

UTILIZZO DELLA GEOSTATISTICA A SUPPORTO DELLA CARTOGRAFIA PEDOLOGICA NELLA PIANURA ALLUVIONALE DEL BRENTA

Fabrizio Ungaro¹, Costanza Calzolari¹, Francesca Ragazzi², Luciano Fantinato²

¹ CNR IRPI - Istituto di Ricerca per la protezione Idrogeologica, Unità Staccata di Firenze

² ARPAV Centro Agroambientale - Castelfranco Veneto (TV)

Abstract

This paper presents the results of the application of a geostatistical methodology aimed to provide information to improve the delineation of soil mapping units of the 1:50,000 soil map of the Venice lagoon watershed. The methodology presented is suitable in the case of variable with non stationary mean and non stationary residuals and is applied to the Brenta alluvial plain, which is characterized by weak morphological evidences. The analyses focused on clay contents at three different depths. Sequential Gaussian simulations (SGS) were implemented to simulate clay residuals of the different soil-landscape units in order to assess and quantify local uncertainty taking explicitly into account the mean value of each unit.

Results show a good agreement with the general pattern of soil-landscape units in the plain, integrating the traditional soil map and the geostatistical approach in elucidating the clay content distribution over the study area.

Key words: cartography, geostatistics, kriging, sequential conditional simulations

Riassunto

Il lavoro presenta i risultati dell'applicazione di una metodologia geostatistica al fine di fornire indicazioni utili a migliorare la delimitazione delle unità cartografiche della carta dei suoli del bacino scolante nella laguna di Venezia in scala 1:50.000. Viene proposto un protocollo di analisi da utilizzarsi in condizioni di non stazionarietà della media e dei residui da questa, applicandolo ad un caso di studio nella pianura alluvionale del Brenta, territorio dove le differenze morfologiche risultano poco evidenti.

L'analisi ha riguardato in particolare il contenuto in argilla, misurato a tre differenti profondità. Al fine di definire correttamente il livello di incertezza spaziale, è stata implementata una procedura di simulazione sequenziale gaussiana condizionale (*sequential gaussian simulation*, SGS), applicata ai residui dalla media delle diverse unità di paesaggio, in modo da condizionare la stima alla media delle unità presenti nella pianura.

I risultati ottenuti mostrano un sostanziale accordo nel ricostruire i pattern generali di distribuzione della frazione granulometrica argillosa nelle unità di pedopaesaggio del territorio in esame, rendendo più chiara la distribuzione dell'argilla nel territorio e integrando il modello interpretativo ottenuto con metodi tradizionali di cartografia pedologica.

Parole chiave: cartografia, geostatistica, kriging, simulazioni condizionali sequenziali.

Introduzione

La possibilità di integrare diverse fonti di informazioni all'interno di una stessa procedura di stima è uno degli aspetti applicativi più interessanti che la geostatistica offre alla scienza del suolo, consentendo di superare la rigida distinzione tra pedologia qualitativa "tradizionale" e la più recente pedometria quantitativa. Il primo risultato di questa integrazione è senz'altro la possibilità di meglio identificare la struttura spaziale delle variabili o dei processi oggetto di studio in un dato territorio e di migliorare di conseguenza la capacità predittiva e l'affidabilità degli elaborati cartografici che lo rappresentano. Le possibilità offerte dalla geostatistica in termini di algoritmi di calcolo e procedure sono diverse: krigaggio con deriva esterna, cokrigaggio, krigaggio con regressione, krigaggio a media localmente variabile (Bierkens, 1997; Boucneau et al., 1998; Heuvelink e Bierkens 1992, Odeh et al., 1995; Ungaro e Calzolari, 2000); ciascuna di queste procedure risponde a diverse situazioni in termini di relazioni tra la variabile primaria (dato misurato in corrispondenza di punti specifici) e secondaria (dato noto in tutti i punti dell'area considerata o almeno in tutti i punti in corrispondenza dei quali è richiesto un valore stimato per la variabile primaria) per cui occorre valutare caso per caso quale approccio si presti meglio a risolvere il problema di migliorare l'accuratezza e l'affidabilità della stima. Solitamente quest'ultima veniva descritta ricorrendo alla varianza di krigaggio, tuttavia il suo utilizzo è opportuno solo in alcune situazioni che assai raramente si riscontrano nella pratica: simmetria nella distribuzione locale degli errori e indipendenza della varianza dal valore dei dati (Goovers, 1997). Inoltre quello che spesso interessa non è tanto l'incertezza associata al valore stimato in un singolo punto dell'area considerata, ma piuttosto l'incertezza relativa a tutti i punti o a gruppi di punti considerati congiuntamente nel loro insieme. Per questi motivi

è divenuto sempre più frequente il ricorso a procedure non di stima ma di simulazione, che, conservando alcune caratteristiche della distribuzione statistica e della struttura spaziale della popolazione campionata, evitano gli inconvenienti tipici delle procedure di interpolazione e forniscono misure di dispersione del dato stimato, con possibilità di visualizzazione (Gooverts, 2001).

Scopo del presente lavoro è fornire indicazioni utili alla delimitazione delle unità cartografiche della carta dei suoli del bacino scolante in laguna di Venezia in scala 1:50.000 (Giandon et al., 2001) attraverso l'applicazione di tecniche geostatistiche di simulazione, indicandone i limiti operativi e le possibilità di integrazione con le altre fonti di informazioni disponibili per la pianura alluvionale del Brenta, territorio dove le differenze morfologiche, utilizzate per la definizione di unità suolo-paesaggio, risultano poco evidenti.

Materiali e metodi

Area di studio

L'area di studio è rappresentata da una porzione di circa 740 km² della pianura alluvionale del fiume Brenta compresa tra Castelfranco Veneto e Cittadella, a Nord, e Padova e Mestre, a Sud (fig. 1, Giandon et al., 2001). Si tratta della porzione distale del conoide alluvionale del Brenta (conoide di Bassano), di età tardiglaciale wurmiana, il cui apice è situato allo sbocco della valle del Brenta presso Bassano del Grappa. La pendenza media della pianura è intorno allo 0,1% e le quote variano da 47 a 2 m s.l.m.. I sedimenti sono costituiti da materiale fine di granulometria variabile in relazione alla morfologia: si riconoscono infatti un sistema di dossi sabbiosi piuttosto sviluppato, delle depressioni prevalentemente argillose e tra questi un'ampia superficie modale di interdosso prevalentemente limosa. Le aree più rilevate (unità di paesaggio WB2) sono caratterizzate da suoli a granulometria grossolana (*Dystric Eutrudepts, coarse loamy, mixed, mesic; Hypereutric Cambisols*); procedendo da monte verso valle la granulometria diventa più fine, passando così da suoli franco grossolani, con eventuale presenza di scheletro in profondità, a suoli franco fini nella parte centrale o limoso grossolani in prossimità del margine lagunare. Alla riduzione della granulometria e al progressivo innalzamento della profondità media della falda si accompagna un peggioramento del drenaggio che da buono diventa mediocre. Le superfici di transizione tra aree di dosso e superfici depresse (unità WB4) sono molto diffuse arealmente e sono contraddistinte da tessiture limose (generalmente franco limose o franco limoso argillose) e dalla presenza di un orizzonte di accumulo di carbonato di calcio sotto forma di concrezioni che localmente viene indicato con il nome di caranto (*Oxyaquic Eutrudepts fine silty, mixed, mesic; Gleyic Calcisols*). Il drenaggio di questi suoli è mediocre e la falda è presente generalmente entro 150 cm. Le aree depresse (unità WB5), caratterizzate da suoli a tessitura fine e drenaggio lento, decarbonatati in superficie e con orizzonte calcico in profondità (*Aquic Eutrudepts, fine, mixed, mesic; Endogleyic Calcisols*), sono poco estese nella parte centrale, ma più diffuse a valle, nella parte orientale prossima alla laguna.

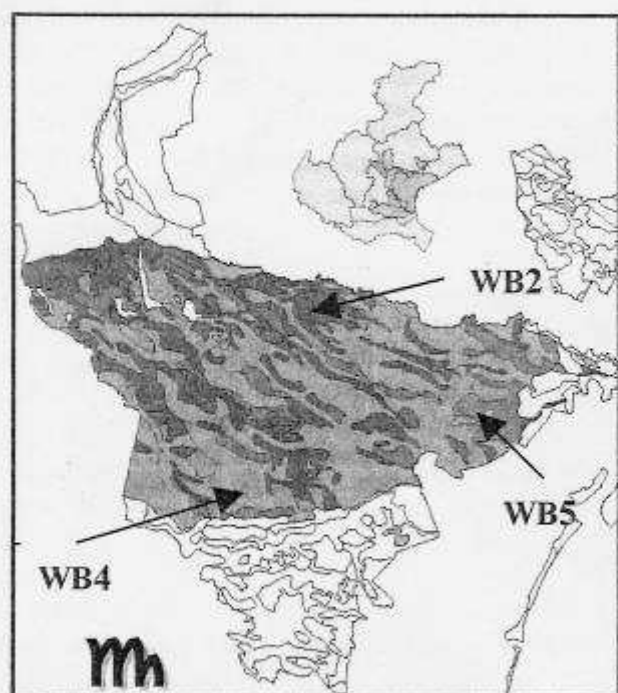


Figura 1. Estratto dalla carta dei suoli del bacino scolante in laguna di Venezia. Il presente lavoro ha riguardato la bassa pianura antica del fiume Brenta

Il data set utilizzato è costituito da valori misurati e georeferenziati del contenuto in argilla, relativi a tre diverse profondità (da 0 a 50 cm, da 50 a 100 cm e >100 cm). A ciascun dato è associata inoltre l'unità cartografica di paesaggio di appartenenza, secondo la legenda della carta dei suoli 1: 50.000. I dati disponibili per la bassa pianura sono rappresentati da un numero di osservazioni compreso tra 225 e 211 (per il primo ed il terzo strato rispettivamente) corrispondenti a circa 3.2-3.4 km² per ogni osservazione (circa 0.3 osservazioni per km²). Le statistiche descrittive del data set, relativamente allo strato 0-50 cm, sono riportate nella tabella 1.

Tabella 1. Contenuto in argilla %, profondità 0-50 cm, statistiche descrittive

	WB2	WB4	WB5	Totale
N	75	113	27	225
Media	17.58	24.72	31.09	23.34
Dev. Std.	6.94	8.65	10.31	9.61
Min.	7.70	11.70	12.20	7.70
Q25	12.85	18.08	24.48	16.08
Mediana	15.53	23.00	31.00	21.03
Q75	19.98	28.78	38.00	28.20
Max.	45.40	52.60	57.20	57.20
Skew.	1.72	1.05	0.43	0.99
Kurt.	3.81	0.87	0.07	0.67

Analisi spaziale e integrazione delle informazioni derivabili dalla carta dei suoli

L'analisi spaziale dei dati si è articolata nelle seguenti fasi: 1) statistiche descrittive e analisi spaziale esplorativa (statistiche su finestre mobili); 2) calcolo dei residui e trasformazione dei dati (normal score transform, Goovaerts, 1997); 3) variografia sperimentale: calcolo dei semivariogrammi per i residui normalizzati; 4) implementazione delle simulazioni sequenziali gaussiane (SGS) condizionali e trasformazione inversa; 5) aggiunta a ciascun valore simulato del valore medio della unità di appartenenza; 6) definizione dell'incertezza degli elaborati prodotti.

Sono state per prima cosa analizzate le differenze in termini di valori medi tra le diverse unità di paesaggio descritte nella bassa pianura (Tukey HSD test). In termini di valori medi, le tre unità principali della bassa pianura risultano significativamente diverse ($p < 0.05$) per il loro contenuto in argilla a tutte e tre le profondità esaminate; per quanto riguarda i contenuti in limo e sabbia, sempre alle tre diverse profondità considerate, risultano significative le differenze tra l'unità WB2 e le unità WB4 e WB5, mentre le differenze tra queste due non risultano significative al livello di significatività prescelto. Sulla base dei test di significatività le unità individuate nell'ambito della bassa pianura appaiono quindi piuttosto ben distinte tra loro almeno in termini tessiturali, soprattutto per quanto riguarda la frazione argillosa.

Le statistiche su finestre mobili sono state calcolate su aree di dimensioni di 5000 x 5000 m, con il 50% di sovrapposizione, per un totale di 116 coppie media - deviazione standard. Se si considera la relazione tra le medie e le deviazioni standard calcolate su tutto il terreno di pianura, si riscontra per l'argilla un discreto effetto proporzionale (R^2 0.42). Tale effetto è meno evidente nel secondo strato (R^2 0.31) e più marcato nello strato più profondo (R^2 0.58), ad indicare una maggiore continuità tra i valori estremi associata ad un maggiore variabilità a livello locale. I residui, calcolati sottraendo al dato misurato il valore medio dell'unità suolo-paesaggio di appartenenza mostrano lo stesso effetto proporzionale con valori di R^2 significativi (0.41 tra 0 e 50 cm, $p < 0.05$), mentre la situazione appare piuttosto diversa per le altre due frazioni granulometriche ed i loro residui, per le quali non si individua alcuna relazione significativa.

Alla base dell'uso delle simulazioni condizionali sequenziali per quantificare il livello di incertezza legato ad una procedura di stima, è l'idea di generare un set di rappresentazioni (realizzazioni) equi-probabili della distribuzione spaziale della variabile oggetto di studio e di utilizzare le differenze tra le carte simulate come misura dell'incertezza ("incertezza spaziale"), sia a livello generale per tutta l'area di stima che per parti di essa.

Tipicamente i requisiti di ciascuna carta simulata sono i seguenti: 1) i valori osservati vengono riprodotti in corrispondenza della loro localizzazione: in questo caso la realizzazione è detta "condizionale" ai valori osservati; 2) l'istogramma dei valori simulati riproduce più o meno strettamente l'istogramma dei dati osservati e su una media di molte simulazioni si avvicina (o almeno dovrebbe) a quello osservato; 3) il modello di semivarianza $g(h)$ viene riprodotto, ossia il semivariogramma dei dati stimati è simile o coincidente con quello dei dati osservati. L'implementazione degli algoritmi di simulazione sequenziale comporta la determinazione della *ccdf* (*conditional cumulative distribution function*), ossia della funzione di distribuzione cumulata condizionale ai valori misurati, in corrispondenza di ogni nodo di stima. In funzione dell'approccio utilizzato per la determinazione della *ccdf*, parametrico (trasformazione gaussiana) o non parametrico (trasformazione indicatrice), si distinguono due classi di algoritmi di simulazione sequenziale. In questo caso, previa verifica dell'ipotesi di multigaussianità, confermata dall'analisi dei semivariogrammi indicatori dei residui (Goovaerts, 1997), è stato adottato un approccio parametrico: viene assunta una distribuzione normale gaussiana, la cui implementazione comporta la trasformazione dei dati in normal score, con distribuzione caratterizzata da media pari a zero e deviazione standard unitaria.

Come già detto, la geostatistica offre la possibilità di utilizzare procedure di stima in grado di incorporare direttamente il pattern spaziale delle medie osservate, assumendo che questo sia correttamente e completamente descritto dalle delineazioni ricondotte alle diverse unità di paesaggio individuate nella bassa pianura. Il valore di una variabile Z da stimare in un punto nello spazio u ricadente nell'unità di paesaggio i è dato da:

$$Z(\mathbf{u})_i = m(\mathbf{u})_i + R(\mathbf{u}) + \varepsilon \quad [2.1]$$

dove $m(\mathbf{u})_i$ è una funzione deterministica che descrive la componente strutturale di Z in u , e che in questo caso è data dal valore medio dell'unità per la variabile considerata, $R(\mathbf{u})$ è un termine stocastico, localmente variabile e spazialmente dipendente, che rappresenta il valore residuo da $m(\mathbf{u})_i$ ed infine ε è un termine di errore, spazialmente indipendente, con media zero e varianza σ^2 . È importante notare come concettualmente la [2.1] differisca dall'approccio cartografico classico per la presenza della componente stocastica $R(\mathbf{u})$ suscettibile di strutturazione in termini di dipendenza spaziale attraverso la modellizzazione del variogramma sperimentale, e come i due approcci si vengano ad integrare quando il valore del trend $m(\mathbf{u})_i$ non venga stimato su vicinaggi locali via krigaggio, ma definito a priori sulla base delle relazioni suolo paesaggio che alla scala operativa di questo studio rappresentano per $m(\mathbf{u})_i$ un modello di continuità spaziale certamente più robusto di quello derivabile attraverso l'analisi variografica. L'informazione secondaria derivata dalla cartografia è quindi utilizzata per caratterizzare il trend spaziale delle varia-

bili principali, sostituendo la media globale dell'area con medie variabili localmente, attraverso i seguenti passaggi: 1) i dati disponibili sono raggruppati in termini di unità di paesaggio di appartenenza e per ciascuna variabile viene calcolato il valore medio di ciascuna unità; 2) la media dell'unità di suolo viene sottratta da ciascuna osservazione per calcolare i residui di ciascuna variabile (fig. 2); 3) sui residui normalizzati viene effettuata l'analisi spaziale esplorativa ed il calcolo dei semivariogrammi sperimentali $\gamma_{RES}(h)$; 4) usando i modelli fittati per $\gamma_{RES}(h)$, i residui vengono simulati via krigaggio ordinario ai nodi di una maglia di stima ed il valore medio corrispondente dell'unità di appartenenza, in corrispondenza di ciascun nodo del grid di stima, viene aggiunto al valore simulato. Nella procedura adottata non viene fatta nessuna assunzione sulla stazionarietà della media dei residui, e la media delle unità di paesaggio in corrispondenza dei nodi del grid di stima viene aggiunta al termine delle L procedure di simulazione in corrispondenza di ogni nodo del grid di stima. Al termine delle 100 simulazioni, in corrispondenza di ciascun nodo del grid di stima sono state calcolati i valori medi e gli indici di dispersione (varianza, errore standard della media, intervallo di confidenza della media, range interquartile, mappe dei decili).

Risultati e discussione

I semivariogrammi sperimentali sono caratterizzati da un incremento piuttosto ripido della semivarianza in corrispondenza dei primi due o tre lag, seguito da una porzione che aumenta gradualmente sino a raggiungere il sill in corrispondenza di una distanza compresa tra i 10 ed i 15 km. L'andamento è comune alle tre profondità esaminate, con un nugget intorno al 40%. In tutti i casi comunque la quota di variabilità non risolta (nugget) è notevole su quella strutturabile in termini variografici: questo è dovuto, almeno in parte, alla bassa densità delle osservazioni disponibili, anche se non è possibile escludere l'influenza dell'elevata variabilità che caratterizza tali ambienti.

Dall'esame del comportamento dei variogrammi direzionali emerge come le variabili esaminate siano caratterizzate da una discreta anisotropia sia geometrica che zonale: nel caso del contenuto in argilla nel primo strato si individuano due direzioni lungo le quali la struttura spaziale appare meglio definita: una lungo l'asse E-O (0°) con anisotropia geometrica, e una N-O S-E (148°), caratterizzata da una marcata anisotropia zonale. Negli strati sottosuperficiali la direzione di maggiore continuità è invece lungo l'asse N/NO-S/SE (110°). In tutti i casi l'andamento lungo i 45° è prossimo ad un puro nugget. Generalmente la continuità delle caratteristiche granulometriche in ambienti deposizionali di pianura è legata all'andamento dei corsi d'acqua, parallelamente ai quali si individuano solitamente le direzioni di maggiore continuità. Nel caso della bassa pianura l'orientamento dell'antico corso del Brenta è con tutta probabilità evidenziato dalla direzione rilevabile per le forme del paesaggio legate in qualche modo agli eventi di deposizione, quali dossi e depressioni. L'orientamento preferenziale di queste forme è in linea di massima coincidente con le direzioni di anisotropia prevalenti rilevate nel corso dell'analisi variografica. In particolare le direzioni di massima anisotropia riscontrate per l'argilla nell'orizzonte superficiale (0-50 cm) sono allineate con le direzioni di orientamento prevalenti delle depressioni, mentre l'orientamento dei dossi appare meno coincidente, soprattutto nella parte orientale della bassa pianura con quello la direzione di massima continuità rilevata per il contenuto in sabbia. I variogrammi sperimentali calcolati per i residui normalizzati (fig. 3) mostrano sostanzialmente le medesime caratteristiche di quelli relativi ai dati normalizzati: buona continuità, presenza di due strutture annidate caratterizzate da range di autocorrelazione differenti, marcata anisotropia, sia zonale che geometrica nelle medesime direzioni già evidenziate per i dati tal quali. Inoltre la % di varianza non risolta diminuisce sensibilmente: ad esempio nel caso dello strato superficiale il valore del nugget passa da 0.34 a 0.16.

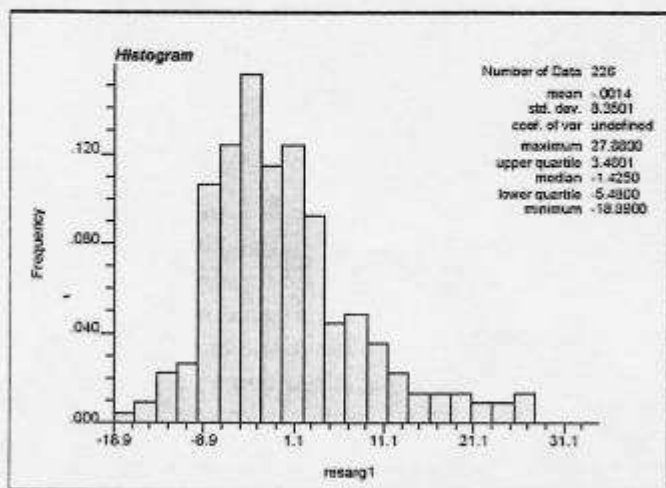


Figura 2. Istogramma, residui argilla %, 0-50 cm

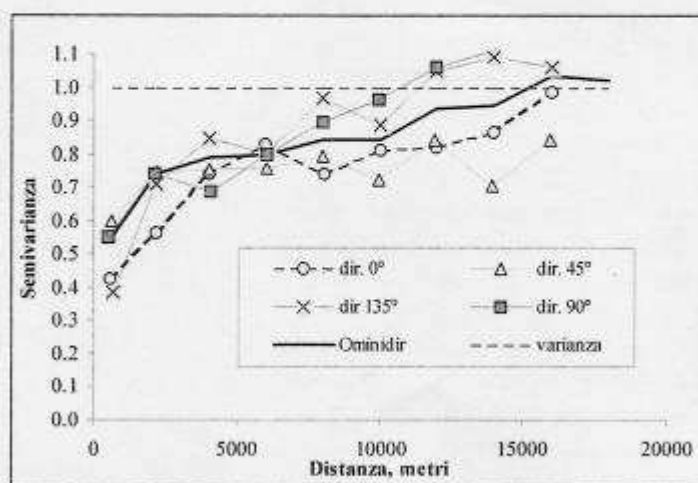


Figura 3. Semivariogrammi, residui normalizzati argilla

Ciò indica che probabilmente le medie delle unità, seppur ben differenziate tra loro da un punto di vista statistico, non rappresentano da sole un modello completo per la struttura spaziale delle variabili esaminate e la buona, talvolta migliore, continuità e la direzionalità dei variogrammi dei residui delle medie indicano dunque l'esistenza di fattori che determinano il pattern di continuità spaziale agendo ad una scala che va oltre quella della rilievo topografico esplicitato dagli andamenti delle delineazioni della carta dei suoli.

Tabella 2. Parametri dei modelli di semivariogrammi. C0: nugget; C1, C2: componenti strutturali; Sph: modello sferico; Anis.: rapporto di anisotropia (= range minimo/range massimo); IGF: indicative goodness of fit

Variabile	C0	C1	Range	Dir.1	Anis.1	Modello1	C2	Range2	Dir. 2	Anis.2	Modello2	IGF
Res. argilla 0-50 cm	0.34	0.36	3960	0°	0.68	Sph	0.30	18000	135°	1000	Sph	1.11e-02
Res. argilla 50-100 cm	0.45	0.42	2100	110°	0.29	Sph	0.11	1710	110°	1000	Sph	2.36 e-02
Res. argilla >100 cm	0.27	0.47	7339	110°	0.13	Sph	0.26	11530	110°	0.31	Sph	6.36 e-02

Utilizzando i modelli di semivariogramma individuati per i residui normalizzati (tab. 2), sono state eseguite 100 simulazioni sequenziali su un grid di stima di 500 x 500 m, utilizzando il software WinGSLib 1.3 (Statis, 2000); al termine di ogni realizzazione, il valore simulato subisce la trasformazione inversa e ad esso viene aggiunto il valore medio dell'unità di appartenenza.

Conclusioni

Concentrando l'analisi geostatistica sui residui della media delle unità cartografiche, è risultato possibile e vantaggioso integrare le informazioni contenute nella carta dei suoli utilizzando il valore medio delle unità di paesaggio come criterio per informare la struttura spaziale della covarianza a piccola scala ed esplicitando la struttura spaziale degli scarti intorno alla media, previa normalizzazione. A tal fine, occorre infatti verificare non solo la significatività in termini statistici delle medie delle unità di paesaggio ma anche l'oscillazione intorno a tali valori medi e verificare la stazionarietà dei residui. Nel caso i residui risultino chiaramente non stazionari è opportuno e necessario quindi ricorrere a procedure di simulazione che prendano esplicitamente in considerazione la loro struttura spaziale. Nel caso di studio qui esaminato, le simulazioni implementate utilizzando il krigaggio ordinario dei residui normalizzati (fig. 4) hanno portato ad una sostanziale congruenza con il modello distributivo dei suoli. In questo caso infatti si osserva una buona coincidenza con i limiti nelle unità di dosso e di depressione indicando chiaramente allo stesso tempo l'esistenza di aree sistematicamente caratterizzate da valori al di sopra o al di sotto del valore medio dell'unità di paesaggio all'interno della pianura indifferenziata. Inoltre, all'interno dei limiti delle medesime unità viene riprodotto il trend generale osservato nei dati sperimentali di graduale aumento della % relativa alla frazione fine all'interno di tutte le unità. In questo modo è stato possibile suggerire alcune modifiche delle delineazioni tracciate sulla base del solo microrilievo (fig. 5), lì dove il valore medio simulato $\pm 1.96 \cdot SE$ fosse esterno all'intervallo di confidenza della media dell'unità nella quale ricade.

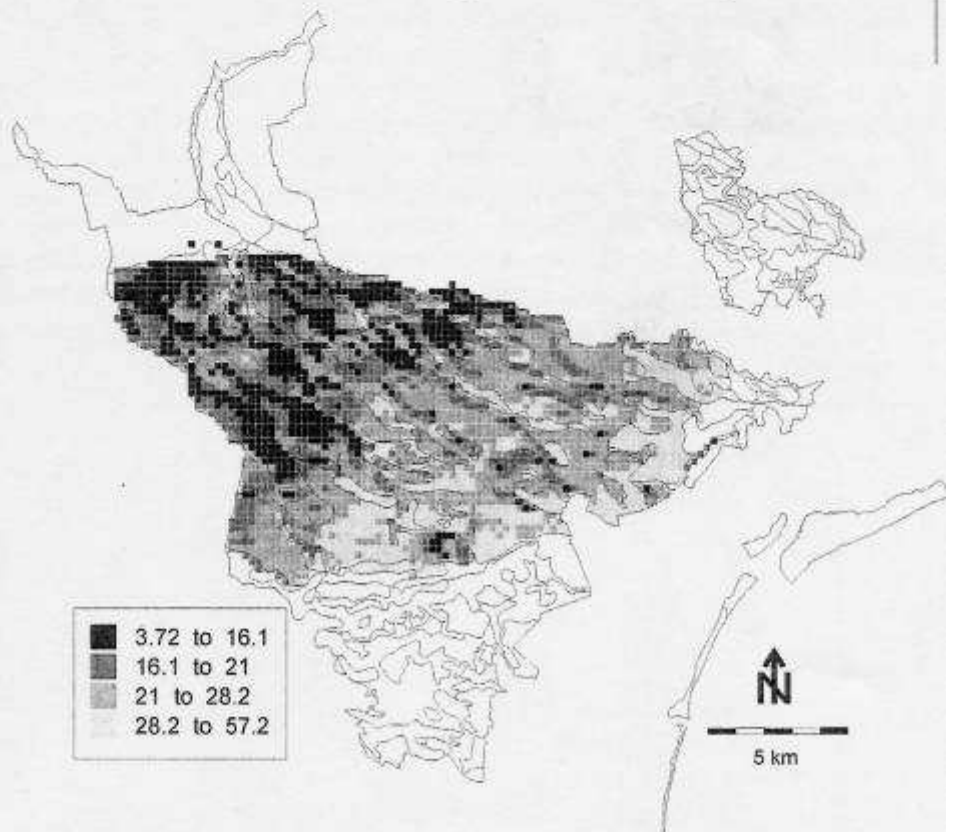


Figura 4. Simulazioni sequenziali gaussiane: distribuzione del contenuto di argilla % (0-50 cm): valore medio (N = 100) simulazioni. Gli intervalli riportati sono relativi ai quartili della distribuzione ottenuta

Infine le procedure di simulazione mostrano una migliore prestazione rispetto alle procedure di stima propriamente dette, nel caso si voglia definire in maniera corretta l'accuratezza statistica dei valori stimati, al fine di individuare le aree caratterizzate da anomalie nella variabilità dove sarebbe più opportuno aumentare la densità di campionamento o rivedere gli schemi interpretativi della variabilità dei suoli.

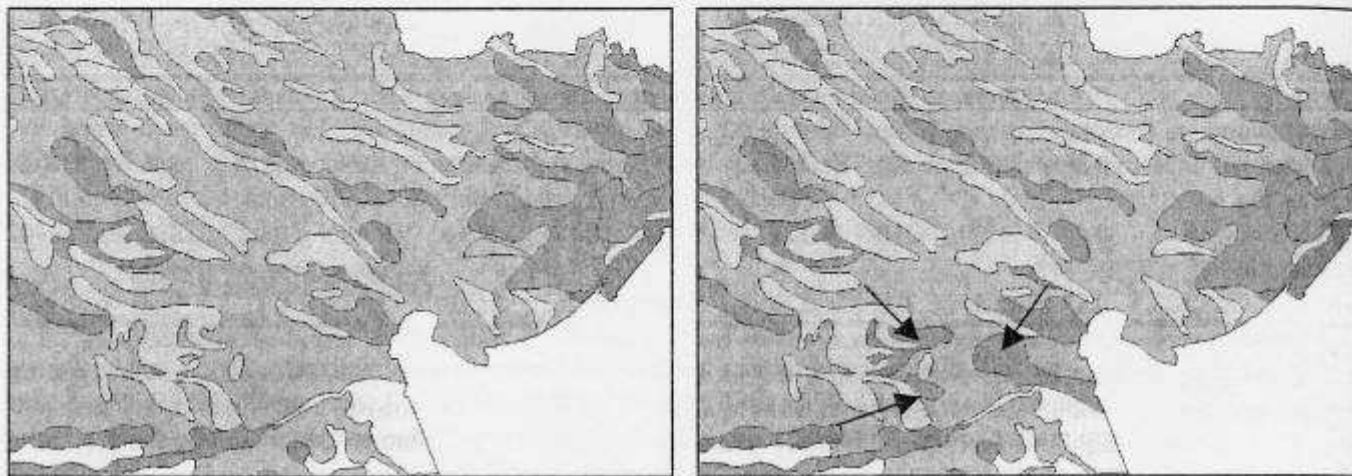


Figura 5. Esempio di modificazioni delle delineazioni della carta dei suoli 1:50.000. Le delineazioni indicate dalle frecce nella figura a destra rappresentano nuovi poligoni attribuiti all'unità WB5 precedentemente non evidenziati ed inseriti all'unità WB2

Ringraziamenti

Il presente lavoro, svolto nell'ambito della convenzione tra ARPAV e CNR-Istituto per lo Studio degli Ecosistemi "Valutazione della capacità protettiva del suolo nei confronti dell'inquinamento delle falde nell'area del bacino scolante in laguna di Venezia", e la cartografia dei suoli sono stati realizzati nell'ambito di un progetto della Regione Veneto con i fondi della legge speciale per Venezia. Si ringrazia la Provincia di Venezia per la collaborazione e i dati forniti.

Bibliografia

- BIERKENS, M.F.P., 1997. Using stratification and residual kriging to map soil pollution in urban areas. In: Baafi, E.Y., Schofield, N.A. (eds.), *Geostatistics Wollongong '96*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 996-1007.
- BOUCNEAU G., VAN MEIRVENNE M., THAS O., HOFMAN G., 1998. Integrating properties of soil map delineation into ordinary kriging. *European Journal of Soil Science*, 49, 213-229.
- GIANDON P., RAGAZZI F., VINCI L., FANTINATO L., GARLATO A., MOZZI P., BOZZO G.P., 2001. La carta dei suoli del bacino scolante in laguna di Venezia. *Bollettino della Società Italiana di Scienza del Suolo*, 50, 273-280.
- GOOVAERTS P., 2001. Geostatistical modeling of uncertainty in soil science. *Geoderma*, 103, 3-26.
- GOOVAERTS P., 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press: New York (Oxford University Press), pp. 483.
- HEUVELINK G.M.B., BIERKENS M.F.P., 1992. Combining soil maps with interpolations from point observations to predict quantitative soil properties. *Geoderma* 55, 1-15.
- ODEH I.A.O., MCBRATNEY A.B., CHITTLEBOROUGH, 1995. Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: heterotopic cokriging and regression-kriging. *Geoderma*, 67, 215-226.
- STATIOS, 2000. WinGslib version 1.3. Statios Software and Services, San Francisco, CA.
- UNGARO F., CALZOLARI C., 2000. Integration of GIS derived soil information with geostatistical estimation of pedotransfer functions inputs for soil modeling applications. In *Proceedings of the 4th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*, Amsterdam, 12-14 July 2000, 663-670.