

Vladimír HUTÁR

PÔDNE PARAMETRE A ICH PRIESTOROVÁ VARIABILITA, TVORBA PEDOTEMATICKÝCH MÁP V SEMIDETAJLNEJ MIERKE

Hutár, V.: Spatial variability of soil parameters, creation of soil thematic map at the semi-detail scale. Kartografické listy 2006, 14, 5 figs., 1 tab., 1 graph, 9 refs.

Abstract: This paper presents main conditions in quality of input data, spatial model optimization and result validation within soil survey in semidetail scale (1:50 000). Position accuracy was determined using reference measurement. Condition of spatial dependence using theory of regionalized variable was applied for interpolation of selected soil parameters. Not every parameter demonstrates optimal condition of spatial dependence (low sampling distance, discrete transition, time dynamic, etc.) Linear regression between measured and estimated values represent powerful tool for validation of method estimation. There are different results in existing tools in spatial interpolation of reference material using identical conditions.

Keywords: spatial interpolation, geostatistics, soil parameters, semidetail scale, pedometrics

Úvod

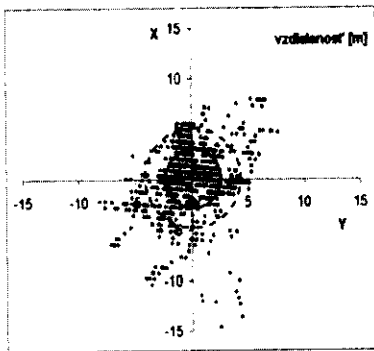
Sledovanie vlastností pôd v teréne a zber primárnych informácií o pôde patrí k prvotným krokom oboznamovania sa s ich základnými vlastnosťami a charakteristikami. Bez tohto prvotného kontaktu nie je možné budovať a rozvíjať poznanie v pedologickej oblasti, ktoré je určené sledovaním prírodných procesov in situ, v pôde. Počas vývoja vednej disciplíny – pedológie v oblasti analýzy a interpretácie pôdných vzťahov v mierke mapy možno sledovať výrazné trendy využívania informačných technológií a systémov. Tento rozvoj, zasahujúci rôzne odvetvia hospodárstva, vedy, školstva, podnikania, ale aj súkromného života, umožnil efektívne spracovávanie informácií a ich vzájomnú výmenu a distribúciu.

Problematika záznamu a spracovávanía informácií v pôdoznalectve bola nastolená už pri počiatku pôdoznaleckého prieskumu. Tradičné pôdoznalectvo, ktoré začiatkom 60. rokov predstavovalo rozhodujúcu oblasť v tejto sfére, uprednostňovalo predovšetkým kvalitatívne spracovávanie poznatkov. Prílišná subjektivita, individuálnosť a nízka verifikácia v teréne boli najčastejšie kritiky adresované konvenčnému pôdoznalectvu. Rozvoj kvantitatívnych metód, využívajúci matematické a štatistické postupy, viedol k výraznému rozvoju vednej disciplíny zvanej pedometrika (pedos, metron). Aj keď počiatky pedometrie možno vidieť už dávnejšie (matematickým a štatistickým spracovávaním informácií o pôde), rozvoj tejto vednej disciplíny predovšetkým súvisí s rozvojom počítačových technológií. Počas vývoja týchto vedných odvetví o pôde možno sledovať vzájomné prelínanie a rozširovanie sa poznatkov aj z iných oblastí. Pri sledovaní a analýze priestorových charakteristík pôdneho krytu sú to napríklad postupy a poznatky z geodézie (napr. globálny systém určovania polohy – GPS) a kartografie (topologické mapy rôznych mierok), diaľkového prieskumu Zeme – DPZ (satelitné obrazové záznamy, fotogrametria). Výsledkom výskumnej činnosti v pôdoznalectve pri sledovaní priestorových zákonitostí je pedotematická mapa. Táto mapa by mala spĺňať požiadavky na presnosť zobrazenia v danej mierke na jednej strane a zákonitosti priestorovej variability pôd na druhej strane.

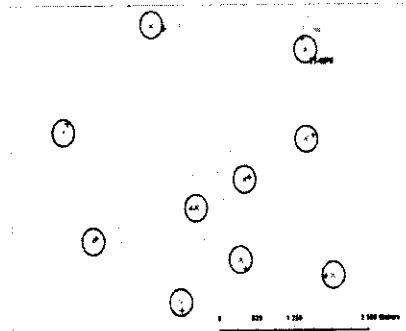
Presnosti polohových informácií pôdnych parametrov

Pri sledovaní pôdnych parametrov v priestorových väzbách sa kladie dôraz na dve základné požiadavky: kvalitatívna charakteristika polohových a analytických presností. Otázka analytickej presnosti spracovania je v prípade laboratórneho stanovenia daná precíznosťou použitého analytického prístroja, správnou laboratórnou praxou ap. Tieto podmienky na dosiahnutie najvyššej presnosti sa dosahujú kruhovými testmi a štandardizáciou za účelom nadobudnutia medzinárodnej akreditácie laboratória. V prípade stanovovania vlastnosti v sledovanej vzorke odhadom záleží na expertnej a znalostnej úrovni pôdoznanca. Problematika presnosti analytických meraní laboratórií je dobre rozpracovaná a známa v kruhu pedologických (ale aj iných) laboratórií. V problematike pôdneho mapovania v menšej miere je rozpracovaná otázka polohových presností.

Väčšina pôdnych máp vypracovaných od svojho počiatku (60. roky 20. storočia) využívala na tvorbu vstupných polohových informácií iba hodnoty zaznamenané do polohopisných máp (rôznych mierok), pričom vo veľa prípadoch bola cieľová mierka mapovania totožná s mierkou pri terénnom prieskume. Počas rozvoja v oblasti mapovania (letecké snímkovanie) možno sledovať tieto trendy aj v pôdoznanectve. Využitie snímok pre potreby fotopedológie opisujú B., Juráni a B. Šurina (1973). Neskôr pri zdokonaľovaní metód v oblasti digitalizácie záznamu aj využitie metód fotogrametrie a diaľkového prieskumu – DPZ (Sviček 2000). Rýchly rozvoj satelitných technológií GPS a ich široké uplatnenie v rôznych odboroch umožnilo stanovenie požadovane presných informácií aj v pôdoznanectve. Tak bolo možné dodatočne stanoviť presnosti polohových meraní voľného mapovania (obr. 1a,b, obr. 2a,b).

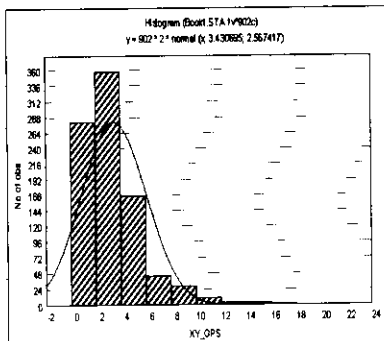


a.

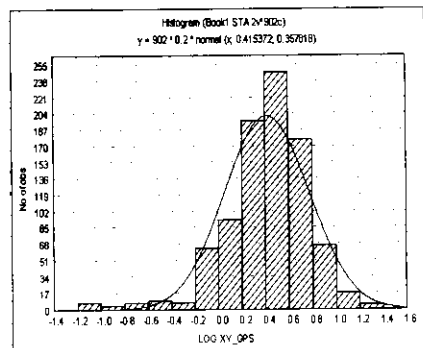


b.

Obr. 1 – a. Polohová presnosť statických pozorovaní GPS. – b. Porovnanie presnosti meraní polohovej informácií v mierke 1:50 000 voči meraniam GPS (GPS merania bez korekcií DGPS v otvorenej krajine)



a.



b.

Obr. 2 – a. Histogram (rozdelenie početnosti) chýb polohových meraní (v mierke 1:50 000) voči referenčnej hodnote GPS (z meraní bez korekcií DGPS v otvorenej krajine). – b. Histogram logaritmov chýb polohových meraní (v mierke 1:50 000) od referenčnej hodnoty (GPS)

Pri sledovaní presnosti polohových informácií sa stanovovala presnosť prístroja GPS voči referenčnej hodnote (geodetický bod). Išlo o statické merania s intervalom časového záznamu bez využitia diferenciálnych korekcií v otvorenej krajine. V prípade terénneho mapovania sa polohová informácia zaznamenaná v mape (1:50 000) porovnávala s takýmito meraniami GPS (referenčná hodnota). Vo všeobecnosti je charakteristika polohovej presnosti udávaná ako „stredná kvadratická chyba“ (RMSE), pričom udávame aj charakteristiku „priemerná chyba“:

$$RMSE_{xy} = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2}, \quad RMSE_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n dx_i^2}, \quad RMSE_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n dy_i^2} \quad (1)$$

RMSE (*root mean squared error*), ktorá je počítaná zvlášť pre os x , os y a rovinu xy v pravouhlom súradnicovom systéme xy . dx , predstavuje odchýlku (rezíduum) od referenčnej hodnoty v smere osi x a dy predstavuje odchýlku v smere osi y . Výsledná hodnota $RMSE_{xy}$ predstavuje rozptyl hodnôt okolo referenčnej hodnoty. Priemerná chyba sa počíta z logaritmov xy odchýliek (reziduí) od referenčnej hodnoty (obr.2a,b):

$$\log \bar{xy} = \frac{1}{n} \sum_i^n \log x_i y_i, \quad xy = \sqrt{dx^2 + dy^2} \quad (2)$$

Keďže rozdelenie početnosti (histogram) logaritmov takýchto chýb je veľmi blízky normálne-mu rozdeleniu, je možné stanoviť aj ďalšie charakteristiky, ako je napr. smerodajná odchýlka, kvantily presnosti meraní atď. Výsledná hodnota predstavuje priemernú odchýlku od referenčnej hodnoty.

Tab. 1 Charakteristiky polohovej presnosti

	Stredná kvadratická chyba $RMSE_{xy}$ (m)	Priemerná chyba (m)
polohová presnosť GPS*	4,29	2,6
polohová presnosť 1:50 000	464,6	186,5

*merania bez korekcií DGPS v otvorenej krajine

Pôdne parametre ako priestorovo závislá náhodná premenná

Pri výskume záujmového regiónu sledujeme pôdne parametre (merateľného charakteru – morfológické, chemické, fyzikálne a biologické, tab. 2) na základe pôdoznaleckého prieskumu. Tieto vzorky (so svojimi priestorovými atribútmi a metrickými charakteristikami) predstavujú základný súbor dát, na základe ktorého charakterizujeme sledovaný región. A keďže sa jedná najčastejšie o metrické charakteristiky, predurčuje ich to na spracovanie numerickými metódami matematickej a štatistickej analýzy. Takéto spracovávanie údajov a ich následná interpretácia nie je potom zaťažená o subjektívne vnímanie, pričom umožňuje interpretáciu širších zákonitostí.

Tab. 2 Prehľad pôdných parametrov ako náhodnej premennej

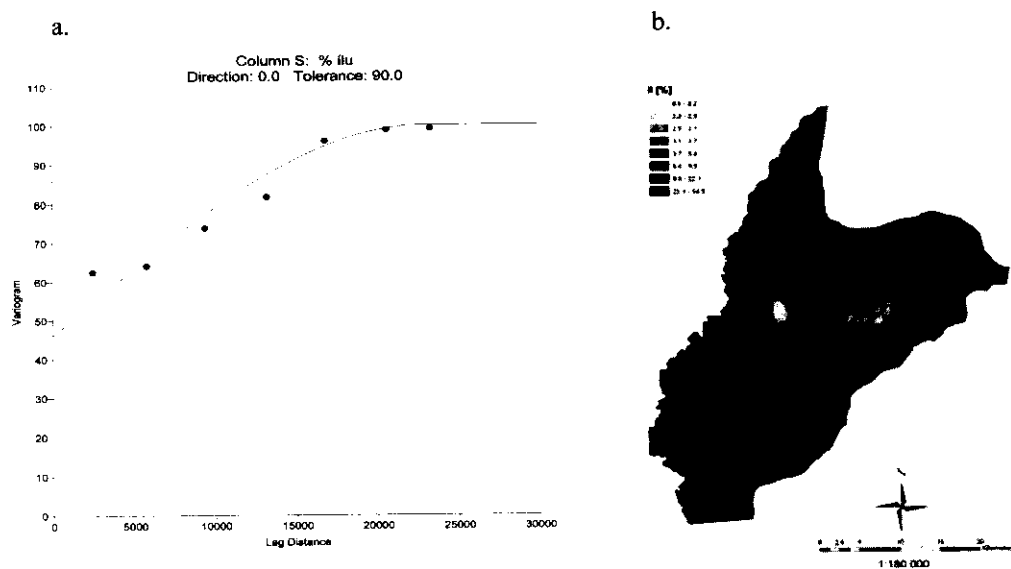
Číselná vlastnosť parametra	absolútna (meraná)	relatívna (meraná)	transformovaná (meraná)	popisná (odhadovaná)
Charakter číselnej vlastnosti	spojitý	spojitý	spojitý	diskrétny
Rozsah parametra	0-číslo.	0-100 %	0-14	počet definovaných tried
Príklad pôdneho parametra	obsah N, P, Hg, atď.	% obsah Cox, piesok, prach, atď.	pH	pôdna vlhkosť, konzistencia, atď.

Všetky metódy priestorovej interpolácie využívajú na odhad hodnoty v sledovanej pozícii hodnoty okolitých meraných údajov a priradované váhy sa určujú definovanými matematicko-štatistickými vzťahmi. Využitie geoštatistických metód (optimálna lineárna interpolačná metóda, známa ako kriging) pri tvorbe pedometrických máp je zaužívané v pedometrickej praxi predovšetkým pre povahu jednotlivých základných pôdnych parametrov (% obsah ílu, N, pH atď.) ako náhodnej premennej s priestorovou závislosťou.

Pre odhad parametra sú v tomto prípade hodnoty váh okolitých meraných parametrov určované tzv. semivariogramom, čo predstavuje centrálny nástroj geoštatistiky. Matematicky vyjadruje ako sa variabilita sledovanej vlastnosti mení so vzdialenosťou a smerom rozdeľujúc akékoľvek dva body premennej (Burrough et McDonnell 1998). Teória základnej geoštatistiky (známa ako teória priestorovo závislej náhodnej premennej) umožňuje takto poznať, ako variabilita závisí iba od oddelení miest a nie na ich absolútnej pozícii.

Pri väčšine pôdnych parametrov (% humusu, prachu atď.) sú charakteristiky semivariogramu nugget (chybový rozptyl), sill (maximálna hodnota ohraničeného modelu semivariacie) a range – rozsah (hodnota vzdialenosti, na ktorej je dosiahnutý sill) optimálne, čo súvisí aj povahou sledovaných parametrov – postupný, difúzny a teda spojitý prechod.

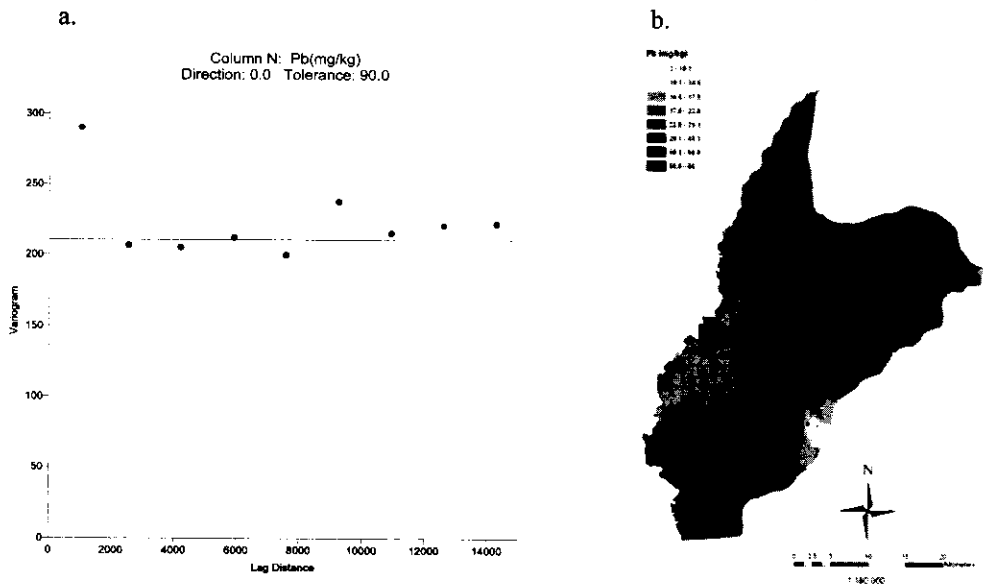
Výsledkom aplikácie váh pre okolité merané hodnoty prostredníctvom semivariogramu je nevychýlený odhad sledovanej charakteristiky. Grafickým výstupom je existencia ucelených izolínií vyjadrujúcich gradient prechodu sledovaného parametra z oblasti vyšších koncentrácií do oblasti nižších koncentrácií. Optimálne charakteristiky semivariogramu – malý nugget, dostatočný sill na zásadný rozsah priestorovej závislosti prináša aj obr. 3a,b priestorovej variability premennej percentuálny obsah humusu v A horizonte regiónu Záhorie.



Obr. 3 – a. Semivariogram priestorovej závislosti % obsahu ílu. – b. Priestorová variabilita percentuálneho obsahu ílu interpolovaná geoštatistickými metódami

Nie všetky pôdne parametre sa vyznačujú obdobnými optimálnymi vlastnosťami priestorovej závislosti. Ako príklad možno uviesť obsah ťažkých kovov (napr. As, Pb, Cu, atď), kde charakteristiky semivariogramu (obr. 4a) vôbec nie sú reprezentatívne (nevýrazný nugget blízky sillu, a teda minimálna priestorová závislosť). Uvedená skutočnosť môže súvisieť s faktom, že vzdialenosť susedných odberov je príliš veľká na zachytenie priestorovej variability sledovaného parametra. Takisto môže ísť o premennú (napr. niektoré ťažké kovy), ktorá má v priestore nespojitý,

diskrétny charakter, čo súvisí aj s podmienkami mobility v pôdnom prostredí. Tvorba koncentrických izolínií je v tomto prípade nepravidelná a ťažko interpretovateľná (obr. 3b).



Obr. 4 – a. Semivariogram priestorovej závislosti obsahu olova Pb (mg/kg) v A horizonte.
 – b. Priestorová variabilita obsahu olova Pb (mg/kg) interpolovaná geoštatistickými metódami

Voľba počtu pozorovaní závisí od viacerých podmienok, akými sú finančné náklady na odber a spracovanie, veľkosť a zložitosť územia, čas na spracovanie projektu. Pre požiadavky mapovania regiónov v projektoch pedogeochemického výskumu v mierke 1:50 000 sú hodnoty vstupných údajov sumarizované v tab. 3. V danej cieľovej mierke je počet pozorovaní (a teda aj priemerná vzdialenosť susedných vzoriek) závislý okrem iného na veľkosti a tvare sledovaného územia, ktorý je väčšinou väčší ako uvedená stredná veľkosť (vo formáte A4, A0). Súvisí to so skutočnosťou, že reálna plocha a tvar záujmového územia nikdy nemajú optimálny geometrický tvar. Stanovená stredná hodnota súvisí s veľkosťou použitého formátu (polovica z formátu ISO A0, A4 v zobrazenej mierke 1:50 000).

Tab. 3 Základné charakteristiky pôdneho mapovania v mierke 1:50 000

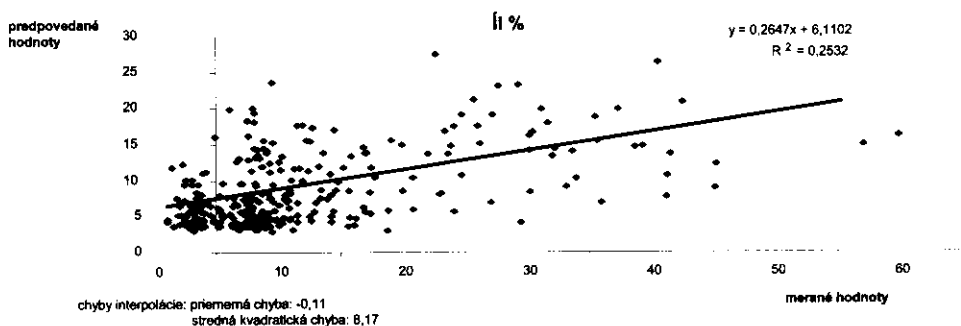
Označenie mapy podľa detailnosti odborného obsahu	Cieľová mapová mierka	Priemerná chyba voľného mapovania v cieľovej mierke	Počet vzoriek N / km ²	Stredná veľkosť územia vo formáte A4	Stredná veľkosť územia vo formáte A0	Priemerná vzdialenosť susedných vzoriek
semidetálna	1:50 000	186 m	1 / 2-3 km ²	78 km ²	1250 km ²	1,4 km

Validácia priestorových modelov pre tvorbu pedotematických máp

Všetky uvedené matematické modely priestorovej interpolácie (deterministické aj stochastické) využívajú na odhad hodnoty v nameraných oblastiach metódu váženého priemerovania z údajov nameraných v okolí sledovanej hodnoty. Váhy, ktoré sú priradované okolitým bodom, sa určujú predovšetkým vzdialenosťou a samotnou zvolenou metódou. Pri všetkých interpolačných metódach má vzťah určovania jednotlivých váh vzhľadom na vzdialenosť aspoň čiastočne spojitý charakter (obr. 3a). Táto skutočnosť má za následok potlačanie (zahladzovanie) lokálnych extrémov vyskytujúcich sa pri priestorovej interpolácii.

Na hodnotenie (tzv. krížovú validáciu) zvolenej metódy sa používa vzťah závislosti meraných hodnôt voči hodnotám odhadovaným, pričom výsledkom hodnotenia je regresná priamka spolu so štatistickým hodnotením priemernej chyby a strednej kvadratickej chyby interpolácie (RMS) – pozri graf 1.

Graf 1 Vzťahy meraných a odhadovaných hodnôt, ich analýza formou lineárnej regresie



Na výsledky hodnotenia má vplyv zvolená metóda, voliteľné parametre samotnej metódy a priestorová distribúcia meraných bodov spolu s hodnotami, ktoré nadobúdajú (priestorová variabilita). Ideálny model priestorovej variability by predstavoval takú regresnú priamku, kde by odhadované hodnoty zodpovedali meraným hodnotám. Takýto model v reálnom svete samozrejme nie je možné zostrojiť vzhľadom na samotný charakter sledovanej veličiny (nespojité prechody, zmeny v čase atď.).

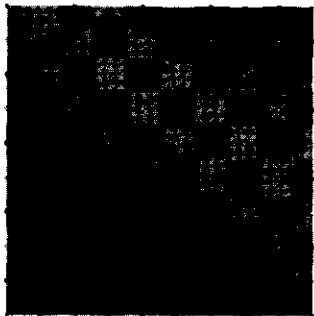
Pre potreby porovnávania existujúcich modelov priestorovej interpolácie bol navrhnutý referenčný materiál vstupného bodového poľa. Tento sa vyznačuje dvojprvkovým nespojitým rozdelením náhodnej premennej s rovnomernou jednotkovou vzdialenosťou zoradenou do mriežky v 2D, pričom hodnoty susedných bodov sa vždy pravidelne striedajú. Analýza priestorovej variability takéhoto poľa formou semivariogramu je vždy negatívna (hodnoty priestorovej závislosti sú nulové), pričom výsledky priestorovej interpolácie sú pri nami testovaných softvéroch odlišné (pri zachovaní rovnakých vstupných parametrov). Uvedené výsledky svedčia o samotnej odlišnosti odhadu použitého nástroja napriek unifikácii vstupných údajov pre zvolenú metódu. Topológia takýchto vzorov je veľmi blízka fraktálnym vzorom (napr. Kochova krivka, Sierpinského koberec – pravé fraktály) v zmysle vnútornej podobnosti a efektu mierky (na základe fraktálnej geometrie Mandelbrot 1977).

Záver

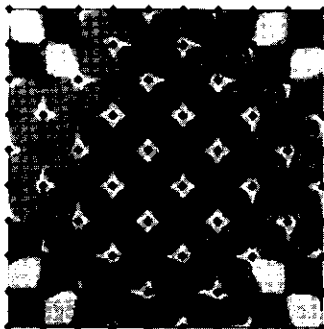
Zber údajov pre tvorbu pôdných máp sa napriek mohutnému rozvoju automatizovaných techník zberu priestorových informácií nezaobíde bez terénneho prieskumu. Kvalita stanovenia pôdných vlastností z reprezentatívnych odberov a ich následná interpretácia závisí v prvom kroku od kvality vykonaného prieskumu (založeného na znalostiach pôdoznanca a jeho technickom vybavení). Využitie, aplikácia technológií a poznatkov z ostatných odvetví pomáhajú zvýšiť kvalitu tvorby nových produktov nielen v oblasti pôdneho mapovania.

Pri využívaní nástrojov zberu polohových informácií (mapy rôznych mierok, snímky DPZ, ortofotomapy, GPS a i.) pôdneho prieskumu je nutné oboznámiť sa presnosťami a limitami použitia daných nástrojov. Na daný účel je vhodné vykonanie opakovaných meraní na referenčnom materiáli za účelom zistenia kvality použitého nástroja. Pri pôdnom mapovaní (prevažne poľnohospodárskych pôd) sa osvedčilo využitie metód globálneho polohového systému pre jeho flexibilitu a vysokú presnosť. Stanovené charakteristiky polohovej presnosti umožňujú zohľadniť túto informáciu pri analýze priestorových vzťahov.

a.



b.



Obr. 5 – a. Priestorová interpolácia referenčného materiálu nástrojom Geostatistical analyst v prostredí ESRI ArcGIS 9.0. – b. Priestorová interpolácia referenčného materiálu v prostredí SURFER 7.00

Na odhad (predpoveď) hodnoty v rovine je vybudovaných množstvo modelov, využívajúcich matematický aj štatistický aparát. Rozhodujúcim parametrom v nich je vzdialenosť, pri ktorej sú zohľadňované okolité merané hodnoty. Nie všetky merané pôdne charakteristiky vykazujú optimálnu distribúciu v priestore, čo môže súvisieť s hustotou odberu a charakteristikou meranej veličiny. Uvedenú skutočnosť možno overiť jednoduchým regresným vzťahom medzi meranými a odhadovanými veličinami, kde ideálny odhad predstavuje zhodu medzi meranými a odhadovanými hodnotami. Uverené rozdiely v odhade hodnôt nie sú len dôsledkom použitia rôznych prístupov priestorovej interpolácie a nastavením vstupných parametrov, ale aj samotnou individuálnosťou jednotlivých softvérových nástrojov.

Literatúra

- BURROUGH P. A., MCDONNELL R. A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford, New York (University Press).
- ČURLÍK, J., ŠURINA, B. (1998). *Príručka terénneho prieskumu a mapovania*. Bratislava (Výskumný ústav pôdnej úrodnosti).
- HUTÁR, V., JAĎUĎA, M. (2005). *Soil mapping in middle scale 1:50 000, several basic principles of soil parameters as regionalized variable in 2 dimension*. *Vedecké práce č. 27*, Bratislava (Výskumný ústav pôdozvedectva a ochrany pôdy), s. 29-34.
- JOHNSTON, K., VERHOEF, J. M., KRIVORUCHKO, K., LUCAS, N. (2001). Using ArcGIS. *Geostatistical Analyst*. GIS by ESRI. New York (Redlans).
- JURÁNI, B., ŠURINA, M. (1973). Fotopedológia a jej využitie v podmienkach Slovenska. *Vedecké práce č. 6*. Bratislava (Výskumný ústav pôdnej úrodnosti a výživy rastlín), s. 131-146.
- MANDELBROT, B. B. (1977). *Fractals, Form, Chance and Dimension*. San Francisco (Freeman).
- SURFER 7.00 – Aug 25 1999 *Surface Mapping System Copyright C 1993-99*, Golden Software, Inc.
- SVIČEK, M. (2000). Detection of eroded soil area from satellite image interpretation on Trnavska hilly land. *Vedecké práce č. 23*, Bratislava (Výskumný ústav pôdozvedectva a ochrany pôdy), s. 165-168.
- ESRI ArcMap 9.0 – C 1999-2004 ESRI Inc.

S u m m a r y

Spatial variability of soil parameters, creation of soil thematic map at the semidetall scale

The paper deals with basic conditions of soil mapping in semidetall scale with regard on quality of enter data (position accuracy, analytical accuracy) and condition of spatial interpolation. Position accuracy of point value (at the semidetall scale 1:50 000) is determined by use of GPS reference measurement. The result of position error is given as RMS error (root mean squared error) and mean error.

Soil parameters collected by soil survey are concerned as random variable (metric values with random distribution) and summarized in Tab. 2 regarding their numerical attributes. Spatial dependence concerning theory of regionalized variable is applied to generate semivariogram for selected soil parameters. Many of basic parameters demonstrate optimal attributes of semivariogram (monotonic increase, low nugget, represen-

tative sill within range). This relate to common characteristic of main soil parameters and their spatial distribution (continuous transition). Several soil parameters (e.g. some heavy metals) demonstrate unrepresentative attributes of spatial dependence using semivariogram analyse (no increase, nugget equal to sill). The reason of such spatial behaviour should be described by low density of sample distribution or discrete spatial transition of investigating parameter.

General conditions of soil mapping (concerning number of samples, sample error, middle area, and neighbour distance in semidetall scale) bring Tab. 3. To validate robustness of spatial prediction, estimated values are compared with measured one in linear regression form. For validation of different software tools and products, topological reference material was developed. Different results using identical condition were obtained.

Fig. 1 – a. Position accuracy of GPS static mode. – b. Comparison of position accuracy in scale 1:50.000 with GPS measurement (GPS stand alone GPS measurement, open landscape)

Fig. 2 – a. Histogram of measurement errors (scale 1:50.000 regarding reference value GPS). – b. Log histogram of measurement errors (scale 1:50.000 regarding reference value GPS)

Fig. 3 – a. Spatial dependence (semivariogram) of clay content (%). – b. Spatial variability of clay (%) content, interpolation with geostatistical tools

Fig. 4 – a. Spatial dependence (semivariogram) of Pb content (mg/kg) in A horizont. – b. Spatial variability of lead Pb (mg/kg) content, interpolation with geostatistical tools

Fig. 5 – a. Spatial interpolation of reference material with tool Geostatistical analyst (ESRI ArcGIS 9.0). – b. Spatial interpolation of reference material with tool SURFER 7.00

Tab. 1 Position accuracy attribute

Tab. 2 Review of soil parameters as random variable

Tab. 3 Basic attributes of soil mapping in scale 1:50 000

Graph 1 Relation between measured and estimated values, analysis with linear regression

Lektoroval:

Ing. Radek DUŠEK, Ph.D.,

Ostravská univerzita, Ostrava