

Geostatiztika a talajterképezésben – Szemle –

SZATMÁRI Gábor és PÁSZTOR László

Magyar Tudományos Akadémia Agrártudományi Kutatóközpont,
Talajtani és Agrokémiai Intézet, Budapest

Bevezetés

A geostatiztika a talajterképezésben, illetve a tágabb értelemben vett talajtani kutatásokban mára már bevált gyakorlat (RAJKAI, 2001; OLIVER & WEBSTER, 2014; WEBSTER, 2015), melyeknek kivitelezését az egyre rohamosabban fejlődő térinformatikai szoftverkörnyezet biztosítja. A geostatiztika és a geometematika segítségével feltárhatjuk, elemezhetjük, kvantitatíve leírhatjuk, illetve modellezhetjük a vizsgált talajtani sajátságok közötti, illetve a környezetükkel fennálló kapcsolatokat a földrajzi és/vagy attribútum térben, akár időben is. Az ily módon megalkotott talajtani modellek segítségével becsléseket végezhetünk az adott talajtani sajátságok paramétereire (például az átlag vagy a szórás), illetve ismeretlen pontbéli vagy területegység értékeire, továbbá előrejelzéseket tehetünk az adott talajtani sajátság jövőbeni változására és alakulására. Ezek a modellek kiemelkedő szerepet játszanak a bizonytalansági, illetve kockázati elemzésekben, amelyekben az adott talajtani sajátsággal, folyamattal kapcsolatos ismeretek hiányának, illetve a káros vagy nem kívánatos kimenetelű események lehetőségeinek mérlegelése történik. Továbbá ezek a modellek segítenek, hogy jobban megismerhessük a talajban lejátszódó folyamatokat a kiegészítő szakmai ismeretek felhasználásával. Ez utóbbi pedig lényeges része a geostatiztikai alapú modellalkotásnak (WEBSTER, 1989; GOOVAERTS, 1997; GEIGER, 2006a, 2007).

A geostatiztikai megközelítések széles körű alkalmazhatóságuknak köszönhetően igen korán, az 1980-as évek elején megjelentek a talajterképezésben, melyek azóta is meghatározzák a (digitális) talajterképezés gyakorlatát, illetve a talajterképezők talajjal kapcsolatos szemléletét és gondolkodását.

Az egyre rohamosabban fejlődő térinformatikai szoftverek és kapcsolódó eszköztárak tették lehetővé, hogy a geostatiztika széles körben elérhetővé váljon azon felhasználók részére, akik munkájuk során a térbeli – és időbeli – referenciájú adatok feldolgozásával, elemzésével, értelmezésével és az ennek háttérében álló természeti folyamatok modellezésével foglalkoznak (OLIVER & WEBSTER, 2014, 2015).

A folyamatosan bővülő térinformatikai eszköztárak pozitív hatással voltak és vannak, mind a talajtérképezésre, mind pedig a tágabb értelemben vett talajtani kutatásokra. A sokszor bonyolult és komplex számításokat igénylő – esetenként nem kis kihívást jelentő programozási feladatokkal is kiegészülő – geostatisztikai megközelítések immáron felhasználóbarát környezetben állnak rendelkezésünkre és tesznek „néhány gombnyomással” elérhetővé olyan alkalmazásokat, melyek eddig „elérhetetlenek” vagy „megvalósíthatatlannak” tűntek a talajtérképező, illetve talajtanos szakember számára. Ugyanakkor a sok előny mellett – akaratlanul is – számos hátrány jelent meg, mint például az, hogy az adott „felhasználóbarát” eszköztár nem feltétlenül kívánja meg a mögöttes koncepciók ismeretét. Ezen eszközök nem kellően megalapozott használata félreértelmezésekhez, illetve hibás eredményekre vezethetnek, melyek így kritikus hatással lehetnek a modell alapján levont döntésre (például: egy talajt érintő szennyezés feltárása és remediációja, mely nem elhanyagolható mértékű humán-egészségügyi kockázattal jár).

Jelen dolgozatunk időrendi struktúráját követ, melyet egy elméleti megfontolásokat tartalmazó fejezet közbeiktatása szakít meg, illetve egy térinformatikai kitekintés zár le. Ezen strukturálás célja, hogy időrendben mutassa be a regionalizált változók bevezetését, a geostatisztika talajtérképezési alkalmazását és az ezzel kapcsolatos szemlélet-formálódást a kezdetektől egészen napjainkig. A közbeiktatott fejezettel célunk azon elméleti megfontolások bemutatása, melyek rámutatnak arra, hogy a talaj ideális médium a geostatisztika alkalmazására, s nem utolsó sorban kitérnek olyan nehezen értelmezhető fogalmakra és koncepciókra, melyek elengedhetetlenek a modellezés során, ugyanakkor a legtöbb félreértés okozói is (JOURNAL, 1986; MYERS, 1989; WEBSTER, 2000). A záró fejezetben a térinformatikai szoftverek geostatisztikai alkalmazásával kapcsolatos eddigi tapasztalatainkat és gondolatainkat kívánjuk megosztani.

Dolgozatunkban nem térünk ki részleteiben az egyes geostatisztikai módszerek elméleti hátterére. Ez utóbbi számos logikusan felépített szakkönyv tárgyát képezi (pl. JOURNAL & HUIJBREGTS, 1978; ISAACS & SRIVASTAVA, 1989; CRESSIE, 1993; GOOVAERTS, 1997; DEUTSCH & JOURNAL, 1998; WEBSTER & OLIVER, 2007; PYRCZ & DEUTSCH, 2014; ROSSI & DEUTSCH, 2014; OLIVER & WEBSTER, 2015).

A regionalizált változók fogalmának bevezetése a bányászatban (1960-as évek)

A bányászati szakemberek korán felismerték, hogy az alkalmazott klasszikus statisztikai módszerek nem vették tekintetbe a vizsgált jelenség (például: egy érctelep fémtartalma) térbeli aspektusát (KRIGE, 1951, 1960; MATHERON, 1963, 1971). Vegyük példaként a hisztogramot, mely az egyik leggyakrabban használt adatrepresentációs eszköz a statisztikában. A hisztogram az egyes diszjunkt osztályokba tartozó megfigyeléseket ábrázolja grafikusán, mely által értékes információkat közöl az elemzővel. Ugyanakkor a megfigyelések földrajzi pozícióját nem veszi számításba, azon általános okból kifolyólag, hogy a statisztika a vizsgálatba vett jelenséget valószínűségi változónak tekinti.

A valószínűségi változónak két alapvető tulajdonsága van: (1) a kutatás alapját jelentő kísérlet (pl. mérés) elméletileg végtelen – a gyakorlatban tetszőlegesen – sokszor megismételhető és (2) a kísérletek függetlenek egymástól. Ezen sajátágok azonban nem voltak összeegyeztethetők az addigi tapasztalatokkal, hiszen (1) a gyakorlatban nincs lehetőség az adott kísérlet újbóli elvégzésére és (2) a kísérletek kimenetelei nem függetlenek egymástól, köztük – térbeli és/vagy időbeli – kapcsolat áll fent (MATHERON, 1963). Meg kell jegyezni, hogy ugyanezen megfigyelések és tapasztalatok a földtudományokban és a talajtanban is érvényesek (FÜST, 1981; WEBSTER, 1989; Goovaerts, 1997; GEIGER, 2006a). Ezért a korábbi statisztikai megközelítésekkel kapott eredmények, becslések nem voltak elfogadhatók, külön kiemelve itt a gazdaságosan kitermelhető nyersanyagra vonatkozó számításokat (MATHERON, 1963). A legfőbb problémát tehát az jelentette, hogy ezek a módszerek érzéketlenek a megfigyelési helyekre, holott ez utóbbi magával az adattal azonos értékű információ. Ezért egy olyan megközelítésre volt szükség, mellyel kifejezett módon hangsúlyozni lehet a vizsgált jelenség térbeli vonatkozásait, mely annak elidegeníthetetlen és a legfontosabb sajátága. E megközelítés elméleti alapjainak kidolgozása Georges Matheron francia matematikus és geológus nevéhez fűződik és a regionalizált változók elméleteként ismerjük.

Georges Matheron munkássága nyomán a regionalizált változókat valószínűségi függvényekkel közelítjük (JOURNEL, 1986); ahol a valószínűségi függvény olyan valószínűségi változók halmaza, melyek egymástól függését bizonyos valószínűségi mechanizmus szabályozza (PANNATIER, 1996; GEIGER, 2006a). A vizsgált jelenséget kifejező regionalizált változót az ezen a jelenségen létrehozott valószínűségi függvény egyedi realizációjának tekintjük (MATHERON, 1971; PANNATIER, 1996; GEIGER, 2006a; WEBSTER & OLIVER, 2007). A regionalizált változó fogalmához szorosan kapcsolódik az erraticus (*erratic*), illetve a struktúrált (*structured*) aspektus (PANNATIER, 1996; GEIGER, 2006a). Az erraticus aspektus a jelenség lokális tulajdonságára vonatkozik, miszerint az adatponti értékek helyileg valószínűségi változók. A struktúrált aspektus a jelenség térbeli eloszlására vonatkozik, miszerint minden adatpont a jelenség térbeli struktúráját kifejező korrelációval van összekötve (GEIGER, 2006a). Utóbbinak egyik – de nem kizárólagos – mértéke a variogram (MATHERON, 1963).

A fentiek alapján tehát elmondható, hogy a geostatistika és a statisztika közötti legfőbb különbség a jelenséghez kapcsolódó megfigyelési helyek információinak rögzítésében és kiterjesztésében van. Míg a statisztika a jelenséget valószínűségi változónak tekinti és a minta adatai függetlenek, addig a geostatistika regionalizált változónak tekinti és a minta adatai nem függetlenek (MATHERON, 1963; GEIGER, 2006a).

A bányászatban bekövetkezett szemléletbeli változások mellett a „társtudományokban” is születtek kísérletek a térbeliség kezelésére (CRESSIE, 1990). Fontosnak tartjuk ezeknek a munkáknak a számbavételét. Elsőként GANDIN (1965) meteorológus munkája említendő, mely MATHERON munkásságához hasonló elméleti megfontolásokat és gyakorlati alkalmazásokat fogalmazott meg (CRESSIE, 1990).

Az erdészek közül MATÉRN (1960) munkássága hangsúlyozandó, akiről egy kovariancia függvényt is elneveztek. Kiemelendők továbbá HÄGERSTRAND (1965),

illetve TOBLER (1970) geográfusok munkái, akik elsőként helyezték előtérbe a földrajztudományban a szomszédsági kapcsolatok szerepét és fontosságát, melyet ma „Tobler törvényeként” (vagy „a földrajz első törvényeként”) ismerünk. CRESSIE (1990) szerint azonban MATHERON volt az első, aki teljes elméleti és gyakorlati megoldást nyújtott; ezért az utókor Georges Matheron-t – és részben Danie G. Krige-t a gyakorlati munkássága révén – tekinti a geostatistika megalapítójának (JOURNAL & HUIJBREGTS, 1978; CRESSIE, 1993; GOOVAERTS, 1997; DEUTSCH & JOURNAL, 1998; WEBSTER & OLIVER, 2007; OLIVER & WEBSTER, 2015).

A geostatistika megjelenése a talajtérképezésben (1970–1980-as évek)

A geostatistikai alapú talajtérképezést megelőzően a talajok térképezését osztályozási szempontból „homogénnek” tekintett terület térképi lehatárolása jelentette (HEUVELINK & WEBSTER, 2001; WEBSTER, 2000, 2015). A talajosztályokat ábrázoló foltterképek alapján volt megállapítható, hogy adott pont vagy terület mely talajosztályhoz tartozik. Az azokra vonatkozó talajjellemzők származtathatók és/vagy becsülhetők voltak (HEUVELINK & WEBSTER, 2001; WEBSTER, 2015). Ezt a térképi információt a térbeli változékonyság diszkrét modelljének nevezzük (HEUVELINK & WEBSTER, 2001). Ezért a talajtérképezés legfőbb célja és kihívása az osztályozási módszerek tökéletesítése és az ismeretek keretrendszerbe illesztése volt (WEBSTER, 2000). Ez az ún. Arisztotelészi logika hosszú ideig meghatározta a talajtulajdonságok térbeli változékonyságával kapcsolatos gondolkodást (WEBSTER, 2015).

Elsőként az építő- és hadmérnökök ismerték fel a statisztikában rejlő lehetőséget a talajtulajdonságok adott pontra vagy területre vonatkozó becslésében. A statisztikailag feldolgozható mintákat rétegzett mintavételezésből nyerték. A mintavételezés alapját jelentő „rétegezést” a talajfolt térképek szolgáltatták. A talajtulajdonságok becslései – melyek a fent említett diszkrét modellt követték – igencsak vegyes eredményekkel szolgáltak (WEBSTER & BECKETT, 1970): (1) több talajtulajdonság esetében az osztályon belüli variancia nagyobb volt, mint az osztályok közötti, illetve (2) megfigyelhető volt, hogy a reziduumok változékonysága nem véletlenszerű, azaz nem ún. fehérzaj. Felfedezhetünk bizonyos analógiát a bányászati szakemberek tapasztalataival. Richard Webster az 1950-es évek végén Afrikában végzett talajtérképezési munkálatai során „meglepő” jelenséggel találkozott: a fokozatos átmenetek miatt nem tudta a talajosztályokat precízen meghatározni és egyértelműen lehatárolni (WEBSTER, 2015). A későbbiekben WEBSTER és CUANALO (1975) egészen új szemszögből vizsgálták a talajokat: úgy tekintették egy keresztiszelvény mentén mért talajtulajdonságok változékonyságát, mintha az egy sztochasztikus folyamat eredménye lenne. A származtatott korrelogramok alapján megfigyelték, hogy bizonyos talajtulajdonságok hosszabb, míg mások rövidebb távolságban mutatnak korrelációt. Ugyanakkor még nem volt számukra világos, hogy ezeket az információkat, miként is használhatnák a talajtérképezésben (WEBSTER, 2015). Néhány évvel később Richard Webster-nek Daniel Sampey geológus említette meg Danie G. Krige és Georges Matheron eredményeit, vagyis a krigelést, illetve a

regionalizált változók elméletét. Ezek az eredmények alapjaiban oldották meg a talajtulajdonságok térbeli becslését (WEBSTER, 2015). BURGESS és WEBSTER (1980a,b), illetve WEBSTER és BURGESS (1980) munkáiban a talajtulajdonságok térbeli változékonyságát regionalizált változónak tekintették és használtak hagyományos (*ordinary*), blokk (*block*), illetve univerzális krigelést (*universal kriging*) a térbeli becslésekhez. A geostatistikai értékelések és módszerek ezt követően széles körben elterjedtek a talajtérképezésben.

Elméleti megfontolások

A talajban megfigyelhető jelenségek, mint regionalizált változók

A geostatistika kiindulási alapja az a feltételezés, hogy a vizsgált jelenség térbeli és/vagy időbeli sztochasztikus folyamatként közelíthető (WEBSTER, 2000). A talajtulajdonságok és a talajban megfigyelhető jelenségek bonyolult, komplex, egymásra kölcsönösen pozitív vagy negatív irányú hatást gyakorló fizikai, kémiai, illetve biológiai folyamatok eredői. Ebből az következik, hogy ezeknek a tulajdonságoknak, jelenségeknek – fizikai értelemben véve – determinisztikusnak kell lenniük. JENNY (1941) munkája ezen a tézisen alapszik miszerint, ha ismerjük, hogy a talaj miként képződött és formálódott az idők során a talajképző kőzeten, akkor elméletileg ismernünk kell jellemzőit és ezek múlt-, jelen- és jövőbeli viselkedését. Fontos megjegyezni, hogy e szemléletmód megkívánja a talajtulajdonságok és a talajban lejátszódó folyamatok – ha nem is teljes körű, de kielégítő – ismeretét, illetve ezen tényezők pontos – de legalábbis megbízható – mérésének lehetőségét is. Ugyanakkor a fizikai, kémiai, illetve biológiai folyamatok közötti interakciók – mind irányukban és erősségükben – oly komplexek és változékonyságúak a talajképződés előrehaladtával, hogy a talajokkal kapcsolatos ismereteink közel sem mondhatók teljesnek. Továbbá a talajon végzett méréseinken keresztül is csak adott pont(ok)ban és adott időpillanat(ok)ban vagyunk képesek „szemlélni” a talajban lejátszódó folyamatokat, így azok térbeli változékonyságáról és az ezeket irányító folyamatok időbeli változékonyságáról is töredékesek az ismereteink. Ezért a talaj sok esetben úgy jelenik meg számunkra, mintha az egy véletlenszerű folyamat eredménye lenne (WEBSTER, 2000, 2015). Természetesen a talaj nem egy véletlenszerű folyamat eredménye – egy determinisztikus rendszer, mely alá van vetve a fizika törvényeinek – ugyanakkor a talajt érintő ismereteink hiánya, illetve a megismerhetőségének korlátai miatt a talaj egy sztochasztikus folyamatként közelíthető és modellezhető (WEBSTER, 2000, 2015). E megközelítés szerint a talajtulajdonságok olyan jellemzői a talajnak, melyek a mérési hely végtelen kicsiny sugarú környezetében valószínűségi változónak tekinthetők, továbbá megadható olyan – nem feltétlenül egy – térben értelmezett függvény, mely ezeket a valószínűségi változókat összekapcsolja. Az ilyen tulajdonságokat a geostatistika regionalizált változónak nevezi (GEIGER, 2006b).

Stacionaritási „hipotézisek”

A geostatiztika további feltételezése a stacionaritás, mely egyben számos félreértés okozója is (JOURNEL, 1986; MYERS, 1989; WEBSTER, 2000). A vizsgált jelenségről egy-egy adatponti érték áll a rendelkezésünkre, ugyanakkor a számításokhoz több ismételt mérésre lenne szükségünk. Ezekre – mint fentebb már említettük – nincs lehetőségünk. Mindazonáltal, ha a vizsgált jelenség homogénnek tekinthető az adott területen, akkor ennek adatpontenkénti értékét úgy tekinthetjük, mint a regionalizált változó önmaga ismétlését a térben. Ez az ismétlődés ugyanazon valószínűségi függvény sok realizációjának azonosságát adja, és statisztikai számításokat tesz lehetővé. A stacionaritás „hipotézisét” a vizsgált jelenség térbeli homogenitásának különböző fokaihoz kapcsoljuk (GEIGER, 2006a). A geostatiztikában a következő stacionaritási típusok a leginkább használatosak (MYERS, 1989; WEBSTER, 2000; GEIGER, 2006a; FÜST & GEIGER, 2010):

- *Szigorú stacionaritás*: Egy valószínűségi függvény szigorúan stacionárius, ha térbeli törvénye invariáns az eltolásra.
- *Gyenge stacionaritás*: Egy valószínűségi függvény gyengén stacionárius, ha a várható érték létezik és független a hely megválasztásától, továbbá a kovariancia létezik és csakis a pontokat elválasztó szeparációs vektortól függ.
- *Belső hipotézis*: Egy valószínűségi függvény belső hipotézissel bír, ha a várható érték helytől független, továbbá a félvariogram létezik és csakis a pontokat elválasztó szeparációs vektortól függ. A belső hipotézis tulajdonképpen nem más, mint a gyenge stacionaritás szűkítése a valószínűségi függvény növekményeire.

Az adott stacionaritási típustól függ, hogy a valószínűségi modellen belül milyen következtetéseket tehetünk. Fontos hangsúlyozni, hogy a stacionaritás a valószínűségi függvény tulajdonsága, s nem jellemzője sem az adatoknak, sem pedig a valóságnak (JOURNEL, 1986; MYERS, 1989; GOOVAERTS, 1997; WEBSTER, 2000). Ezért arra a kérdésre, hogy „a talajban megfigyelt jelenség stacionárius-e?”, nem létezik válasz; sokkal inkább helyénvaló az a kérdés, hogy „az adott jelenségre felépített stacionárius valószínűségi modell reális-e?” (WEBSTER, 2000). Az utóbbi kérdés a modellezés céljainak tükrében válaszolható meg. Fontos megjegyezni, hogy a stacionaritás típusának kiválasztására nincs teszt, ezeket a „hipotéziseket” a minta alapján általában nem lehet igazolni; ezért a stacionaritás „hipotézise” szabatosan nem igazi hipotézis – sokkal inkább egy döntés a szakértő részéről –, hisz az adatok alapján sem elfogadni, sem visszautasítani nem lehet (JOURNEL, 1986; GOOVAERTS, 1997). Ez azt is jelenti, hogy a mintázási stratégia kidolgozása során olyan helyzet kialakítása fontos, mely a stacionaritási feltételezéseket nyilvánvalóvá teszi (FÜST & GEIGER, 2010).

Néhány gondolat a variogramról

A vizsgált jelenség térbeli változékonyságának leírására használt leggyakoribb mérték a variogram (1. egyenlet).

A geostatiztika általánosan használja a variogramot a vizsgált jelenség térbeli változékonyságának mértékeként a kovariancia helyett, mely főként történelmi

okokra vezethető vissza (GRINGARTEN & DEUTSCH, 2001). Ez elhanyagolható gyakorlati következményekkel jár lévén, hogy gyenge stacionaritás feltételezése mellett a kovariancia és a variogram ekvivalens eszközök (GRINGARTEN & DEUTSCH, 2001; FÜST & GEIGER, 2010) (2. egyenlet). Ugyanakkor belső hipotézis feltételezése mellett a fenti egyenlőségek nem igazak. Belső hipotézis esetén csakis a variogram létezik és csakis az használható a vizsgált jelenség térbeli változékonyságának jellemzésére.

$$2\gamma(\mathbf{h}) = \text{Var}[Z(\mathbf{u}) - Z(\mathbf{u} + \mathbf{h})] = E\{[Z(\mathbf{u}) - Z(\mathbf{u} + \mathbf{h})]^2\}, \quad (1)$$

$$\gamma(\mathbf{h}) = C(\mathbf{0}) - C(\mathbf{h}) \quad \text{vagy} \quad C(\mathbf{h}) = C(\mathbf{0}) - \gamma(\mathbf{h}), \quad (2)$$

ahol: $2\gamma(\mathbf{h})$ a variogram, $Z(\mathbf{u})$ és $Z(\mathbf{u} + \mathbf{h})$ az egymástól \mathbf{h} szeparációs vektorral elválasztott adatponti párok, $C(\mathbf{0})$ a jelenség a priori varianciája és $C(\mathbf{h})$ a kovariancia.

Fontos kiemelni, hogy az adatok átlagában megjelenő szisztematikus változás, azaz a trend cáfolja a leggyengébb stacionaritási típust is, vagyis a belső hipotézist (FÜST & GEIGER, 2010). A számított variogram értékeinek monoton növekvő tendenciája jelzi a trend jelenlétét. Ilyen esetekben trendmentesítést kell végeznünk, mely során eltávolítjuk az adatok átlagában megjelenő szisztematikus változást és a reziduumon végezzük el a feltáró variográfiai vizsgálatot (GRINGARTEN & DEUTSCH, 2001; FÜST & GEIGER, 2010; SZATMÁRI & BARTA, 2013).

Habár a variogram szerepe evidensnek mondható a geostatisztikai alapú térbeli modellezésekben, mégis számítása, interpretációja és modellezése elhanyagolt (GRINGARTEN & DEUTSCH, 2001; BÁRDOSSY, 2006; OLIVER & WEBSTER, 2014). A variogram egy kritikus inputja a modellalkotásnak, hisz rajta keresztül tudjuk megvizsgálni és leírni a vizsgált jelenség térbeli változékonyságát (GRINGARTEN & DEUTSCH, 2001). Ezért a feltáró variográfia nélkülözhetetlen részét képezi minden geostatisztikai modellalkotásnak, mely során (1) kiválasztjuk a homogénnek tekinthető zónákat, (2) elemezzük a térbeli változékonyság mértékeit, (3) feltárjuk a lehetséges anizotrópiákat, (4) vizsgáljuk a mértékek robusztusságát és (5) azonosítjuk a térbeli változékonyság jellemzését zavaró ún. anomália adatpárokat (PANNATIER, 1996; GOOVAERTS, 1997; DEUTSCH & JOURNEL, 1998; GRINGARTEN & DEUTSCH, 2001; BÁRDOSSY, 2006; GEIGER, 2006a). Az irányfüggő és irány-független tapasztalati variogramok, a variogram felszín, a variogram felhők és az ún. h-scatterplotok segítik a feltáró variográfiai vizsgálatot (PANNATIER, 1996; GEIGER, 2006a). Fontos megjegyezni, hogy a variográfia a vizsgált jelenséggel kapcsolatos szakmai ismereteket is igényli (GRINGARTEN & DEUTSCH, 2001; BÁRDOSSY, 2006; GEIGER, 2006a), például: a variográfia során megállapított röghatás (*nugget*), hatástávolság (*range*), anizotrópia és az esetleges ciklusosság értelmezése a vizsgált jelenséggel kapcsolatos szakmai ismeretekre és tapasztalatokra támaszkodik, melyeket az illesztett variogram modellnek tükröznie kell.

**A geostatisztika szerepe és trendjei a nemzetközi,
illetve a hazai (digitális) talajtérképezésben
(1980-as évektől napjainkig)**

A geostatisztika az 1980-as évektől kezdődően növekvő tendenciával határozza meg a talajjal kapcsolatos „térbeli” szemléletünket és a térképezést illető gondolkodásunkat és gyakorlatunkat. A geostatisztika első hazai alkalmazásai a talajtanban meglehetősen korán, az 1980-as évek második felében jelentek meg (OERTLI & RAJKAI, 1988; RAJKAI et al., 1988; CSILLAG & KERTÉSZ, 1989).

A talaj ideális médium a geostatisztika megközelítéseire (WEBSTER, 1994, 2000, 2015), ezért fontos kiemelni, hogy a talajtanos szakemberek nem csak átvették a kidolgozott geostatisztikai módszereket, hanem lépést is tartottak, sőt aktívan hozzá is járultak a geostatisztika eszköztárának fejlesztéséhez, bizonyos részeinek újragondolásához és megújításához. A talajtérképezők érdeklődése és hozzájárulása főként a nem stacionárius valószínűségi függvények, illetve a lokális és térbeli bizonytalanság modellezése és értékelése felé irányult (HEUVELINK & WEBSTER, 2001). Ezt számos szakkönyv (pl. GOOVAERTS, 1997; WEBSTER & OLIVER, 2007; WEBSTER & LARK, 2013), doktori disszertáció (pl. HENGL, 2003; KEMPEN, 2011) és publikáció (pl. WEBSTER, 1989; GOOVAERTS, 1999a; MCBRATNEY et al., 2000, 2003; LARK, 2012) fémjelzi, megannyi nemzetközi konferencia (pl. Pedometrics, Digital Soil Mapping Workshops) szóbeli közlései mellett. Hazánkban is több jelentős munka született, melyben geostatisztikai megközelítéseket alkalmaztak a talajtulajdonságok vizsgálatára (pl. CSILLAG et al., 1992, 1996; TÓTH & KERTÉSZ, 1996; TAMÁS, 2001; TÓTH & VÁRALLYAY, 2001; NAGY & TAMÁS, 2005; KOHÁN & SZALAI, 2014; RAKONCZAI & FEHÉR, 2015). Az elmúlt tíz évben – a nemzetközi trendekhez hasonlóan – Magyarországon is számos digitális talajtérképezési munka látott napvilágot, melyek a regionalizált változók elméletét alkalmazták (DOBOS et al., 2006, 2007; PÁSZTOR et al., 2010, 2013, 2014, 2015, 2016; ILLÉS et al., 2011; SZATMÁRI et al., 2013, 2015a,b).

Az első geostatisztikai módszer, melyet a talajtérképezésben alkalmaztak a hagyományos krigelés (*ordinary kriging*) volt (BURGESS & WEBSTER, 1980a). Ugyanakkor mind a mai napig igen gyakran és széles körben alkalmazott egyváltozós módszer, amit „egyszerűségének”, szofisztikált algoritmusának és az elérhető jó minőségű eredményeinek köszönhet (WEBSTER & OLIVER, 2007; WEBSTER, 2015). Mind a hazai, mind a nemzetközi szakirodalom széles körű alkalmazhatóságát bizonyítja (WEBSTER, 1989; WEBSTER & OLIVER, 2001; FARKAS et al., 2008; SZALÓKI & SOMODI, 2014).

A talajtani felmérések során gyakori, hogy bizonyos laboratóriumi vizsgálatokat nem az összes mintán végezzük el, melynek oka lehet például: a vizsgálat magas költsége. Ekkor bizonyos talajtulajdonságokra kevesebb adat áll a rendelkezésünkre, ugyanakkor ezeket is térképezni kívánjuk (MCBRATNEY & WEBSTER, 1983). Ezek az igények már 1983-ban megfogalmazódtak a szakemberek részéről; ezért olyan módszerre volt szükség, mely szimultán képes tekintetbe venni a térképezendő változó adatponti értékeit, illetve a rendelkezésre álló egyéb, az előzőnél „sűrűbben” mintázott talajjellemzőket a térbeli becslésben.

A bányászati gyakorlatban az ilyen jellegű problémákra kidolgozott kokrigeléses (*cokriging*) megközelítést MCBRATNEY és WEBSTER (1983) alkalmazta a talajtérképezésben. A kokrigelés mögött azon megfontolás húzódik, hogy a becsléni kívánt regionalizált változó mellett egy (vagy akár több) regionalizált változó áll a rendelkezésünkre, melyek térben korrelálnak. E kapcsolat felhasználható az adott talajtulajdonság becslésére és pontosabb térkép állítható elő (MCBRATNEY & WEBSTER, 1983). A térképezési igények és az elérhető talajtani adatbázisok révén a kokrigelés igen elterjedt módszer lett a talajtérképezésben. Ugyanakkor nem csak talajtani, hanem a talajtulajdonságok becslésében alkalmazható egyéb környezeti adatok is betölthetik a segédinformáció szerepét.

Az elmúlt két évtizedben a digitális domborzatmodellek előállítása, illetve a távérzékelés rohamos fejlődésnek indult, mely egyértelműen kedvezett a kokrigelés alkalmazásának (ODEH et al., 1994, 1995). Ezen fejlődésnek köszönhetően egyre olcsóbban, egyre nagyobb mennyiségben és nem utolsósorban, növekvő geometriai, időbeli, illetve spektrális felbontásban állnak rendelkezésre segédinformációk, melyek aktívan felhasználhatók a kokrigelésben. Erre számos hazai és nemzetközi példa található (ODEH et al., 1994, 1995; MEUL & VAN MEIRVENNE, 2003; BOURENNANE et al., 2006; DOBAI et al., 2012). Fontos kiemelni, hogy ezek a segédinformációk egységes térbeli lefedettséggel állnak a rendelkezésünkre, mely számos új módszertani perspektívát eredményezett.

Tipikusan ilyen megközelítés a krigelés külső drifttel (*kriging with external drift*), mely kifejezetten megkívánja a segédinformációk teljes térbeli lefedettségét, ugyanakkor a segédinformációk mennyiségével kapcsolatban rugalmasabb, mint a kokrigelés. Ez utóbbi abból a tényből fakad, hogy a nagyszámú segédinformáció „túlonyolítja” a direkt és a kereszt-variogramok modellezését, melyre számos további feltétel is vonatkozik (GOOVAERTS, 1997). Emellett a krigelés külső drifttel új szemszögből közelítette meg a talajtulajdonságok térbeli változékonyságát. Ahogy az a nevéből is következik, ez a módszer kezeli az adatok átlagában megjelenő szisztematikus változást – vagyis a trendet –, mely a rendelkezésre álló segédinformációk révén modellezhető. A térbeli becslés feltétele a lineáris kapcsolat a becsléni kívánt tulajdonság és a segédinformációk között, melynek együtthatóit implicit becsli a krigelési rendszeren keresztül (GOOVAERTS, 1997). Habár a gyakorlatban jelentősen több segédinformációt szimultán kezel, mint a kokrigelés, azonban a nagyszámú segédinformáció ellehetetlenítheti a mátrix számításokat (HENGL, 2009). Ezenfelül a segédinformációk térbeli értékeiben megjelenő ugrászerű változások a krigelési rendszer instabilitását okozzák (GOOVAERTS, 1997). Az 1990-es évek közepe óta igen széles körben alkalmazzák a digitális talajtérképezésben (például: GOOVAERTS, 1997, 1999b; BOURENNANE & KING, 2003; BAXTER & OLIVER, 2005).

A krigelés külső drifttel módszer mellett – szinte vele egy időben – másik perspektívaként jelent meg a regresszió krigelés (*regression kriging*), mely az előzőhöz hasonlóan kezeli a trendet, ugyanakkor a trendmentesítést a priori végzi el (ODEH et al., 1994, 1995). A trendmentesítés szintén az adott talajtulajdonság és a rendelkezésre álló segédinformációk közötti kapcsolat számszerűsítésén alapszik, de nem feltétel a lineáris kapcsolat, továbbá a segédinformációk térbeli értékeiben megje-

lenő ugrásszerű változások is megengedettek (HENGL, 2009). Ez utóbbi előnye miatt a 2000-es évektől kezdődően a regresszió krigelés igen elfogadott és gyakran alkalmazott módszer a digitális talajtérképezésben. A segédinformációk köre – mint a digitális domborzatmodell és a belőle származtatott morfológiai paraméterek, illetve a távérzékeléssel nyert képinformációk – tovább bővült kategória típusú változókkal, mint például a földtani, területhasználati, illetve az archív talajtérképek. A kezdetben alkalmazott többszörös lineáris regressziók mellett megjelentek a GLM (*generalized linear model*) és GAM (*generalized additive model*) módszerek a trend leválasztásra (HENGL, 2009; POGGIO et al., 2010, 2013; KEMPEN, 2011). A regresszió krigelés mind a hazai, mind a nemzetközi digitális talajtérképezésben elfogadott és az utóbbi években gyakran alkalmazott módszer (például: HENGL et al., 2004, 2007; SIMBAHAN et al., 2006; MINASNY & MCBRATNEY, 2007; DOBOS et al., 2007; MINASNY et al., 2011; SZATMÁRI et al., 2013, 2015a,b; HEUVELINK, 2014; PÁSZTOR et al., 2014, 2015, 2016). Fontos megjegyezni, hogy napjainkban a trendleválasztásra sokszor nagyobb hangsúly helyeződik, mint a visszamaradó reziduuumok sztochasztikus modellezésre. Saját tapasztalat, hogy a talajtulajdonságok és a segédinformációk közötti kapcsolat erőssége – melyet az illesztett trend R^2 értékével jellemzünk – rendkívül széles skálán változhat. Ennek hátterében számos tényező szerepel, melyek hatását SZATMÁRI és munkatársai (2013), illetve TAKÁCS és munkatársai (2015) vizsgálták. Digitális talajtérképezési munkáik során a leggyengébb kapcsolat $R^2 \approx 11\%$ -nak (SZATMÁRI et al., 2013), míg a legerősebb kapcsolat $R^2 \approx 81\%$ -nak (SZATMÁRI et al., 2015a) adódott. Alacsony R^2 érték mellett az adott talajtulajdonság térbeli változékonyságának fennmaradó, döntő nagyságú részét mindenképpen geostatistikai megközelítéssel kell modellezniük, ezért tapasztalataik szerint ez utóbbi legalább annyira fontos, mint maga a trendmodellezés.

Az utóbbi években erőteljesen megnövekedett az igény a talajtérképek megbízhatóságát számszerűsítő információk iránt (például: GlobalSoilMap.net), melyek számos további felhasználásban kapnak fontos szerepet (HEUVELINK, 2014). Ezzel kapcsolatban két fő – geostatistikai alapon nyugvó – megközelítéssel találkozhatunk a digitális talajtérképezésben: (1) a krigelési variancia alkalmazása a konfidencia intervallum származtatásához (HEUVELINK, 2014; KEMPEN et al., 2014; PÁSZTOR et al., 2016), illetve (2) sztochasztikus szimulációk alkalmazása a térbeli bizonytalanság modellezésére (POGGIO et al., 2013; POGGIO & GIMONA, 2014; SZATMÁRI et al., 2015a). A krigelési variancia számítása a „krigelés” alapvető része. Ismeretében egyszerűen számolható például a 95%-os konfidencia intervallum (HEUVELINK, 2014). Ugyanakkor csakis szigorú feltételek teljesülése esetén használható a lokális bizonytalanság jellemzésére, melyek a gyakorlatban többnyire nem adóttak (JOURNAL, 1986; JOURNAL & ROSSI, 1989; GOOVAERTS, 1997), ezért általában véve a geostatistika nem tekinti a krigelési varianciát a lokális becslési pontosság mértékének (JOURNAL, 1986; JOURNAL & ROSSI, 1989; GEIGER, 2006a). A krigeléssel szemben a sztochasztikus szimulációk célja olyan alternatív, de egyenlően valószínű realizációk létrehozása, melyek visszaadják a modell statisztikákat, mint az adatok hisztogramját, illetve variogramját (GOOVAERTS, 1997; DEUTSCH & JOURNAL, 1998; GEIGER, 2006b, 2012).

A szimulációk során kapott realizációk összessége a térbeli bizonytalanság modellje (GOOVAERTS, 1997; GEIGER, 2006b, 2012). A kapott realizációk alapján minden egyes gridpontra modellezhető annak gyakorisági eloszlása, mely segítségével (1): képezhető a várható érték és a hozzá tartozó konfidencia intervallum, ahol is ezen intervallum szélessége jelenti a várható érték becslésének bizonytalanságát; illetve (2): olyan „lekérdezésére” is lehetőség nyílik, mint például mi annak a valószínűsége, hogy egy adott értéknél kisebb egy talajtulajdonság értéke a teljes területre vonatkozóan (GEIGER, 2006b, 2012; SZATMÁRI et al., 2015a). Ez utóbbi szerepe a környezetvédelmi gyakorlatban (például a szennyezett területek lehatárolásában) igen meghatározó (GOOVAERTS, 1997, 1999a, 2001).

Néhány gondolat a térinformatikai szoftverekbe épített geostatistikai eszközökről

A rohamosan fejlődő térinformatikai szoftverek és a bővülő eszköztárak egyértelműen pozitív hatással voltak és vannak, mind a talajterképezésre, mind pedig a tágabb értelemben vett talajtani kutatásokra (OLIVER & WEBSTER, 2014, 2015). A piaci forgalomban lévő, illetve a nyílt forráskódú térinformatikai szoftverek geostatistikai vizsgálatokra való alkalmazhatóságát HENGL (2009) foglalja össze. GOOVAERTS (2009) specifikusan mutatja be a geostatistikai szoftvereket, ahol is a térinformatikai kapcsolódás csak másodrendű szempont. Munkájuk alapján elmondható, hogy a legtöbb geostatistikai módszer napjainkban már könnyen – akár nyílt forráskódú térinformatikai szoftverek révén – elérhető a felhasználó számára, aki „barátságos” grafikus felhasználó felületen (GUI) keresztül képes komplex geostatistikai alapú modellalkotásra. Utóbbi nagyban kedvezett a geostatistika szélesebb körben való elterjedésének (OLIVER & WEBSTER, 2014, 2015); ugyanakkor számos kérdés is felmerül ezzel kapcsolatban.

Elsőként említhető az a tény, hogy a felhasználóbarát panelek nem kívánják meg a mögöttes koncepciók ismeretét, mely félreértelmezésekhez, illetve hibás következtetésekre vezethet. A geostatistika talajterképezési alkalmazásának kezdetén a felhasználó legtöbbször saját maga programozta le az adott krigelési algoritmust, mely egyrészt megkívánta a programozásban való jártasságot, illetve az algoritmus mögött álló koncepciók teljes körű ismeretét (OLIVER & WEBSTER, 2014, 2015; WEBSTER, 2015). Napjainkban ezek a felhasználóbarát panelek – a mögöttes információ-tartalom nélkül – ún. fekete dobozként jelennek meg a geostatistikában kevésbé jártas felhasználó előtt, mely téves eszközök megválasztásához és beállításához vezethet. Ugyanakkor az egyes eszköztárak alap (*default*) beállításai nem feltétlenül vezetnek az adott probléma optimális megoldásához (OLIVER & WEBSTER, 2015; WEBSTER, 2015). Ezek hatása kritikus lehet a modell alapján meghozott szakmai döntésre. Azonban mára már sok térinformatikai szoftver igen jól kidolgozott támogatási rendszerrel (ún. súgókkal) rendelkezik, mely akár leegyszerűsített példákon keresztül végigvezeti a felhasználót a modellezés bizonyos lépéseiben.

További kérdésként merülhet fel a felhasználó részéről, hogy az adott térinformatikai környezetben megjelenő geostatistikai eszköztár mennyiben is tekinthető „szavahihetőnek”; ahol szavahihetőnek tekintjük azon – előre programozott – eszközöket, melyek mögött ténylegesen azon algoritmusok állnak, melyek megtalálhatók számos ismert szakkönyv oldalain. Ennek szintén kritikus szerepe lehet a modell eredményeinek értelmezésében és a szakmai döntések meghozatalában. Mi is tapasztaltuk ennek hatásait, mikor egy mintaterületen kívántuk alkalmazni a térinformatikai szoftver „regresszió krigelés” modulját a szervesanyag-tartalom térbeli modellezésére. A modul olyan „egyszerűsített” algoritmust alkalmazott, mely nem volt összeegyeztethető a regresszió krigelés eredeti algoritmusával. Ennek következtében a becslések eltértek a tényleges algoritmustól várt becslésektől (habár ez nagy hangsúllyal nem jelent meg az eredménytérképen). Emellett a modullal számolt regresszió krigelés becslési varianciája egyértelműen hibás volt, melyből felismerhető volt a modul inkompetenciája. Ezek a problémák könnyen elkerülhetők, ha a vizsgálat kezdete előtt tájékozódunk az adott eszköztárról, de legjobb talán, ha már jól megismert adatsoron teszteljük az adott eszköztárat. Az utóbbihoz szorosan kapcsolódó probléma, hogy bizonyos térinformatikai eszköztárak olyan opciókat is felajánlanak, melyeket a geostatistika nem „ismer”. Munkánk során talákoztunk olyan térinformatikai szoftverbe épített variogram modellező eszköztárral, melyben a választható variogram modell típusok többsége nem felelt meg a követelményeknek (lásd: GOOVAERTS, 1997; DEUTSCH & JOURNAL, 1998; WEBSTER & OLIVER, 2007). Ezen variogramok nem megengedettek, ezért használatuk hibás eredményre vezet.

Fontos kihangsúlyoznunk, hogy nem kívánjuk negatív képben feltüntetni a térinformatikai szoftvereket, hisz tagadhatatlanul hasznos eszköztárakkal rendelkeznek a geostatistikai alapú modellezések területén és nagyban megkönnyítik a talajtanos szakemberek munkáját. Inkább csak arra szeretnénk volna felhívni a figyelmet, hogy milyen problémákkal is találkozhatunk térinformatikai környezetben megvalósított geostatistikai modellezés kapcsán, melyhez saját tapasztalatainkat használtuk fel.

Összefoglalás

Az 1980-as évek elejétől kezdődően a geostatistikai módszerek és a regionalizált változók elmélete egyre szélesebb körben került felhasználásra a talajtérképezésben, illetve a tágabb értelemben vett talajtani kutatásokban. Ez annak tulajdonítható, hogy a talaj ideális médium a geostatistika megközelítéseire, mely a talajtanos szakemberek részéről számos elméleti, illetve gyakorlati fejlesztést eredményezett, mint például a nem normál eloszlások kezelhetősége, a nem stacionárius valószínűségi függvények, illetve a lokális és térbeli bizonytalanság értékelése. A talajtérképezés szemlélete és gyakorlata drasztikusan megváltozott a geostatistikának köszönhetően, hisz számos talajtulajdonság térbeli változékonysága mutat folytonosságot a térben (és időben egyaránt), mely a geostatistika megközelítéseivel sikeresen modellezhető. Napjaink digitális talajtérképezése nagymértékben

támaszkodik a geostatistika nyújtotta lehetőségekre, melyre számos hazai és nemzetközi példát találunk.

Dolgozatunk legfőbb célja az volt, hogy bemutassuk, miként is változott a talajterképezés szemlélete és gyakorlata az 1980-as évektől egészen napjainkig illetve, hogy miként is adaptálták a geostatistikai megfontolásokat és a regionalizált változók elméletét a talajterképezésben, illetve a tágabb értelemben vett talajtani kutatásokban. Emellett bemutattuk a térinformatikai szoftverek potenciálját a geostatistikai elemzésekben és a talajtulajdonságok digitális térképezésében. Ugyanakkor rámutattunk arra is, hogy a térinformatikai eszköztárak nem megfelelő használata téves eredményre és következtetésre vezethet, melynek oka lehet a mögöttes koncepciók ismeretének a hiánya, illetve bizonyos félreértelmezések. Ezért munkánkban bemutattunk néhány fontosabb fogalmat (például: a stacionaritást), mely elengedhetetlen kelléke a geostatistikai modellalkotásnak, ugyanakkor számos félreértelmezés okozója is. Továbbá rávilágítottunk a feltáró variográfia szerepére, illetve az azt kiegészítő szakmai ismeretek fontosságára, melyek segítségével a geostatistika hasznos eszköze lesz a talajban lejátszódó jelenségek térbeli modellezésének és megértésének.

Munkánkat a K105167 OTKA pályázat támogatta.

Kulcsszavak: geostatistika, talajterképezés, variogram, stacionaritás, regionalizált változó

Irodalom

- BAXTER, S. J. & OLIVER, M. A., 2005. The spatial prediction of soil mineral N and potentially available N using elevation. *Geoderma*. **128**. 325–339.
- BÁRDOSSY, GY., 2006. Geologic and geostatistical evaluation of spatial variability. *Acta Geologica Hungarica*. **49**. 89–101.
- BOURENNANE, H. & KING, D., 2003. Using multiple external drifts to estimate a soil variable. *Geoderma*. **114**. 1–18.
- BOURENNANE, H., DÉRE, CH., LAMY, I., CORNU, S., BAIZE, D., VAN OORT, F. & KING, D., 2006. Enhancing spatial estimates of metal pollutants in raw wastewater irrigated fields using a topsoil organic carbon map predicted from aerial photograph. *Science of the Total Environment*. **361**. 229–248.
- BURGESS, T. M. & WEBSTER, R., 1980a. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. *Journal of Soil Science*. **31**. 315–331.
- BURGESS, T. M. & WEBSTER, R., 1980b. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. II. Block kriging. *Journal of Soil Science*. **31**. 333–341.
- CRESSIE, N., 1990. The origins of kriging. *Mathematical Geology*. **22**. 239–252.
- CRESSIE, N., 1993. *Statistics for Spatial Data* (Revised Ed.). John Wiley and Sons, Inc. New York.
- CSILLAG, F. & KERTÉSZ, M., 1989. Spatial variability: Error in natural resource maps? *Agrokémia és Talajtan*. **38**. 715–726.

- CSILLAG, F., KERTÉSZ, M. & KUMMERT, Á., 1996. Sampling and mapping of heterogeneous surfaces: Multi-resolution tiling adjusted to spatial variability. *Geographical Information Systems*. **10**. 851–875.
- CSILLAG, F., KUMMERT, Á. & KERTÉSZ, M., 1992. Resolution, accuracy and attributes: Approaches for environmental geographical information systems. *Computers, Environment and Urban Systems*. **16**. 289–297.
- DEUTSCH, C. V. & JOURNAL, A. G., 1998. *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford University Press. New York.
- DOBAI A., HOLNDONNER P. & DOBOS E., 2012. Egy digitális talajtérképezési módszertan bemutatása meglévő adatbázisok felhasználásával egy választott mintaterületen. In: *Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában III.* (Ed.: LÓKI J.) 135–142. Debreceni Egyetemi Kiadó. Debrecen.
- DOBOS, E., CARRÉ, F., HENGL, T., REUTER, H.I. & TÓTH, G., 2006. *Digital Soil Mapping as a support to production of functional maps*. Office for Official Publications of the European Communities. Luxembourg.
- DOBOS, E., MICHELL, E. & MONTANARELLA, L., 2007. The population of a 500-m resolution soil organic matter spatial information system for Hungary. In: *Digital Soil Mapping: An Introductory Perspective* (Eds.: LAGACHERIE, P., MCBRATNEY, A. B. & VOLTZ, M.) 487–495. Elsevier. Amsterdam.
- FARKAS, CS., RAJKAI, K., KERTÉSZ, M., BAKACSI, ZS. & MEIRVENNE, M., 2008. Spatial variability of soil hydro-physical properties: A case study in Herceghalom, Hungary. In: *Soil Geography and Geostatistics: Concepts and Applications* (Eds.: KRASILNIKOV, P., CARRÉ, F. & MONTANARELLA, L.) 107–128. Office for Official Publications of the European Communities. Luxembourg.
- FÜST, A., 1981. *Bányászati geometriai és geostatistikai összefoglaló (tanszéki segédlet)*. NME kiadvány. Miskolc.
- FÜST, A. & GEIGER, J., 2010. Monitoringtervezés és –értékelés geostatistikai módszerekkel I.: Szakértői véleményen alapuló, „igazolós” mintázás geostatistikai támogatása. *Földtani Közöny*. **140**. 303–312.
- GANDIN, L.S., 1965. *Objective Analysis of Meteorological Fields* (Translated from the Russian). Israel Program for Scientific Translations. Jerusalem.
- GEIGER, J., 2006a. *Geostatistika (kézirat)*. Szegedi Tudományegyetem Földtani és Őslénytani Tanszék. Szeged.
- GEIGER, J., 2006b. Szekvenciális gaussi szimuláció az övzónytestek kisléptékű heterogenitásának modellezésében. *Földtani Közöny*. **136**. 527–546.
- GEIGER, J., 2007. *Geomatematika*. JATEPress. Szeged.
- GEIGER, J., 2012. Some thoughts on the pre- and post-processing in sequential gaussian simulation and their effects on reservoir characterization. In: *New Horizons in Central European Geomathematics, Geostatistics and Geoinformatics* (Eds.: GEIGER, J., PÁL-MOLNÁR, E. & MALVIC, T.) 17–34. GeoLitera. Szeged.
- GOOVAERTS, P., 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press. New York.
- GOOVAERTS, P., 1999a. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma*. **89**. 1–45.
- GOOVAERTS, P., 1999b. Using elevation to aid the geostatistical mapping of rainfall erosivity. *Catena*. **34**. 227–242.

- GOOVAERTS, P., 2001. Geostatistical modelling of uncertainty in soil science. *Geoderma*. **103**. 3–26.
- GOOVAERTS, P., 2009. Geostatistical Software. In: *Handbook of Applied Spatial Analysis: Software Tools, Methods and Applications* (Eds.: FISHER, M. M. & GETIS, A.) 125–134. Springer. Berlin.
- GRINGARTEN, E. & DEUTSCH, C. V., 2001. Teacher's aide: Variogram interpretation and modeling. *Mathematical Geology*. **33**. 507–534.
- HÄGERSTRAND, T., 1965. A Monte Carlo approach to diffusion. *Européenes de Sociologie*. **6**. 43–67.
- HENGL, T., 2003. Pedometric mapping: Bridging the gaps between conventional and pedometric approaches (Ph.D. Thesis). Wageningen University. Wageningen.
- HENGL, T., 2009. *A Practical Guide to Geostatistical Mapping* (2nd Ed.). University of Amsterdam. Amsterdam.
- HENGL, T., HEUVELINK, G. B. M. & ROSSITER, D. G., 2007. About regression-kriging: From equations to case studies. *Computers & Geosciences*. **33**. 1301–1315.
- HENGL, T., HEUVELINK, G. B. M. & STEIN, A., 2004. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma*. **120**. 75–93.
- HEUVELINK, G. B. M., 2014. Uncertainty quantification of GlobalSoilMap products. In: *GlobalSoilMap: Basis of the Global Spatial Soil Information System* (Eds.: ARROUAYS, D., MCKENZIE, N., HEMPEL, J., RICHER DE FORGES, A. & MCBRATNEY, A. B.) 335–340. Taylor & Francis Group. London.
- HEUVELINK, G. B. M. & WEBSTER, R., 2001. Modelling soil variation: past, present, and future. *Geoderma*. **100**. 269–301.
- ILLÉS G., KOVÁCS G. & HEIL B., 2011. Nagyfelbontású digitális talajterképezés a Vaskereszt erdőrezervátumban. *Erdészettudományi Közlemények*. **1**. 29–43.
- ISAAKS, E. H. & SRIVASTAVA, R. M., 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press. New York.
- JENNY, H., 1941. *Factors of Soil Formation*. McGraw-Hill. New York.
- JOURNEL, A. G., 1986. Geostatistics: Models and tools for the earth sciences. *Mathematical Geology*. **18**. 119–140.
- JOURNEL, A. G. & HUIJBREGTS, CH. J., 1978. *Mining Geostatistics*. Academic Press. New York.
- JOURNEL, A. G. & ROSSI, M. E., 1989. When do we need a trend model in kriging? *Mathematical Geology*. **21**. 715–739.
- KEMPEN, B., 2011. Updating soil information with digital soil mapping (Ph.D. Thesis). Wageningen University. Wageningen.
- KEMPEN, B., HEUVELINK, G. B. M., BRUS, D. J. & WALVOORT, D. J. J., 2014. Towards GlobalSoilMap.net products for The Netherlands. In: *GlobalSoilMap: Basis of the Global Spatial Soil Information System* (Eds.: ARROUAYS, D., MCKENZIE, N., HEMPEL, J., RICHER DE FORGES, A. & MCBRATNEY, A. B.) 85–90. Taylor & Francis Group. London.
- KOHÁN, B. & SZALAI, J., 2014. Spatial analysis of groundwater level monitoring network in the Danube-Tisza Interfluvium using semivariograms. *Hungarian Geographical Bulletin*. **63**. 379–400.
- KRIGE, D. G., 1951. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa*. **52**. 119–139.

- KRIGE, D. G., 1960. On the departure of ore value distributions from the lognormal model in South African gold mines. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. **61**. 231–244.
- LARK, R. M., 2012. Towards soil geostatistics. *Spatial Statistics*. **1**. 92–99.
- MATÉRN, B., 1960. *Spatial Variation*. Reports of the Forest Research Institute of Sweden (Meddelanden från Statens Skogsforskningsinstitut). **49**.
- MATHERON, G., 1963. Principles of geostatistics. *Economic Geology*. **58**. 1246–1266.
- MATHERON, G., 1971. *The Theory of Regionalized Variables and Its Applications*. École Nationale Supérieure des Mines de Paris. Párizs.
- MCBRATNEY, A. B., ODEH, I. O. A., BISHOP, T. F. A., DUNBAR, M. S. & SHATAR, T. M., 2000. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma*. **97**. 293–327.
- MCBRATNEY, A. B., MENDONÇA-SANTOS, M. L. & MINASNY, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*. **117**. 3–52.
- MCBRATNEY, A. B. & WEBSTER, R., 1983. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties: V. Co-regionalization and multiple sampling strategy. *Journal of Soil Science*. **34**. 137–162.
- MEUL, M. & VAN MEIRVENNE, M., 2003. Kriging soil texture under different types of nonstationarity. *Geoderma*. **112**. 217–233.
- MINASNY, B. & MCBRATNEY, A. B., 2007. Spatial prediction of soil properties using EBLUP with the Matérn covariance function. *Geoderma*. **140**. 324–336.
- MINASNY, B., VRUGT, J. A. & MCBRATNEY, A. B., 2011. Confronting uncertainty in model-based geostatistics using Markov Chain Monte Carlo simulation. *Geoderma*. **163**. 150–162.
- MYERS, D. E., 1989. To be or not to be... Stationary? That is the question. *Mathematical Geology*. **21**. 347–362.
- NAGY I. & TAMÁS J., 2005. Cukorrépa (*Beta vulgaris* L.) termelési kvóták denzitásának optimalizálása pontszerű geostatistikai módszerekkel. *Agrártudományi Közlemények*. **18**. 46–50.
- ODEH, I. O. A., MCBRATNEY, A. B. & CHITTLEBOROUGH, D. J., 1994. Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model. *Geoderma*. **63**. 197–214.
- ODEH, I. O. A., MCBRATNEY, A. B. & CHITTLEBOROUGH, D. J., 1995. Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: heterotopic cokriging and regression-kriging. *Geoderma*. **67**. 215–226.
- OERTLI, J. J. & RAJKAI, K., 1988. Spatial variability of soil properties and plant coverage on alkali soils of the Hungarian Puszta. In: *Proc. of the International Symposium on Solonchak Soil: Problems, Properties, Utilization* (Eds.: ADAM, M., SZABOLCS, I., MILJKOVIC, N. & PLAMENAC, N.) 156–161. Yugoslav Society of Soil Science. Osijek.
- OLIVER, M. A. & WEBSTER, R., 2014. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *Catena*. **113**. 56–69.
- OLIVER, M. A. & WEBSTER, R., 2015. *Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging*. Springer. Cham.
- PANNATIER, Y., 1996. *Variowin: Software for Spatial Data Analysis in 2D*. Springer. New York.

- PÁSZTOR L., BAKACSI ZS., LABORCZI A. & SZABÓ J., 2013. Kategória típusú talajterképek térbeli felbontásának javítása kiegészítő talajtani adatok és adatbányászati módszerek segítségével. *Agrokémia és Talajtan*. **62**. 205–218.
- PÁSZTOR, L., LABORCZI, A., TAKÁCS, K., SZATMÁRI, G., DOBOS, E., ILLÉS, G., BAKACSI, ZS. & SZABÓ, J., 2015. Compilation of novel and renewed, goal oriented digital soil maps using geostatistical and data mining tools. *Hungarian Geographical Bulletin*. **64**. 49–64.
- PÁSZTOR, L., SZABÓ, J. & BAKACSI, ZS., 2010. Application of the Digital Kreybig Soil Information System for the delineation of naturally handicapped areas in Hungary. *Agrokémia és Talajtan*. **59**. 47–56.
- PÁSZTOR, L., SZABÓ, J., BAKACSI, ZS., LABORCZI, A., DOBOS, E., ILLÉS, G. & SZATMÁRI, G., 2014. Elaboration of novel, countrywide maps for the satisfaction of recent demands on spatial, soil related information in Hungary. In: *Global-SoilMap: Basis of the Global Spatial Soil Information System* (Eds.: ARROUAYS, D., MCKENZIE, N., HEMPEL, J., RICHER DE FORGES, A. & MCBRATNEY, A. B.) 207–212. Taylor & Francis Group. London.
- PÁSZTOR, L., SZABÓ, K. ZS., SZATMÁRI, G., LABORCZI, A. & HORVÁTH, Á., 2016. Mapping geogenic radon potential by regression kriging. *Science of the Total Environment*. **12**. 883–891.
- POGGIO, L. & GIMONA, A., 2014. National scale 3D modelling of soil organic carbon stocks with uncertainty propagation – An example from Scotland. *Geoderma*. **232–234**. 284–299.
- POGGIO, L., GIMONA, A. & BREWER, M., 2013. Regional scale mapping of soil properties and their uncertainty with a large number of satellite-derived covariates. *Geoderma*. **209–210**. 1–14.
- POGGIO, L., GIMONA, A., BROWN, I. & CASTELLAZZI, M., 2010. Soil available water capacity interpolation and spatial uncertainty modelling at multiple geographical extents. *Geoderma*. **160**. 175–188.
- PYRCZ, M. J. & DEUTSCH, C.V., 2014. *Geostatistical Reservoir Modeling*. Oxford University Press. New York.
- RAJKAI, K., 2001. Modellezés és modellhasználat a talajtani kutatásban (Szemle). *Agrokémia és Talajtan*. **50**. 469–508.
- RAJKAI, K., MARCHAND, D. & OERTLI, J. J., 1988. Study of the Spatial Variability of Soil properties on Alkali Soils. In: *Proc. of the International Symposium on Solonetz Soil: Problems, Properties, Utilization* (Eds.: ADAM, M., SZABOLCS, I., MILJKOVIC, N. & PLAMENAC, N.) 150–155. Yugoslav Society of Soil Science. Osijek.
- RAKONCZAI, J. & FEHÉR, ZS., 2015. A klímaváltozás szerepe az Alföld talajvíz-készleteinek időbeli változásaiban. *Hidrológiai Közlemények*. **95**. 1–15.
- ROSSI, M. E. & DEUTSCH, C. V., 2014. *Mineral Resource Estimation*. Springer. Dordrecht.
- SIMBAHAN, G. C., DOBERMANN, A., GOOVAERTS, P., PING, J. & HADDIX, M. L., 2006. Fine-resolution mapping of soil organic carbon based on multivariate secondary data. *Geoderma*. **132**. 471–489.

- SZALÓKI A. & SOMODI ZS., 2014. Talajok nehézfém-tartalmának heterogenitás-vizsgálata geostatistikai módszerek segítségével. In: Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában V. (Ed.: BALÁZS, B.) 359–368. Debreceni Egyetemi Kiadó. Debrecen.
- SZATMÁRI G. & BARTA K., 2013. Csernozjom talajok szervesanyag-tartalmának digitális térképezése erózióval veszélyeztetett mezőföldi területen. *Agrokémia és Talajtan*. **62**. 47–60.
- SZATMÁRI G., BARTA K., FARSANG, A. & PÁSZTOR, L., 2015a. Testing a sequential stochastic simulation method based on regression kriging in a catchment area in Southern Hungary. *Geologia Croatica*. **68**. 273–283.
- SZATMÁRI G., BARTA K. & PÁSZTOR L., 2015b. An application of a spatial simulated annealing sampling optimization algorithm to support digital soil mapping. *Hungarian Geographical Bulletin*. **64**. 35–48.
- SZATMÁRI G., LABORCZI A., ILLÉS G. & PÁSZTOR L., 2013. A talajok szervesanyag-készletének nagyléptékű térképezése regresszió krigeléssel Zala megye példáján. *Agrokémia és Talajtan*. **62**. 219–234.
- TAKÁCS K., LABORCZI A., BAKACSI ZS., SZABÓ J. & PÁSZTOR L., 2015. Domborzatmodellek és űrfelvételek szerepe a digitális talajtérképezésben – országos termőréteg vastagság térképezés. In: Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában VI. (Ed.: BODA J.) 413–420. Debreceni Egyetemi Kiadó. Debrecen.
- TAMÁS, J., 2001. Precíziós mezőgazdaság. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó. Budapest.
- TOBLER, W. R., 1970. A computer movie simulating urban growth in the Detroit Region. *Economic Geography*. **46**. 234–240.
- TÓTH, T. & KERTÉSZ, M., 1996. Application of soil-vegetation correlation to optimal resolution mapping of solonchak rangeland. *Arid Soil Research and Rehabilitation*. **10**. 1–12.
- TÓTH, T. & VÁRALLYAY, GY., 2001. Egy mintaterület talajának variabilitása a sófelhalmozódás tényezői szerint. *Agrokémia és Talajtan*. **50**. 19–34.
- WEBSTER, R., 1989. Recent achievements in geostatistical analysis of soil. *Agrokémia és Talajtan*. **38**. 519–536.
- WEBSTER, R., 1994. The development of pedometrics. *Geoderma*. **62**. 1–15.
- WEBSTER, R., 2000. Is soil variation random? *Geoderma*. **97**. 149–163.
- WEBSTER, R., 2015. Technological developments for spatial prediction of soil properties, and Danie Krige's influence on it. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. **115**. 165–172.
- WEBSTER, R. & BECKETT, P. H. T., 1970. Terrain classification and evaluation using air photography: a review of recent work at Oxford. *Photogrammetria*. **26**. 51–75.
- WEBSTER, R. & BURGESS, T. M., 1980. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. III. Changing drift and universal kriging. *Journal of Soil Science*. **31**. 505–524.
- WEBSTER, R. & CUANALO DE LA C., H. E., 1975. Soil transect correlograms of north Oxfordshire and their interpretation. *Journal of Soil Science*. **26**. 176–194.
- WEBSTER, R. & LARK, R. M., 2013. *Field Sampling for Environmental Science and Management*. Routledge Taylor & Francis Group. London.

WEBSTER, R. & OLIVER, M. A., 2007. Geostatistics for Environmental Scientists (2nd Ed.). John Wiley and Sons, Ltd. Chichester.

Érkezett: 2016. március 10.

Geostatistics in soil mapping – A review

G. SZATMÁRI and L. PÁSZTOR

Institute for Soil Sciences and Agricultural Chemistry, Centre for Agricultural Research,
Hungarian Academy of Sciences, Budapest

Summary

Geostatistical approaches and the underlying theory of regionalized variables have been increasingly used in general soil science and (digital) soil mapping since the beginning of the 1980s. This can be attributed to the fact that soil is an ideal medium for practical geostatistics, which additionally has yielded many developments, reconsiderations and revisions from soil scientists addressed to theoretical and practical issues, such as non-stationarity, non-normality and the assessment of local and spatial uncertainty. The approach and practice of soil mapping have been drastically changed thanks to geostatistics, since many soil properties show a continuum in space (as well in time), which can be more properly modelled by geostatistics than by areal maps with discrete boundaries of soil classes. Nowadays digital soil mapping has been widely supported by geostatistics, as demonstrated by the extensive literature both internationally and in Hungary. The main aim of this study was to show how the approach and practice of soil mapping have changed since the 1980s, and how geostatistical considerations and the theory of regionalized variables have been successfully adopted in general soil science and in soil mapping. Additionally, it is shown how GIS (geographic information system) software products are able to support the geostatistical analysis and mapping of soil properties. On the other hand, it is pointed out that GIS tools have some limitations, which can lead to inappropriate results and decisions due to incomplete knowledge and/or misunderstandings. Some important notions (e.g. stationarity) are introduced, which are indispensable to geostatistical modelling but which commonly cause misunderstandings. Furthermore, the role of exploratory variography in the modelling process has been highlighted and the importance of expert knowledge in this field, which help to make geostatistics an appropriate tool for modelling and understanding the spatial (or even spatiotemporal) variability of soils.

This work was funded by the Hungarian National Scientific Research Fund (OTKA, Grant No. K105167).