

# Correlazione statistica di livelli ghiaiosi (torrente Idice, Bologna)

G. GALLI \*, C. CANTELLI \*\*, P. LAMBORGHINI \*\*\*

**SOMMARIO:** La teoria delle variabili regionalizzate e la statistica elementare sono state applicate ai valori dei rapporti ghiaia/sabbia + pelite (G/S + P), ricavati dai dati di perforazione della porzione orientale della conoide del torrente Idice (Bologna). I risultati dell'indagine statistica sono i seguenti: 1) distinzione di due popolazioni, una caratterizzata dal 60 ÷ 70% del rapporto G/S + P e da un andamento aritmetico di tale rapporto lungo una direzione NE-SO; una popolazione con valori G/S + P dell'1 ÷ 40%, caratterizzati da un andamento log-normale in direzione NO-SE. 2) Determinazione dell'andamento della varianza del rapporto G/S + P, da monte a valle. 3) Identificazione dei limiti metrici di autocorrelazione del rapporto G/S + P. Questi dati hanno permesso di costruire un modello matematico probabilistico, consistente in corpi lenticolari di primo e secondo ordine, e di valutare l'andamento delle isotropie. I modelli sono stati usati come strumento di correlazione dei livelli ghiaiosi. Il differente assetto e gli spessori differenziali dei litosomi ghiaiosi, in differenti zone della conoide, evidenziano l'esistenza profonda di blocchi il cui basculamento risulta essere stato indotto da faglie orientate in senso appenninico e antiappenninico.

## 1. Introduzione

La teoria delle variabili regionalizzate costituisce la base dalla quale è derivata la tecnica del 'kriging', usata in ingegneria e geologia mineraria per calcoli delle variazioni del tenore [MATHERON, 1971; CLARK, 1979]. Più generalmente tale teoria si occupa degli aspetti spaziali delle variabili e pertanto può essere applicata in tutti quei casi nei quali le variabili hanno una distribuzione o interrelazione spaziale e/o temporale.

Questo lavoro presenta i risultati di un'applicazione geologica della teoria delle variabili regionalizzate a dati di perforazioni, provenienti dalla conoide quaternaria del torrente Idice (Bologna, Italia).

La descrizione dell'applicazione specifica viene preceduta da un breve paragrafo, nel quale vengono richiamati brevemente i termini e le definizioni matematiche. Per una trattazione più approfondita si rimanda il lettore interessato ai lavori degli Autori sopracitati.

## 2. Variabili casuali regionalizzate e semivariogramma

Vengono chiamate regionalizzate quelle variabili casuali (variabili con proprietà matematiche, ma con risultato incerto) i cui valori variano in funzione della posizione delle varia-

bili nello spazio. Si assume che queste variabili siano situate in un campo geometrico (definito da forma, dimensione e orientamento). Queste variazioni avvengono con continuità, ma in modo complesso, senza quindi che se ne possa rappresentare l'andamento mediante funzioni matematiche semplici.

Se  $Z(x)$  è il valore di una variabile calcolata nel punto 'x', all'interno di uno spazio  $V$ , il valore medio  $E(Z(x))$  della variabile, all'interno di  $V$ , sarà dato da:

$$E(Z(x)) = \frac{1}{V} \int_V Z(x) dV \quad (1)$$

Generalmente (non sempre) al valore di  $Z(x)$  è associata una varianza, che misura la dispersione del valore della variabile all'interno dello spazio  $V$ :

$$\text{VAR}(Z(x)) = \frac{1}{V} \int_V [Z(x) - E(Z(x))]^2 dV \quad (2)$$

Se si considera ora una seconda variabile regionalizzata  $Z'(x)$ , situata nello stesso spazio  $V$  e a una distanza  $[x + h]$  da  $Z(x)$ , è ragionevole supporre che i valori delle due variabili siano legati da una qualche interrelazione: più la variabile  $Z'(x)$  è lontana da  $Z(x)$ , più diminuisce l'interdipendenza tra i valori delle due variabili. E viceversa. Più generalmente i due valori, situati lungo un vettore di distanza  $h$ , variano al variare del modulo e dell'orientamento di  $h$ .

\* Dott. Gianni GALLI, geologo, dottorato di ricerca all'Istituto di Geologia di Bologna.

\*\* Dott. Claudio CANTELLI, professore di Geografia Fisica nel Dipartimento di Geografia dell'Università di Bologna.

\*\*\* Dott. Patrizio LAMBORGHINI, laureato in Scienze Geologiche, dipendente del Parco Nazionale d'Abruzzo.

L'autocovarianza esprime quindi il grado di relazione tra valori situati a una certa distanza, lungo il vettore di distanza  $h$ :

$$\text{ACOV}(Z, Z') = \frac{1}{V^2} \int_V [Z(x) - E(Z(x))] [Z'(x) - E(Z(x))] dv \quad (3)$$

Si può altresì definire una funzione di autocorrelazione:

$$\text{ACORREL.} = \frac{\text{ACOV}(Z, Z')}{\text{VAR}(Z(x))} \quad (4)$$

La stazionarietà assume che tutti i campioni provengano dalla stessa distribuzione probabilistica. La variabile  $Z(x)$  è stazionaria di primo ordine se  $E(Z(x))$  è indipendente da  $x$  (cf. (3)), e stazionaria di secondo ordine se  $E(Z(x))$  e

$\text{VAR}(Z(x))$  sono entrambi indipendenti da  $x$  (cf. (4)). Sarà sempre possibile comunque definire uno spazio  $V' < V$ , all'interno del quale sussistano condizioni di quasi-stazionarietà.

Il variogramma  $2\gamma$  è un grafico (e/o una formula) che descrive la differenza di valore tra paia di campioni, caratterizzati da un dato orientamento relativo. È definito come una varianza  $2\gamma$ , composta da una componente casuale ( $\text{VAR} Z(x)$ ) e da una componente spaziale ( $\text{ACOV}(Z', Z)$ ):

$$2\gamma(Z(x), h) = \text{VAR}[Z(x)] - \text{ACOV}[Z(x), Z(x+h)] \quad (5)$$

Dalla (5) risulta che come  $h \rightarrow 0$ , la varianza e l'autocovarianza tendono ad assumere gli stessi valori; come  $h$  aumenta, l'autocovarianza diminuisce perché aumenta progressivamente l'indipendenza tra i punti. Perciò il valore di  $2\gamma$  è compreso tra i valori di zero, fino a valori che si approssimano alla varianza per valori grandi di  $h$ .

Queste relazioni sono espresse graficamente nella Fig. 1.

In pratica  $2\gamma$  si approssima alla varianza asintoticamente. La distanza oltre la quale i valori sono indipendenti tra loro (uguali cioè alla varianza) è chiamata 'limite metrico di autocorrelazione' (*range*) ( $a$  di Fig. 1).

Generalmente non si ha lo stesso tipo di variogramma in differenti direzioni, all'interno dello spazio  $V$ . Se  $2\gamma$  ha gli stessi valori, indipendentemente dalla direzione  $h$ , l'autocorrelazione viene chiamata isotropica, altrimenti è anisotropica. Se  $2\gamma$  è indipendente non solo dalla direzione, ma anche dal modulo di  $h$ , non si ha alcuna correlazione, e la curva avrà un andamento del tipo indicato nella Fig. 2A. Se  $2\gamma$  varia con continuità, all'aumentare di  $h$ , si avrà invece una curva come quella della Fig. 2B. Fra i due tipi di curve esiste tutta una serie di casi intermedi che danno origine a parecchi tipi di variogrammi.

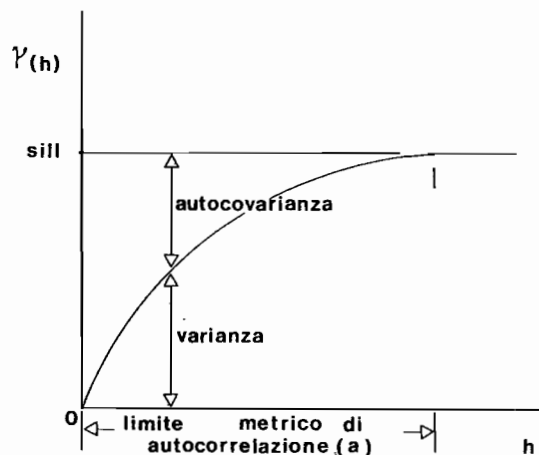


Fig. 1. - Semivariogramma sferico. Il semivariogramma  $\gamma(h)$ , composto dalla varianza e dalla autocovarianza, descrive le differenze tra i valori di proprietà, in funzione della distanza  $h$ , lungo una determinata direzione. I valori della differenza vengono calcolati per il numero massimo di valori multipli di una distanza iniziale  $h$ , dove  $h$  è un vettore di distanza. Per definizione  $\gamma(h)$  parte da zero, perché due campioni a distanza zero devono contenere gli stessi valori, a meno che non esista una discontinuità iniziale (*nugget effect*). Il semivariogramma è utilizzato per definire la distanza entro la quale i valori sono interdipendenti (limite metrico di autocorrelazione  $a$ ). La componente casuale del semivariogramma (varianza) aumenta all'aumentare della distanza mentre la componente spaziale (autocovarianza) diminuisce. Oltre il valore del limite metrico di autocorrelazione il valore di semivariogramma diventa costante approssimandosi asintoticamente ad un dato valore della varianza (*sill*). Il modello sferico è definito matematicamente come:

$$\gamma(h) = \text{sill} \left[ \frac{3h}{2a} - \frac{1h^3}{2a^3} \right] \text{ quando } h \leq a;$$

$$\gamma(h) = \text{sill} \text{ quando } h \geq a.$$

Noi prenderemo in considerazione variabili casuali regionalizzate per le quali valgono le seguenti relazioni:

$$2\gamma(Z(x), h) < \text{VAR}[Z(x)] \text{ per } h < a; \quad (6)$$

$$2\gamma(Z(x), h) = \text{VAR}[Z(x)] \text{ per } h \geq a. \quad (7)$$

La variabile casuale regionalizzata è chiamata transitiva per un dato valore di 'a', per condizioni che soddisfino la (6) e la (7).

Il modello transitivo più comune è quello sferico (o di Matheron), riportato nella Fig. 1. Nei modelli transitivi si ha un valore di  $2\gamma$  per il quale il grafico diventa orizzontale. Questo punto viene chiamato *sill*. Dal *sill* si ricava matematicamente il valore del limite metrico di autocorrelazione (Fig. 1).

Nella costruzione di variogrammi sperimentali l'autocorrelazione tra i punti si trova calcolando l'autocovarianza da dati reali. Se 'y' è una proprietà misurata in una serie di punti 1, 2, 3 ..., equidistanti, allora:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (y_i - y_{i+h})^2 \quad \begin{matrix} i = 1, 2, 3 \dots \\ h = 1, 2, 3 \dots \end{matrix} \quad (8)$$

dove N è il numero di paia di punti che possono essere usati per qualsiasi valore di h. Si osservi che  $\gamma(h)$  può essere calcolato solo per multipli interi della distanza tra i punti campione situati lungo il vettore di distanza h (Fig. 2).

### 3. Metodologia

Il metodo sopradiscusso è stato applicato a dati di perforazioni, provenienti da una parte della conoide quaternaria del torrente Idice (Fig. 3). L'area indagata comprende circa 12 km<sup>2</sup>, sui 76.42 km<sup>2</sup> [CREMONINI, 1981] di estensione totale della conoide. La profondità media raggiunta dalle perforazioni è circa di 60 metri. Sono stati utilizzati dati provenienti circa

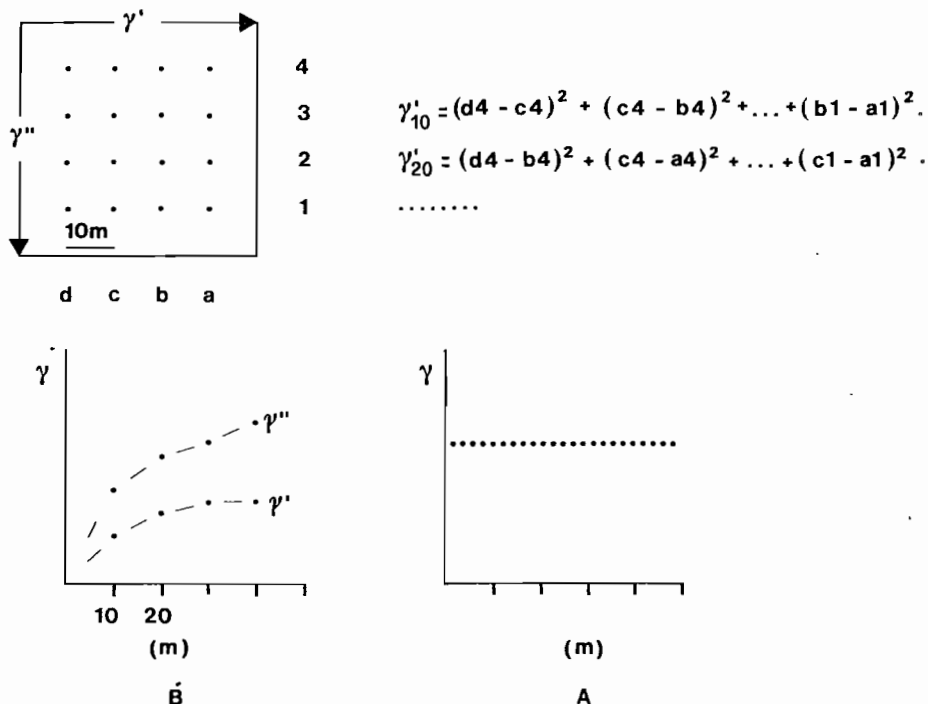


Fig. 2. - Metodo di costruzione del semivariogramma. I valori di una proprietà vengono (ri) distribuiti su un reticolato a maglie regolari (es. 10 metri). La varianza viene calcolata in diverse direzioni ( $\gamma'$ ;  $\gamma''$ ) e risulta dalla somma dei quadrati delle differenze dei valori delle proprietà, ubicate in punti progressivamente più distanti ( $nh$ , dove  $n = 1, 2, 3 \dots$ ). Sotto sono riportati un variogramma ad andamento casuale (A) e due variogrammi continui (B). Nel variogramma A) non esiste alcuna correlazione perché i valori dei campioni sono indipendenti. Nei variogrammi B) esiste un'anisotropia strutturale perché si hanno diversi variogrammi in direzioni differenti: nella direzione ' la funzione è più continua. Tra A e B esiste un gran numero di casi intermedi.

da 80 perforazioni. Per ragioni contrattuali non ci è possibile darne né il numero esatto né l'ubicazione.

L'analisi della struttura delle covarianze, sotto forma di variogrammi, si proponeva lo scopo di ottenere informazioni qualitative e quantitative:

— andamento della varianza in direzioni reciprocamente ortogonali, a monte e a valle, parallelamente e normalmente alla direzione di flusso del torrente, per la valutazione del grado di isotropia e anisotropia strutturale complessive;

— limiti metrici di autocorrelazione, in posizione prossimale e distale della conoide, normalmente e parallelamente alla direzione di flusso attuale del torrente, utili per costruire un modello probabilistico, da utilizzare per correlare i livelli ghiaiosi delle perforazioni.

L'analisi è stata compiuta sui rapporti ghiaia/sabbia + pelite (G/S + P). Si è quindi proceduto nel seguente modo:

1) I valori G/S + P, ottenuti dai dati delle perforazioni, sono stati riportati in pianta;

2) Dalla distribuzione disomogenea dei valori G/S + P si è ricavata una distribuzione omogenea ricalcolando i dati, ad intervalli fissi (Fig. 4), con le medie mobili dei punti più prossimi. Tali medie sono state calcolate su allineamenti reciprocamente ortogonali e paralleli alla direzione del torrente Idice, in posizione prossimale, intermedia e distale del corpo di conoide, come schematizzato nella Fig. 5.

3) Sui valori della Fig. 4 sono stati calcolati i sei variogrammi, utilizzando la relazione (8).

I sei variogrammi calcolati, A-D, B-C e F-G sono riportati nella Fig. 6.

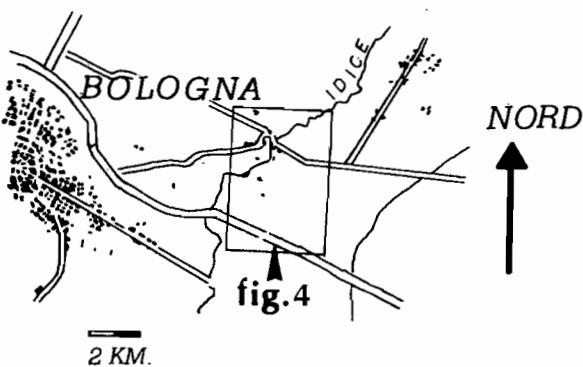


Fig. 3. - Ubicazione dell'area di studio.

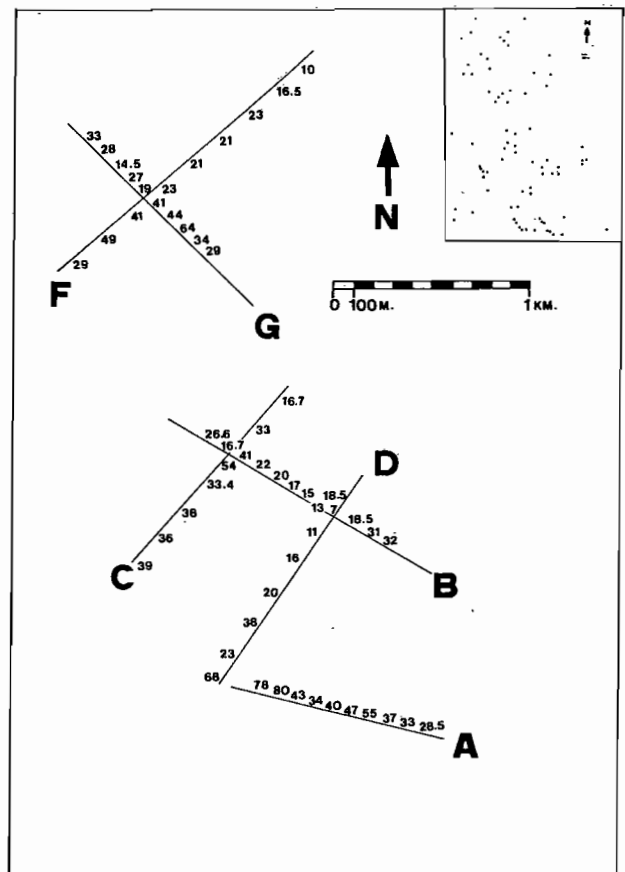


Fig. 4. - Ubicazione dei tracciamenti lungo i quali sono stati calcolati i semivariogrammi. I numeri sono stati ottenuti con il calcolo delle medie mobili dei valori percentuali delle ghiaie, cioè mediante una serie di medie pesate, disposte regolarmente nello spazio (in questo caso unidimensionale), da una originaria distribuzione disomogenea di perforazioni. Nel riquadro è riportata la rosa di dispersione delle perforazioni.

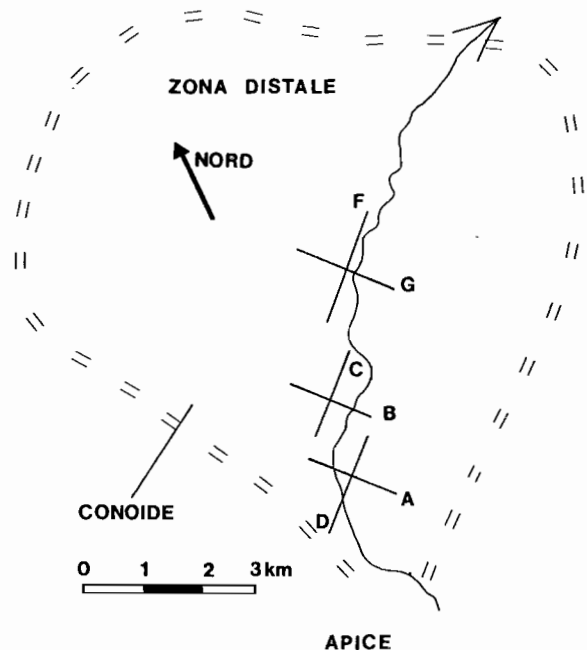


Fig. 5. - Orientamento approssimativo dei tracciamenti A, B, C, D, F e G, relativamente alla distribuzione areale della conoide e alla direzione di flusso del torrente.

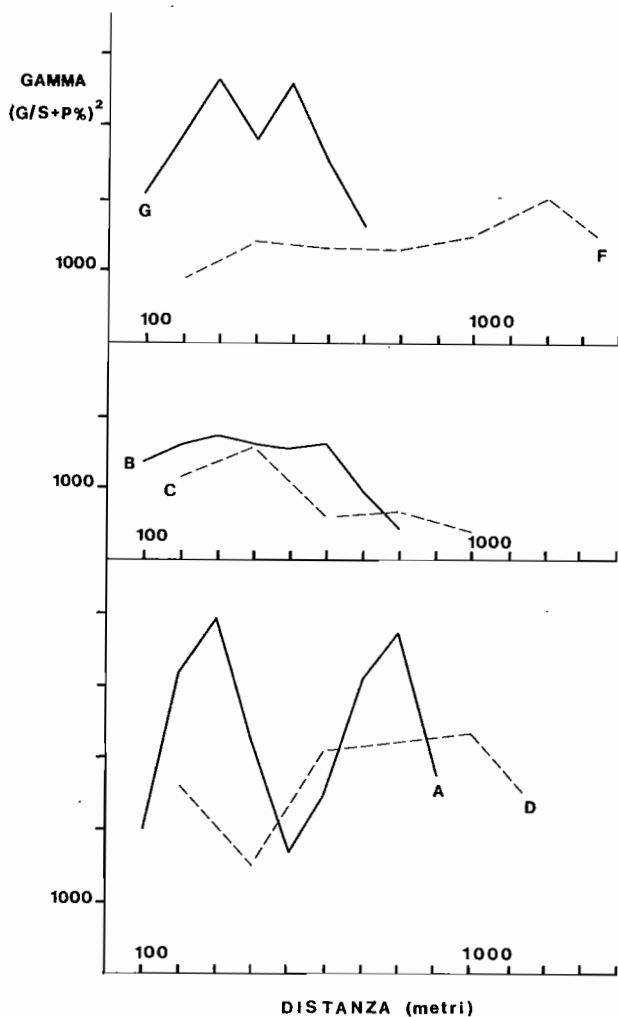


Fig. 6. - Semivariogrammi sperimentali  $(G/S + P)^2$ .

#### 4. Risultati dell'analisi statistica

L'esame dei variogrammi ha portato alle seguenti considerazioni.

— Le varianze (NE e NO) complessivamente diminuiscono da monte a valle. Quelle NE in modo più continuo.

— La varianza NO è maggiore di quella NE, e mostra minori diminuzioni, da monte a valle, della varianza NO. Ne consegue che il/i litosoma è più omogeneo in direzione NE.

— L'approssimazione al modello sferico indica che il litosoma (i) ha una buona organizzazione interna, cioè un buon ordine strutturale.

— In tutti i sei variogrammi sono evidenti due correlazioni lineari, terminanti in altrettanti punti angolosi. Queste variazioni costanti del valore  $G/S + P$  rispetto alla distanza corrispondono a lenticolarità di primo e secondo ordine, quest'ultima derivante dalla giustappo-

limiti metrici di autocorrelazione		
tracciamento	I ordine	II ordine
A	450	1200
B	450	—
C	600	—
D	350	900
F	600	1800
G	450	750

sizione di corpi lenticolari di primo ordine. I valori calcolati dei limiti metrici di autocorrelazione sono riportati nella Tab. I. Tali valori sono ottenuti dal trattamento matematico dei picchi dei variogrammi della Fig. 6, utilizzando l'algoritmo relativo al modello sferico [CLARK, 1979]. Dai valori di autocorrelazione di primo e secondo ordine sono stati costruiti gli ellissoidi di autocorrelazione, rappresentanti i limiti metrici di autocorrelazione probabilistica dei litosomi di I e II ordine (Fig. 7), nelle direzioni NE e NO, dalla zona prossimale a quella distale della conoide. L'approssimazione e la deviazione della circolarità danno una stima qualitativa delle variazioni complessive di isotropia degli ellissoidi di autocorrelazione.

La distribuzione delle percentuali  $G/S + P$  è stata riportata nell'istogramma della Fig. 8. È quindi possibile individuare due popolazioni: la prima ha una moda sui 10 ÷ 20% del valore  $G/S + P$  e un andamento log-normale; la seconda ha un picco a 60-70% e un andamento gaussiano.

Nel grafico della Fig. 9 la varianza dei valori  $G/S + P$  è stata proiettata in funzione del quadrato della media dei valori  $G/S + P$ , per i punti che cadono sui tracciamenti G, F, A, D, B e C (ottenuti con le medie dei punti più prossimi). È evidente l'esistenza di una proporzionalità diretta tra varianza e media dei valori  $G/S + P$ , relativamente ai dati calcolati lungo le direttrici G, A e B. Tale proporzionalità indica che in senso NO la popolazione ha un andamento log-normale. Al contrario le distribuzioni casuali dei punti giacenti lungo le direttrici D, C e F indicano che in direzione NE i valori  $G/S + P$  variano in funzione aritmetica.

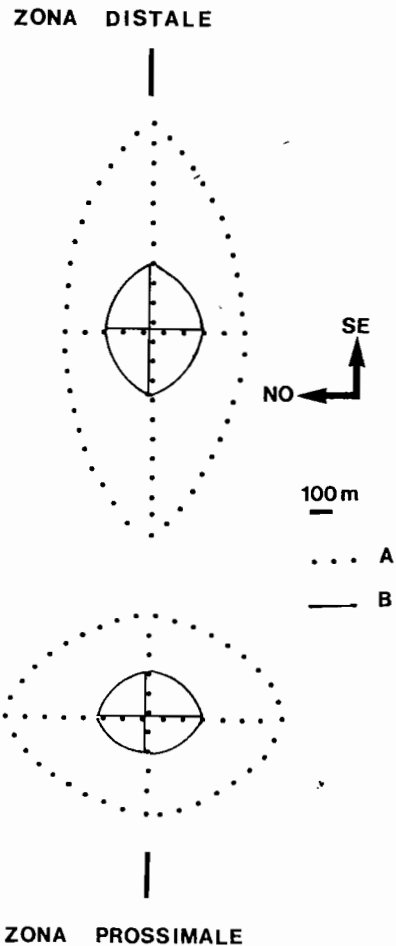


Fig. 7. - Modelli matematici morfologici ricavati dai dati della Tab. I, ricavati per la zona prossimale (in basso) e distale (in alto) della conoide. I differenti valori dei limiti metrici di autocorrelazione nelle direzioni parallele e trasversali a quella del flusso del torrente hanno permesso di determinare la forma media dei corpi di conoide di I e II ordine e le direzioni di allungamento (assi di anisotropia strutturale). B = limiti metrici di autocorrelazione di I ordine; A = limiti metrici di autocorrelazione di II ordine.

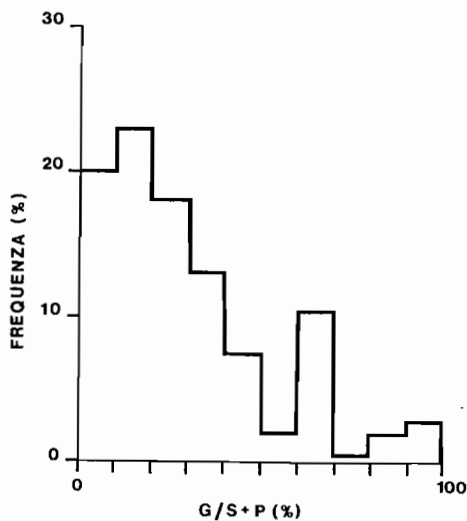


Fig. 8. - Istogramma dei valori percentuali ghiaia/sabbia + pelite (G/S + P).

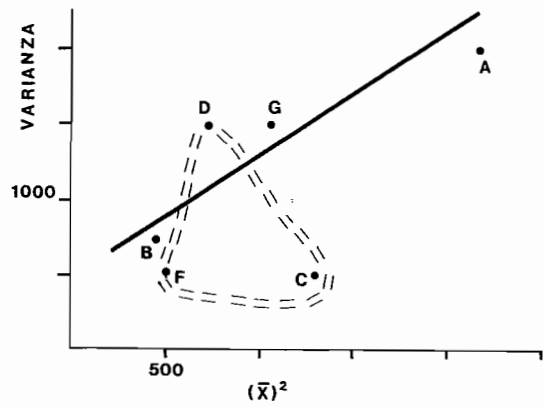


Fig. 9. - Varianza dei valori G/S + P in funzione del quadrato della loro media.

Quindi, dal confronto tra i dati ottenuti con l'istogramma della Fig. 8 e mediante analisi della varianza (Fig. 9), si può distinguere una popolazione con andamento log-normale, in direzione NO, compresa tra i valori 1-40% del rapporto G/S + P, e una seconda popolazione caratterizzata da un andamento aritmetico lungo tracciamenti NE con valori G/S + P compresi tra 60 e 70%.

Il metodo dei variogrammi ha permesso di ottenere la distanza orizzontale massima di correlazione dei livelli ghiaiosi; l'uso integrato di semivariogrammi e istogrammi ha permesso di ricavare le distanze verticali massime di correlazione tra i livelli ghiaiosi. Si sono quindi sovrapposti gli ellissoidi di autocorrelazione sulle sezioni verticali nelle quali erano riportati i livelli ghiaiosi individuati dalle perforazioni, per ottenere la geometria statistica dei litosomi (Fig. 10). La correlazione quindi è stata ricavata senza ricorrere a livelli guida e senza conoscere la dinamica deposizionale del corpo di conoide.

## 5. Implicazioni geologiche

Le due popolazioni vengono fatte corrispondere a depositi di flusso canalizzato (*stream flow*) (60-70% G/S + P) e di intercanale (*sheet flow*) (1-40% G/S + P). La log-normalità dei depositi di intercanale è riferita a processi semi-markoviani [SCHWARZACHER, 1975]. La sedimentazione nelle aree di intercanale non sarebbe continua ma avverrebbe in altri termini per incrementi discreti di materiale, separati da periodi più o meno lunghi di non deposizione.

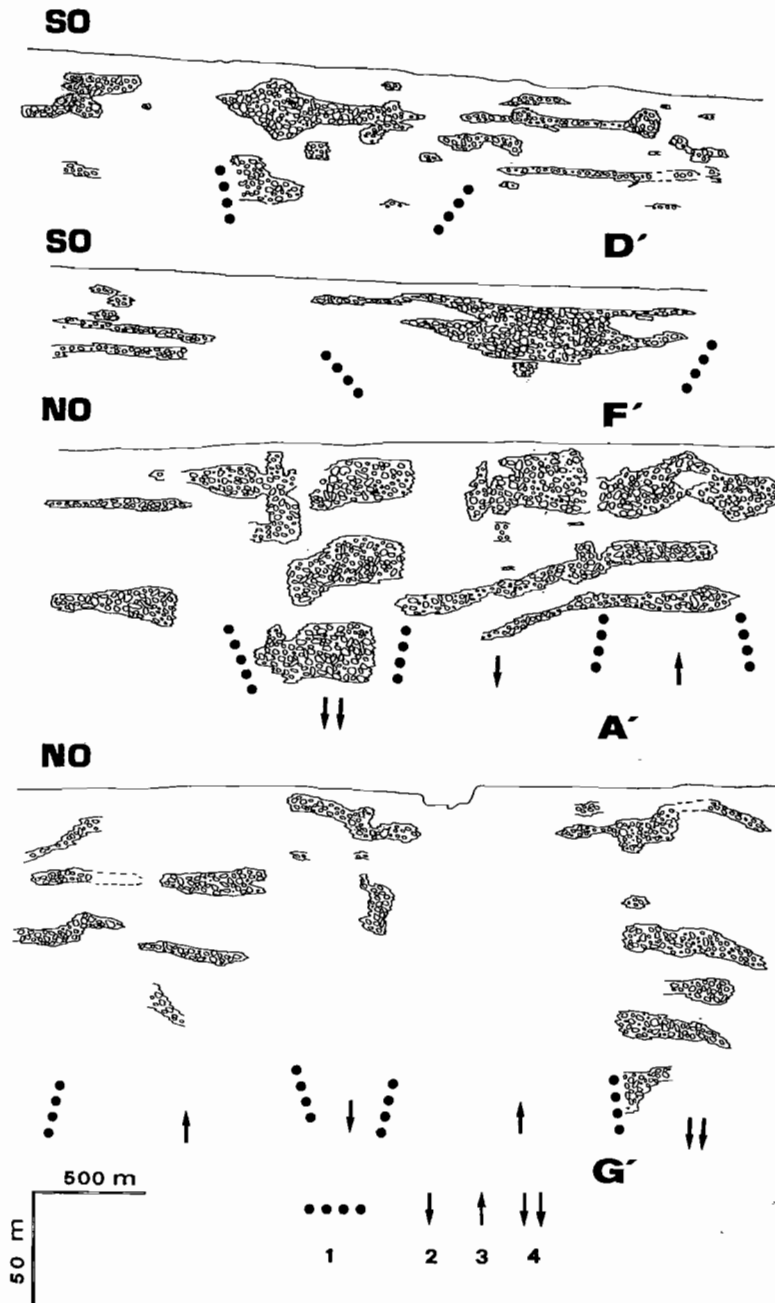


Fig. 10. - Correlazioni statistiche dei livelli ghiaiosi incontrati dalle perforazioni. L'ubicazione delle sezioni A', D', G' e F' è circa corrispondente ai tracciamenti A, D, G e F (l'approssimazione rientra nelle condizioni di stazionarietà di I e II ordine: v. MATHERON, 1971). Le correlazioni sono state ottenute facendo coincidere il centro degli ellissoidi di autocorrelazione con le zone corrispondenti ai depositi di *stream flow* (60-70% G/S + P). Sotto ogni sezione sono schematizzate le strutture disgiuntive sepolte e le direzioni prevalenti di movimento tra i blocchi, che hanno determinato lo spessore differenziale dei corpi ghiaiosi, in differenti zone della conoide: 1: faglia sinsedimentaria; 2: area abbassata; 3: area rialzata; 4: area soggetta a subsidenza differenziale.

L'aumento dei valori di autocorrelazione verso NE viene messo in relazione ad una transizione da depositi più o meno disorganizzati a monte, a depositi di barre a valle. I due modelli matematici rappresentati graficamente nella Fig. 7 possono essere visualizzati come assemblaggi di depositi di tipo *pod* (a monte) e di tipo *ribbon* (a valle) [PETTJOHN *et al.*,

1972]. È interessante anche osservare che mentre gli assi NE degli ellissoidi di primo e secondo ordine variano in modo omogeneo, dalla parte apicale a quella distale della conoide (diventano la metà o il doppio), gli assi NO rimangono costanti (450 metri) o variano in misura minore (ad es. da 750 a 1200 metri). In altri termini i depositi di flusso canalizzato

mantengono la stessa sezione trasversale, dall'apice alla parte distale, indipendentemente dal gradiente topografico.

La scarsa anisotropia della varianza in direzione sia parallela che trasversale alla direzione di flusso, relativamente all'ellissoide di autocorrelazione ricavato per la parte prossimale, farebbe propendere più che per una progredazione, per fenomeni di aggradazione del corpo di conoide.

Gli spessori differenziali dei corpi ghiaiosi e il loro andamento sinuoso (cf. RICCI LUCCHI, 1981: Fig. 8, p. 96) visibili nella Fig. 10 sono interpretati come risultanti da una tettonica a blocchi sinsedimentaria quaternaria agente anche sotto forma di faglie rotazionali di gravità (*growth faults*). Le modalità di variazione delle dimensioni degli assi di autocorrelazione ci risultano quindi essere collegate a fattori tettonici. Questa tettonica a blocchi può anche essere il risultato di un blando, graduale basculamento di blocchi fagliati. Nella Fig. 10 sono indicate le direzioni prevalenti di movimento dei blocchi. L'esame dei profili indica che la zona a SE del corso attuale del torrente Idice è stata quella maggiormente subsidente. Il confronto tra profili longitudinali e trasversali mostra che i blocchi risultano essere stati spostati principalmente da faglie trasversali (NE-SO), anche se non è esclusa una dislocazione minore lungo faglie orientate in senso appenninico (NO-SE).

## 6. Conclusioni

Lo studio delle strutture delle covarianze, sotto forma di variogrammi, ha fornito una metodologia quantitativa di correlazione, ha individuato l'esistenza di zone a subsidenza differenziale, ha ricavato le dimensioni statistiche degli acquiferi e ha fornito informazioni sulla dinamica deposizionale del corpo di conoide.

La teoria delle variabili regionalizzate è un campo ancora in buona parte inesplorato. In campo ingegneristico-geotecnico, da misure di proprietà espresse da indici numerici, distribuiti o ridistribuibili a intervalli regolari, in uno spazio lineare o areale di quasi-stazionarietà, è possibile risalire a stime di parametri geotecnici. In particolare, in problemi concernenti le interazioni tra proprietà del terreno e strutture e geometrie di fondazioni [LEVI, 1977], quindi nell'analisi della diffusione delle

tensioni sul suolo e dell'andamento delle caratteristiche di compressibilità, nel calcolo dell'andamento dei coefficienti di influenza dei cedimenti del terreno per diversi valori di profondità, pressione, distanza, e in diverse direzioni; nel calcolo dell'andamento dei coefficienti di influenza degli abbassamenti di fondazioni per diverse strutture, come platee, reticoli di travi [PEDRIELLI, 1982], il metodo può trovare ampia applicazione, previo un numero minimo di controlli sul terreno.

## RINGRAZIAMENTI

Il lavoro è stato compiuto in stretta collaborazione. In particolare P. Lamborghini ha raccolto i dati di campagna; G. Galli ha elaborato il metodo statistico; G. Galli e C. Cantelli hanno ricavato le implicazioni geologiche. Il Dott. A. G. Fabbri (Laboratorio di Geologia Marina, Bologna) ha riletto criticamente una prima versione del lavoro, apportandovi utili suggerimenti.

## BIBLIOGRAFIA

- CLARK I. (1979) - *Practical geostatistics*. Applied Science Publisher Ltd., 127 pp., London.
- CREMONINI S. (1981) - *Evoluzione morfologica ed idrografica della pianura bolognese tra Reno e Idice*. Tesi di laurea in Scienze Geologiche, Univ. di Bologna, A.A. 1979-1980.
- LEVI F. (1977) - *Introduzione al ciclo di conferenze sulle fondazioni dirette e l'interazione terreno e struttura*, Atti dell'Istituto di Scienze delle Costruzioni del Politecnico di Torino, n. 354.
- MATHERON G. (1971) - *The theory of Regionalized Variables and its applications*. Cahier n. 5, Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, 211 p.
- PEDRIELLI S. (1982) - *Previsione di cedimenti di fondazioni su 'Suolo alla Boussinesq', con il metodo Zemiotchkin e Sinitsin*, INARCOS n. 432, ottobre, 1982.
- PETTIJOHN F. J., POTTER P. E., SIEVER R. (1972) - *Sand and sandstones*. Springer-Verlag, 618 p.
- RICCI LUCCHI F. (Ed.) (1981) - *IAS, Excursion guidebook*, Bologna, Italy, 316 p.
- SCHWARZACHER W. (1975) - *Sedimentation Models and Quantitative Stratigraphy*. Elsevier, 382 p.

## SUMMARY

### Statistical correlation of gravel core data (Idice alluvial fan, Bologna, Italy)

This paper presents an application of the theory of regionalized random variables (variograms) and elementary statistics to subsurface data obtained from cores drilled in the eastern part of the Indice river alluvial fan (Bologna, Italy).

Regionalized variables are those variables whose values depend on their position in a geometrical field. The variogram is a plot of variance of pairs of samples versus distance. It synthetically shows the degree of regularity



of a given property in its zone of influence (range). Its application is based on the following assumptions:

- 1) differences between samples are determined by the relative spatial orientation of samples;
- 2) data are stationary.

The theory was applied in order to get both qualitative and quantitative estimates (analyses of structures of covariances, trends of anisotropy, calculation of ranges).

Gravel to sand + pelite ratios (G/S + P) were calculated from 80 to 90 cores, drilled upon an area of catchment of 12 km<sup>2</sup>; cores averaged 60 metres in depth. G/S + P ratios were plotted on a map (not shown) and smoothed (moving average technique) along 6 lines trending NE-SW and NW-SE (respectively parallel and normal to the stream flow direction). These lines are located in the proximal, median and distal portion of the alluvial fan. The objective of such a smoothing was to obtain a number of values at regular intervals, in order to calculate variograms.

The integrated use of histograms and plots of variance of G/S + P ratios versus average of G/S + P values, discriminated two populations:

- 1) a population characterized by the 60-70% of the G/S + P and by an arithmetic behaviour parallel to the flow direction;

- 2) a population characterized by the 1-40% of the G/S + P and by a log-normal variation parallel to the stream direction.

Populations 1) and 2) were interpreted respectively as stream flow and sheet flow deposits.

Calculations of ranges led to constructing two models of covariances, in a bidimensional space (ellipsoids of autocorrelation), for the proximal and distal portion of the alluvial fan. A scarce ellipticity of the proximal ellipsoid of autocorrelation was interpreted as being due to a prevailing aggradation regime.

The two models and the discrimination of populations 1) and 2) allowed for correlation of gravel core data. Differential thicknesses and settings of gravel bodies were related to the existence of a deep horst-graben tectonics, activated by faults striking NE-SW and NW-SE. Comparisons between profiles showed the existence of zones characterized by a differential subsidence. Plot of ellipsoids of autocorrelation on a topographic map may help one outline aquifers.

This study deals with a geological application of the theory of regionalized variables. However, it is an intriguing technique, prone to be equally adapted to a number of geotechnical problems.