

Zbijenost tala vinograda različite starosti u Panonskoj Hrvatskoj. II dio. Modeliranje prostorne raspodjele čimbenika zbijenosti tala u vinogradu

Soil Compaction in different ages vineyards in Pannonian Croatia. Part II. Modeling spatial variability of soil compaction parameters in vineyard

Igor BOGUNOVIC^{1*}, Ivica KISIC¹, Edi MALETIC², Aleksandra JURISIC¹, Luka ROSKAR³ and Igor DEKEMATI³

¹Zavod za opću proizvodnju bilja, Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Svetošimunska 25, 10000 Zagreb, Hrvatska

²Zavod za vinogradarstvo i vinarstvo, Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Svetošimunska 25, 10000 Zagreb, Hrvatska

³Student Ms studija, Agronomski fakultet Zagreb, Sveučilište u Zagrebu

*correspondence: ibogunovic@agr.hr

Abstract

Geostatistical modeling with different interpolation methods represents progress in describing and monitoring the spatial variability of soil properties. By choosing the proper interpolation method it is possible to produce distribution maps of investigated soil properties which are characterized by significant accuracy, and thus reduced required number of samples for the soil description and determination. On the example of determined soil penetration resistance and collected undisturbed soil samples from thirty years and seven years vineyards, and with geostatistical data analysis followed by comparison of interpolation models, spatial maps of soil resistance, bulk density and soil moisture are produced. This paper presents the applicability of GIS for characterization the spatial variation of soil resistance, bulk density and soil moisture based on 72 undisturbed samples collected at three depths (0-10 cm, 11-20 cm and 21-30 cm) and 177 measured soil penetration resistance in each of the studied vineyards located in central Croatia. The study points to the usefulness of geostatistical techniques analysis of spatial distribution of some physical soil properties. The results provided in graphical form and their associated variance, indicating the possibility of using geostatistical analysis for the sustainable management of soils in the vineyards and plans for soil conservation in the study area.

Keywords: Mapping, Soil compaction, Soil resistance, Spatial variability, Vineyard

Sažetak

Modeliranje geostatističkim interpolacijskim metodama predstavlja napredak u opisivanju i praćenju prostorne varijabilnosti svojstava tla. Pravilnim odabirom interpolacijskih metoda možemo proizvesti karte rasprostranjenosti istraživanih čimbenika koje su značajne točnosti, te na taj način smanjiti potreban broj uzoraka za opisivanje i determinaciju nekog tla. Na primjeru izmjerenih otpora tla i prikupljenih neporušenih uzoraka iz tridesetogodišnjeg i sedmogodišnjeg vinograda, geostatističkom obradom podataka i usporedbom interpolacijskih modela izrađene su prostorne karte za otpore tla, volumnu gustoću i trenutačnu vlažnost. U radu se prikazuje primjenjivost GIS-a za karakterizaciju prostornih varijacija otpora tla, volumne gustoće i trenutačne vlage tla na bazi 72 neporušena uzorka prikupljenih na tri dubine (0-10 cm, 11-20 cm i 21-30 cm) i 177 izmjerenih otpora tla u svakom od istraživanih vinograda smještenih u središnjoj Hrvatskoj. Istraživanje ukazuje na korisnost geostatističkih tehnika analiza prostornih distribucija pojedinih fizikalnih svojstava tla. Dobiveni rezultati u grafičkom obliku i njihove pridružene varijance, ukazuju na mogućnost korištenja geostatističkih analiza za održivo upravljanje tlima u vinogradima i planovima za očuvanje tla u istraživanom području.

Ključne riječi: mapiranje, otpori tla, prostorna varijabilnost, vinograd, zbijenost

Detailed abstract

Around the globe millions of hectares of soil are disturbed by excessive soil compaction. Soil compaction is responsible for the soil degradation on all continents, due to the changed physical characteristics that resulted in reduced soil fertility. Vineyards are no exception where many machinery traffic between rows (in order to the implement agricultural practices) lead to surface and subsoil compaction. For this reason GIS and achievements of geostatistical analysis is being increasingly used in order to understand the spatial variability of some soil characteristics, and to help to identify spatial zones with some form of soil degradation. Geostatistical modeling with different interpolation methods represents progress in describing and monitoring the spatial variability of soil properties. By choosing the proper interpolation method it is possible to produce distribution maps of investigated soil properties which are characterized by significant accuracy, and thus reduced required number of samples for the soil description and determination. For the purposes of this paper researches were conducted at seven-thirty and vineyard near Zagreb, in central Croatia. In each vineyard research included measurements of soil penetrometer resistance up to 80 cm deep in 177 repetitions, and 72 samples collected in metal cylinders from soil layers 0-10 cm, 11-20 cm and 21-30 cm, respectively, for determination of bulk density and soil moisture. The sampling locations are determined by a high precision GPS device for later geostatistical analysis. The results showed that the average soil resistances are ranged from 1.22 MPa to 1.74 MPa at thirty years vineyards, depending on the observed soil layer, and from 0.62 MPa to 1.48 MPa at seven

years vineyard. The average values of bulk density are in the range of 1.47 g cm^{-3} to 1.60 g cm^{-3} , depending on the vineyard. Bulk density values increased with soil depth. Thirty years and seven year vineyards recorded moderate variability of soil resistance at investigated depths. Bulk density values indicate low variability in both vineyards, while the observed variability of the soil moisture at thirty years vineyard is moderate and in seven years vineyard is moderate in the surface layer and low variable in the surface layer. Appropriate best-fit semivariograms for investigated parameters are mostly in Stable form under thirty years vineyard while on the seven-year vineyards most parameters are best described by Gaussian and Stable form. Ranges of semivariance indicates adequate sampling scheme for describing the spatial variation pattern of soil resistance and bulk density. Soil moisture in the surface layer at thirty years vineyard recorded pure nugget effect and, therefore, in future studies it is necessary to collect a larger number of samples or to apply different forms of interpolation methods. Compared interpolation recorded similar root mean square error (RMSE) values. It can be concluded that none interpolation method cannot provide permanent maps of investigated factors. The most of investigated factors is described with Radial Basis Function (RBF), followed by Local Polynomial and Kriging methods. From the RBF interpolators in most cases as the best is proved to be Inverse Multiquadratic. Generated maps of soil resistance and bulk density can be helpful in further soil use in the vineyard and for soil conservation in investigated area.

Uvod

Degradacija tla je problem star kao i sama poljoprivreda, a njen utjecaj na proizvodnju hrane i okoliš postaje ozbiljniji nego ikad prije zbog obujma i intenziteta degradacijskih procesa (Durán Zuazo i Rodríguez Pleguezuelo, 2008). Procjena je da diljem svijeta 68 milijuna hektara tla degradirano zbijanjem uslijed prolaska mehanizacijom. Zbijenost tala odgovorna je za degradaciju tla u Europi (33 milijuna ha), Africi (18 milijuna ha), Aziji (10 milijuna ha), Australiji (4 milijuna ha), a i u nekim dijelovima Sjeverne Amerike (Flowers i Lal, 1998; Hamza i Anderson, 2003). Zbijenost tla je fizikalni oblik degradacije tla koji mijenja strukturu tla te utječe na plodnost tla (Mueller i sur., 2010). Za razliku od zadržavanja vode na površini tla ili erozije tla koja se može primijetiti s površine tla, zbijenost tla izaziva degradaciju strukture tla koje je teško locirati i racionalizirati (McGarry i Sharp 2003). Radi toga se u posljednja dva desetljeća sve više znanstvenika koristi dostignućima geostatističkih analiza radi shvaćanja prostorne varijabilnosti pojedinih karakteristika tla, te lakšeg identificiranja prostornih zona s nekim oblikom degradacije tala.

Prostorna varijabilnost je opće poznat fenomen tala a u okolini je prirodno uvjetovana geološkim, pedološkim procesima, klimatskim i reljefnim značajkama, no u zadnje vrijeme čovjek svojim utjecajem također mijenja pojedina svojstva tala. Za razliku od teksture i organske tvari koja imaju manju vremensku promjenu u tlu (Heege, 2013), čovjek agrotehničkim operacijama (rahljenje uslijed obrade, te ponovno zbijanje tijekom naknadnih operacija ili uslijed prirodnih faktora) mijenja pojedina fizikalna svojstva tala koja su podložna stalnim promjenama (Birkás et al., 2008). Posljednjih su desetljeća bolje istraživačke metode rezultirale većom svjesnosti o varijabilnosti fizikalnih svojstava tala unutar nekog područja, stoga postoji potreba da se istraži

prostorna varijabilnost fizikalnih svojstava tla preciznijim kvantifikacijskim tehnikama kako bi se oplemenili i podržali različiti načini korištenja poljoprivrednim zemljištem.

Geostatistika je često korištena za izražavanje prostornih obrasca varijabli okoliša (Webster i Oliver, 2007; Pereira i sur., 2013a,b; Bogunovic i sur., 2014). Uz ispravno primijenjeno uzorkovanje, interpolacijske tehnike omogućuju nam da otkrijemo vrijednosti pojedinih svojstva tala na neuzorkovanom području pomoću određenog broja uzoraka. Uvažavajući zakonitosti teorije regionalizirane varijable moguće je utvrditi potrebnu ovisnost između dva uzorkovana mjesta u prostoru, jer vrijednost varijable zavisi od mjesta uzorkovanja (Matheron, 1963; Journel i Huijbregts, 1978). Posljednjih godina znanstvenici su usmjereni na primjenu geostatistike i različitih interpolacijskih metoda da predvide svojstva neuzorkovanog tla, te da bolje razumiju prostorne varijabilnosti uzoraka u shemama različitih prostornih razmjera. Studije koje uspoređuju različite interpolacijske metode već su objavljivane (npr. Robinson i Metternicht, 2006; Xie i sur., 2011; Yasrebi i sur., 2009) ali su rezultati različiti i ovise o istraživanom čimbeniku, udaljenosti između mjesta uzorkovanja, transformaciji podataka i broju susjednih uzoraka prihvaćenim u postupku interpolacije.

Ovaj rad će ukazati na mogućnost primjene i usporedbe različitih interpolacijskih metoda radi točnijeg izražavanja prostorne varijabilnosti fizikalnih svojstava tla u tridesetogodišnjem i sedmogodišnjem vinogradu: otpora tla (PR), gustoće volumne (ρ_v) i momentalne vlažnosti (Mv) na temelju 354 mjerenja penetrometrom i 144 cilindara zapremnine 100 cm^3 prikupljenih u vinogradima u Zagrebu, u centralnoj Hrvatskoj.

Glavni ciljevi su utvrditi prostornu distribuciju otpora tla, volumne gustoće i vlage tla u tridesetogodišnjem i sedmogodišnjem vinogradu, analizirati i opisati obrazac prostornog variranja i usporediti točnost različitih interpolacijskih metoda.

Materijali i metode rada

Mjesto istraživanja, uzorkovanje i laboratorijske analize

Istraživanja su provedena u vinogradima pokušališta Jazbina Agronomskog fakulteta u Zagrebu na području kontinentalne Hrvatske ($45^\circ 51' \text{ S } 16^\circ 0' \text{ I}$, 258 m n.v.). Klima je umjerena kontinentalna s tridesetogodišnjim prosjekom (1961.-1990.) od 852 mm oborina i prosječnom godišnjom temperaturom od 10.3° C (DHMZ, mjerna stanica Maksimir, 5 km od mjesta istraživanja). Prije podizanja istraživanih vinograda provedeno je rigolanje i melioracijska gnojdba, te tanjuranje i ručno sađenje cijepova.

Mjerenja otpora tla i prikupljanje uzoraka tla u cilindrima obavljani su 2. travnja u tridesetogodišnjem vinogradu, te 20. svibnja 2014. godine u sedmogodišnjem vinogradu. Mjerna područja određena su s prethodno određenih koordinata (slika 1). Precizno pozicioniranje u prostoru je provedeno GIS uređajem GeoExplorer GeoXH 6000, s točnošću pozicioniranja $\pm 10 \text{ cm}$. Za provedbu mjerenja otpora tla korišten je Eijkelkamp penetrologer koji kontinuirano mjeri otpore do 80 cm dubine. Podaci o otporima grupirani su u slojeve od 10 cm (0-10, 11-20, 21-30 i 31-40 cm) i izraženi kao srednja vrijednost. Uzorci tla u svakom vinogradu prikupljeni su u neporušenom stanju ($n=72$) u metalnim cilindrima zapremnine 100 cm^3 s tri dubine 0-10, 11-20 i 21-30 cm. Trenutačna vlaga (Mv, % vol) i volumna gustoća (ρ_v , g cm^{-3}) su određivani u

cilindrima sušenjem 72 sata na 105 °C. Ukupno je prikupljeno 144 uzoraka s točno utvrđenih mjesta u pomoću metalnih cilindara, zapremnine 100 cm³. Također je provedeno 354 mjerenje otpora tla.

Statistička analiza i prostorna analiza podataka

U svrhu analize podataka upotrijebljena je deskriptivna statistika poput srednje vrijednosti (mean), standardne devijacije (SD), varijance (var), koeficijenta zaobljenosti (kurtosis), asimetrije (skewness), raspona, najmanje (min) i najveće (max) vrijednosti, te koeficijenta varijacije (CV%). Deskriptivni parametri su računati koristeći Microsoft Excel za Windows. Pregledom srednje i krajnjih vrijednosti (mean, min i max) može biti korisno za otkrivanje ekstremnih vrijednosti (engl. Outlier). Koeficijent zaobljenosti i asimetrije određuju normalnost podataka i asimetriju što ima važan učinak na izvedbu interpolacijskih metoda i za odluku da li podaci imaju oblik normalne distribucije može biti dovoljno pregledati te koeficijente. Poželjno je imati uzorak podataka koji su što bliži obliku normalne distribucije (Goovaerts i sur., 2005), jer prisutnost ekstremnih vrijednosti i visoka asimetrija može dovesti do netočnosti prilikom interpretacije semivariograma i daljih grešaka u stvaranju predikcijskih karata. Procjena na temelju koeficijenata asimetrije i zaobljenosti podataka je da normalna distribucija, na ovom slučaju podaci s rasponom od 0 do 3 asimetrije, smatra normalno distribuiranim podacima (PazGonzales i sur., 2000).

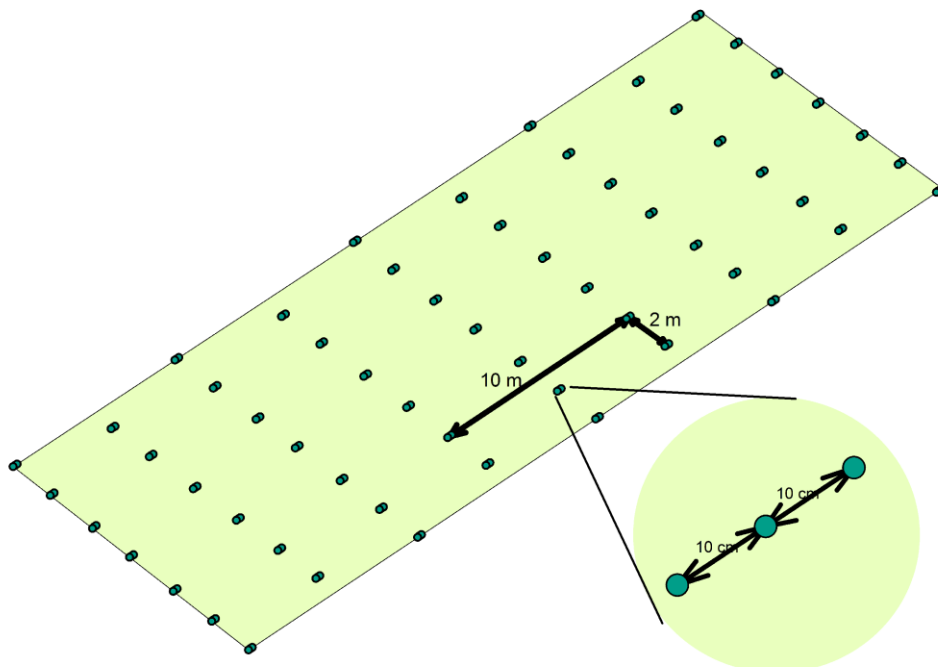


Figure 1. Scheme of sampling in vineyards

Slika 1. Shematski prikaz uzorkovanja u vinogradima

Geostatistika se temelji na prostornoj povezanosti među promatranim uzorcima, a ta korelacija se može matematički izraziti kroz model zvan semivarijanca. Semivarijanca je funkcija koja opisuje prostorne varijacije jednog promatranog parametra u prirodi. Može se izraziti pomoću formule:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

Gdje je N broj parova podataka točaka razdvojenih udaljenostima h , a $Z(x_i)$ i $Z(x_i+h)$ su slučajne funkcije u točkama x_i i x_i+h . Grafički prikaz semivarijance $\gamma(h)$ kao funkcije prema udaljenosti h (predstavlja udaljenost između uzoraka) nazivamo semivariogramom. Veličina semivarijance ovisi o razmaku uzorkovanja, pri čemu uzorkovanje na kraćim udaljenostima rezultira manjom semivarijancom i obrnuto. Povećanjem udaljenosti prilikom uzorkovanja – h semivarijanca raste do određene udaljenosti koju nazivamo raspon (engl. Range). Od tog trenutka je postignuta konstantna vrijednost, poznata pod nazivom prag (engl. Sill). Sve uzorke unutar raspona smatramo prostorno zavisnim. Semivarijanca promatrana na manjoj udaljenosti od udaljenosti uzorkovanja je identificirana kao pogreška uzorkovanja (eng. Nugget). Nugget može ukazivati, osim na spomenutu grešku uzorkovanja i na lokalno variranje u prostoru (Fu i sur., 2010). Ovaj rad prikazat će semivariogram neovisne o smjeru pružanja (omnidirektne variogram), što podrazumijeva da je varijabilnost svih istraživanih svojstava jednaka u svim smjerovima. Prostorna zavisnost izračunata je nugget/sill omjerom. Ako je omjer manji od 25% varijabla je snažno prostorno povezana; između 25% i 75% varijabla je umjereno prostorno zavisna; a kad je veći od 75% varijabla ukazuje na slabu prostornu zavisnost (Chien i sur., 1997).

Testiranje modela interpolacije provedeno je primjenom krosvalidacije (engl. cross-validation), već primjenjena u radovima (Goovaerts, 1997; Robinson i Metternicht, 2006; Bogunovic i sur., 2014). Metoda se temelji na uklanjanju vrijednosti mjerene na odabranom mjestu i određivanje nove vrijednosti na istome mjestu, uzevši u obzir preostale podatke. Postupak se ponavlja za sve lokacije i na kraju se izračuna korijen srednje kvadratne pogreške (engl. root mean square error - RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \{Z(x_i) - \hat{Z}(x_i)\}^2}$$

gdje je RMSE– srednja kvadratna pogreška (krosvalidacija), $Z(x_i)$ - izmjerena vrijednost odabrane varijable, $\hat{Z}(x_i)$ – procijenjena vrijednost odabrane varijable. Takva vrijednost izračunata je za karte dobivene metodama ordinary kriging (OK), prvi i drugi red local polinomial (LP), te (RBS) radial basis funkcijama (inverse multiquadratic, multilog, multiquadratic, natural cubic spline and thin plate spline). Interes je da RMSE vrijednost bude što manja. Statističke analize variograma i interpolacijskih metoda provedene su pomoću ArcGis 10.1 (ESRI) geostatističkog softverskog programa.

Rezultati i diskusija

Deskriptivni parametri

Tablica 1 prikazuje deskriptivnu statistiku istraživanih čimbenika tla. Prema svim prikazanim podacima, većina istraživanih parametara su normalno distribuirani i nije potrebno raditi dodatne transformacije podataka. Izuzetak nalazimo u skupini podataka koji prikazuju trenutačnu vlažnost na dubini 11-20 cm u tridesetogodišnjem vinogradu. Prikazani podaci odstupaju od Gaussove distribucije (asimetričnost - 6.15, zaobljenost - 2.08). Nakon izvršene Box-Cox transformacije podataka (Lambda je iznosila -1) dolazi do značajnog smanjenja asimetrije (s 6.15 na 0.94) i zaobljenosti (s 2.08 na 0.83), te taj skup podataka poprima oblik normalne distribucije (tablica 1). Od ostalih podataka prezentiranih u tablici 1 najmanju asimetriju prikazuje PR tridesetogodišnjeg vinograda na dubini 31-40 cm i iznosi -0.06, dok je najveća asimetrija izražena kod PR sedmogodišnjeg vinograda u dubini 0-10 cm s vrijednošću 2.76, no još uvijek unutar raspona za koji se smatra da su podaci normalno distribuirani. Koeficijent zaobljenosti kod PR kreće se u rasponu od -0.23 do 1.60, kod ρ_v od -0.02 do 1.24, te kod Mv od -1.20 do 0.88 i ne predstavljaju značajno odstupanje. Prosječna vrijednost PR na temelju 177 mjerenja kod tridesetogodišnjeg vinograda iznosi od 1.22 MPa do 1.74 MPa, ovisno o dubini tla, te od 0.62 MPa do 1.48 MPa kod sedmogodišnjeg vinograda. Prosječne vrijednosti ρ_v kreću se u rasponu od 1.47 g cm⁻³ do 1.60 g cm⁻³, ovisno o vinogradu i povećavaju se s dubinom tla. Prema ρ_v vrijednostima možemo zaključiti da tla promatranog područja spadaju u zbijenija tla. Koeficijent varijacije (CV) je korišten da se prikažu ukupne promjene. Rezultati CV manji od 10% ukazuju na slabu varijabilnost, dok oni veći od 90% ukazuju na opsežnu varijabilnost (Dahiya i sur., 1984). Svi podaci koeficijenta varijacije PR pokazuju vrijednosti između 26.6% i 52.2%, što znači da je PR umjereno varijabilan po dubinama tla. Vrijednosti ρ_v ukazuju na slabu varijabilnost kod oba vinograda (najveći CV zabilježen u sloju 0-10 cm s CV 5.58%). Varijabilnost Mv kod tridesetogodišnjeg vinograda umjerena, dok je kod sedmogodišnjeg vinograda umjerena u površinskom sloju (CV 13.30%). Podpovršinski slojevi zabilježili su slabu varijabilnost s CV ispod 10%.

Usporedba s drugim rezultatima je otežana radi drugačijih fizikalnih svojstava tala, međutim moguća je usporedba varijabilnosti. Kavianpoor i sur. (2012) u istraživanju prostorne varijabilnosti na planinskim tima Irana zamjećuju slabu varijabilnost ρ_v (CV 10.09%), isto kao i kod Gholami i sur. (2011) koji su zabilježili varijaciju ρ_v od 8%.

Prostorne karakteristike istraživanih čimbenika

Metoda kriginga omogućava interpolaciju istraživanih vrijednosti odstupanja procjene od motrenja putem modeliranja semivariograma i idući je korak prema kartiranju istraživanih čimbenika nakon kojeg slijedi završni korak izrade karata procjene i pogreške procjene. Odgovarajući modeli eksperimentalnog semivariograma za otpore tla, trenutačnu vlažnost i volumnu gustoću u tridesetogodišnjem i sedmogodišnjem vinogradu prikazani su u tablici 2.

Table 1. Basic statistic of soil properties in investigated area for soil resistance (MPa), soil moisture (% vol) and bulk density (g cm^{-3}) in thirty-years and seven-year vineyard

Tablica 1. Statistička svojstva tla u istraživanom području za otpore tla (MPa), trenutačnu vlažnost (% vol) i volumne gustoću (g cm^{-3}) u tridesetogodišnjem i sedmogodišnjem vinogradu

Dubina/ Depth (cm)	PR				ρ_v			Mv		
	0-10	11-20	21-30	31-40	0-10	11-20	21-30	0-10	11-20	21-30
30-years vineyard										
Srednja vrijednost / Mean	1,22	1,4	1,72	1,74	1,47	1,51	1,57	33,32	34,68(0.97)	34,81
Standardna pogreška / Standard error	0,048	0,042	0,035	0,035	0,017	0,014	0,015	1,58	1,33	1,14
Standardna devijacija / Standard deviation	0,64	0,56	0,47	0,47	0,08	0,07	0,07	7,73	6,52(0.04)	5,58
Asimetričnost / Skewness	-0,21	0,14	0,11	-0,06	-0,2	-0,18	2,41	1,97	6,15(0.94)	2,7
Zaobljenost / Kurtosis	0,62	0,38	0,06	-0,23	0,25	0,43	1,24	0,88	2,08(0.83)	-1,2
Raspon / Range	2,88	2,81	2,66	2,34	0,32	0,26	0,34	34,7	30,6	24
Minimum / Min	0,16	0,46	0,41	0,55	1,31	1,4	1,45	22,2	27,6	19,7
Maksimum / Max	3,04	3,28	3,07	2,89	1,63	1,66	1,8	56,9	58,2	43,7
CV (%)	52,2	38,9	27,7	26,6	5,58	4,7	4,69	22,79	18,62(0.46)	16,27
7-years vineyard										
Srednja vrijednost / Mean	0,62	0,83	1,26	1,48	1,51	1,56	1,6	34,18	39,2	39,31
Standardna pogreška / Standard error	0,021	0,027	0,034	0,042	0,017	0,017	0,012	0,94	0,49	0,42
Standardna devijacija / Standard deviation	0,28	0,35	0,45	0,56	0,08	0,09	0,06	4,6	2,4	2,05
Asimetričnost / Skewness	2,76	-0,35	0,25	1,06	-0,79	-0,58	1,56	0,79	2,06	0,35
Zaobljenost / Kurtosis	1,6	0,55	0,44	0,9	0,05	-0,02	0,02	-1,2	-0,69	0,65
Raspon / Range	1,98	1,73	2,47	3,26	0,28	0,31	0,29	17	11,1	8,2
Minimum / Min	0,24	0,25	0,36	0,52	1,36	1,39	1,47	24,1	31,9	36,5
Maksimum / Max	2,21	1,98	2,83	3,78	1,65	1,7	1,75	41,1	43	44,7
CV (%)	41,61	37,83	33,08	35,77	5,49	5,49	3,74	13,3	6,28	5,19

^{a)}Vrijednosti u zagradi predstavljaju vrijednosti nakon provedene Box-Cox transformacije (Box i Cox, 1964) s jačinom transformacije od -1.

Table 2. Best-fitted models of experimental semivariogram for soil resistance (MPa), soil moisture (% vol) and bulk density (g cm^{-3}) in thirty-years and seven-year vineyard

Tablica 2. Odgovarajući modeli eksperimentalnog semivariograma za otpore tla (MPa), trenutačnu vlažnost (% vol) i volumnu gustoću (g cm^{-3}) u tridesetogodišnjem i sedmogodišnjem vinogradu.

Svojstvo/ Property	Model	Pogreška/ Nugget	Prag/ Sill	Pogreška/prag (%) Nugget/Sill (%)	Prostorna zavisnost / Spatial dependence	Raspon/ Range (m)
30-years vineyard						
PR 0-10 cm	Stable	0	0,088	0	Jaka/Strong	28,85
PR 11-20 cm	Stable	0	0,136	0	Jaka/Strong	17,17
PR 21-30 cm	Stable	0,077	0,208	37,01	Umjerena/Moderate	19,85
PR 31-40 cm	Spherical	0,277	0,353	78,4	Slaba/Weak	57,96
Mv 0-10 cm	Nugget	-	-	100	Slaba/Weak	-
Mv 11-20 cm	Stable	0	16,72	0	Jaka/Strong	10,60
Mv 21-30 cm	Exponential	0	36,35	0	Jaka/Strong	14,36
ρ_v 0-10 cm	Spherical	0	0,008	0	Jaka/Strong	16,53
ρ_v 11-20 cm	Spherical	0	0,006	0	Jaka/Strong	18,04
ρ_v 21-30 cm	Exponential	0	0,006	0	Jaka/Strong	15,49
7-years vineyard						
PR 0-10 cm	Stable	0	0,085	0	Jaka/Strong	7,14
PR 11-20 cm	Exponential	0	0,137	0	Jaka/Strong	24,96
PR 21-30 cm	Gaussian	0,191	0,235	81,45	Slaba/Weak	65,22
PR 31-40 cm	Exponential	0,186	0,318	58,49	Umjerena/Moderate	25,44
Mv 0-10 cm	Stable	17,56	24,72	71,03	Umjerena/Moderate	16,05
Mv 11-20 cm	Spherical	3,79	33,64	11,25	Jaka/Strong	12,23
Mv 21-30 cm	Stable	3,67	4,72	77,69	Slaba/Weak	43,30
ρ_v 0-10 cm	Spherical	0,003	0,011	30,68	Umjerena/Moderate	64,94
ρ_v 11-20 cm	Gaussian	0,006	0,010	66,57	Umjerena/Moderate	64,94
ρ_v 21-30 cm	Gaussian	0,003	0,005	64,69	Umjerena/Moderate	64,94

Najbolji odgovarajući modeli semivariograma kod tridesetogodišnjeg vinograda poprimaju u najviše slučajeva stabilni oblik, a zatim slijedi sferni i eksponencijalni oblik. Kod sedmogodišnjeg vinograda na najviše istraživanih parametara semivariogram je najbolje opisan Gauss-ovim i stabilnim oblikom, dok su još prisutni

sferni i eksponencijalni oblik. Rezultati (tablica 2) pokazuju da kod tridesetogodišnjeg vinograda najveći raspon prostorne ovisnosti utvrđen kod PR na dubinama 31-40 cm i 0-10 cm s 57.96 m i 28.85 m, dok je najmanji efektivni raspon utvrđen kod Mv na dubini 11-20 cm s 10.60 m. Rasponi ρ_v kreću se od 15.49 m do 18.04 m. Rasponi kod sedmogodišnjeg vinograda su također raznoliki i kreću se od 7.14 m do 65.44 m kod PR te od 12.23 m do 43.30 m kod Mv, ovisno o promatranoj dubini tla. Raspon ρ_v unutar kojeg su uzorci prostorno povezani je 64.94 m na sve tri dubine.

Iako su rasponi dobiveni analizom eksperimentalnih semivariograma istraživanih čimbenika raznoliki, navedeni podaci pokazuju da su udaljenosti unutar koje su provedena uzorkovanja bitno manja od udaljenosti unutar koje su istraživani podaci međusobno prostorno korelirani. Takvi podaci upućuju na zaključak da je trenutna shema uzorkovanja dostatna da se prostorno opišu istraživana svojstva tala. Jedini izuzetak predstavlja Mv na dubini 0-10 cm, čiji semivariogram poprima čisti „Nugget“ oblik što navodi na veliki udio neobjašnjivog variranja u prostoru. „Nugget“ oblik upućuje na greške mjerenja ili preveliku varijabilnost unutar istraživanog prostora. U slučajevima kada „Nugget“ varijanca dominira izlaze treba tražiti u primjeni sofisticiranijih metoda koji se temelje na principu koregionalizacije (co-kriging) varijabli (Miloš, 2000). Također, moguće je povećati broj uzorkovanja, ali to dovodi po povećanih troškova istraživanja.

Na eksperimentalnom polju sedmogodišnjeg vinograda prostorna povezanost pojedinih istraživanih svojstava je raznolika. PR je svojstvo koje prikazuje jaku prostornu zavisnost u površinskim slojevima (0-10 cm i 11-20 cm), dok s dubinom ona pada. Mv sedmogodišnjeg vinograda prikazuje različitu prostornu zavisnost, ovisno o istraživanoj dubini, dok su podaci volumne gustoće umjereno ovisni na sve tri dubine.

Eksperimentalni tridesetogodišnji vinograd pokazuje jaku prostornu povezanost PR u površinskim slojevima dok je u dubljim slojevima ona umjerena i slaba (Tablica 2). Osim već spomenutog neobjašnjivog variranja u površinskom sloju Mv čija semivarijanca poprima potpuni „Nugget“ oblik, ostali slojevi Mv i ρ_v pokazuju jaku prostornu povezanost, koja sa izabranim modelima semivariograma može doprinijeti rješavanju problema kvantificiranja prostorne varijabilnosti svojstava tala u istraživanom vinogradu.

Interpolacijske metode i prostorna distribucija istraživanih čimbenika

Rezultati testiranih metoda interpolacije za sve parametre su prikazani u tablicama 3 i 4, dok su grafički prikazi istraživanih parametara prikazani na slikama 2 i 3. Test različitih metoda interpolacije daje točan uvid u prostorne raspodjele PR, Mv i ρ_v na istraživanim vinogradima. Točnost pojedine interpolacijske metode potvrđena je srednjom vrijednošću korijenom srednje standardne greške (engl. RMSE).

Table 3. Assessment of interpolation methods for calculation of the distribution of soil resistance, soil moisture and bulk density in thirty-years vineyard. RMSE values are presented for each soil layers. The most accurate method is marked with an asterisk (*).

Tablica 3. Ocjena interpolacijskih metoda za izračun prostorne raspodjele otpora tla, trenutačne vlažnosti tla i gustoće volumne u tridesetogodišnjem vinogradu. RMSE vrijednosti su prikazane za svaki sloj tla. Najtočnija metoda označena je zvjezdicom (*).

30-years vineyard		PR				Mv			ρ _v		
Method	Type	0-10	11-20	21-30	31-40	0-10	11-20	21-30	0-10	11-20	21-30
KRG	Ordinary	0,252*	0,328*	0,462	0,522	8,382	7,615	6,404	0,085	0,0514	0,076
LP	1	0,270	0,335	0,448	0,526	8,507	6,999	6,374	0,075*	0,0541	0,070*
	2	0,278	0,335	0,443*	0,519*	8,929	7,431	7,947	0,083	0,0501	0,081
RBF	Completely Regularized Spline	0,256	0,338	0,483	0,549	8,817	6,964	6,288	0,080	0,0504	0,072
	Spline with Tension	0,254	0,335	0,475	0,542	8,652	6,885	6,187	0,080	0,0508	0,072
	Multiquadratic	0,288	0,370	0,542	0,612	10,060	7,527	7,211	0,082	0,0498*	0,079
	Inverse Multiquadratic	0,254	0,332	0,461	0,526	8,005*	6,541*	5,973*	0,082	0,0511	0,073
	Thin Plate Spline	0,386	0,479	0,721	0,805	11,518	8,166	9,058	0,095	0,0568	0,098

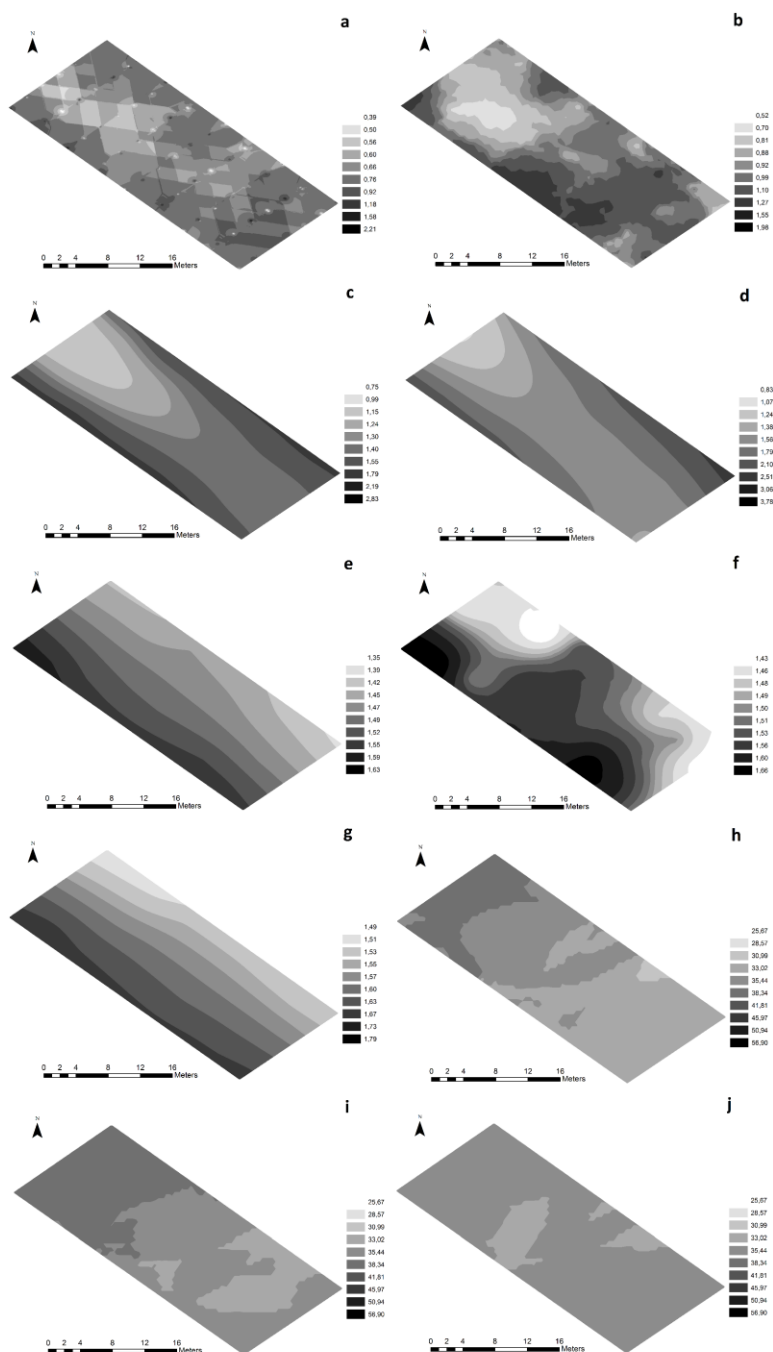


Figure 2. Spatial distribution maps in thirty-years vineyard produced with most accurate method. a) PR in layer 0-10 cm; b) PR in layer 11-20 cm; c) PR in layer 21-30 cm; d) PR in layer 31-40 cm; e) ρ_v in layer 0-10 cm; f) ρ_v in layer 11-20 cm; g) ρ_v in layer 21-30 cm; h) Mv in layer 0-10 cm; i) Mv in layer 11-20 cm; j) Mv in layer 21-30 cm

Slika 2. Karte prostorne distribucije u tridesetogodišnjem vinogradu napravljene najtočnijom metodom. a) PR na dubini 0-10 cm; b) PR na dubini 11-20 cm; c) PR na dubini 21-30 cm; d) PR na dubini 31-40 cm; e) ρ_v na dubini 0-10 cm; f) ρ_v na dubini 11-20 cm; g) ρ_v na dubini 21-30 cm; h) Mv na dubini 0-10 cm; i) Mv na dubini 11-20 cm; j) Mv na dubini 21-30 cm

U površinskim slojevima PR su najtočnije prikazani metodom kriginga koji je prikazao najmanju RMSE vrijednost (0.252 na dubini 0-10 cm i 0.328 na dubini 11-20 cm). Na dubinama 21-30 cm i 31-40 cm kao najbolja interpolacijska metoda pokazala se LP1 s RMSE 0.443 (21-30 cm) i RMSE 0.519 (31-40 cm). Prostorna raspodjela trenutačne vlažnosti tla najtočnija je grafički izražena s RBF (Inverse Multiquadratic) interpolacijskom metodom. RMSE vrijednosti iznose za 0-10 cm, 11-20 cm i 21-30 cm iznose redom 8.005, 6.541 i 5.973. Najbolja metoda kod volumne gustoće je LP1 na dubini 0-10 cm (RMSE 0.075) i 21-30 cm (RMSE 0.070) i RBF (Multiquadratic) metoda (RMSE 0.0498).

Otpori tla u sedmogodišnjem vinogradu (tablica 4, slika 3) najbolje su prikazani RBF (Inverse Multiquadratic) metodom u površinskom sloju (RMSE 0.2545), na dubini 11-20 cm običnim krigingom (RMSE 0.326), te LP2 metodom na dubinama 21-30 cm (RMSE 0.443) i 31-40 cm (RMSE 0.519). Kao i kod tridesetogodišnjeg vinograda predstavljenog u tablici 3, trenutačna vlažnost je najbolje opisana RBF (Inverse Multiquadratic) metodama kod sve tri dubine tla (RMSE 4.093, 5.777, 1.826). Gustoća volumna najbolje je prostorno prikazana s RBF (Inverse Multiquadratic) metodom (RMSE 0.0701) na dubini 0-10 cm, LP1 metodom (RMSE 0.078) na dubini 11-20 cm i običnim krigingom (RMSE 0.058) na dubini 21-30 cm.

Iz prikazanih rezultata vidljivo je da je većina interpolacijskih metoda u ovoj studiji zadovoljavajuća. RMSE vrijednosti su relativno niske (<1) kod promatranih čimbenika poput PR i ρ_v dok povećane (<1) vrijednosti srednje kvadratne pogreške navode na oprez prilikom datog grafičkog prikaza (slika 2h) trenutačne vlažnosti u vinogradima. Ranija semivariogramaska analiza je već pokazala da se u pojedinim slojevima točke uzorkovanja međusobno nezavisno ponašaju, te je za buduća istraživanja nužno povećati broj uzorkovanja za određivanje i kvalitetniju procjenu trenutačnog stanja vlažnosti u vinogradima.

Table 4. Assessment of interpolation methods for calculation of the distribution of soil resistance, soil moisture and bulk density in seven-years vineyard. RMSE values are presented for each soil layers. The most accurate method is marked with an asterisk (*).

Tablica 4. Ocjena interpolacijskih metoda za izračun prostorne raspodjele otpora tla, trenutačne vlažnosti tla i gustoće volumne u sedmogodišnjem vinogradu. RMSE vrijednosti su prikazane za svaki sloj tla. Najtočnija metoda označena je zvjezdicom (*).

7-years vineyard		PR				Mv			ρ_v		
Method	Type	0-10	11-20	21-30	31-40	0-10	11-20	21-30	0-10	11-20	21-30
KRG	Ordinary	0,2582	0,326*	0,451	0,535	4,570	6,329	1,871	0,0716	0,082	0,058*
LP	1	0,2650	0,335	0,447	0,526	4,299	5,995	1,866	0,0702	0,078*	0,059
	2	0,2762	0,334	0,443*	0,519*	4,751	6,278	2,278	0,0798	0,086	0,065
RBF	Completely Regularized Spline	0,2565	0,338	0,483	0,549	4,107	6,218	1,941	0,0715	0,086	0,063
	Spline with Tension	0,2549	0,335	0,475	0,542	4,119	6,114	1,912	0,0712	0,085	0,062
	Multiquadratic	0,2875	0,369	0,541	0,611	4,123	7,038	2,142	0,0759	0,091	0,067
	Inverse Multiquadratic	0,2545*	0,333	0,461	0,525	4,093*	5,777*	1,826*	0,0701*	0,085	0,060
	Thin Plate Spline	0,3841	0,475	0,716	0,799	4,129	8,269	2,440	0,0833	0,103	0,080

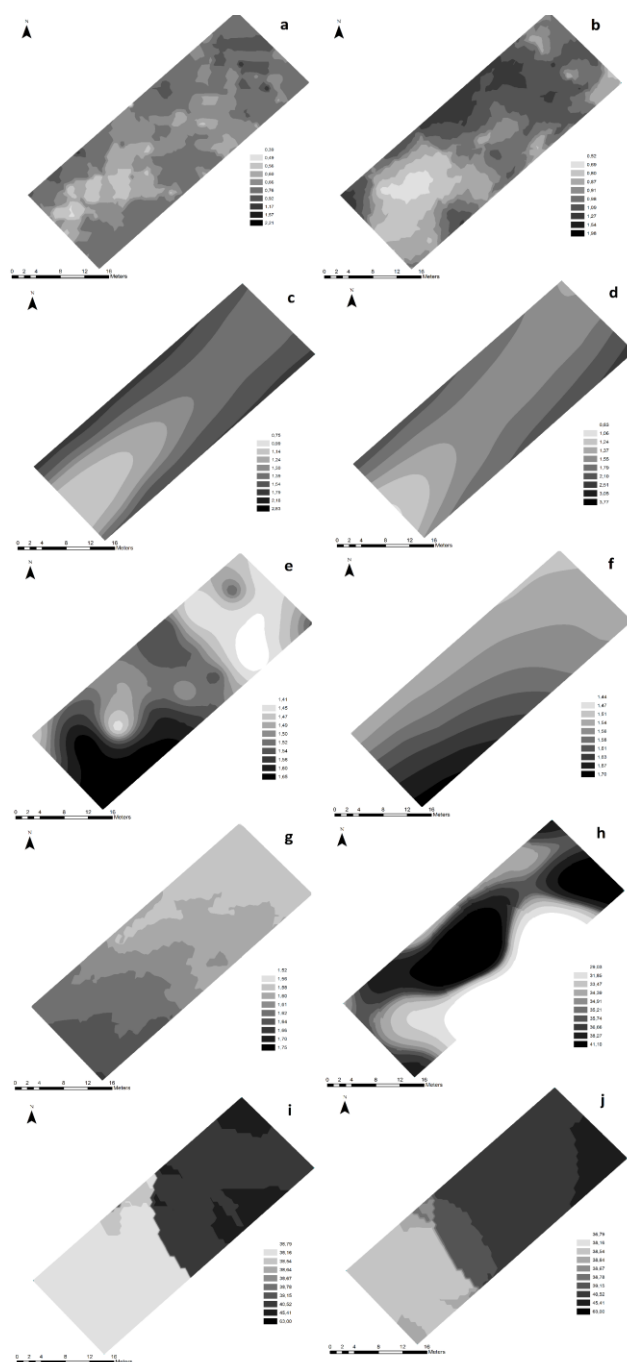


Figure 3. Spatial distribution maps in seven-years vineyard produced with most accurate method: a) PR in layer 0-10 cm; b) PR in layer 11-20 cm; c) PR in layer 21-30 cm; d) PR in layer 31-40 cm; e) ρ_v in layer 0-10 cm; f) ρ_v in layer 11-20 cm; g) ρ_v in layer 21-30 cm; h) Mv in layer 0-10 cm; i) Mv in layer 11-20 cm; j) Mv in layer 21-30 cm

Slika 3. Karte prostorne distribucije u sedmogodišnjem vinogradu napravljene najtočnijom metodom: a) PR na dubini 0-10 cm; b) PR na dubini 11-20 cm; c) PR na dubini 21-30 cm; d) PR na dubini 31-40 cm; e) ρ_v na dubini 0-10 cm; f) ρ_v na dubini 11-20 cm; g) ρ_v na dubini 21-30 cm; h) Mv na dubini 0-10 cm; i) Mv na dubini 11-20 cm; j) Mv na dubini 21-30 cm

Zaključak

Na temelju obrađenih podataka možemo zaključiti da tla istraživanih vinograda karakterizira heterogenost otpora tla, trenutačne vlage i gustoće volumne. Tridesetogodišnji i sedmogodišnji istraživani vinogradi bilježi umjerenu varijabilnost otpora tla po svojim dubinama. Vrijednosti gustoće volumne ukazuju na slabu varijabilnost kod oba vinograda gdje niti jedan koeficijent varijacije ne prelazi 6%, dok je zabilježena varijabilnost trenutačne vlažnosti kod tridesetogodišnjeg vinograda umjerena, a kod sedmogodišnjeg vinograda umjerena u površinskom sloju i slabo varijabilna u podpovršinskim slojevima. Odgovarajući proizvedeni variogrami su većinom stabilnog oblika kod istraživanih parametara tridesetogodišnjeg vinograda dok kod parametara sedmogodišnjeg vinograda najviše poprimaju Gauss-ov i stabilni oblik. Rasponi semivarijance iz najbolje odgovarajućih semivariograma ukazuju na odgovarajuću shemu uzorkovanja. Izuzetak je trenutačna vlažnost u površinskom sloju kod tridesetogodišnjeg vinograda koja bilježi 100% utjecaj slučajne ili nestrukturirane komponente variranja u prostoru. U budućem istraživanju broj uzoraka za prostornu raspodjelu trenutačne vlažnosti treba povećati, a također treba istražiti drugačije „hibridne“ interpolacijske oblike poput principa koregionalizacije (co-kriging). Ova studija govori da niti jedna interpolacijska metoda ne može dati trajne karte istraživanih čimbenika. Također, sve metode daju sličnu RMSE vrijednost. Kod tridesetogodišnjeg i sedmogodišnjeg vinograda najviše je istraživanih čimbenika na određenim dubinama opisana s RBF interpolacijom, a zatim slijedi LP i Kriging metode. Od RBF interpolatora u najviše slučajeva kao najbolja se pokazala Inverse Multiquadratic. Rezultati ovog rada prikazuju primjenu geostatistike za proučavanje i analizu prostornog ponašanja pojedinih svojstava tla. Proizvedene karte otpora tla i volumne gustoće mogu biti od pomoći u daljnjem korištenju vinograda i očuvanju tla. Karte trenutačne vlažnosti imaju visoke RMSE vrijednosti, stoga je istraživanje nužno nastaviti s većim brojem uzorkovanih mjesta.

Literatura

- Birkás, M., Szemők, A., Antos, G., Neményi, M., (2008) Environmentally-sound adaptable tillage. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Bogunovic, I., Mesic, M., Zgorelec, Z., Jurisic, A., Bilandzija, D., (2014) Spatial variation of soil nutrients on sandy-loam soil. Soil and Tillage Research, 144,174-183. DOI: 10.1016/j.still.2014.07.020
- Box, G. E., Cox, D. R., (1964) An analysis of transformations. Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological), 26(2), 211-252.
- Chien, Y. J., Lee, D. Y., Guo, H. Y., Houn, K. H., (1997) Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Taiwan soils. Soil Science, 162(4), 291-298.
- Durán Zuazo, V. H., Rodríguez Pleguezuelo C. R., (2008) Soil-erosion and runoff prevention by plant covers. A review. Agronomy for Sustainable Development, 28(1), 65–86. DOI: 10.1051/agro:2007062
- Flowers, M., Lal, R., (1998) Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. Soil and Tillage Research, 48(1-2), 21–35. DOI: 10.1016/S0167-1987(98)00095-6

- Fu, W., Tunney, H., Zhang, C., (2010) Spatial variation of soil nutrients in a dairy farm and its implications for site-specific fertilizer application. *Soil and Tillage Research*, 106(2), 185–193. DOI: 10.1016/j.still.2009.12.001
- Goovaerts, P., (1997) *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, New York.
- Goovaerts, P., Avruskin, G., Meliker, J., Slotnick, M., Jacquez, G., Nriagu, J., (2005) Geostatistical modeling of the spatial variability of arsenic in groundwater of southeast Michigan. *Water Resources Research*, 41(7), 1-19. DOI: 10.1029/2004WR003705
- Hamza, M. A., Anderson, W. K., (2003) Responses of soil properties and grain yields to deep ripping and gypsum application in a compacted loamy sand soil contrasted with a sandy clay loam soil in Western Australia. *Australian Journal of Agricultural Research*, 54(3), 273–282. DOI: 10.1071/AR02102
- Heege, H. J., (2013) *Precision in Crop Farming*. Springer, Dordrecht. DOI: 10.1007/978-94-007-6760-7
- Journel, A.G., Huijbregts, C.J., (1978) *Mining Geostatistics*. Academic press, San Diego.
- Matheron, G., (1963) Principles of geostatistics. *Economic Geology*, 58(8), 1246-1266. DOI: 10.2113/gsecongeo.58.8.1246
- McGarry, D., Sharp, G., (2003) A rapid, immediate, farmer-usable method of assessing soil structure condition to support conservation agriculture. In: L. Garcia Torres, ed. (2003) *Conservation agriculture: environment, farmers experiences, innovations, socio-economy, policy*. Springer Netherlands, p. 375-380. DOI: 10.1007/978-94-017-1143-2_45
- Miloš, B., (2000) Geostatističke analize pedoloških podataka I. Mjerenje prostornog varijabiliteta svojstava tla semivariogramima. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 65(4), 219-228.
- Mueller, L., Schindler, U., Mirschel, W., Shepherd, T.G., Ball, B.C., Helming, K., Rogasik, J., Eulenstein, F., Wiggering, H., (2010) Assessing the productivity function of soils. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30(3), 601–614. DOI: 10.1051/agro/2009057
- Paz-Gonzalez, A., Vieira, S. R., Taboada Castro, M. T., (2000) The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. *Geoderma*, 97(3), 273-292. DOI: 10.1016/S0016-7061(00)00066-5
- Pereira, P., Cerdà, A., Úbeda, X., Mataix-Solera, J., Arcenegui, V., Zavala, L.M., (2013a) Modelling the impacts of wildfire on ash thickness in a short-term period. *Land Degradation and Development*, 26(2), 180-192. DOI: 10.1002/ldr.2195
- Pereira, P., Cerdà, A., Úbeda, X., Mataix-Solera, J., Martín, D., Jordán, A., Burguet, M., (2013b) Spatial models for monitoring the spatio-temporal evolution of ashes after fire – a case study of a burnt grassland in Lithuania. *Solid Earth*, 4(1), 153–165. DOI: 10.5194/se-4-153-2013

- Robinson, T. P., Metternicht, G., (2006) Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties. *Computers and electronics in agriculture*, 50(2),97-108. DOI: 10.1016/j.compag.2005.07.003
- Webster, R., Oliver, M.A., (2007) *Geostatistics for Environmental Scientists*, 2nd ed. Wiley Interscience, London.
- Xie, Y., Chen, T.B., Lei, M., Yang, J., Guo, Q.J., Song, B., Zhou, X.Y., (2011) Spatial distribution of soil heavy metal pollution estimated by different interpolation methods: accuracy and uncertainty analysis. *Chemosphere*, 82(3), 468–476. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2010.09.053
- Yasrebi, J., Saffari, M., Fathi, H., Karimian, N., Moazallahi, M., Gazni, R., (2009) Evaluation and comparison of ordinary kriging and inverse distance weighting methods for prediction of spatial variability of some soil chemical parameters. *Research Journal of Biological Sciences*, 4(1), 93–102.