

INTEGRAZIONE GEOSTATISTICA DI DATI CON APPLICAZIONI A MODELLI IDROGEOLOGICI A SCALA REGIONALE

G. Vignoli^{1,2}, A.-S. Høyer², T. M. Hansen³, L. T. Vu⁴, D. A. Keefer⁵, F. Jørgensen⁶

¹ DICAAR, Univ. Di Cagliari, Cagliari, Italy

² GRUK, GEUS, Aarhus, Denmark

³ Niels Bohr Institute, Copenhagen, Denmark

⁴ I-GIS, Aarhus, Denmark

⁵ ISGS, Chicago, United States of America

⁶ Central Denmark Region, Viborg, Denmark

La modellazione geostatistica è un sempre più usata per investigare il sottosuolo (e non solo). Sempre più spesso, le simulazioni geostatistiche non si limitano più all'utilizzo di metodologie "two-point" (TP) come il (giustamente) famoso "kriging", ma sfruttano le potenzialità di metodi "multiple point" (MP).

Il kriging (Journel e Huijbregts 1978; Matheron 1973) è un metodo deterministico (fornisce un unico output a partire dai dati sparsi disponibili) e necessita della conoscenza di un modello a priori di correlazione e variabilità fra le osservazioni (noto come variogramma). Oltre alla complessità nel maneggiarlo correttamente, questo approccio TP fornisce risultati che, spesso, sono troppo lisci (Journel e Zhang 2006). Ciò comporta, per esempio, che non sia adatto a rappresentare eterogeneità con variazioni brusche, e che sovrastimi/sottostimi sistematicamente i valori estremi delle variabili indagate.

Invece, le simulazioni MP possono essere efficacemente utilizzate per superare queste difficoltà. Esistono diverse strategie di simulazione MP; tutte capaci di fornire insiemi di realizzazioni che, complessivamente, costituiscono il modello geostatistico attraverso cui stimare la probabilità di occorrenza di particolari caratteristiche geologiche. Per citare alcuni esempi: "Sequential Gaussian Simulation" (SGSIM - Dimitrakopoulos e Luo, 2004), "Sequential Indicator Simulation" (SISIM - Seifert e Jensen, 1999) e "Single Normal Equation Simulation" (SNESIM - Liu, 2006).

Se da una parte le strategie TP - considerando, appunto, solo due punti - non possono riprodurre pattern complessi, gli approcci MP - tenendo conto di molti punti simultaneamente - possono essere impiegati per simulare strutture estremamente complesse. Chiaramente, le informazioni a priori necessarie per qualunque strategia MP sono molto ricche e complesse,

e sono normalmente formalizzate in una immagine concettuale (non necessariamente bidimensionale, ma, potenzialmente, 3D o anche 4D), chiamata “Training Image” (TI). In letteratura, è raro trovare discussioni sulla preparazione e ottimizzazione delle TI, che, però, sono input cruciali per il successo e l’affidabilità della simulazione finale.

Una simile cura, in effetti, dovrebbe caratterizzare la preparazione anche degli altri dati di input: le realizzazioni che popolano il modello geostatistico finale sono affidabili esclusivamente nella misura in cui l’incertezza dei dati di condizionamento è stata correttamente valutata e presa debitamente in considerazione.

In questa ricerca, si discute una strategia per la preparazione e ottimizzazione: 1) delle TI e 2) dei dati (sismici, da pozzo, da precedenti modelli geologici) per il condizionamento delle simulazioni. L’impiego di tale strategia è esemplificato attraverso l’applicazione ad un caso di modellizzazione della distribuzione di sabbia e argilla nella porzione del Miocene compresa in un’area di circa 3000 km², sul confine tra Danimarca e Germania (Høyer *et al.*, 2017).

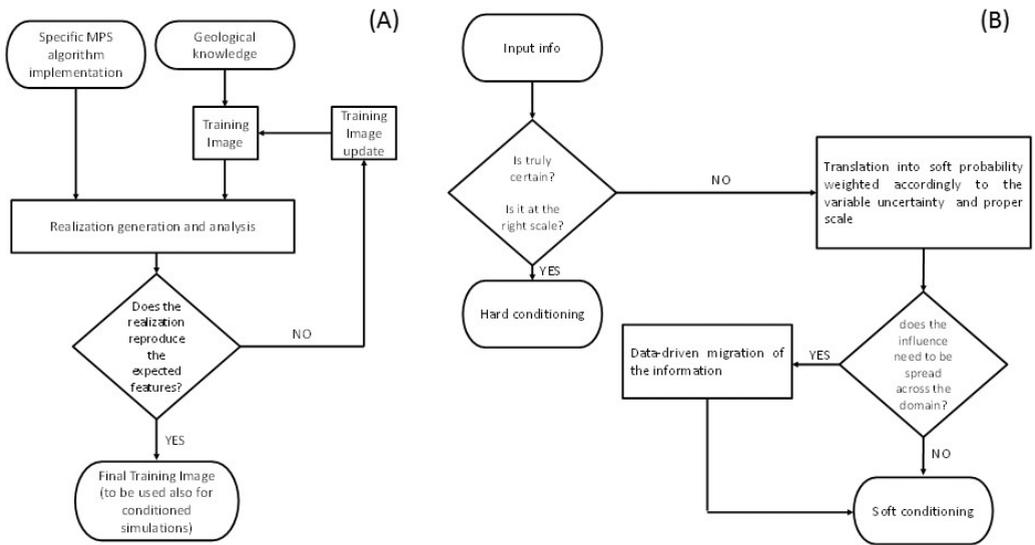


Fig. 1 - Diagrammi di flusso relativi: (A) alla strategia iterativa per la definizione ottimale della TI; (B) alla preparazione dei dati di condizionamento delle simulazioni.

La strategia. Il presente studio si concentra sulla discussione di un approccio per la simulazione MP che: 1) sfrutti TI tridimensionali che (insieme all’algoritmo di simulazione adottato) siano effettivamente efficaci nel generare features corrispondenti alle geologie attese (Fig. 1A); 2) includa i differenti dati geologici/geofisici tenendo opportunamente in considerazione le diverse incertezze (Fig. 1B); 3) permetta di migrare l’influenza del “soft conditioning” oltre il semplice intorno del punto di osservazione (Fig. 1B).

- Relativamente al primo punto (Fig. 1A), nell’esempio di studio, la TI utilizzata consiste in un’immagine 3D di circa 5×10^5 voxel, con la stessa discretizzazione utilizzata per la simulazione (100m x 100m x 5m), corrispondente ad un’area di $\sim 90 \text{ km}^2$. La dimensione di tale TI è significativamente più piccola del dominio di simulazione, ma è sufficientemente grande da rappresentare le tipiche strutture del Miocene che si vogliono simulare. La preparazione della TI da usare non può prescindere dal codice di simulazione impiegato (non solo a causa dei differenti algoritmi e possibili settaggi, ma anche per le diverse implementazioni). Per questo, l’approccio proposto prevede iterativamente: i)

di verificare a posteriori che le simulazioni non condizionate mostrino le caratteristiche attese (ovviamente indipendenti dalla singola realizzazione); ii) di modificare coerentemente la TI, iii) di controllare ulteriormente la coerenza fra le nuove realizzazioni e le caratteristiche che si vogliono simulare. Ad esempio, in Fig. 2, è mostrata la stessa sezione, ma in due distinte realizzazioni non condizionate basate su due differenti TI. Nonostante le modifiche nella seconda TI siano piccole rispetto alla TI di partenza (sono state semplicemente eliminate alcune lenti di sabbia), gli effetti nelle realizzazioni finali sono molto significativi. Il processo iterativo può essere interrotto quando le realizzazioni non condizionate raggiungono la rappresentatività richiesta (che può essere stimata sia qualitativamente che attraverso la definizione di parametri quantitativi – Høyer *et al.*, 2017).

- Per quanto riguarda il secondo punto (Fig. 1B), relativo alla stima ed inclusione dell'incertezza dei dati di input, è necessario premettere che, nonostante le informazioni dei pozzi siano (quasi) sempre considerate certe e utilizzate come "hard conditioning", in generale, la loro qualità e affidabilità dipende da moltissimi fattori (per es., il metodo di perforazione, lo scopo e l'età del pozzo, la presenza contestuale di log geofisici). Un altro fattore da considerare è la differenza di scala fra le strutture che si vogliono simulare e il dettaglio dei pozzi. Al fine di includere e, almeno parzialmente, risolvere queste difficoltà, nell'esempio proposto si è deciso di incorporare le informazioni litologiche dei pozzi (~200 pozzi con una profondità superiore ai 100m dei circa 9000 disponibili nell'area) come "soft conditioning". Per fare questo, una finestra mobile con la stessa estensione tipica dei features da simulare (~20m) è stata applicata ad ogni pozzo, restituendo la probabilità di avere una litologia piuttosto che l'altra. La ratio di tale approccio risiede nell'assunzione che, nel centro di una formazione, si è più certi della litologia di quanto lo si sia in prossimità dei bordi. Certamente, avendo a disposizione uno studio pozzo per pozzo, tale probabilità poteva essere pesata tenendo conto della qualità variabile dei pozzi. Sfortunatamente, questo non è stato possibile, e un peso del 20% è stato applicato uniformemente a tutti i pozzi. Al contrario dei dati da pozzo, e grazie alla loro qualità e risoluzione (comparabile con quella delle strutture geologiche rilevanti in questo studio), i dati sismici sono stati considerati come "hard conditioning" (Fig. 3).

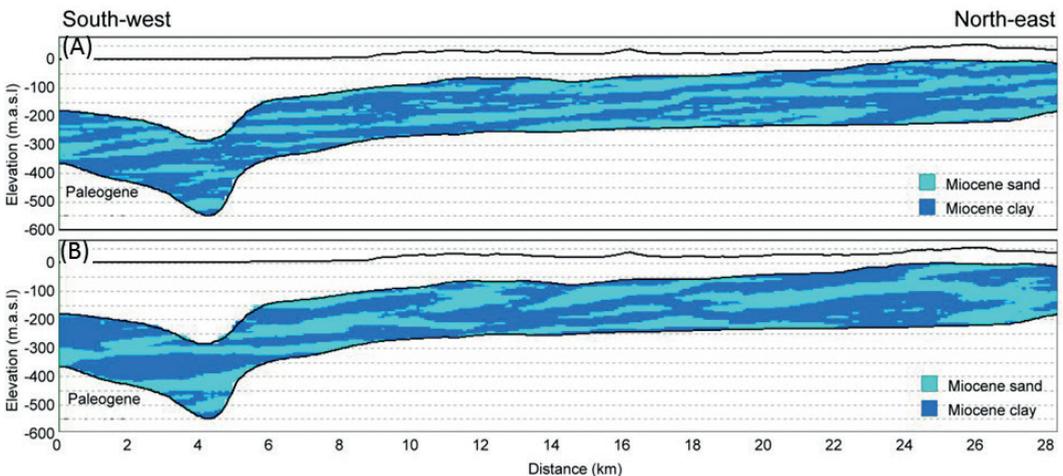


Fig. 2 - Sezione di una realizzazione non condizionate ottenuta con due differenti TI: (A) Relativa alla TI1, corrispondente alla prima ipotesi di training image; (B) Relativa alla TI2, corrispondente alla TI effettivamente selezionata per le successive simulazioni condizionate.

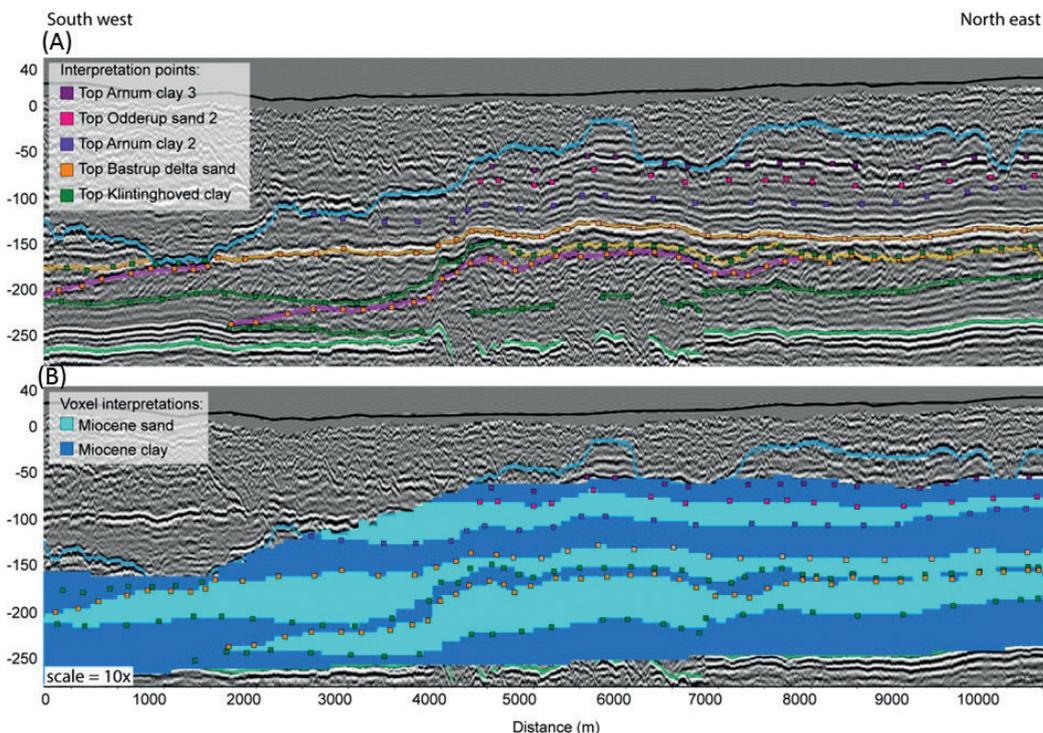


Fig. 3 - Preparazione dei dati sismici: (A) Sezione mostrata insieme all'interpretazione degli orizzonti; (B) La stessa sezione sismica insieme all'input geologico utilizzato come "hard conditioning" nella simulazione MP.

Inoltre, il dominio di simulazione, circonda un'area già interessata da un precedente modello geologico "tradizionale" di dettaglio. Per garantire la continuità fra il modello stocastico e l'esistente modello tradizionale, anche quest'ultimo è stato utilizzato come "hard conditioning".

- La soluzione del terzo punto (Fig. 1B) è particolarmente rilevante in quanto, quando le sorgenti dell'informazione sono distribuite nello spazio in maniera sparsa (come, nel caso specifico, i pozzi), l'effetto del "soft conditioning" può essere estremamente locale. Per porre rimedio a questo e imporre un trend spaziale alle realizzazioni, si è proceduto con il kriging della probabilità di sabbia/argilla fra pozzi. Questo può essere considerato un approccio pratico (una soluzione più sofisticata potrebbe consistere nell'utilizzo dell'algoritmo proposto da Hansen *et al.*, 2016) per migrare l'informazione "soft" da sorgenti localizzate a tutto il dominio di simulazione, preservando il fatto che tale informazione è ovviamente più significativa in prossimità delle sorgenti e meno man mano che ci sia allontana.

Conclusioni. In questo studio, relativo a simulazioni MP, vengono discussi strategie ottimali: 1) per la preparazione di TI effettivamente rappresentative; 2) per l'inclusione di dati di diversa natura (litologiche da pozzo, geofisiche, provenienti da preesistenti modelli geologici, ecc.) come "hard" e "soft conditioning" tenendo conto dei diversi e variabili gradi di incertezza; 3) per estendere l'effetto delle sorgenti sparse di "soft conditioning" e migrare il loro contenuto informativo attraverso l'intero dominio di simulazione. Queste strategie per la preparazione ottimale degli input di simulazione sono esemplificate e testate attraverso la modellazione del Miocene in un'area di ~3000km² sul confine tra Danimarca e Germania.

Bibliografia

- Dimitrakopoulos, R., Luo, X., 2004. Generalized sequential Gaussian simulation on group size v and screen-effect approximations for large field simulations. *Mathematical Geology*, 36(5), pp.567-591.
- Hansen, T.H., Vu, L.T., Bach T.; 2016: MPSLIB: A C++ class for sequential simulation of multiple-point statistical models. *SoftwareX*, 5, pp. 127-133.
- Høyer, A.S., Vignoli, G., Hansen, T.M., Keefer, D.A., Jørgensen, F.; 2017: Multiple-point statistical simulation for hydrogeological models: 3-D training image development and conditioning strategies. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(12), p.6069.
- Journel, A.G., Huijbregts, C.J.; 1978: *Mining geostatistics* (Vol. 600). London: Academic press.
- Journel, A., Zhang, T.; 2006: The necessity of a multiple-point prior model. *Mathematical geology*, 38(5), pp.591-610.
- Liu, Y.; 2006: Using the Snesim program for multiple-point statistical simulation, *Comput. Geosci.*, 32, pp. 1544–1563.
- Matheron, G.; 1973: The intrinsic random functions and their applications. *Advances in applied probability*, 5(3), pp.439-468.
- Seifert, D., Jensen, J.L.; 1999: Using sequential indicator simulation as a tool in reservoir description: issues and uncertainties. *Mathematical Geology*, 31(5), pp.527-550.