált szelvények. A kutatás e részének alapelgondolása, hogy mivel a spektrális adatokban benne rejlik az információ ezekről a talajtulajdonságokról, így a mélység szerinti spektrális változatosságnak az ábrázolásával képet kaphatunk a főbb talajalkotók és paraméterek mélységgel változó tulajdonságairól, valamint numerikus módszerekkel a talajok taxonómiai rokonságfoka is kifejezhető. A vizsgálat menetét vázlatosan az 1. ábrán mutatom be.



1. ábra: A spektrális alapú osztályozás módszerének vázlata

2.2.1 A vizsgált talajszelvények bemutatása, talajmintavétel

A kiválasztott szelvények a Talajtani és Agrokémiai Tanszék nappali és szakmérnöki oktatási tevékenységéhez kapcsolódó talajokban kerültek feltárássra és mintázásra. A talajtípusok csernozjom, csernozjom barna erdőtalaj, agyagbemosódásos barna erdőtalaj és pangóvízes barna erdőtalaj típusába tartoznak. A WRB (IUSS Working Group, WRB, 2015) szerint a Chernozems (CH), Kastanozems (KZ) és Luvisols (LU) referencia csoportba tartoznak.

A helyszíni felvételezés minden esetben nyitott talajszelvények vizsgálatára alapult. Ahol a talaj keménysége miatt (pl. mészapadok jelenléte) miatt nem volt lehetséges 1,5 méterig kimélyíteni a szelvényt, a mintákat fűrással vettem meg. A helyszíni vizsgálatok és szelvényleírást követően a talajszelvények főfalából két módon vettem mintát. A referencia laboratóriumi vizsgálatokhoz a meghatározott genetikai talajszintekből, a spektrális mérésekhez fix, 1 méteres mélységig 5, míg 1 és 1,5 méter között 10 cm-es mélység-intervallumokból vettem mintát.

2.2.2 Laboratóriumi referenciamérések és mélység szerinti standardizálás

A genetikai szintekből vett talajmintákon a következő vizsgálatokat végeztem el: szerves szén, CaCO₃, fizikai féleség, kémhatás, kationcsere kapacitás, kicserélhető bázisok meghatározása, bázistelítettség.

A referencia talajadatok mélységi harmonizálására azért volt szükség, mert a genetikai szintenkénti mintázás az egyes szelvények esetében eltérő mintavételi mélységet eredményezett. Mass Preserving Spline függvény illesztésével a spektrális mérésekhez alkalmazott mintavételt követve végeztem el az értékek újramintavételezését.

2.2.3 Spektrális mérések és spektrális transzformáció

A tizenhárom talajszelvényből gyűjtött összesen 325 db talajminta szolgált a VIS – NIR spektroszkópiai mérések alapjául. A felvett reflektancia spektrumokat először az $Abszorbancia = \log I / Reflektancia$ képlet alapján abszorbanciává transzformáltam, majd az anyagi tulajdonságokat hordozó abszorpciós (abszorbancia esetében reflexiós) sávok kihangsúlyozására az első rendű deriváltakat számítottam ki.

2.2.4 Spektrális változók kinyerése

Munkám során arra törekedtem, hogy a spektrális adatokból olyan változókat generáljak, melyek kifejezik a spektrális adatokban rejlő információt, illetve a szelvény mentén ábrázolhatók. A dimenzionalitás csökkentésére a főkomponens analízist (Principal Component Analysis - PCA) alkalmaztam. Az eljárás főkomponensek alkalmazásával lecsökkenti az adatsor dimenzionalitását oly módon, hogy az első néhány komponens kifejezi az adatokban rejlő változékonyság legnagyobb hányadát. A talajok mélység menti spektrális tulajdonságait kifejező változókként pedig a PCA egyik fő eredményét, a mintákra kiszámított főkomponens faktorértékeket használtam.

2.2.5 A spektrális változatosság szelvény menti vizsgálata – Fuzzy C-means klaszterezés

Annak érdekében, hogy a spektrális adatok „szelvény leíró képességéről” képet kapjak Fuzzy C-means klaszterezést végeztem el a PC faktorértékek mátrixán. Ennek a módszernek a segítségével minden adatpontot előre meghatározott számú klaszter mindegyikébe sorolunk úgy, hogy az adott klaszterbe tartozását egy „klaszter tagság” értékkel jellemzünk. A Fuzzy C-means klaszter tagság értékeknek mélység szerinti ábrázolásával grafikus alapon vizsgáltam a mélység menti spektrális változatosságot.

2.2.6 A spektrális alapú taxonómiai rokonságok megállapítása– taxonómiai távolságszámítás

A talajok hasonlóságának illetve különbözőségének számszerű kifejezéséhez a taxonómiai jellegű munkákban gyakran alkalmazott taxonómiai távolságszámítás módszerét alkalmaztam. A távolságszámítást a spektrális adatokból kinyert főkomponens faktorértékek szelvény menti lefutása alapján végeztem el, a MINASNY et al. (2009) által is alkalmazott egyszerű euklideszi távolságszámítás módszerével. A távolságszámítás eredménye a távolságmátrix. A talajok csoportosulását, illetve a lehetséges átmeneti jellegeket grafikusán ábrázoltam az euklideszi távolság-értékeket tartalmazó mátrix főkomponens analízisével. Ezáltal lehetőség nyílt arra, hogy az egyes talajszelvények hasonlóságát, vagy különbözőségét egy főkomponens koordinátarendszerben ábrázoljam.

3. Eredmények és értékelésük

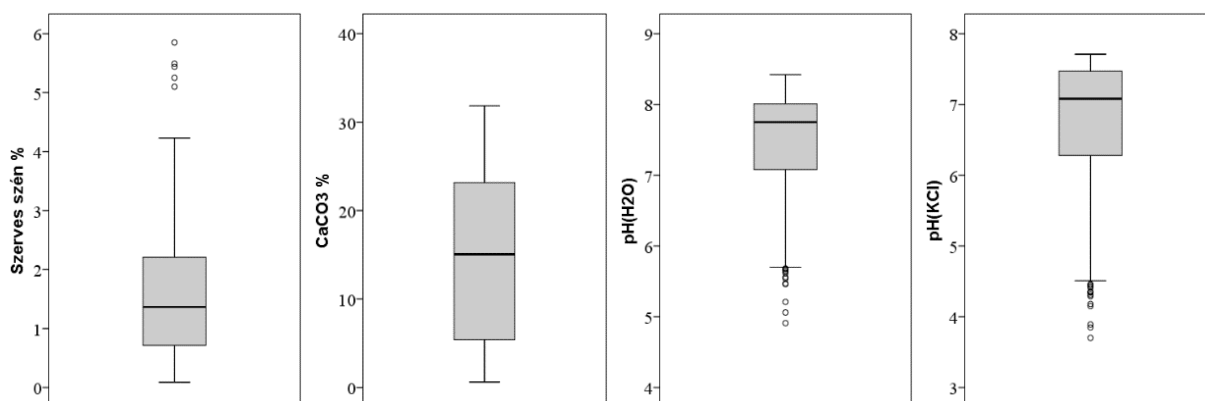
3.1 A kemometriai elemzések eredményei

3.1.1 A referencia talajparaméterek alapstatisztikai mutatói

A hagyományos laboratóriumi módszerekkel meghatározott szerves szén, kalcium-karbonát és kémhatás értékek statisztikai mutatóit az 1. táblázatban és a 2. ábrán boxplotok segítségével mutatom be. A talajparaméterek alapstatisztikai mutatói összhangban vannak a Gödöllői-dombságra jellemző viszonyokkal.

1. táblázat: A referencia talajparaméterek alapstatisztikai mutatói

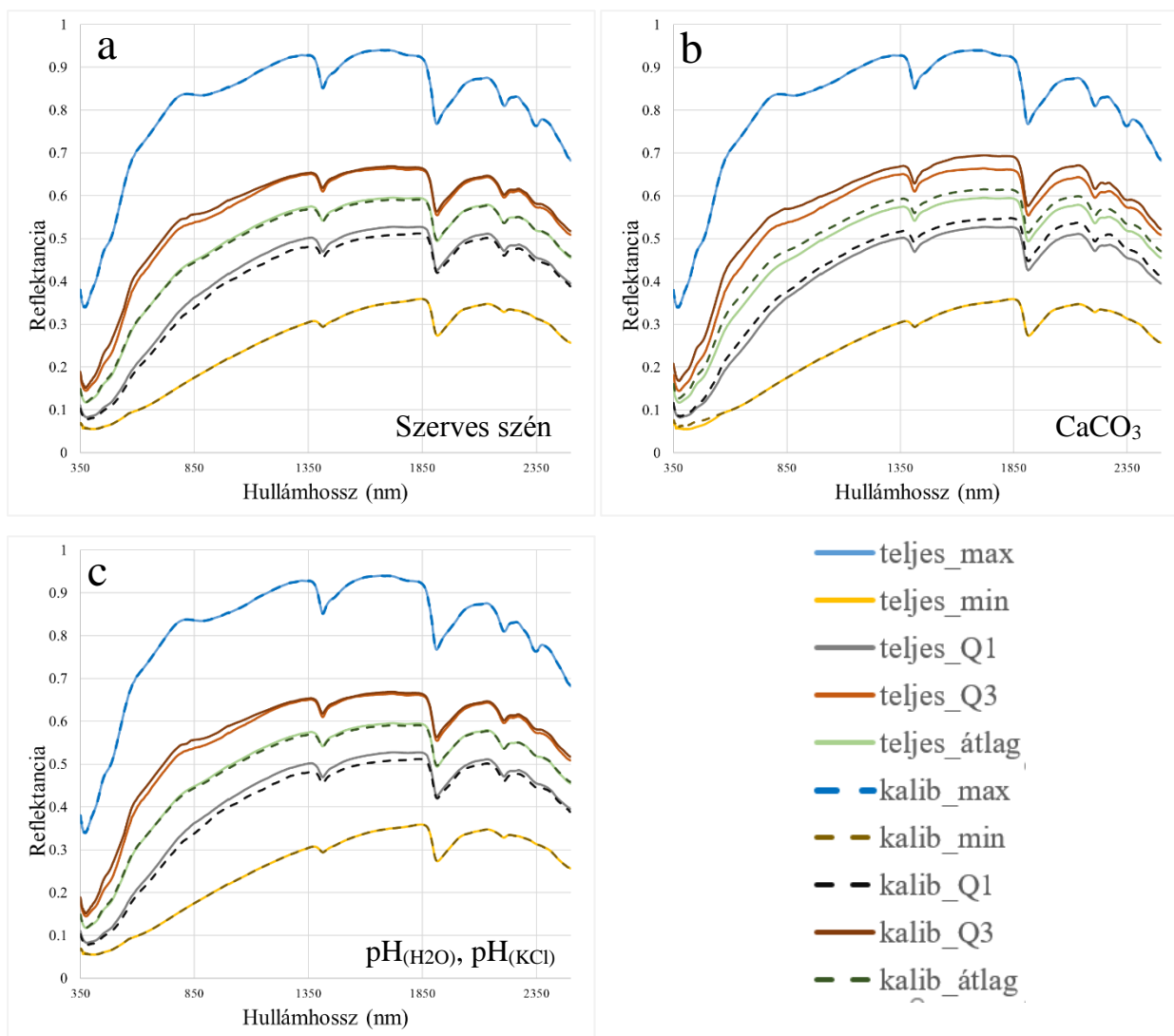
	Átlag	Max	Min	Szórás	Medián	Q1	Q3
Sz. szén (%)	1.6	5.9	0.1	1.1	1.4	0.7	2.2
CaCO ₃ (%)	14,7	31.8	0.6	9.6	15	5.4	23.1
pH _(H₂O)	7.4	8.4	5.1	0.8	7.7	7.0	8.0
pH _(KCl)	6.7	7.7	3.8	1.1	7.0	6.3	7.4



2. ábra: a vizsgált referencia talajparaméterek értékeinek ábrázolása boxplotokon

3.1.2 A spektrális adatok statisztikai mutatói

Az összes, 770 db mintáról, valamint a kiválasztott kalibrációs mintákról felvett spektrális reflektancia adatok alapstatisztikai mutatóit a 3. ábrán tüntettem fel. A diagram a hullámhossz függvényében folyamatos vonallal ábrázolja a teljes adatsorra, míg pontozott vonallal a kalibrációhoz kiválasztott mintákra vonatkozó minimum, maximum felső és alsó kvartilis és átlagértékeket. A pH_(H₂O) és a pH_(KCl) kalibrálásához ugyanazok a minták kerültek kiválasztásra. A diagramok alapján elmondható, hogy a kalibrációs minta adatsor alapstatisztikai mutatói hasonlóak a teljes adatsor mutatóihoz, így a kiválasztott minták reprezentatívnak tekinthetők.



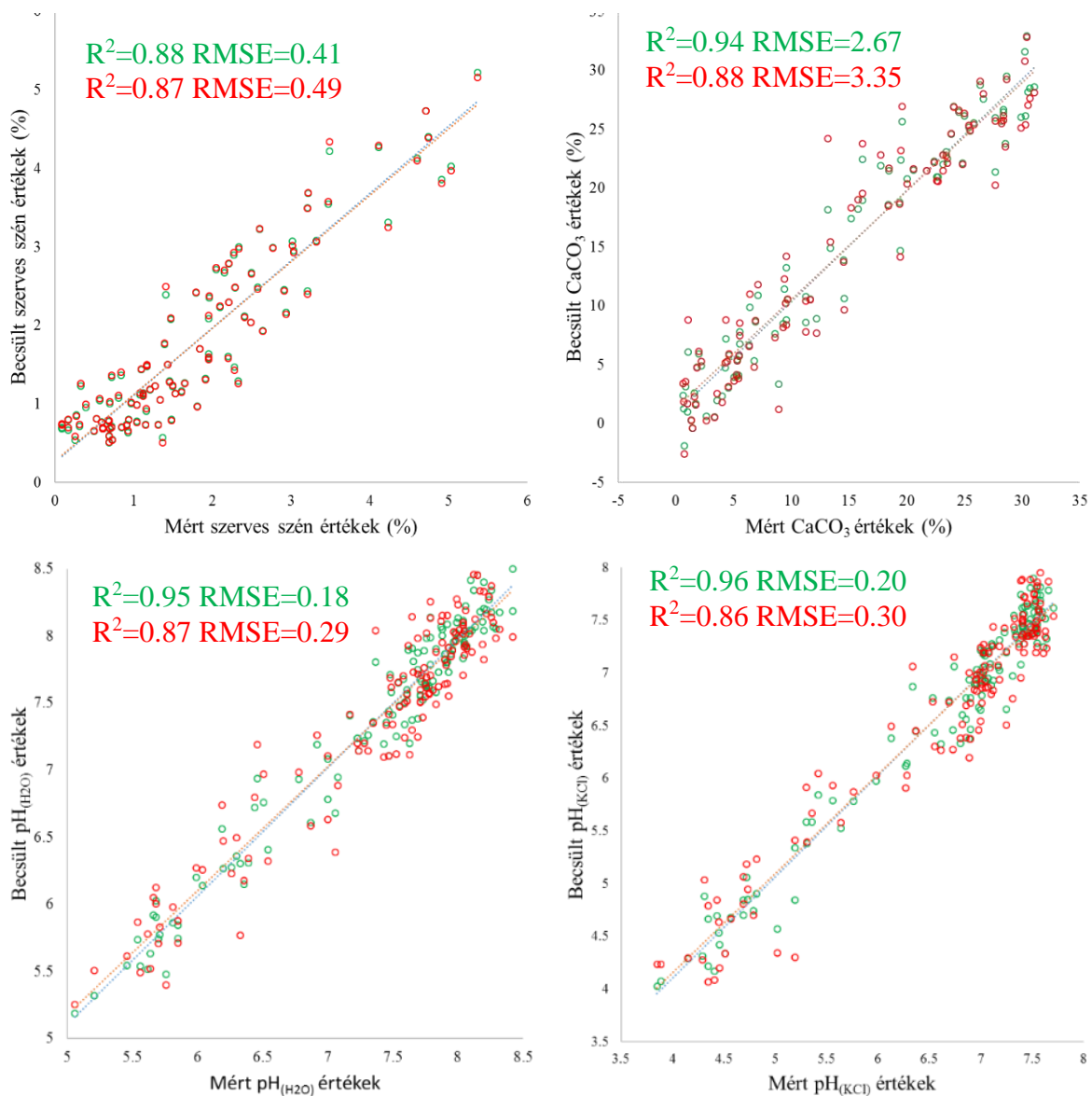
3. ábra: A teljes spektrális adatsor (folyamatos vonalak) és a kalibrációs spektrális mintasor (pontozott vonalak) alapstatisztikai mutatói a.) szerves szén b.) CaCO₃, c.) pH_(H₂O) és pH_(KCl) kalibrálás mintáira

3.1.3 A PLSR modellezés eredménye

A laboratóriumban mért és a modell által becsült szervesszén, CaCO₃ és kémhatás értékeket a 4. ábrán feltüntetett szóródási diagramokon ábrázoltam. A diagramok elemzése alapján a következő főbb megállapítások tettem:

- A validációs lépés során számított minden esetben magasabb R² és alacsonyabb RMSE érték mutatkozik, mint a kalibrációs lépés során. Ez annak köszönhető, hogy a kalibrációs folyamat során a modell önmagát ugyanazzal az adatokkal ellenőrzi, amivel a modellt létrehoztuk, míg a validáció során egy „módosított” statisztikai paraméterekkel jellemezhető adatsor értékeit látjuk, mely a modell valós „prediktív kapacitását” közelíti.
- A modell tesztelése során kapott R²-érték a szervesszén és CaCO₃ esetében magas, mely a vizsgált paraméterek jelentős spektrális aktivitásával magyarázható a vizsgált VIS-NIR tartományban. Az RMSE érték alapján a modellek pontossága 0,37 % a szerves szén, míg 3,31 % a CaCO₃ esetében, mely közepesnek mondható.

- A szakirodalomban közölt adatokhoz képest (VISCARRA ROSSEL et al., 2006) a vártnál magasabb RMSE értékek elsősorban annak köszönhetők, hogy a mérések nem hagyományos laboratóriumi spektrométerrel, hanem hordozható spektrométerrel történtek, amely műszer használata rendkívül sok – a mérések pontosságát negatívan befolyásoló – tényező figyelembe vételét követeli meg. A modellek pontosságának növelésére elsősorban a mérési előírások fejlesztése és standardizálása nyújthat megoldást (BEN-DOR et al., 2010)
- A kémhatás becslése a desztillált vizes és a kálium-kloridos szuszpenzió esetén is jó statisztikai mutatókkal jellemezhető. Annak ellenére, hogy a talajokról felvett spektrumokban anyagi tulajdonságok tükröződnek olyan talajparaméter becslése is lehetséges a reflektancia spektrumok alapján, melyek számos talajalkotó által együttesen meghatározott kémiai tulajdonság, és nincs közvetlen lenyomata a spektrumokban. Következésképpen a pH becslése nem közvetlenül, hanem – jellegzetes spektrális lenyomattal rendelkező, és a kémhatással szoros korrelációt mutató – anyagi összetevők mennyiségén keresztül, közvetve történik.



4. ábra: A vizsgált referencia paraméterek laboratóriumban mért és a modell által becsült értékei

3.2 A spektrális tulajdonságokon alapuló talajosztályozás eredményei

3.2.1 A terepi felvételezés és az osztályozás eredményei

A terepi vizsgálatok alapján a 13 vizsgált talajszelvény közül nyolc a Chernozems, kettő a Kastanozems, míg három szelvény a Luvisols WRB RSG-be tartozik (2. táblázat).

2. táblázat: A szelvények vizsgálata során megállapított diagnosztikai egységek, WRB referenciacsoporthoz és a magyar osztályozás szerinti talajtípusok

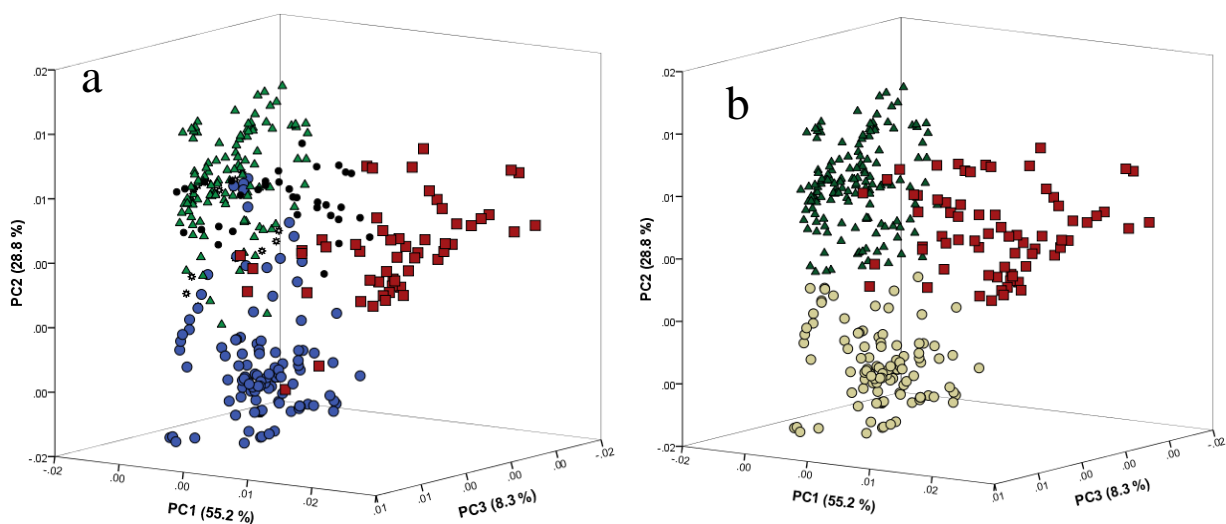
ID	Diagnosztikus szintek	Diagnosztikus tulajdonságok, anyagok	WRB osztályozás IUSS WORKING GROUP (2015)	Magyar osztályozás STEFANOVITS (1972), JASSÓ (1989)
CH1	Calcic (90 -); Chernic (0-65)	Protocalcic properties	Endocalcic Vermic CHERNOZEM (Pantoloamic, Pachic)	Kilúgzott csernozjom talaj (180)
CH2	Calcic (50 -); Chernic (0-50)	Protocalcic properties	Katocalcic CHERNOZEM (Pantoloamic)	Típusos meszes vagy mészlepedékes csernozjom talaj (191)
CH3	Calcic (80-); Chernic (0-80)	Protocalcic properties;	Endocalcic Vermic CHERNOZEM (Pantoloamic, Pachic)	Kilúgzott csernozjom talaj (180)
CH4	Calcic (80-); Chernic (0-80)	Protocalcic properties;	Endocalcic Vermic CHERNOZEM (Episiltic, Katoloamic, Pachic)	Típusos meszes vagy mészlepedékes csernozjom talaj (191)
CH5	Calcic (70-); Chernic (0-70)	Protocalcic properties; Gleyic properties	Katocalcic Bathyglyic Vermic CHERNOZEM (Pantoloamic, Pachic)	Típusos meszes vagy mészlepedékes csernozjom talaj (191)
CH6	Calcic (70-); Chernic (0-70)	Protocalcic properties; Gleyic properties	Endocalcic Endogleyic CHERNOZEM (Pantoloamic, Pachic)	Típusos meszes vagy mészlepedékes csernozjom talaj (191)
CH7	Calcic (70-); Chernic (0-70)	Protocalcic properties; Gleyic properties	Endocalcic Bathyglyic CHERNOZEM (Pantoloamic, Pachic)	Típusos meszes vagy mészlepedékes csernozjom talaj (191)
CH8	Calcic (60-); Chernic (0-70)	Protocalcic properties	Katocalcic CHERNOZEM (Pantoloamic, Pachic)	Típusos meszes vagy mészlepedékes csernozjom talaj (191)
KZ1	Argic (75-90); Calcic (90 -); Mollic (0-30)	Protocalcic properties	Endocalcic Endoluvic KASTANOZEM (Pantoloamic)	Nem karbonátos csernozjom barna erdőtalaj (161)
KZ2	Argic (65-90); Calcic (90-); Mollic (0-25)	Protocalcic properties	Endocalcic Endoluvic KASTANOZEM (Pantoloamic)	Nem karbonátos csernozjom barna erdőtalaj (161)
LU1	Argic (30-95); Calcic (95-)	Protocalcic properties	Endocalcic LUVISOL (Epiloamic, Amphiclayic Cutanic, Differentic)	Nem podzolos agyagbemosódásos barna erdőtalaj (112)
LU2	Argic (50-95); Calcic (95-)	Protocalcic properties	Endocalcic LUVISOL (Epiloamic, Amphiclayic, Cutanic, Differentic)	Nem podzolos agyagbemosódásos barna erdőtalaj (112)
LU3	Argic (0-150)	Stagnic properties	Nudiargic Amphistagnic LUVISOL (Pantoclayic Cutanic Epidystric Pantoclayic)	Agyagbemosódásos pszeudoglejes (pangóvízes) barna erdőtalaj (122)

3.2.2 A spektrális mérések transzformációja és főkomponens analízis

A spektrális adatbázison elvégzett – az adatok dimenzionalitását csökkentő – főkomponens analízis 8 főkomponenst eredményezett, amelyek kifejezik a spektrális változatosság 98 %-át (24. ábra). A teljes variancia 2 %-át kifejező főkomponenseket kizártam az elemzésből.

3.2.3 A főkomponens faktorértékek csoportosítása Fuzzy C-means klaszterezéssel

Az 5. ábra a faktorértékek elrendeződését mutatja a teljes variancia 92,3 %-át kifejező első három főkomponens tengely mentén. A szín- és jelkódolás azokat diagnosztikai szinteket jelölik, melyekből a mintavételezés történt (5/a ábra), illetve azt a Fuzzy C klasztert, amelybe tartozik (5/b ábra). A háromdimenziós szóródási diagramok vizuális interpretációja alapján „A” Klaszterbe tartozó pontok szóródása nagyfokú egyezőséget mutat a **Calcic** szintekből származó mintákat reprezentáló pontok szóródásával. A „B” Klaszterbe tartozó minták elterjedése hasonló a **Mollic** szintet jelölő pontok elterjedésével. A „C” Klaszter mintázata pedig az **Argic** szintet reprezentáló pontok által kirajzolt mintázattal mutat hasonlóságot. Azok a minták, melyek **Calcic** és **Mollic** szintek átfedéséből származnak vagy „A” és „B” Klaszterbe kerültek.



5. ábra: A minták szóródása az első 3 főkomponens tengely mentén.

a.) a színek és a szimbólumok a diagnosztikai szinteket jelölik:

Calcic: ● Argic: ■ Mollic: ▲ Mollic - Calcic: ○ Nem diagnosztikai szint: ●

b.) a színek és a szimbólumok a Fuzzy C-közép klasztereket jelölik:

A Klaszter: ○ B Klaszter: ■ C Klaszter: ▲

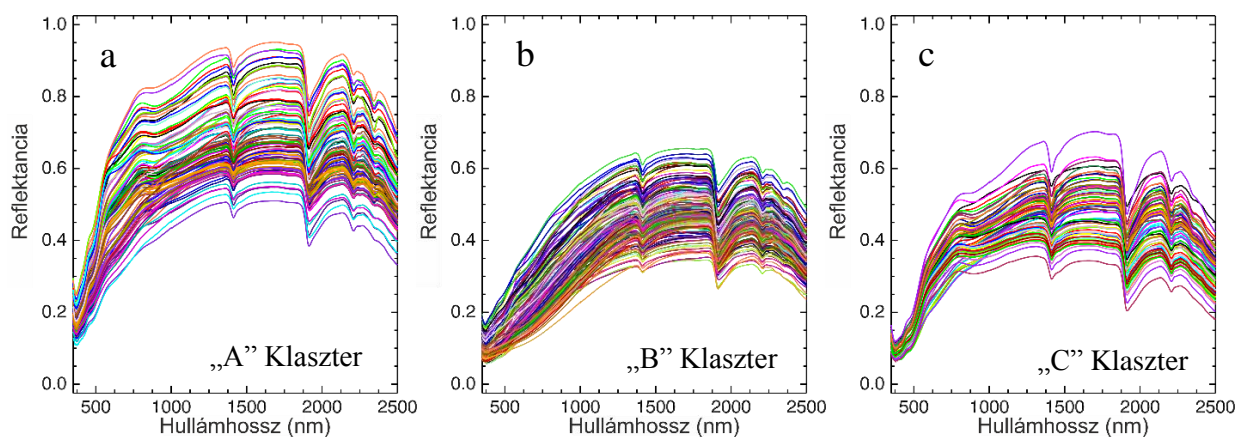
A 6. ábrán a Fuzzy C-means klaszterezés alapján csoportosított minták eredeti, a spektroszkópiai transzformációkon még át nem esett reflektancia görbéit tüntettem fel. Bár a klaszterezést a reflektancia spektrumok alapján számított abszorbanica spektrumok 1. rendű deriváltjain végeztem el, a transzformált görbék vizuális interpretációja rendkívül nehéz.

Összevetve a „B” és „C” Klaszterbe tartozó mintákról felvett spektrumokkal az „A” Klaszterbe tartozó spektrumok rendelkeznek a legmagasabb átlagos reflektancia értékekkel (6/a ábra). A 450, 550 és 850 nm

környéki széles kevésbé mély abszorpciós sávok a vas-oxidok, hidroxidok és oxihidroxidok (pl. hematit, goethit) jelenlétének bizonyítéka (SCHWERTMANN, 1993). A 2340 nm-nél jelentkező keskeny abszorpciós sáv az ebbe a klaszterbe tartozó mintáról felvett görbékben a legkifejezettebb, mely a jelentős mennyiségű karbonátásvány jelenlétének köszönhető (LAGACHERIE et al., 2008).

Összevetve az „A” és „C” Klaszter spektrumaival a „B” klaszter spektruma rendelkeznek a legalacsonyabb átlagos reflektancia értékekkel (6/b ábra). A látható és közeli infravörös tartomány rövidebb hullámhosszain (350 - ~1000 nm) számos görbe mutat konvex jelleget, mely a nagy mennyiségű szerves anyag általános reflektanciát csökkentő és konvexitást növelő hatásával magyarázható. A csökkenő konvexitás a szerves anyag tartalom csökkenésével magyarázható (STEVENS et al., 2010). A „B” klaszterbe tartozó spektrumok 1300 nm-nél rövidebb és 2000 nm-nél hosszabb hullámhosszúságú tartományában a széles, kevésbé mély valamint keskeny és mély abszorpciós sávok hiánya illetve az „A” klaszter görbéihez képest kevésbé kifejezettsége tapasztalható. Ez elsősorban a szerves anyagok spektrális jellegzetességeinek a többi összetevő – kevésbé kifejezett – lenyomatainak „elfedésével” magyarázható (O’ROURKER és HOLDEN, 2011).

A „C” Klaszterbe tartozó spektrumok rendelkeznek a legkifejezettebb – a vas-oxidok, hidroxidok és oxihidroxidok nagy mennyiségét jelentő – abszorpciós sávokkal a ~1000 nm-nél rövidebb hullámhossz tartományban (6/c ábra). Az 1400 és 1900 nm-nél jelentkező (a többi klaszterhez képest) mélyebb abszorpciós sávok a H₂O tartalmú ásványok jelentős koncentrációjával magyarázható. Az 1400 nm környéki sáv az OH nyújtási alaprezgés első felharmonikusa, míg az 1900 nm környéki sáv a H-O-H hajlítási és OH nyújtási alaprezgés kombinációja (CHABRILLAT et al., 2003). A 2200 nm környéki keskeny mély abszorpciós sáv ebben a klaszterben kifejezett. Ez annak az indikátora, hogy az ebbe a klaszterbe tartozó minták rendelkeznek a legtöbb olyan ásvánnyal, mely a kristályszerkezetében Al – OH csoportot tartalmaz, melyek főként agyagásványok. A 2340 nm környéki sáv hiánya, illetve kevésbé kifejezettsége a karbonátok hiányát, vagy alacsony koncentrációját jelenti.



6. ábra: A minták spektrális reflektanciája Fuzzy C klaszterenként csoportosítva

A Fuzzy C-means klaszter (FCMC) tagság és a referencia talajparaméter Mass Preserving Spline Function (MPSF) alkalmazásával újramintavételezett értékeinek mélység szerinti eloszlását a 7. ábrán tüntettem fel. Az „A” Klaszter FCMC tagság értékeinek eloszlása nagyfokú hasonlóságot mutat a MPSF újramintavételezett CaCO₃ értékekével. A karbonátok jelentősebb mértékű kilúgzódásának jeleit mutató









talajokban (LU1, LU2, KZ1, KZ2, CH1, CH2) az értékek a mélységgel hirtelen, átmenet nélkül vesznek fel magas értéket. Azon szelvények esetében, amelyekben a kilúgzási folyamatok jelei kevésbé kifejezettek (CH3, CH4, CH5, CH6, CH7, CH8) az értékek növekedése folyamatos. Az „A” Klaszter minden esetben a szelvények mélyebb szintjeiben fordul elő, mely mélység-intervallumok jó egyezést mutatnak a terepi munka során meghatározott **Calcic** szinttel.

A „B” Klaszter FCMC tagság értékei a MPSF alkalmazásával újrámintavételezett szerves szén értékek eloszlásával mutat nagyfokú hasonlóságot. A B Klaszter minden esetben a szelvények felszínén kezdődik, és az általa kijelölt mélység-intervallum jó egyezést mutat a **Mollic** és **Chernic** szint mélység-tartományaival.

A „C” Klaszter FCMC tagság értékeinek mélység menti eloszlásának magyarázata más megközelítést igényel. Az értékek mélység szerinti eloszlása csak az olyan szelvények esetében mutat hasonlóságot az agyagtartalommal, melyekben jelentős mértékű agyagmozgás és felhalmozódás játszódtott le (LU1, LU2, LU3, KZ1, KZ2). Az LU3 szelvény kivételével a „C” Klaszter minden esetben felszín alatti szintként jelenik meg, és az általa kijelölt mélység intervallum jó egyezést mutat a terepen meghatározott **Argic** szinttel. Az LU3 szelvény esetében a „C” Klaszter már a felszínen megjelenik, és az egész szelvény ebbe a csoportba tartozik. Ezt a szelvényt érintették a legerősebben az eróziós folyamatok, melyek következtében az agyag-felhalmozódási szintig erodálódott. Továbbá az LU3 szelvény az egyedüli, mely nem rendelkezik **Calcic** szinttel a karbonátok jelentős mértékű kilúgzódása miatt. Tehát ez a klaszter nem az agyagtartalommal, hanem az agyagtartalom növekedésével mutat összefüggést.

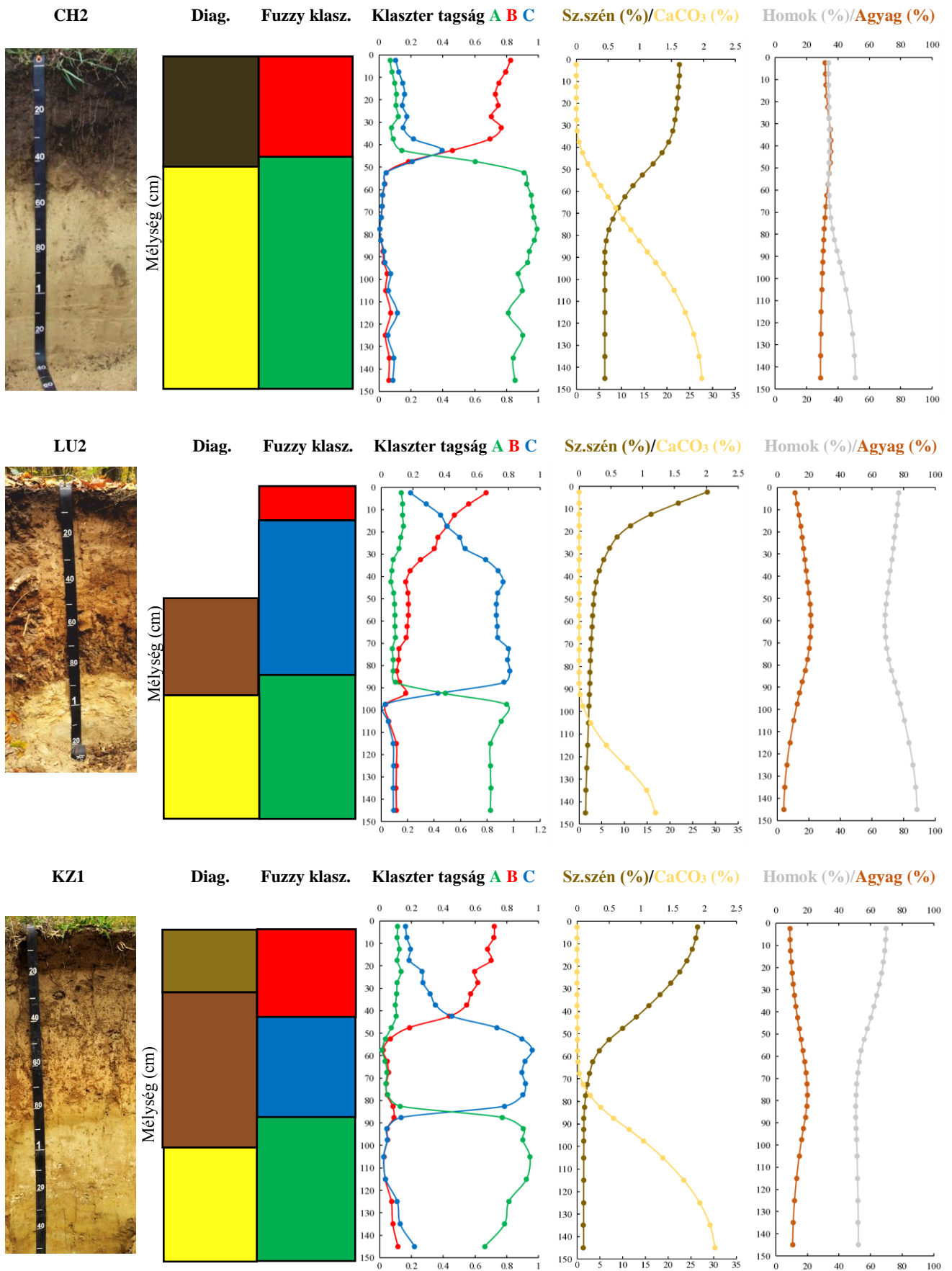
A 7. ábra a Fuzzy C-means klaszterek, klasztertagság értékek és a referencia talajparaméter értékek szelvény menti lefutásának összehasonlítását három talajszelvény (CH2, KZ1 és LU2), és négy talajparaméter (szerves szén, CaCO₃, homok és agyagtartalom) példája alapján mutatja be. Az ábra első blokkjában a szelvények főfaláról készített fénykép látható.

A *Diag* blokkban a diagnosztikai szinteket, a *Fuzzy klasz* blokkban a Fuzzy C-means klasztereket tüntettem fel. Jelmagyarázat:

	Chernic szint		A Klaszter
	Mollic szint		B Klaszter
	Argic szint		C Klaszter
	Calcic szint		
	Nincs diagnosztikai szint		

A *Klasztertagság* blokkban a Fuzzy C-means klaszterezés eredményeképpen – az egyes mintákra kiszámított – klasztertagság értéket tüntettem fel. **Zöld** színnel az 1. **piros** színnel a 2., míg **kék** színnel a 3. klaszter tagság értékeit tüntettem fel. A diagram elsődleges és másodlagos vízszintes tengelyén is a 0-1 közötti tagságérték olvasható le.

A *referencialajparaméterek* blokkjaiban blokkonként két talajparaméter értékeinek szelvény menti lefutását tüntettem fel. Az elsődleges vízszintes (felső) tengelyen a blokk nevében szereplő első talajparaméter értékei olvashatók le. A másodlagos vízszintes (alsó) tengelyen a blokk nevében szereplő második talajparaméter értékei olvashatók le.



7. ábra: Példák a Fuzzy C-means klaszterek, klasztertagság értékek és a referencia talajparaméter értékek szelvény menti lefutásának összehasonlítására

3.2.4 Taxonómiai távolságszámítás

Az Euklideszi távolságszámítás eredményeit egy színkóddal ellátott távolságmátrixban mutatom be (3. táblázat). Ebben a mátrixban a taxonómiai rokonságokat egyrészt a taxonómiai távolságértékek, valamint az ezeknek az értékeknek megfelelő színkódok fejezi ki. A zöld árnyalatok (alacsony értékek) kis, míg a vörös árnyalatok (magas értékek) nagy taxonómiai távolságot jelentenek.

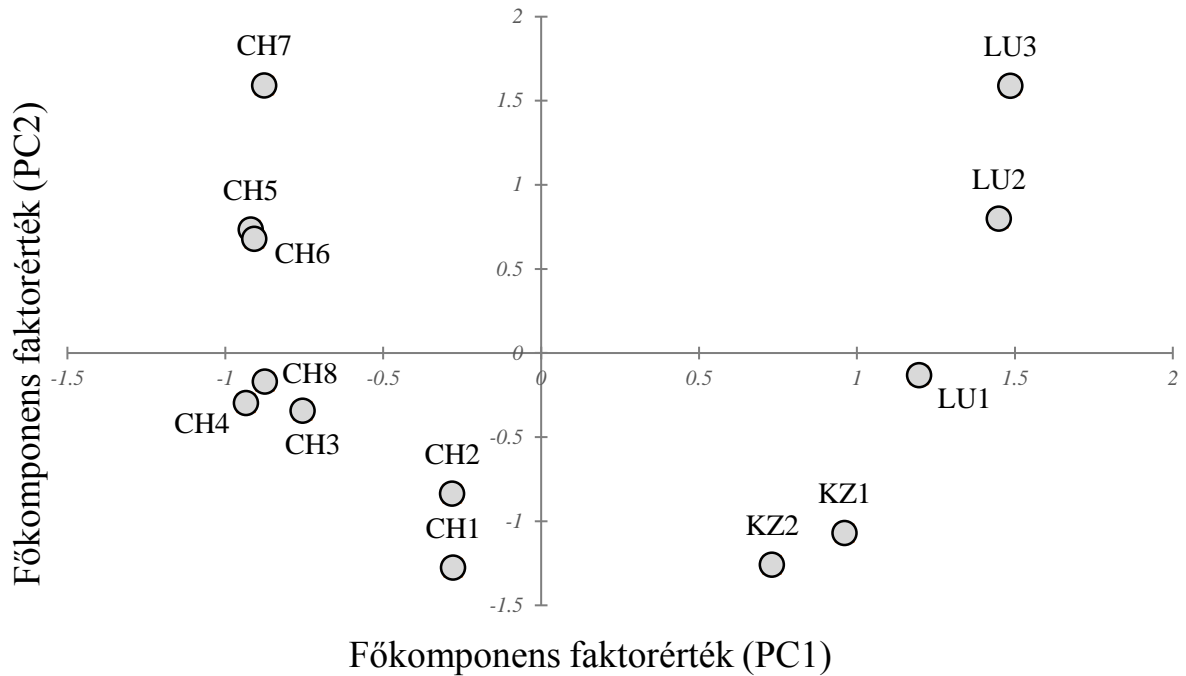
3. táblázat: A talajszelvények spektrális tulajdonságai alapján számított hasonlósági mátrix

	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH8	CH6	CH7	KZ1	KZ2	LU1	LU2	LU3
CH1	0.000	0.052	0.038	0.043	0.058	0.047	0.064	0.074	0.054	0.054	0.069	0.077	0.092
CH2	0.052	0.000	0.059	0.052	0.069	0.040	0.057	0.072	0.062	0.055	0.077	0.093	0.090
CH3	0.038	0.059	0.000	0.024	0.040	0.046	0.054	0.055	0.075	0.070	0.088	0.103	0.108
CH4	0.043	0.052	0.024	0.000	0.027	0.036	0.037	0.050	0.078	0.071	0.091	0.106	0.114
CH5	0.058	0.069	0.040	0.027	0.000	0.048	0.046	0.059	0.094	0.087	0.106	0.121	0.129
CH8	0.047	0.040	0.046	0.036	0.048	0.000	0.036	0.053	0.082	0.074	0.097	0.111	0.118
CH6	0.064	0.057	0.054	0.037	0.046	0.036	0.000	0.053	0.093	0.083	0.105	0.122	0.132
CH7	0.074	0.072	0.055	0.050	0.059	0.053	0.053	0.000	0.106	0.097	0.117	0.137	0.143
KZ1	0.054	0.062	0.075	0.078	0.094	0.082	0.093	0.106	0.000	0.022	0.040	0.049	0.066
KZ2	0.054	0.055	0.070	0.071	0.087	0.074	0.083	0.097	0.022	0.000	0.043	0.061	0.074
LU1	0.069	0.077	0.088	0.091	0.106	0.097	0.105	0.117	0.040	0.043	0.000	0.054	0.067
LU2	0.077	0.093	0.103	0.106	0.121	0.111	0.122	0.137	0.049	0.061	0.054	0.000	0.070
LU3	0.092	0.090	0.108	0.114	0.129	0.118	0.132	0.143	0.066	0.074	0.067	0.070	0.000

A mátrixon elvégzett főkomponens analízis két olyan főkomponenst eredményezett, melyek sajátértéke magasabb 1-nél. Ez a két főkomponens kifejezi a szelvények közötti hasonlóságot leíró mátrixban rejlő változékonyság 83.7 %-át. Az 1. és 2. főkomponens tengelyen a szelvényeket reprezentáló pontokat a 8. ábrán tüntettem fel.

A hasonlósági mátrix (3. táblázat) és a szóródási diagram (8. ábra) alapján a **Chernozems** a **Kastanozems** valamint a **Luvisols** RSG-be tartozó szelvények csoportja jól elkülöníthető egymástól. Azok a Chernozem RSG-be tartozó szelvények, melyek a szelvényben időszakosan fellépő anaerob viszonyok hatására kialakuló – talajvíz okozta – glejesedés morfológiai bélyegei jelentkeznek (**Gleyic properties**), valamint 70 cm-nél mélyebb **Chernic** szinttel rendelkeznek (**Pachic**) a tulajdonságtérben egymáshoz közel helyezkednek el (CH5, CH6, CH7 szelvények). Azok a szelvények, melyek esetében a **Gleyic properties** nem került meghatározásra, de mély (> 70 cm), nagyon sötét humuszos szinttel rendelkeznek (**Pachic**) szintén közel helyezkednek el egymáshoz (CH3, CH4, CH8). A kevésbé mély (40–60 cm) **Chernic** szinttel rendelkező CH1 és CH 2 szelvények, melyekben az előző talajokhoz képest a kilúgzási folyamatok jóval kifejezetebbek, és karbonátfelhalmozódási szintjük (**Calcic**) élesebben válik el a felette lévő szinthez képest szintén közel helyezkednek el egymáshoz. A **Chernic** szinthez képest világosabb, de még sötétnek mondható **Mollic**, valamint **Argic**, és a **Mollic** alsó határa alatt 50 cm-en belül kezdődő **Calcic** szinttel rendelkező KZ1 és KZ2 talajok szelvény menti spektrális tulajdonságaik alapján közel helyezkednek el egymáshoz. A három Luvisols RSG-be tartozó szelvény nem formál egyértelmű csoportot. Tulajdonságtérbeli eloszlásuk átmeneti jelleget mutat kezdve a vékony, de szerves szénben gazdag felszíni

szinttel, valamint 100 cm-en belül kezdődő Calcic szinttel rendelkező LU1 szelvénnel, folytatva a hasonló tulajdonságokat mutató, de szerves szénben szegényebb felszíni szinttel rendelkező LU2 szelvénnel, zárva az LU3 szelvénnel, mely az eróziós folyamatok miatt alacsony szerves széntartalmú felszíni szinttel rendelkezik, de az erőteljes kilúgzási folyamatok miatt nem rendelkezik **Calcic** szinttel.



8. ábra: A hasonlósági mátrixon elvégzett főkomponens analízis eredménye. A szóródási diagram az 1. és 2. főkomponens mentén ábrázolja a szelvények elhelyezkedését

4. Következtetések és javaslatok

A doktori kutatásom eredményei alátámasztják, hogy a látható és közeli infravörös tartományban végzett reflektancia mérésekkel számos talajtulajdonságról nyerünk egyidejűleg minőségi és mennyiségi információt, így a technológiának jelentős szerepe lehet a talajfelvételezésben és talajosztályozásban.

A spektrális alapú talajtani vizsgálatokban is alapvető fontosságú a jó minőségű talajadat, esetünkben a spektrális reflektancia biztosítása. A mérési módszertan minden részletre kiterjedő kidolgozása, és követése abban az esetben még hangsúlyosabb, amikor a spektrumok rögzítéséhez hordozható műszert alkalmazunk. A munkám során alkalmazott ASD FieldSpec MAX 3 hordozható spektrométert laboratóriumi eszközként használva a hagyományos asztali műszerekhez képest jóval szigorúbb protokoll követése elengedhetetlen.

A talajparaméter becslési eljárás következő kritikus eleme a többváltozós elemzéshez szükséges kalibrációs minták kiválasztása. Ebben az esetben kiemelkedő fontosságú, hogy a teljes sokaságból olyan mintákat válasszunk ki referenciaelemzések céljából, melyek arra vonatkozóan reprezentatívak. A minták random módszerrel történő, és szubjektív döntésen alapuló kiválasztása mellett olyan eljárásokat (pl. Kennard-Stone algoritmus) is alkalmaznunk kell, melyek a teljes sokaság statisztikai mutatóinak figyelembe vételével jelölik ki a jellemzőket.

A többváltozós kalibrációs eljárások során kiemelt figyelmet kell szentelni azoknak a mintáknak, amelyek mérési hiba miatt, vagy összetételüknél fogva a létrehozott modellekbe nem illeszkednek. Mérési hiba esetén a mérést meg kell ismételni. Ha a minta más talajpopulációba tartozása miatt nem illeszkedik a modellbe, elengedhetetlen hasonló összetételű minták bevonása a kalibrációba, vagy nem-lineáris modellezési eljárások alkalmazása.

A talajok mélység szerinti tulajdonságainak vizsgálata során megállapítottam, hogy egyszerű többváltozós módszerekkel a spektrális adatokból kinyerhetők olyan változók, melyek kifejezik a spektrális változatosságot, szelvény mentén ábrázolva összefüggést mutatnak hagyományos talajparaméter-értékek eloszlásával, melyek alapján diagnosztikai talajszintekkel jó egyezést mutató szintek jelölhetők ki, valamint alkalmasnak bizonyulnak a talajok közötti taxonómiai rokonságok feltárását célzó elemzések bemenő adataként.

Munkám során három WRB referenciacsoportba tartozó talajszelvényeket vizsgáltam, amelyek viszonylag szűk talaj-populációt képviselnek. A spektrális mérések alkalmazási lehetőségeinek további feltárása érdekében szükséges további, talajképző tényezőket tekintve különböző talajok bevonását, és a módszer tesztelését.

Munkám végkövetkeztetése, hogy a VIS-NIR reflektancia spektroszkópia alkalmazása rendkívüli lehetőségeket nyitna meg a talajtani gyakorlatban, melynek alapvető feltétele a hazai talajok sokféleségét reprezentáló spektrális könyvtár létrehozása. Egy ilyen léptékű adatbázis létrehozásával és folyamatos bővítésével a talajparaméterek spektrális alapú becslése egyre hatékonyabbá, a talajosztályozási folyamat standard mérésekre épülve egyre objektívabbá válna.

5. Új tudományos eredmények

1. Létrehoztam egy – a Gödöllői-dombsági talajok spektrális változatosságát reprezentáló – spektrális könyvtárat.
2. Kemometriai módszerekkel olyan spektrális modellt hoztam létre, melyek alkalmazásával a Gödöllői-dombsági talajok szerves szén, kalcium-karbonát tartalma, valamint kémhatása ismert megbízhatósággal meghatározható.
3. A talajok mélységgel változó spektrális tulajdonságainak vizsgálatával megállapítottam, hogy a spektrális reflektancia adatok tartalmazznak a szelvények jellemzéséhez és a vizsgált diagnosztikai szintek kijelöléséhez szükséges fizikai és kémiai információt.
4. Megállapítottam, hogy a talajok mélységgel változó spektrális tulajdonságaira alapozott taxonómiai távolságszámítás lehetővé teszi a vizsgált talajszelvények WRB referenciacsoportok szerinti megfeleltetését.

6. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációk

1. Tudományos folyóiratokban megjelent (közlésre elfogadott), lektorált, teljes szövegű tudományos közlemény

1.1. Idegen nyelvű, impakt faktoros folyóiratban (WEB OF SCIENCE szerint):

1.1.1. Külföldi kiadású

NOCITA, M., STEVENS, A., VAN WESEMAEL, B., AITKENHEAD, M., BACHMANN, M., BARTHÈS, B., BEN DOR, E., BROWN, D. J., CLAIROTTE, M., CSORBA, A., DARDENNE, P., DEMATTÈ, J. A. M., GENOT, V., GUERRERO, C., KNADEL, M., MONTANARELLA, L., NOON, C., RAMIREZ-LOPEZ, L., ROBERTSON, J., SAKAI, H., SORIANO-DISLA, J. M., SHEPHARD, K. D., STENBERG, B., TOWETT, E. K., VARGAS, R., WETTERLIND, J. (2015): Chapter Four - Soil Spectroscopy: An Alternative to Wet Chemistry for Soil Monitoring. *Advances in Agronomy*. 132, 139 – 159 pp. (Impact Factor: 5.02 (2014))

1.2. Idegen nyelvű, nem impakt faktoros folyóiratban

1.2.1. Hazai kiadású

CSORBA, Á., LÁNG, V., FENYVESI, L., MICHÉLI, E. (2013): Prediction of soil parameters based on reflectance spectroscopy and multivariate modelling methods. *Növénytermelés*. 62 (Suppl) 213 - 216 pp.

1.3. Magyar nyelvű, nem impakt faktoros hazai folyóiratban

CSORBA, Á., LÁNG, V., FENYVESI, L., MICHÉLI, E. (2012): Reflektancia spektroszkópia alkalmazása talajok szerveszén- és CaCO₃-tartalmának becslésében. *Agrokémia és Talajtan*. 6/2, 277 - 290 pp.

5. Kongresszusi kiadványokban megjelent közlemények (nyomtatott formában v. elektronikus adathordozón – nem hitelesített kiadványokra vonatkozóan)

5.1. Teljes szövegű közlemény idegen nyelven

CSORBA, A., LÁNG, V., FENYVESI, L., MICHÉLI, E. (2013). Prediction of soil pH, soil organic carbon and calcium carbonate content based on reflectance measurements. In: 3rd Global Workshop on Proximal Soil Sensing. Konferencia helye, ideje: Potsdam, Németország, 2013.05.26 Potsdam: 243 - 247 pp.

CSORBA, A., LANG, V., MICHELI, E., FENYVESI, L., (2012): Prediction of Soil Organic Carbon and Calcium Carbonate Content Based on Reflectance Spectroscopy and Multivariate Modelling Methods. *International Conference of Agricultural Engineering, CIRG-AgEng 2012, Valencia, Spanyolország, 2012.07.08-12, Papers Book*.

LÁNG, V., CSORBA, Á., MICHÉLI, E.,: Prediction of Selected Soil Parameters Based On Reflectance Measurements: a Case Study In a Hungarian Catchment Area, ASA, CSSA, SSSA Annual Meeting, San Antonio, 2011

7. Felhasznált irodalom

- BARNES, R. J., DHANOA, M. S., LISTER, S. J. (1989): Standard normal variate transformation and detrending of near-infrared diffuse reflectance spectra. *Applied Spectroscopy*. 43, 772 – 777 pp.
- DUCKWORTH, J. H., 1998. Spectroscopic quantitative analysis. In: *Applied Spectroscopy* (Eds.: WORKMAN, J. & SPRINGSTEEN, A.) Academic Press. San Diego, California. 93–163 pp.
- GELADI, P., MACDOUGALL, D., MARTENS, H. (1985): Linearization and scatter-correction for near-infrared reflectance of meat. *Applied Spectroscopy*. 39, 491 – 500 pp.
- IUSS WORKING GROUP WRB (2015): World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Reports No. 103. FAO. Rome.
- JASSÓ, F. (szerk.)(1989): *Melioráció-öntözés és talajvédelem. Útmutató a nagyméretarányú országos talajtérképezés végrehajtásához* 89 melléklet, Agroinformációs vállalat, Budapest.
- MICHÉLI, E. (2011): A talajképző folyamatok megjelenése a diagnosztikai szemléletű talajosztályozásban. *Agrokémia és Talajtan*, 60/1. 17-32 pp.
- MINASNY, B., MCBRATNEY, A. B., HARTEMINK, A. E. (2009): Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base. *Geoderma*. 155. 132 – 139 pp.
- O'ROURKE, S. M., HOLDEN, N. M. (2011): Optical sensing and chemometric analysis of soil organic carbon – a cost effective alternative to conventional laboratory methods? *Soil Use Manage*, 27, 143 – 155 pp.
- SAVITZKY, A., GOLAY, M. (1964): Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*. 36, 1627 – 1639 pp.
- SCHWERTMANN, U. (1993): Relations between iron oxides, soil color and soil formation. In: *Soil Color, Special Publication*. (Eds.: BIGHAM, J. M. & CIOLKOSZ, E. J.) 51–70. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin.
- STEFANOVITS, P. (1972): *Talajtan*. Mezőgazda Kiadó, Budapest
- STEVENS, A., UDELHOVEN, T., DENIS, A., TYCHON, B., LIOY, R., HOFFMANN, L., WESMAEL, B. (2010): Measuring soil organic carbon in croplands at regional scale using airborne imaging spectroscopy. *Geoderma*, 158, 32 – 45 pp.
- VÅGEN, T-G., WINOWIECKI, L.A., TAMENE DESTA, L., TONDOH J.E. (2015): The Land Degradation Surveillance Framework (LDSF) – Field Guide v 4.1. World Agroforestry Centre, Nairobi, Kenya 14 pp.
- VISCARRA ROSSEL, R. A., CATTLE, S. R., ORTEGA, A., FOUAD, Y. (2009): In situ measurements of soil colour, mineral composition and clay content by vis-NIR spectroscopy. *Geoderma*, 150: 253-266 pp.
- VISCARRA ROSSEL, R. A., WALVOORT, D. J. J., MCBRATNEY, A. B., JANIK, L. J., SKJEMSTAD, J. O. (2006): Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assesment of various soil properties. *Geoderma*, 131, 59 – 75 pp.
- VISCARRA ROSSEL, R.A., CHEN, C. (2011): Digitally mapping the information content of visible-near infrared spectra of surficial Australian soils. *Remote Sensing of Environment*. 115/6, 1443 – 1455 pp.

