

# Geostatistical Soil Data Analysis

---

## II. Optimal interpolation with kriging

Boško MILOŠ

### SUMMARY

---

The optimal interpolation by using the technique of ordinary kriging, based on the regionalised variable theory, is described and illustrated by a case study of the top-soil (depth 0-30cm) CaCO<sub>3</sub> and humus content in the 136 pedons at Petrovo polje, located in dalmatinska Zagora.

The spatial variability of the CaCO<sub>3</sub> and humus content shown by threedimensional diagrams of the kriged estimates and associated standard errors diagrams may be consequence of different geology, topography and hidrology of the area.

Reliability diagrams or maps of the kriged estimation errors, might be useful in locating areas of large errors, to define optimal sampling strategy for different levels of estimation precision.

The results of investigation showed that, by using anisotropic semivariogram models, applied geostatistical analysis can be used to improve local estimation precision of the selected soil properties. For this reason, kriging can be recommended, as a convenient tool, for quantitative estimating and mapping of the individual soil properties at unsampled locations.

### KEY WORDS

---

soil, kriging, semivariograms, regionalized variable theory

Institute for Adriatic Crops and Karst Reclamation  
Put Duilova 11, 21000 Split, Croatia  
E-mail: bosko@stijena.krs.hr  
Received: March 20, 2000



# Geostatističke analize pedoloških podataka

---

## II. Optimalna interpolacija krigingom

Boško MILOŠ

### SAŽETAK

---

U radu je opisana i, na primjeru sadržaja  $\text{CaCO}_3$  i humusa u površinskom horizontu/sloju (dubina 0-30cm) iz 136 pedoloških profila Petrova polja smještenog u dalmatinskoj Zagori, ilustrirana primjena metode optimalne interpolacije - ordinarnog kriginga temeljenog na teoriji regionalizirane varijable.

Prostorni varijabilitet sadržaja  $\text{CaCO}_3$  i humusa, prikazan na trodimenzionalnim kartama kriging procjena i dijagramima standardnih grešaka procjena, posljedica je različite geološke građe, reljefa i hidrografije istraživanog terena.

Dijagrami ili karte pouzdanosti kriging procjena mogu, lociranjem područja sa velikim greškama, pomoći definiranju optimalnih strategija uzorkovanja za različite stupnjeve točnosti procjene.

Rezultati istraživanja su pokazali da se kriging metoda, uz uključivanje anizotropnih modela semivariograma, može koristiti za povećanje pouzdanosti lokalnih procjena izabranih svojstava tla. Stoga se kriging analize mogu preporučiti, kao pouzdan "alat", za kvantitativno procjenjivanje i kartiranje pojedinačnih svojstava tla na neuzorkovanim mjestima.

### KLJUČNE RIJEČI

---

tlo, kriging, semivariogrami, teorija regionalizirane varijable

Institut za jadranske kulture i melioraciju krša  
Put Duilova 11, 21000 Split, Hrvatska  
E-mail: bosko@stijena.krs.hr  
Primljeno: 20. ožujka 2000.

## UVOD

Procjenjivanje vrijednosti nekog svojstva na neuzorkovanim mjestima, unutar prostora prekrivenog točkama opažanja, poznat kao interpolacija, je problem koji već dugi niz godina zaokuplja pažnju brojnih istraživača, poput: geologa, geografa, pedologa, hidrologa i dr. Ovaj problem je posebno izražen na zaravnjenim terenima (npr. aluvijalni sustavi), gdje na temelju odnosa tla i reljefa nije moguće lako predviđati prostorno variranje svojstava tla. U takvim situacijama, pedolozi se često sučeljavaju sa dilemom oko broja uzoraka ili osmatranja i izbora mjesta njihove lokacije.

U ovom radu, proučavanje prostorne varijabilnosti, ustanovljavanje i interpolacija procijenjenih vrijednosti na neuzorkovana mjesta, vršeno je geostatističkom metodom temeljenoj na teoriji "regionalizirane varijable" (Matheron, G. 1965). Za razliku od klasičnog statističkog pristupa geostatistika uzima u obzir prostornu ovisnost varijabli, i polazi od hipoteze, da je poznavanjem vrijednosti nekog svojstva, npr. tla, na poznatoj točki moguće ustanoviti njegovu vrijednost i na neuzorkovanom mjestu. Istinitost ove pretpostavke ovisi o stupnju prostorne ovisnosti između promatranja, koja se izražava semivarijancijom kao mjerom prosječne sličnosti između promatranja na datoj udaljenosti (razmaku promatranja).

Geostatistička analiza ima dva postupka. Prvi, i ujedno bitniji, obuhvaća računanje eksperimentalnog semivariograma i izbor pogodnog modela. Drugi, je prognozna interpolacijska tehnika, poznata kao kriging (Journel i Huijbregts 1978), koji koristi parametre semivariograma za prostornu interpolaciju podataka između eksperimentalnih točaka.

Izraz "kriging" je sinonim za "optimalno predviđanje" i metoda koja se još naziva i "najboljim linearnim nepristranim procjeniteljem", jer: minimalizira grešku varijance procjene, ima sumu težina jednaku jedan i što, za računanje vrijednosti na neuzorkovanim lokacijama koristi jednostavne ponderirane srednje vrijednosti (metodu ponderiranih prosjeka).

U pedološkoj literaturi, teorija regionalizirane varijable je korištena kao metoda za opisivanje prostornog variranja (u formi semivariograma) i kao prognozna tehnika (Webster 1982; Yost i sur. 1982; McBratney i Webster 1983 i 1986; Burgess i Webster 1980a i 1980b; Vauclin i sur. 1983; Watson 1984; Burrough 1983a i 1983b; McBratney 1984; Webster i McBratney 1987; Trangmar i sur. 1985; Laslett i sur. 1987).

Ova istraživanja su pokazala da svojstva tla imaju karakter "regionalizirane varijable" i da njihove prostorne promjene mogu biti postupne, stupnjevite, ali jako često i nagle, uz izraženu anizotropičnu strukturu. Stupanj i karakter

prostorne ovisnosti u svezi je sa tipom prostornih promjena pedogenetskih čimbenika i efekata njihovih interakcija. Međutim, prostorne promjene svojstava tla su jako složene i stoga se ponekad ne mogu aproksimirati ni sa jednim od poznatih teorijskih modela. Zbog toga se, u opisivanju kompleksnosti tla, izlazi traže u izgradnji složenih modela (Burrough 1983a i 1983b).

Nadalje, navedena istraživanja su ukazala na dvije bitne značajke kriging metode. Prva, proizilazi iz činjenice da, za razliku od klasičnih statističkih metoda, kriging uzima u obzir prostornu ovisnost između promatranja (uzoraka). Druga, značajka i prednost kriginga jeste što osigurava procjenu varijance svakog promatranja, koje se mogu prikazati u obliku karata ili dijagrama standardnih grešaka procjena.

Primjenjivost geostatističkih metoda u proučavanju prostorne varijabilnosti tala testirana je na primjeru pedoloških istraživanja Petrova polja. Ono je izabrano zbog toga jer raspoložemo originalnim podacima o svojstvima tla i njihovim geografskim lokacijama i što je, prethodnim istraživanjima (Miloš 1999), ustanovljeno da izabrana svojstva tla imaju značajke regionalizirane varijable.

Polazeći od navedenog, ovaj rad je usmjeren: a) istraživanju primjene kriginga u ustanovljavanju prostornog variranja pojedinačnih svojstava tla, b) izradi karata sadržaja  $\text{CaCO}_3$  i humusa u hidromorfnim tlima Petrova polja i c) karata grešaka kriging procjena.

Očekuje se da će rezultati istraživanja imati i praktičnu primjenu. To se temelji na činjenici da će izradene kriging karte i karte kriging procjena identificirati područja sa velikim greškama, koja će biti potrebno detaljnije uzorkovati i tako će, za postavljene stupnjeve preciznosti procjene, pomoći definiranju optimalne strategije uzorkovanja.

## MATERIJAL I METODE RADA

### Objekt istraživanja

U cilju prikaza primjene kriginga, posebno u procjenjivanju i kartiranju pojedinačnih svojstava tla, proširena su prethodna geostatistička istraživanja (Miloš 1999), temeljena na podacima pedoloških istraživanja Petrova polja (Miloš 1984; 1985; 1987 i 1998). Detaljan opis pedoloških istraživanja i geostatističkih analiza nalazi se u prethodnoj studiji (Miloš 1999), a ovdje se daje samo njihov sumaran prikaz.

Petrovo polje je tipično krško polje, smješteno u dalmatinskoj Zagori, pored Drniša, površine 1904 ha. Raznovrsne je geološke građe (aluvijalni nanosi rijeke Čikole i njenog pritoka - bujice Mahniša, koluvijalne naslage, permski dijabazi i spiliti, perm-trijaski pješčenjaci i glinci i pleistocenske breče) i fluvijativne geomorfološke prošlosti (Slika 1).

Hidrografiju karakterizira povremeno plavljenje glavne vodne arterije - rijeke Čikole i veliko kolebanja razine podzemnih voda. Geomorfološki, Polje je zaravan sa više plavnih terasa i uzdignutijih priterasnih terena koji se nalaze izvan zone redovitog plavljenja.

U svezi sa opisanim geološkim i geomorfološko-hidrološkim prilikama je i raznovrsna pedološka građa, koju karakterizira prisustvo različitih hidromorfni tala: fluvisol, humofluvisol, humoglej i euglej, identificirani prema klasifikaciji tala (Škorić i sur. 1973). Tla Petrova polja su teškog teksturnog sastava. Sadržaj humusa varira u širokom rasponu i u svezi je sa prisustvom različitih tipova hidromorfni tala i izraženosti pedogenetskih procesa. Najmanji sadržaj humusa je u fluvijativnim tlima gdje sedimentacija prevladava pedogenezu. Podaci o sadržaju  $\text{CaCO}_3$  pokazuju da tla istraživanog terena imaju pretežno visok sadržaj karbonatna, koji u ovisnosti o vrsti matične podloge, varira u jako širokom rasponu od beskarbonatnih do jako karbonatnih.

Prethodnim geostatističkim istraživanjima (Miloš, B. 1999) je ustanovljeno da svojstva tla Petrova polja imaju anizotropičnu strukturu, koja je u svezi s činjenicom da su prostorne promjene ključnih čimbenika koji doprinose njihovom varijabilitetu, posebno geoloških i orografsko-

hidrografskih, različite u različitim smjerovima. Nadalje, pokazano je da svojstva tla iz površinskih horizonata/slojeva imaju bolje izraženu prostornu strukturu (kontinuitetnije prostorno ponašanje) nego iz dubljih horizonata/slojeva. To pokazuje da će i njihova interpolacija biti preciznija i pouzdanija. Stoga su, za potrebe ovoga rada, iz baze pedoloških podataka (GIS Petrova polja, Miloš 1998) izabrani sadržaj  $\text{CaCO}_3$  i humusa u površinskom horizontu/sloju, (dubina 0-30cm), iz 136 pedoloških profila. Sadržaj  $\text{CaCO}_3$  određen je Scheiblerovim kalcimetrom, a humusa metodom Tjurina.

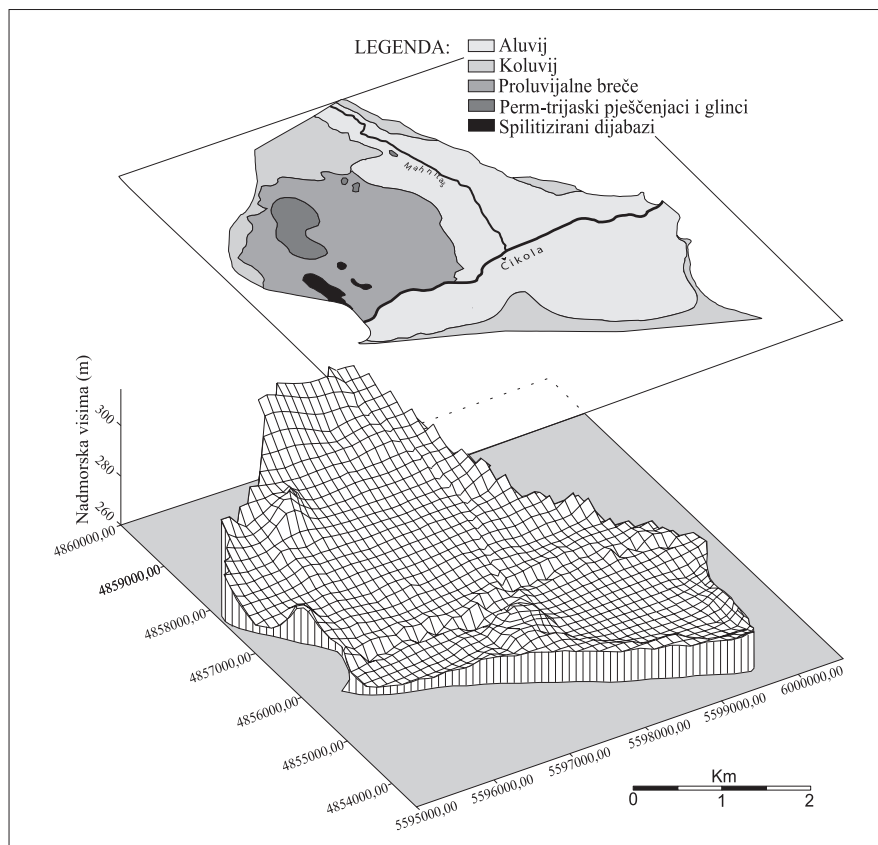
Navedeni podaci i prethodnim analizama ustanovljeni parametri njihovih prostornih struktura (Miloš 1999), i prikazani u formi semivariograma, korišteni su kao osnova za prikaz primjene kriging metode u procjenjivanju svojstava tla na neuzorkovanim lokacijama i izradi karata  $\text{CaCO}_3$  i humusa i karata njihovih (kriging) varijanci u tlima Petrova polja.

### Kriging

Polazna točka u krigingu jeste da je neko svojstva, npr. tla,  $Z$ , kontinuirano prostorno distribuirano i uzorkovano na mjestima  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , sa vrijednostima

$$Z_{(x_1)}, Z_{(x_2)}, \dots, Z_{(x_n)}.$$

Slijedeći definiciju kriginga kao najboljeg linearnog nepristranog procjenitelja, kriging procjena za neko



Slika 1. 3D model terena i geološka karta Petrova polja  
Figure 1. 3D model of the relief and geological map of Petrovo polje

svojestvo tla,  $Z_{(x_i)}$ , sa koordinatama  $x$  i  $y$  ( $x_i = [x, y]$ ) je linearna kombinacija, ili ponderirani prosjek originalnih vrijednosti (Journel i Huijbregts 1978), i izgleda ovako:

$$Z^*_{(x_0)} = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_{(x_i)}$$

gdje su:  $Z^*_{(x_0)}$  kriging procjena i,  $\lambda_i$ , su težine ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ ).

Kriging sustav ustanovljava koeficijente ili težine tako da, pri velikom broju procjena, budu zadovoljeni sljedeći uvjeti:

- srednja greška jednaka nuli:  $E\{[Z - Z^*]\} = 0$ ,

- minimalna varijanca procjene:

$\sigma^2 = E\{[Z - Z^*]^2\} = \min.$ , što se postiže kada je:

$\sum_{i=1}^n \lambda_j \gamma(x_i, x_j) + \psi = \gamma(x_i, x_0)$  za svako  $i$ , tada je

$\sigma^2 = \sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot \lambda(x_j, x_0) + \psi$  gdje su:  $g(x_i, x_j)$  je semivari-

janca točaka uzorkovanja  $x_i$  i  $x_j$ ;

$g(x_i, x_0)$  je semivarijanca između uzorkovane točke  $x_i$  i neuzorkovane točke  $x_0$ , je  $\psi$  Langrangeov multiplikator, i da

-suma (težina) bude jednaka jedan:  $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$

Varijanca procjene nekog svojstva je tražena vrijednost razlika kvadrata između originalnih,  $Z(x_0)$ , i procijenjenih vrijednosti,  $Z^*(x_0)$ . Greške se računaju ovako:  $G_p = Z(x_0) - Z^*(x_0)$ .

Radi pronalazjenja težina,  $\lambda_i$ , potrebno je prethodno poznavanje prostorne ovisnosti svojstva koja se izražava u terminima semivariograma  $\gamma(h)$ , gdje za svaku udaljenost  $h$

$$\gamma(h) = \frac{1}{N-h} \sum_{i=1}^{N-h} (Z_{x+h} - Z_x)^2$$

gdje su:

$Z_{x+h}, Z_x$  originalne vrijednosti svojstava u točkama  $x+h$  i  $x$ ,

$N$  je broj parova podataka točaka razdvojenih udaljenostima  $h$ .

Funkcija  $\gamma(h)$  se naziva semivarijanca i definirana je kao porast varijance (razlika između  $Z_{x+h}$  i  $Z_x$ ) povećanjem udaljenosti  $h$ . Grafički prikaz semivarijanca  $2\gamma(h)$  prema udaljenosti točaka  $h$  naziva se semivariogram.

Kriging analiza je provedena korištenjem podataka o sadržaju  $CaCO_3$  i humusa u površinskom horizontu/sloju (dubina 0-30cm) na svakoj od 136 eksperimentalnih točaka (profila) uzetih iz baze pedoloških podataka Petrova polja i korištenjem rezultata (parametara semivariograma za  $CaCO_3$  i humus) prethodnih geostatističkih analiza (Miloš 1999).

U izradi (kriging) karata koristili smo dvije interpolacijske kategorije kriginga:

a) Kriging kao "egzaktan" interpolacijsku metodu. U ovom slučaju, u kriging proceduru je izravno uključen originalni skup pedoloških podataka bez nugget utjecaja, tj. modelom koji ne uključuje nekontrolirane pogreške već polazi od toga da se sa promjenom udaljenosti prostorno variranje svojstva odvija linearno.

b) Kriging kao "izravnatu" (smoothing) interpolacijsku metodu. Ova kategorija kriginga uključuje geostatističke parametre semivariograma (model, nugget, prag i raspon) i parametri anizotropije ili smjera većeg ili manjeg kontinuiteta između točaka podataka.

Parametri kriging procjena ustanovljeni su primjenom geostatističkog paketa Geo-EAS. Prostorna 3D i 2D kriging interpolacija kriging procjena i kriging grešaka analiziranih svojstava tla izvršena je korištenjem geostatističkog paketa SURFER.

## REZULTATI I RASPRAVA

### Prostorna struktura varijabli

Geostatistički parametri eksperimentalnih semivariograma za  $CaCO_3$  i humus izravnati su linearnim modelom i prikazani u tabeli 1., a parametri njihove geometrijske anizotropije u tabeli 2.

Tabela 1. Geostatistički parametri eksperimentalnih semivariograma za  $CaCO_3$  (%) i humus (%)<sup>2</sup> iz površinskog horizonta/sloja tla

Table 1. Geostatistical parameters of experimental semivariograms for top-soil  $CaCO_3$  (%) and humus (%)<sup>2</sup>

Svojestvo	Nugget	Prag	Raspon (m)	Model
$CaCO_3$ (%) <sup>2</sup>	63,8	292,8	2450	Linearan
Humus (%) <sup>2</sup>	1,11	3,35	4550	Linearan

Tabela 2. Parametri geometrijske anizotropije  
Table 2. The parameters of the geometrical anisotropy

Svojestvo	Maksimalni raspon (m)	Minimalni raspon	Kut maksimalnog variranja	Anizotropijski odnos
CaCO <sub>3</sub> (%)	2750	900	135 <sup>0</sup> (SE-NW)	3,06
Humus (%)	4500	1400	90 <sup>0</sup> (SN-NW)	3,21

Tabela 3. Srednje vrijednosti ( $\bar{X}$ ), standardne devijacije (d) i rasponi ( $X_{\min}$  i  $X_{\max}$ ) originalnih (Z) i krigingom procijenjenih svojstava tla (Z\*)

Table 3. Mean ( $\bar{X}$ ), standard deviation (d) and ranges ( $X_{\min}$  i  $X_{\max}$ ) of the original soil properties (Z) and estimated by kriging (Z\*)

Svojestvo tla	Originalne vrijednosti (Z)				Kriging procjena (Z*)			
	$X_{\min}$ .	$X_{\max}$ .	$\bar{X}_k$	k	$X_{k(\min)}$ .	$X_{k(\max)}$ .		
CaCO <sub>3</sub> (%)	16,76	13,662	0	53,3	17,28	9,664	1,1	41,0
Humus (%)	3,63	1,533	1,70	8,83	3,63	1,089	1,61	6,95

Iz tabele 1. se vidi da i CaCO<sub>3</sub> i humus imaju relativno visok postotak neobjašnjivog variranja (nugget varijance) koja je ustanovljena na najkraćoj korištenoj udaljenosti (razmaku) uzorkovanja. Najveće razlike su u rasponu, dakle dužini unutar koje su točke uzorkovanja međusobno prostorno korelirane.

Veći raspon sadržaja humusa upućuju na njegovo kontinuiranije prostorno ponašanje. To znači da mjerenja sadržaja humusa postaju međusobno prostorno nezavisna (nekorelirana) tek na udaljenosti između parova točaka (profila) većoj od 4550m, a sadržaj CaCO<sub>3</sub> na udaljenosti od 2750m (Tabela 1).

Anizotropično variranje sadržaja CaCO<sub>3</sub> i humusa (Tabela 2) pokazuje da su čimbenici koji utječu na njegov varijabilitet različiti u različitim smjerovima. Sadržaj CaCO<sub>3</sub> ima najveći raspon (2750m) u smjeru istok-zapad (SE-NW), što znači da je i lokalno variranje čimbenika koji utječu na njegov sadržaj, prije svih geološke građe, stalnije i sa manje naglih promjena nego u ostalim smjerovima. Najveći raspon sadržaj humusa (4500m) ima u smjeru jugoistok-sjeverozapad (SE-NW). To pokazuje da i čimbenici koji utječu na njegov varijabilitet, prije svih orografija i hidrografija, u tom smjeru imaju najkontinuiranije prostorno ponašanje.

### Kriging procjene

Statistički pokazatelji skupa originalnih vrijednosti analiziranih svojstava tla (CaCO<sub>3</sub> i humus) i njihovih krigingom procijenjenih vrijednosti, uz uključivanje prethodno prikazanih i opisanih parametara semivariograma, prikazani su u Tabeli 3.

Kriging procjene CaCO<sub>3</sub> i humusa, računate za svako od 136 mjesta uzorkovanja (pedoloških profila), imaju: srednje vrijednosti gotovo identične originalnim prosjecima, manje standardne devijacije

i uže raspone variranja ( $x_{\min}$  i  $x_{\max}$ ). Razlike između statističkih parametara originalnih i krigingom procijenjenih vrijednosti posljedica je utjecaja prethodno ustanovljene prostorne strukture (Tabela 3.)

Utjecaj parametara semivariograma na prostornu strukturu može se jasnije predočiti vizuelnim poređenjem trodimenzionalnih modela prostornog rasporeda CaCO<sub>3</sub> (Slika 2) i humusa (Slika 3).

Trodimenzionalne kriging karte sadržaja CaCO<sub>3</sub> i humusa u površinskom horizontu/sloju tla Petrova polja, izrađene "egzaktnim" izotropičnim krigingom, tj., izravnim uključivanjem originalnog skupa podataka u kriging interpolacijsku proceduru (bez nugget utjecaja) prikazane su na slikama 2a i 3a.

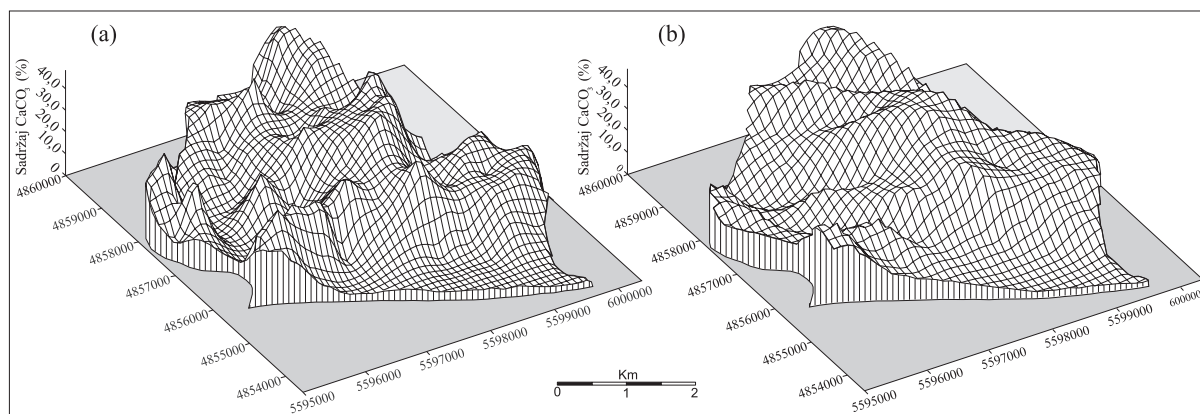
Trodimenzionalne karte sadržaja CaCO<sub>3</sub> i humusa izrađene interpolacijom kriging procjena, koje su evaluirane korištenjem originalnih podataka uz uključivanje parametara semivariograma CaCO<sub>3</sub> i humusa (model, nugget, prag i raspon) i parametara anizotropije (Tabele 1 i 2), prikazane su na Slikama 2b i 3b.

Kriging 3D karte izrađene "egzaktnim" izotropičnim krigingom pokazuju samo utjecaj originalnih svojstava tla i stoga se kreirani model prostora (Slike 2a i 3a), odlikuje sa puno naglih promjena-prekida: neravnina, izbojaka ili šiljaka. Trodimenzionalne 3D karte izrađene anizotropičnim krigingom (Slike 2b i 3b), dakle, uključivanjem parametara anizotropičnih semivariograma, imaju model prostora koga karakterizira prisustvo blagih i zaravnjenih površina.

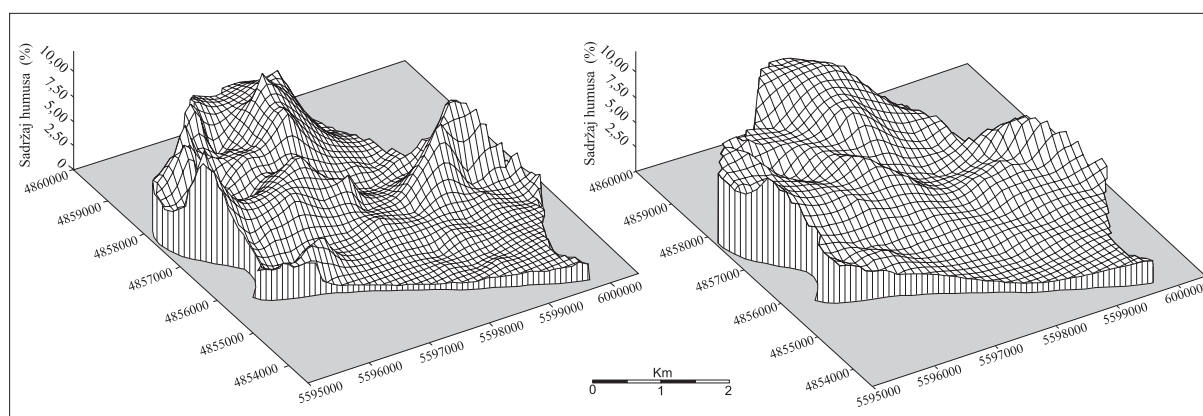
### Greške kriging procjena

Matematički, greške procjene su razlike između originalnih i krigingom procijenjenih vrijednosti analiziranih svojstava (CaCO<sub>3</sub> i humusa) ustanovljene za svaku od 136 lokacija. Statistički pokazatelji grešaka dati su u tabeli 4., a učestalost





Slika 2. Kriging karta sadržaja  $\text{CaCO}_3$  u površinskom horizontu/sloju izrađena “egzaktnim” izotropičnim kriginom (a) i “izravnatim” anizotropičnim kriginom (b)  
 Figure 2. Kriging map of top-soil  $\text{CaCO}_3$  produced by exact isotropic kriging (a) and smoothing anisotropic kriging (b)



Slika 3. Kriging karta sadržaja humusa u površinskom horizontu/sloju izrađena “egzaktnim” izotropičnim kriginom (a) i “izravnatim” anizotropičnim kriginom (b)  
 Figure 3. Kriging map of top-soil humusa produced by exact isotropic kriging (a) and smoothing anisotropic kriging (b)

njihovog pojavljivanja je prikazana na dijagramima (Slika 4).

Iz tabele 4. se vidi da su srednje vrijednosti grešaka procjena ( $\bar{X}_e$ ) blizu nuli, što znači da su kriging procjene nepristrasne. Raspored učestalosti pojavljivanja grešaka (Slika 5<sub>(a,b)</sub>) pokazuje jaku koncentraciju oko nule, što uz malu varijancu procjene ( $d^2$ ) ukazuje na normalan raspored.

Klasičan interval pouzdanosti ( $\pm 2\delta_e$ ) sadrži približno 95% grešaka i smatra se dobrim

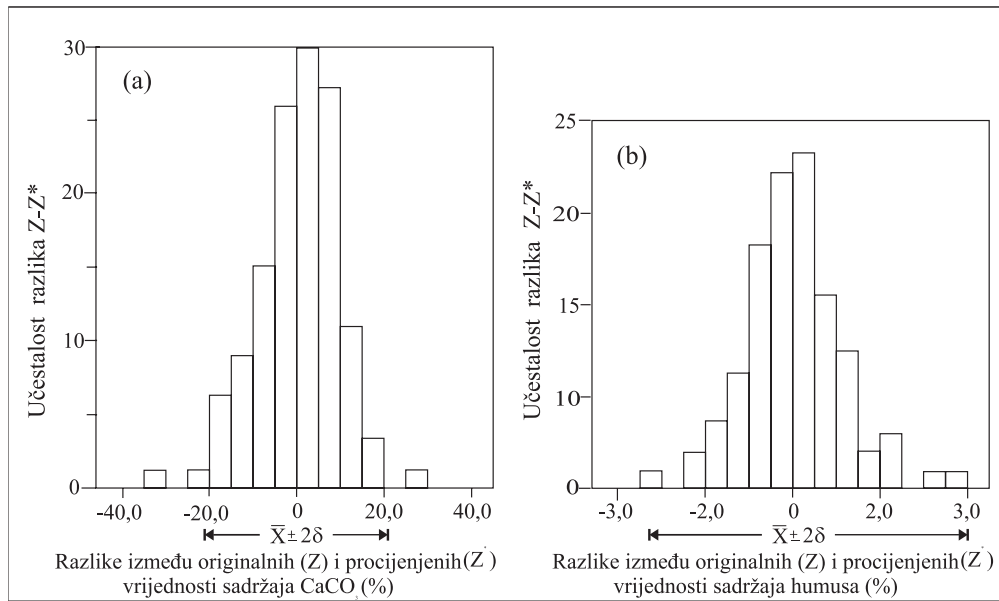
pokazateljem kvalitete geostatističke procjene. U konkretnom slučaju se vidi (Slika 5 i Tabela 4) da se 95% svih grešaka nalazi unutar raspona ( $\pm 2\delta_e$ ). To iznosi  $\pm 21,2\%$   $\text{CaCO}_3$  i  $\pm 2,85\%$  humusa

Interpolacijom grešaka kriging procjena  $\text{CaCO}_3$  i humus za svaku od 136 lokacija, kreirane su 3D i 2D karte grešaka (Slika 5a i b), koje prikazuju konture (prostore i površine) različitih (pozitivnih i negativnih) vrijednosti grešaka procjene sadržaja  $\text{CaCO}_3$  i humusa.

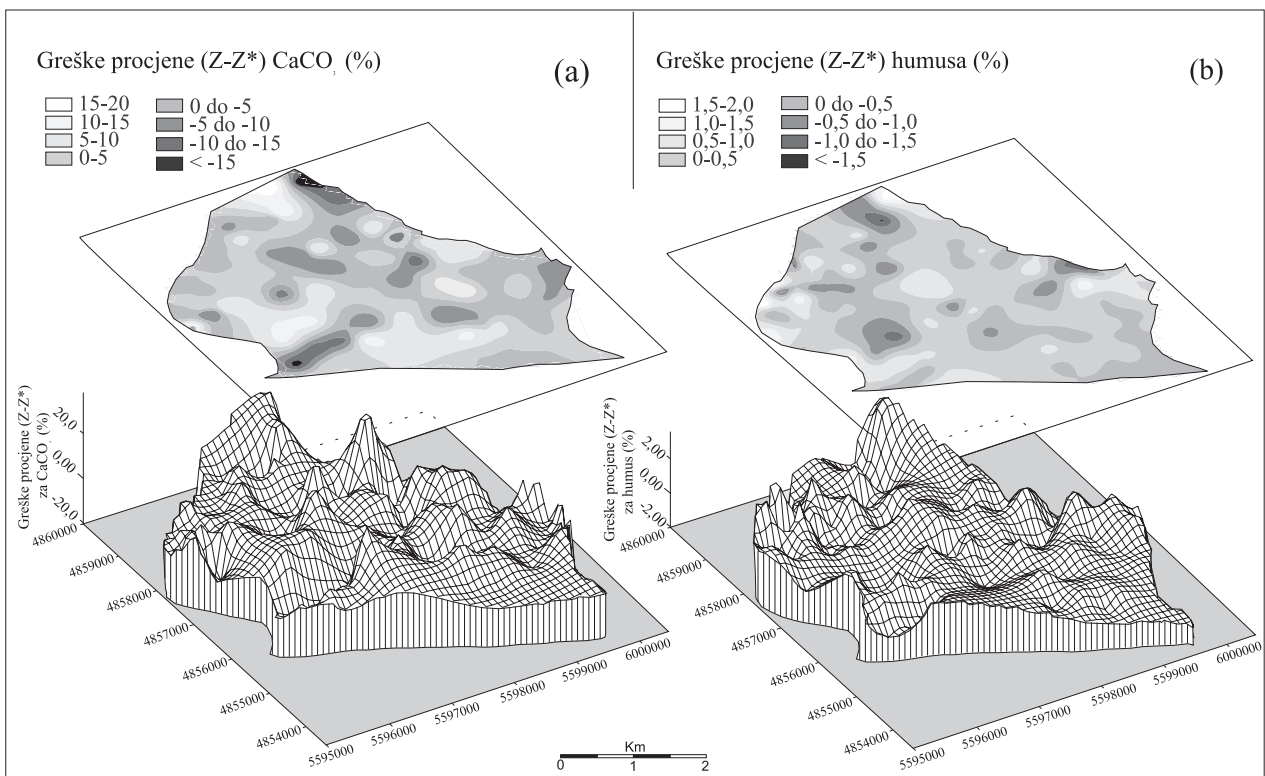
Tabela 4. Srednje vrijednosti ( $\bar{X}$ ), standardne devijacije ( $\delta$ ) i rasponi ( $X_{\min}$  i  $X_{\max}$ ) razlika između originalnih i kriginom procijenjenih vrijednosti svojstava tla ( $Z-Z^*$ )

Table 4. Mean ( $\bar{X}$ ), standard deviation ( $\delta$ ) and ranges ( $X_{\min}$  i  $X_{\max}$ ) of the differences between original and by kriging estimated soil properties ( $Z-Z^*$ )

Svojstvo tla	$\bar{X}_e$	Statistički pokazatelji grešaka kriging procjena		
		e	$X_{e(\min)}$	$X_{e(\max)}$
$\text{CaCO}_3$ (%)	0,41	10,689	-31,8	24,9
Humus (%)	0,01	1,426	-2,47	3,01



Slika 4. Dijagrami učestalosti pojavljivanja grešaka ( $Z-Z^*$ ) za  $\text{CaCO}_3$  (a) i humus (b)  
 Figure 4. Histogram of kriging errors ( $Z-Z^*$ ) for  $\text{CaCO}_3$  (a) and humus content (b)



Slika 5. 3D i 2D slika grešaka kriging procjena sadržaja  $\text{CaCO}_3$  (a) i humusa (b) u površinskom horizontu/sloju tla Petr. polja  
 Figure 5. 3D and 2D error map of kriging estimations of the  $\text{CaCO}_3$  (a) and humus content (b) in the top-soil of Petrovo polje

Ustanovljene greške su kvantitativni izraz preciznosti, odnosno pouzdanosti izabranog modela procjene uz primijenjenu shemu uzorkovanja. Najmanje greške procjene i  $\text{CaCO}_3$  i humusa su u središnjem dijelu polja koji je u geomorfološko-hidrografskom i geološkom, a time i pedološkom smislu najhomogeniji. Najveće su pogreške u kontaktnoj zoni različitih geoloških supstrata i u

područjima promjene geomorfologije (rubni dijelovi polja).

Izloženi rezultati su pokazali da korištena metoda daje odgovor na pitanje: sa kolikom se pouzdanosću, na temelju originalnih podataka, može predvidjeti (prognozirati) realni poljski varijabilitet izabranih pojedinačnih svojstava tla na svakom segmentu istraživanih prostora. U kolikoj će



mjeri evaluirana procjena biti prihvaćena ovisi o kontekstu, odnosno, namjeni ili svrsi za koju se radi.

Optimalna shema uzorkovanja je ona koja će osigurati najpouzadaniju procjenu uz najmanji broj uzoraka tj., najmanji trud i cijenu uzorkovanja. Doprinos kriginga optimizaciji sheme uzorkovanja, dakle, proističe iz precizne identifikacije segmenata prostora (dijelova Polja) sa najvećim greškama procjene na kojima je, uz traženi stupanj pouzdanosti, potrebno provesti detaljnije uzorkovanje tla.

## ZAKLJUČCI

Rezultati primjene kriging analize, u procjeni varijabiliteta i izradi karata sadržaja  $\text{CaCO}_3$  i humusa u površinskom horizontu/sloju hidromorfni tala Petrova polja, upućuju na slijedeća zapažanja:

Modeli prostornog rasporeda sadržaja  $\text{CaCO}_3$  i humusa, evaluirani anizotropičnim krigingom uz uključivanje parametara prostorne strukture semivariograma (nugget, prag i raspon) i parametara anizotropije, daju realniju sliku prostornih struktura analiziranih varijabli, nego modeli evaluirani izotropičnim krigingom, tj., oni koji su evaluirani izravnim uključivanjem originalnog skupa podataka u kriging interpolacijsku proceduru. Ovo jasno pokazuje da je prije provođenja kriginga potrebno računanje parametara semivariograma.

Anizotropna struktura i relativno visoke nugget varijance analiziranih varijabli (sadržaj  $\text{CaCO}_3$  i humusa) istraživanog terena su posljedica velikog lokalnog variranja pedogenetskih čimbenika, prije svih geološke građe, orografije i hidrografije.

Prednost kriging interpolacijske metode bila je u tome jer je osigurala procjenu varijance za svaku lokaciju (pedološki profil) koje su prikazane na kartama kriging grešaka ili dijagramima pouzdanosti procjene.

Izradene karte kriging grešaka mogu imati i praktičnu primjenu, jer osiguravaju jednostavno identificiranje prostora s najvećim greškama na kojima je potrebno, u skladu sa postavljenim kvalitetom procjene, provesti intenzivnije uzorkovanje.

Kriging je pouzdana metoda za procjenjivanje varijabiliteta (procjenu svojstava tla na neuzorkovanim lokacijama) i izradu karata svojstava tla i njihovih grešaka procjene, uz uvjet da izabrana svojstva imaju karakter regionalizirane varijable sa poznatim (izračunatim) parametrima prostorne strukture - semivariogramima. Stoga, u pedološki heterogenim prostorima, kriging analiza može pomoći pri identificiranju uzroka variranja i planiranju optimalne sheme uzorkovanja za traženi stupanj pouzdanosti procjene. Radi osiguranja precizne procjene bitno je da uzorci budu sakupljeni

na dovoljno kratkim udaljenostima (intervalima) tako da budu prostorno zavisni.

## LITERATURA

- Burgess T.M., Webster R. (1980a). Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. *Journal of Soil Sci.* Vol. 31:315-331.
- Burgess T.M., Webster, R. (1980b). Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. II. Block kriging. *Journal of Soil Sci.* Vol. 31:333-341.
- Burrough P.A. (1983a). Multiscale sources of spatial variation in soil. I. The application of fractal concepts to nested levels of soil variation. *Journal of Soil Sci.* Vol. 34:577-597.
- Burrough P.A. (1983b). Multiscale sources of spatial variation in soil. II. A non-Brownian fractal model and its application in soil survey, *Journal of Soil Sci.* Vol. 34:599-620.
- Journel G.A., Huijbregts Ch. J. (1978). *Mining geostatistics.* Academic Press, London.
- Laslett G.M., McBratney A.B., Pahl P.J., Hutchinson M.F. (1987). Comparison of several spatial prediction methods for soil pH. *Journal of Soil Sci.* Vol. 38:325-341.
- McBratney A.B. (1984). *Geostatistical soil survey.* Department of Soil Science. University of Aberdeen.
- McBratney A.B., Webster, R. (1983). Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. V. Co-regionalization and multiple sampling strategy. *Journal of Soil Sci.* 34, 137-162.
- McBratney A.B., Webster, R. (1986). Choosing function for semi-variograms of soil properties fitting them to sampling estimates. *Journal of Soil Sci.* 37, 617-639.
- Matheron G. (1963). Principles of geostatistics. *Econ. Geol.* 58:1246-1266.
- Matheron G. (1982): The theory of the regionalized variables its applications. In J.A. DeGraffenreid (ed.). Time and space dependent data in the earth sciences. Kansas Geol. Survey, series in Spatial Analysis 6. Univ. of Kansas, Lawrence.
- Matheron G. (1965). Les variables regionalisees et leur estimation. Masson, Paris.
- Miloš B. (1984). Tla sekcije Šibenik 2. Institut za jadranske kulture i melioraciju krša - Split.
- Miloš B. (1985). Pedološka karta Petrova polja. Institut za jadranske kulture i melioraciju krša - Split.
- Miloš B. (1987). Numerička klasifikacija hidromorfni tala u osnovama za hidromelioracije. Disertacija, Sarajevo.
- Miloš B. (1998). GIS petrova polja, Institut za jadranske kulture i melioraciju krša - Split.
- Miloš B. (1999). Geostatističke analize pedoloških podataka. I. Mjerenje prostornog varijabiliteta svojstava tla semivariogramima. Institut za jadranske kulture i melioraciju krša - Split, u tisku.
- Trangmar B.B., Yost R.S., Uehara G. (1985): Application of geostatistics to spatial analysis of soil properties. *Adv. Agron.* Vol. 38. Academic Press, New York, NY.

- Vauclin M., Veira S.R., Vachaud G. i Nielsen D.R. (1983). The use of cokriging with limited field soil observation. *Soil Science Society of America Journal* 47,175-184.
- Watson G.S. (1984). Smoothing and interpolation by kriging with splines and cross validation. *Mathematical Geology*, 16, 601-615.
- Webster R. (1982). Spatial analysis of soil and its application to soil mapping. In *Computer applications in Geology I&II. Miscellaneous Paper No. 14*, Geological Society of London, pp. 103-136.
- Webster R., McBratney A.B. (1987). Mapping soil fertility at Broom Barn by simple kriging. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 38, 97-115.
- Yost R.S., Uehara G., Fox R.F. (1982). Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas. II. Kriging. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:1033-1037.
- Škorić A., Filipovski G., Ćirić M. (1973). *Klasifikacija tala Jugoslavije*. ANUBiH, posebna izdanja, Knjiga LXXVIII, Sarajevo.

---

acs66\_12