

USO DEL SUOLO, IL SUPPORTO DELLA GEOSTATISTICA

LA GEOSTATISTICA MINERARIA, NATA PER RISOLVERE PROBLEMI RELATIVI ALLO SFRUTTAMENTO DELLE MATERIE PRIME E DELLE RISORSE ENERGETICHE, SI È EVOLUTA IN GEOSTATISTICA AMBIENTALE OGGI LARGAMENTE APPLICATA, DALLA SCIENZA DEI SUOLI ALLA CLIMATOLOGIA, DALLA MORFOLOGIA ALL'EPIDEMIOLOGIA. LE CRITICITÀ E I POSSIBILI SVILUPPI APPLICATIVI.

Parlando di uso del suolo si associa a un mezzo naturale (il suolo) un'azione antropogenica (l'uso, l'abuso o il consumo) che ne modifica le caratteristiche originali, in maniera diretta o indiretta. Rimane centrale il problema della conoscenza di tali caratteristiche, siano esse "originali" o "alterate".

Le proprietà dei suoli hanno natura diversa, per es. categorica o numerica, ma sono riconducibili sempre a variabili georeferenziate, cioè grandezze definite punto per punto. In termini matematici si parla di *variabili regionalizzate*, e se si indica evidenziando la coordinata del punto nello spazio di lavoro, per es. *temperatura nel punto* $x T(x)$.

Lo spazio di lavoro è normalmente bidimensionale, quello geografico, ma a seconda del problema e della variabile può essere mono o tridimensionale. Si tratta inoltre di variabili spazio-temporali, ma il tempo, in molti casi, può venire "stralciato" (trascurato, considerato autonomamente, fattorizzato ecc.).

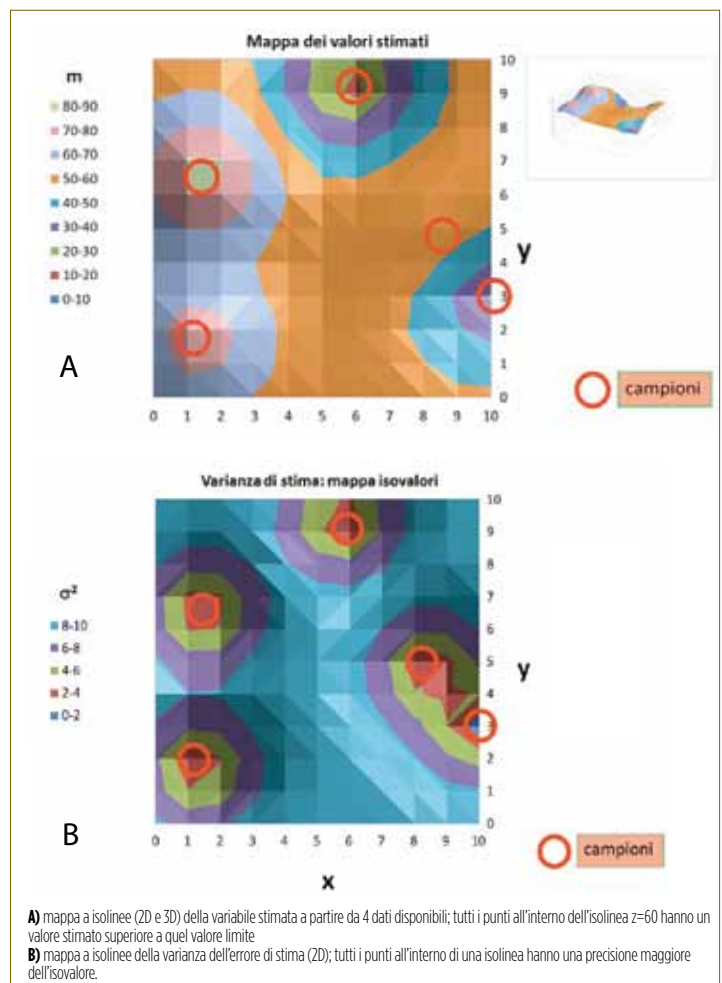
Le variabili che caratterizzano il suolo e il suo uso spesso sono note solo nei punti ove esistono dei campioni o delle misure. Pertanto nella maggior parte dei casi ci si basa su valori *stimati*, quindi *incerti*. Questo fatto dà una forte *connotazione probabilistica* (rischio) alla natura dei problemi e alle decisioni conseguenti.

Dalla geostatistica mineraria alla geostatistica ambientale

La *geostatistica* è il nome corrente della disciplina che fa riferimento alla *teoria delle variabili regionalizzate* creata dal professor Matheron a partire dagli anni 50 per studiare queste variabili in un quadro probabilistico (Matheron, 1970). La geostatistica si è sviluppata originariamente in campo minerario per risolvere il problema dello sfruttamento delle materie prime minerali ed energetiche e degli idrocarburi. In tale ambito le variabili regionalizzate

FIG. 1
GEOSTATISTICA
E USO DEL SUOLO

Cartografia della variabile saturazione.



sono tipicamente concentrazioni di minerali e caratteristiche geomorfologiche.

Si tratta della *geostatistica mineraria*, nata per affrontare e risolvere al meglio molti problemi legati all'uso del sottosuolo (Journel e Huijbregts, 1978). Fra questi, i più tipici e noti riguardano la stima e la selezione delle riserve coltivabili.

Negli anni 90 la *geostatistica ambientale* è entrata in scena superando rapidamente la geostatistica mineraria in termini di numero di settori applicativi e di varietà di applicazioni (Bruno e de Fouquet, 2005). Dato un mezzo naturale o più

spesso antropizzato, gli studi mirano a quantificarne lo stato o a definirne l'evoluzione, spaziando dalla scienza dei suoli alla climatologia, dalla morfologia all'epidemiologia.

In un senso più ristretto la geostatistica ambientale si occupa delle relazioni fra le variabili che caratterizzano i diversi mezzi (es. densità di popolazione, uso del suolo attuale e precedente) e le concentrazioni di diverse sostanze nell'aria, nelle acque superficiali o nel sottosuolo.

Molto spesso nelle diverse applicazioni rimane equivalente la logica del problema

o la natura stessa delle variabili, come dimostra ad esempio il parallelismo esistente fra il caso della selezione del minerale utile in un giacimento e quello della selezione del volume da bonificare in un'area inquinata.

La Regione Emilia-Romagna sin dagli anni 90 ha promosso delle applicazioni avanzate della geostatistica alla scienza dei suoli (Dosi et al. 1992; Raspa et al., 1993) e ad altre tematiche riconducibili all'uso dell'ambiente superficiale (Bruno et al., 1994-5).

Occorre però dire che devono ancora essere valorizzate in campo ambientale la grande esperienza e la raffinata capacità di analisi che la geostatistica ha sviluppato in ambito minerario, per risolvere problemi concreti, legati agli effetti di un'azione umana su un mezzo naturale. Devono ancora essere messi bene a fuoco nella pratica degli studi ambientali e dell'uso del suolo, ma persino nelle norme, alcuni concetti fondamentali, come ad esempio: la rilevanza e l'impatto della corretta definizione della scala di lavoro, il riconoscimento della natura sommabile o non delle variabili, l'effetto *informazione* e l'effetto *supporto* sulla *selettività*, le condizioni che rendono possibile e corretta l'equivalenza fra parametri statistici e grandezze fisiche da caratterizzare. Esaminiamo a titolo dimostrativo una delle più comuni questioni.

L'importanza della precisione delle stime nella costruzione delle carte

Le variabili che caratterizzano il suolo sono normalmente rappresentate tramite cartografie, mappe e immagini. Se escludiamo i casi specifici delle variabili dedotte direttamente da immagini da satellite o telerilevate, le grandezze d'interesse non sono note in tutti i punti dello spazio, ma solo laddove sono disponibili campionamenti o misure. In tutti gli altri punti occorre stimare i valori a partire dai dati, con metodologie più o meno complesse e con precisioni diverse punto per punto. Solo in alcuni casi, la grande disponibilità di dati consente di raggiungere precisioni tali per cui la grandezza in esame si considera nota in tutto il dominio di studio. La cartografia a isolinee di un parametro fisico, per es. *granulometria* o *saturazione*, è ottenuta interpolando graficamente una maglia sufficientemente densa di valori stimati. È intuitivo che la precisione in generale sarà diversa punto per punto, più elevata in prossimità dei dati e molto

FIG. 2
GEOSTATISTICA
E USO DEL SUOLO

Mappa della probabilità di superamento del valore limite $z_{cut}=60$. All'interno dell'isolinea $P=30\%$, tutti i punti hanno oltre il 50% di probabilità di superare il valore di soglia.

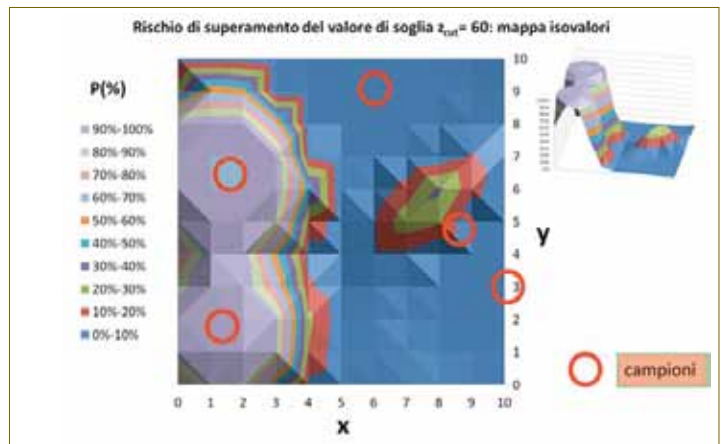


FOTO G. SIGHELE

meno lontano da questi. Occorre avere consapevolezza che le decisioni sull'uso del suolo sono prese anche sulla base di valori stimati, incerti. Diventa dunque molto importante conoscere la qualità delle carte, ovvero la precisione delle stime utilizzate per la loro costruzione. Si tratta di un problema che è sempre stato al centro delle applicazioni geostatistiche, per la sua rilevanza in termini economici

e di rischio sulle decisioni da assumere.

Un esempio può chiarire meglio il concetto: si tratta dell'effetto che l'informazione disponibile ha sulla selettività.

In genere un mezzo si definisce inquinato quando la sostanza indagata supera un valore limite, tipicamente fissato per legge. Normalmente prendiamo la mappa della concentrazione della sostanza

e identifichiamo come inquinata la superficie "racchiusa" dall'isolinea pari al valore di soglia.

Di fatto si sta operando una selezione sui valori stimati, non sui valori veri, perché all'interno dell'area selezionata al massimo vi sarà solo qualche campione. Consideriamo allora un punto selezionato, il cui valore stimato è di poco superiore alla concentrazione limite; non è detto che lo sia anche il valore vero, anzi vi sono consistenti probabilità che il valore vero sia inferiore al limite di legge. L'effetto di questa erronea selezione è un danno economico: ad

esempio si è bonificato anche dove non era necessario. Il problema dell'errore di selezione è più delicato nel caso opposto, quando delle superfici sono escluse da un'operazione di bonifica perché ritenute sicure sulla base dei loro valori stimati cartografati. In effetti, sempre per valori prossimi al valore limite, esistono consistenti probabilità che fosse necessario intervenire laddove era stato escluso. In questo caso gli effetti dell'errata selezione sono più difficili da calcolare, perché di natura socio-ambientale, oltre che economica. Se poi effettuassimo una campionatura

aggiuntiva, ripercorrendo la procedura stima>cartografia>selezione, i risultati ottenuti risulterebbero diversi e più precisi perché basati su un numero maggiore di dati iniziali. Dall'analisi del rischio connesso all'errore di selezione discende una metodologia di selezione un poco più raffinata, ma molto più giustificata: si deve considerare inquinata la superficie che ha un prefissato livello di probabilità di superare il valore limite.

La geostatistica fornisce un aiuto essenziale al problema della selezione, sotto molti aspetti. In primo luogo mira a realizzare le stime più precise possibili, perché il danno conseguente all'errore di selezione diminuisce quanto più preciso è lo stimatore. Dapprima si studia il tipo di variabilità spaziale della grandezza, classicamente quantificato dal *variogramma*, quindi si sceglie uno "stimatore" efficiente, il *krigaggio*, le cui versioni elementari sono implementate in molti software (es. Grass, Surfer).

Un secondo apporto deriva dalla capacità della geostatistica di affiancare al valore stimato in ogni punto la sua precisione, cioè la *varianza di stima*. Ne risulta una seconda cartografia a isolinee, la mappa della *varianza di stima*, che quantifica punto per punto l'affidabilità della cartografia della variabile di interesse. In conclusione, la geostatistica fornisce sempre due carte, quella della variabile stimata e quella della sua precisione (*figura 1 a,b*). Da qui è possibile arrivare al calcolo della mappa a isolinee della probabilità di superare il valore di soglia (*figura 2*) e quantificare così i rischi connessi all'operazione di selezione.

Si tratta solo di un esempio dell'apporto potenziale della geostatistica, che deve peraltro essere ancora pienamente recepito a livello di pratica e soprattutto di norme. Ma a fronte della conoscenza del tipo di variabilità spaziale (*variogramma*), della capacità di effettuare delle stime efficienti (*krigaggio*) e della capacità di calcolare la precisione delle stime (*varianza di stima*), conseguono una gamma molto ampia di soluzioni avanzate che la geostatistica può offrire, specifiche problema per problema.

Roberto Bruno

Dipartimento di Ingegneria civile, ambientale e dei materiali, Università di Bologna



BIBLIOGRAFIA

- Bruno, R., Lavagnoli, M., Patrizi, G., Rambaldi, A., Raspa, G. & Venturini, L. (1994), *Analisi geostatistica per la ricostruzione strutturale delle aree di cava negli acquiferi alluvionali di Ravenna*. Atti di GEOFLUID 94, "Problemi di Geingegneria degli acquiferi", Piacenza, Italia, 6-8 ottobre 1994.
- Bruno, R., Gallerani, S. & Valpreda, E. (1995), *Integration between Geostatistics and GIS for modelling the recent subsidence in a salt lagoon area*. Proceedings of "International Conference on Environments and Informatics", Budapest, Hungary, June 29-July 1, 1995.
- Bruno, R. & de Fouquet, Ch., 2005, *The expansion of environmental Geostatistics in "Space, structure and randomness*. Contribution in honour of Georges Matheron in the fields of geostatistics, random sets, and mathematical morphology", Bilaudeau M., Meyer F., Schmitt M. (eds) Springer, pp. 105-133.
- Dosi M.P., Filippi N., Patrizi G., Raspa G. e Bruno R. (1992), *Una strategia di analisi dei dati per la classificazione dei suoli: primi risultati di un progetto della Regione Emilia-Romagna sulle carte pedologiche di semidettaglio*, Atti (Vol.2) della XXXVI Riunione Scientifica della Soc. Ital. di Statistica, Pescara, 21-24 Aprile, 1992.
- Journel, A. & Huijbregts, Ch., 1978, *Mining Geostatistics*, Academic Press, London, 600 p.
- Matheron G., 1970, *La théorie des variables régionalisées, et ses applications*, Les Cahiers du Centre de Morphologie mathématique, fascicule
- Raspa G., Bruno R., Dosi P., Filippi N. & Patrizi G. (1993), *Multivariate Geostatistics for soil classification*. Conference proceedings of "Geostatistics Troia '92", Ed. A.Soaes, Kluwer Academic, 1993, pp 793-805.
- Raspa, G, Bruno, R. & Dosi, P. (1993), *Coregionalization Analysis and Factorial Kriging for Soil Variability Study*, Atti di International Workshop on Statistics of Spatial Processes: Theory and Applications, Bari, Settembre 1993, pp.186-188.