

Laureanda: Alessandra Carollo

Relatore: Prof. Raffaele Martorana

Correlatrice: Dott.ssa Patrizia Capizzi

LA TOMOGRAFIA SISMICA PER LO STUDIO DI CAVITÀ ANTROPICHE. DATI SINTETICI E SPERIMENTALI.

La presenza di vuoti sotterranei pone dei seri problemi in termini di sicurezza e tutela dell'incolumità pubblica e privata ed in termini di stabilità di strutture ed infrastrutture in aree densamente popolate (Fig. 1). L'individuazione di eventuali cavità è pertanto un pre-requisito fondamentale per minimizzare il rischio geologico di un'area.



Figura 1. Sinkhole (Marsala, Trapani).

Le analisi geofisiche sono i metodi più efficienti per ottenere informazioni finalizzate alla descrizione del sottosuolo e alla ricerca di vuoti sotterranei. La capacità di determinare la dimensione delle cavità, la loro profondità ed il contrasto delle proprietà fisiche tra cavità e roccia circostante è un aspetto fondamentale per comprendere la validità di un

determinato metodo di indagine. Fino ad oggi diversi metodi di prospezione geofisica sono stati utilizzati per il rilevamento di vuoti sotterranei. Il loro successo è ancora oggi fortemente influenzato dalla loro non invasività, dalla capacità di penetrazione dell'indagine e dalla loro risoluzione. Nei complessi scenari geologici però di solito, non è possibile individuare una singola tecnica geofisica come metodo ottimale. La combinazione di dati sperimentali provenienti da differenti metodi geofisici risulta l'approccio più adatto per l'individuazione e la delimitazione delle cavità sepolte, in quanto minimizza le possibili ambiguità di interpretazione geofisica ed offre un ottimo compromesso in termini di capacità diagnostica, profondità di penetrazione, risoluzione delle tecniche, tempi, costi e logistica del sito. È inoltre essenziale che l'indagine geofisica venga progettata e scelta sulla base delle informazioni a priori sul contesto geologico, che consentano di avere una stima approssimativa delle profondità e delle dimensioni del vuoto, delle formazioni geologiche presenti, al fine di valutare eventuali contrasti nelle proprietà fisico-meccaniche dei materiali coinvolti. La tomografia elettrica è ad oggi il metodo più largamente utilizzato per la ricerca di cavità nel sottosuolo. Tuttavia negli ultimi anni ad essa sempre più spesso viene affiancata la tecnica della tomografia sismica a rifrazione al fine di ottenere interpretazioni più robuste. Per testare le proprietà, le limitazioni e l'efficacia della tomografia sismica, soprattutto se affiancata alla geoelettrica, sono state eseguite simulazioni su modelli sintetici e confronti tra queste e dati sperimentali. I modelli sintetici presentano anomalie nella velocità delle onde P rappresentanti cavità o blocchi litologici compatti (da Fig. 2 a Fig. 6). I dati simulati sono stati confrontati con modelli sintetici di resistività elettrica, con caratteristiche geometriche simili a quelli sismici, per eseguire uno studio integrato dei parametri acquisiti dalle due differenti metodologie di indagine e cercare un parametro di correlazione, utile all'individuazione delle cavità in modelli reali.

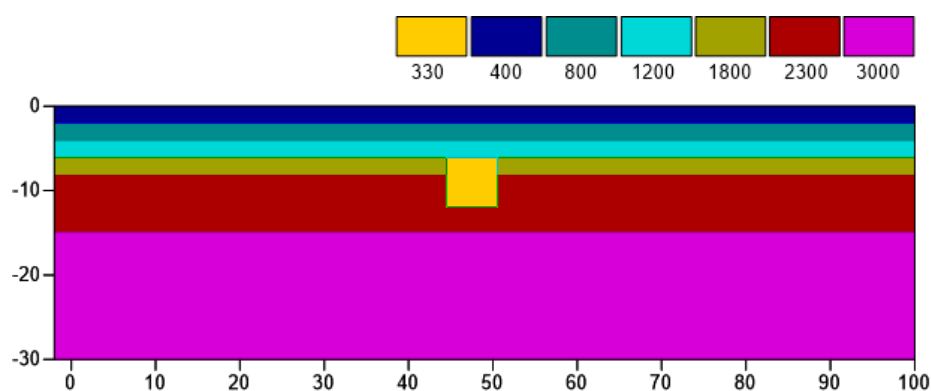


Figura 2. Modello A ad una cavità: modello sismico sintetico.

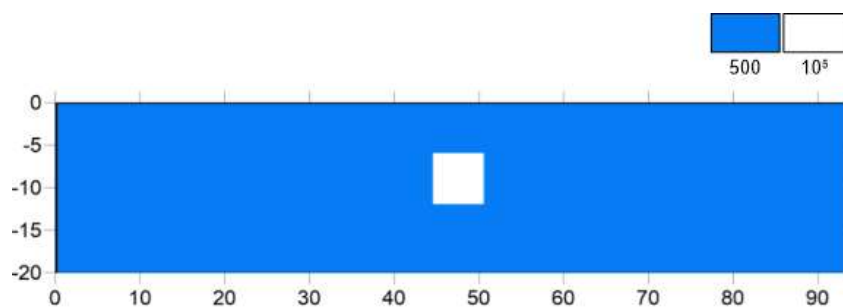


Figura 3. Modello A ad una cavità: modello elettrico sintetico.

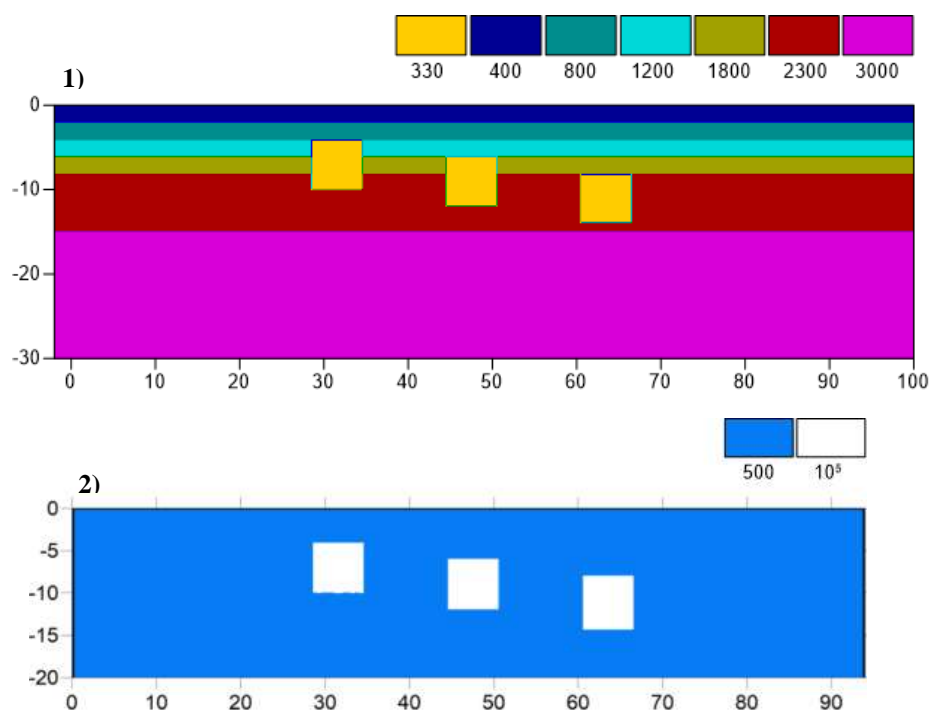


Figura 4. Modello B a tre cavità: modello sismico sintetico (1), modello elettrico sintetico (2).

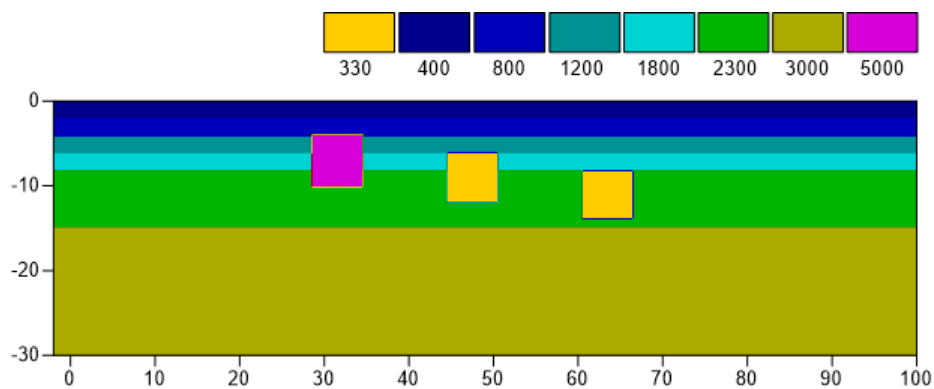


Figura 5. Modello C1 a due cavità ed un blocco calcarenitico compatto: modello sismico sintetico.

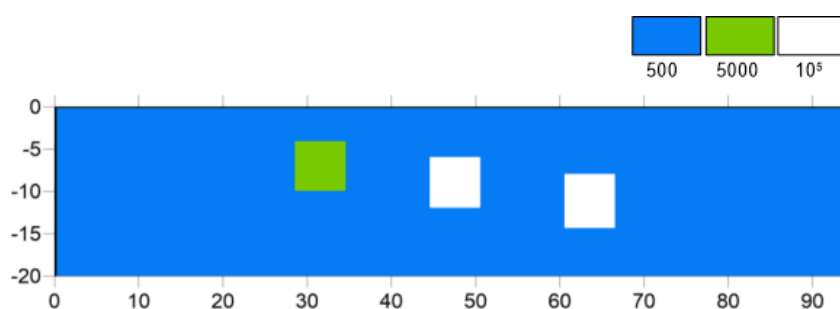


Figura 6. Modello C1 a due cavità ed un blocco calcarenitico compatto: modello elettrico sintetico.

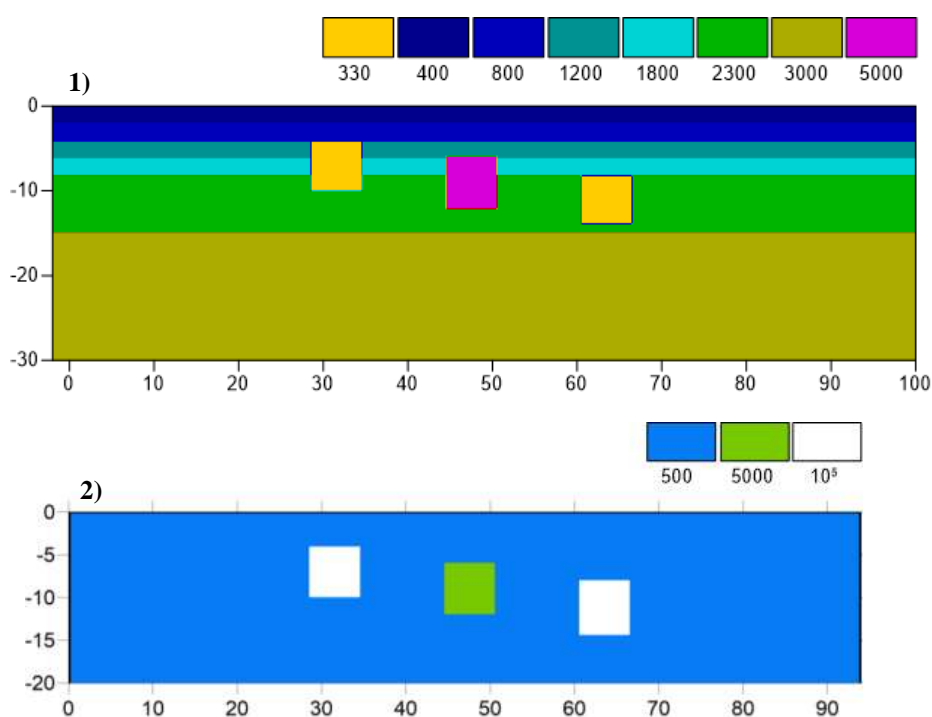


Figura 7. Modello C2 a due cavità ed un blocco calcarenitico compatto: modello sismico sintetico (1), modello elettrico sintetico (2).

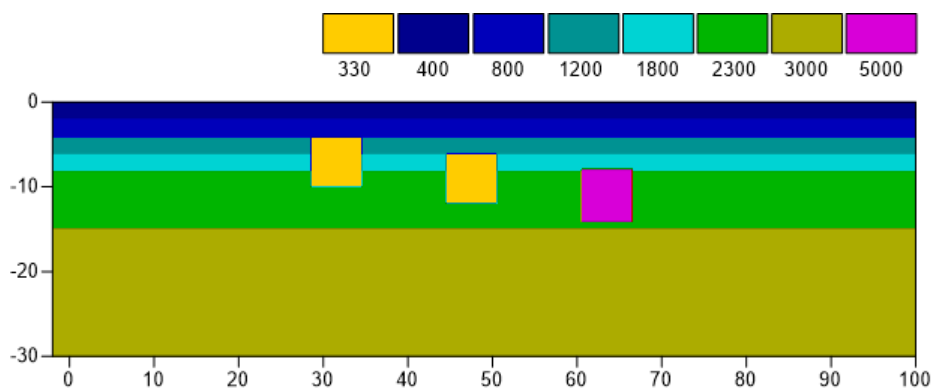


Figura 8. Modello C3 a due cavità ed un blocco calcarenitico compatto: modello sismico sintetico.

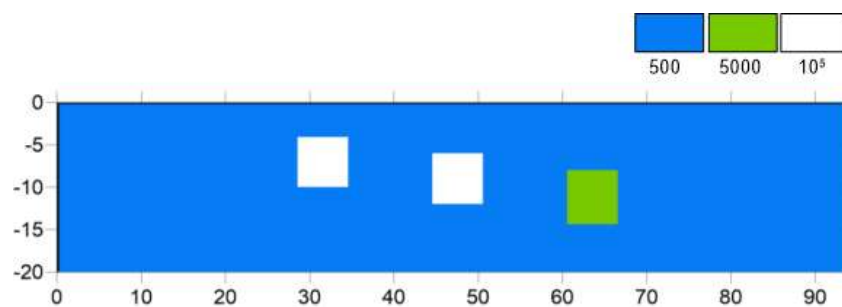


Figura 9. Modello C3 a due cavità ed un blocco calcarenitico compatto: modello elettrico sintetico.

Sulla base di un rilievo speleologico di dettaglio (Fig.10 e Fig. 11), è stato creato un modello sintetico per simulare un complesso di cavità indagato sperimentalmente (Fig. 12). Il sito investigato è la Cava Foderà, all'interno del Parco delle Cave di Marsala, classificata come cava a cielo aperto, in cui sono stati acquisiti dati di tomografia sismica a rifrazione e di tomografia elettrica (Fig. 13).

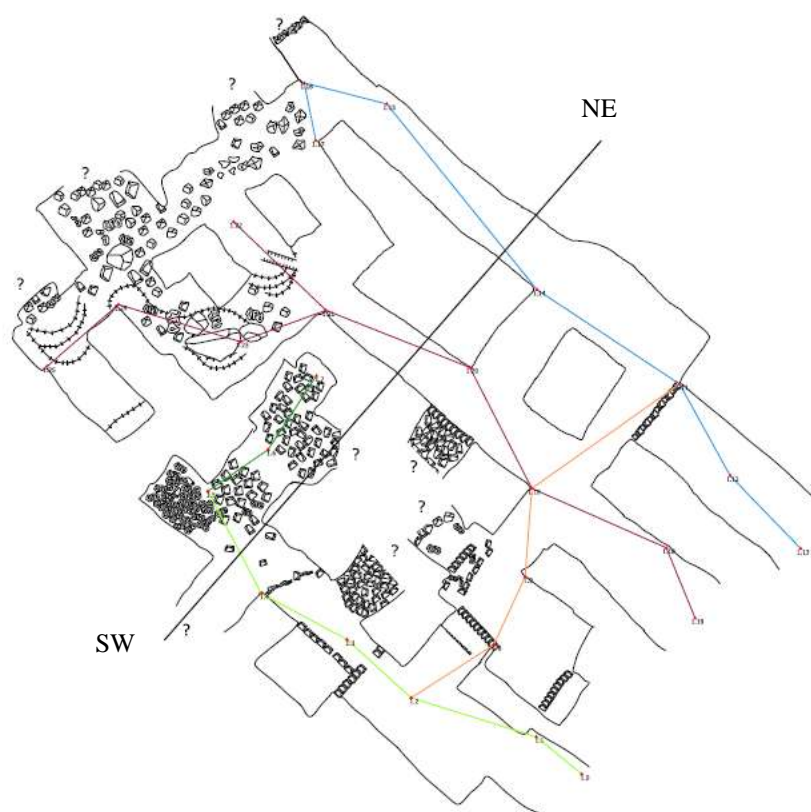


Figura 7. Pianta della Cava Foderà. Realizzata da M. Vattano (2016).



Cava Foderà

Figura 11. Sezione del profilo NE-SW. Realizzata da M. Vattano (2016).

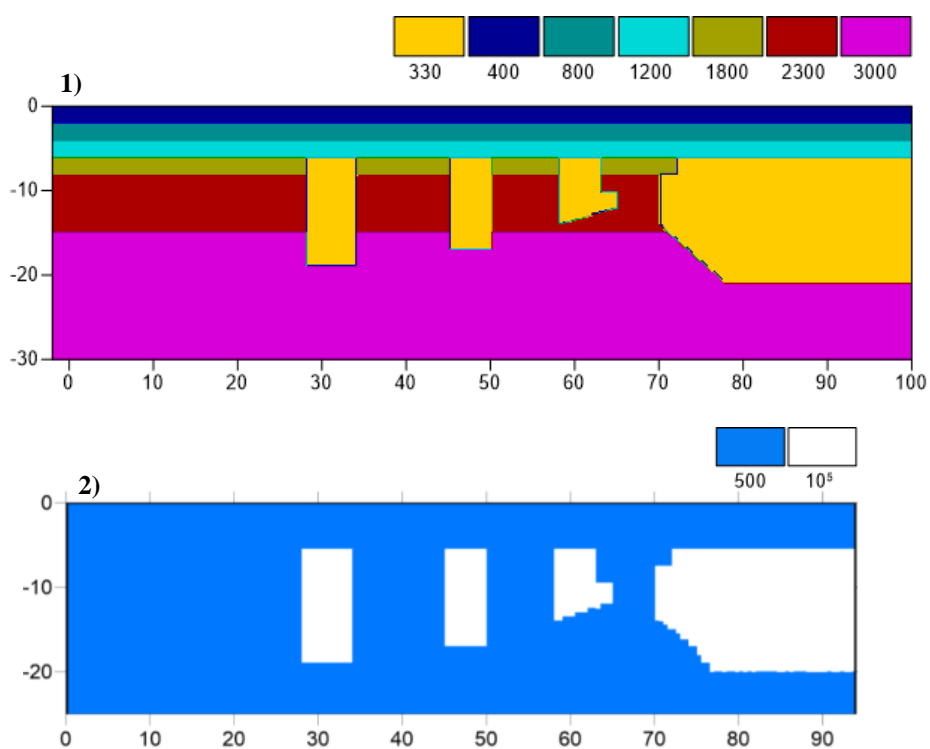


Figura 12. Modello D Cava Foderà: modello sismico sintetico (1), modello elettrico sintetico (2).



Figura 13. Ingresso Cava Foderà.

Le inversioni dei modelli sismici sintetici, hanno permesso di ricavare delle immagini di distribuzione dei raggi sismici e di velocità di propagazione delle onde P, in funzione della profondità. Questi modelli sono caratterizzati da una bassa densità dei raggi e bassi valori di velocità di propagazione delle onde P in corrispondenza delle cavità. Le inversioni dei modelli elettrici sintetici, invece, associano a tali aree alti valori di resistività. L'analisi delle correlazioni tra la distribuzione dei valori di resistività elettrica, della velocità di propagazione delle onde P e della densità dei raggi sismici ha permesso di evidenziare, con maggior precisione le zone del sottosuolo interessate dalla presenza di cavità (Fig. 14, Fig. 15, Fig. 16).

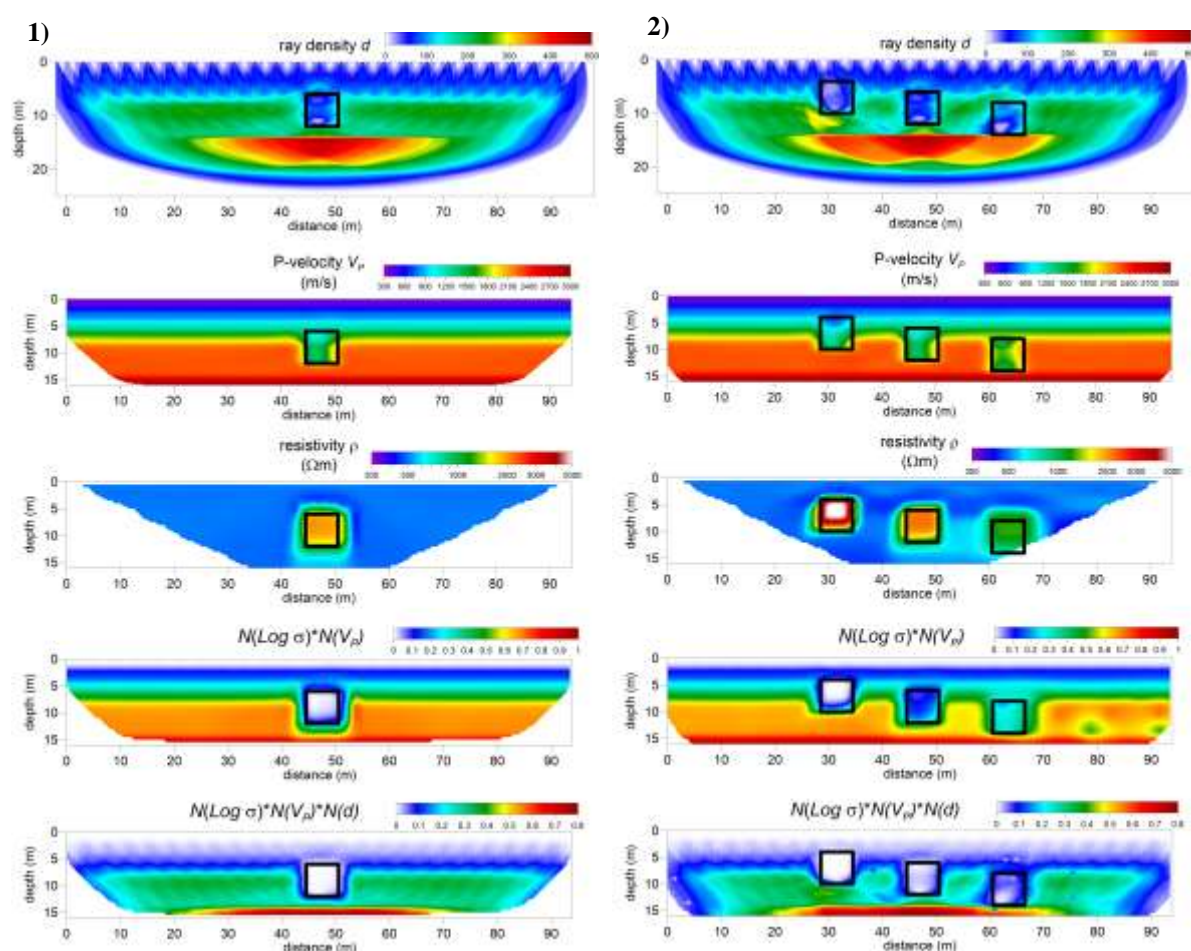


Figura 14. Modello A ad una cavità (1), Modello B a tre cavità (2). a) modello densità dei raggi sismici; b) modello di velocità delle onde P; c) modello di resistività elettrica; d) correlazione tra conducibilità e V_p ; e) correlazione tra conducibilità, V_p e densità dei raggi sismici. Sulle immagini sono riportate le forme delle cavità del modello sintetico (in nero).

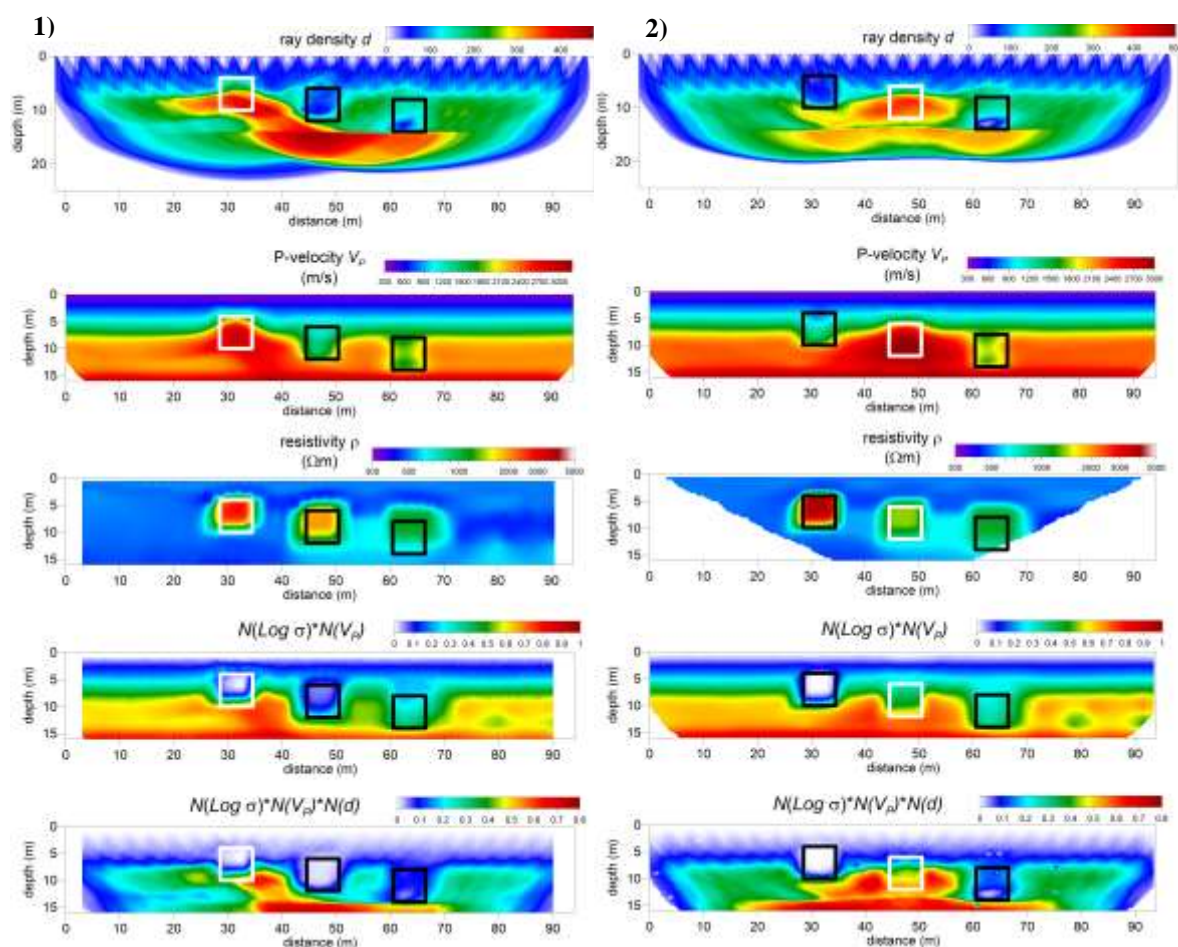


Figura 8. Modello C1 a due cavità ed un blocco calcarenitico compatto (1), Modello C2 a due cavità ed un blocco calcarenitico compatto (2). a) modello densità dei raggi sismici; b) modello di velocità delle onde P; c) modello di resistività elettrica; d) correlazione tra conducibilità e V_p ; e) correlazione tra conducibilità, V_p e densità dei raggi sismici. Sulle immagini sono riportate le forme delle cavità del modello sintetico (in nero) del blocco calcarenitico (in bianco).

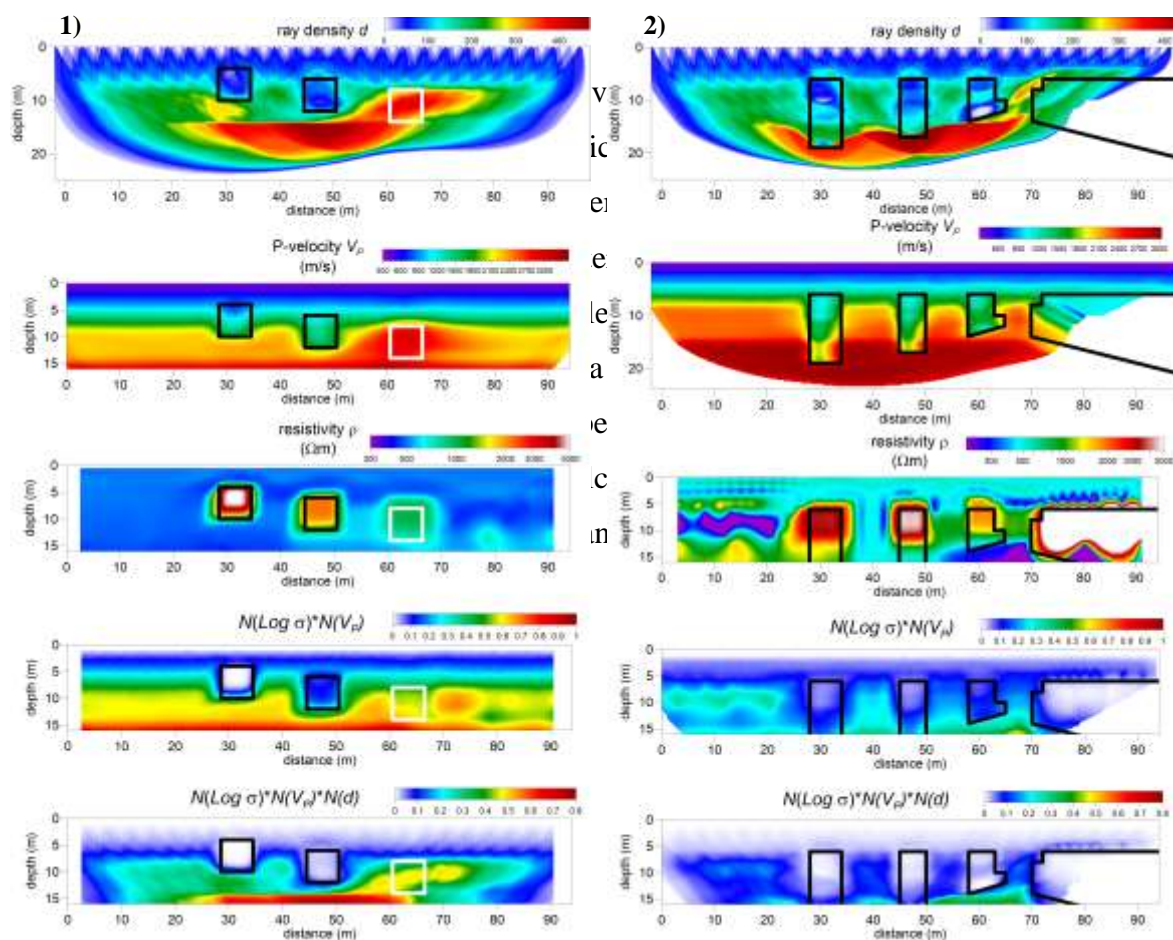


Figura 9. Modello C3 a due cavità ed un blocco calcarenitico compatto (1), Modello D a due cavità ed un blocco calcarenitico compatto (2). a) modello densità dei raggi sismici; b) modello di velocità delle onde P; c) modello di resistività elettrica; d) correlazione tra conducibilità e V_p ; e) correlazione tra conducibilità, V_p e densità dei raggi sismici. Sulle immagini sono riportate le forme delle cavità del modello sintetico (in nero) del blocco calcarenitico (in bianco).

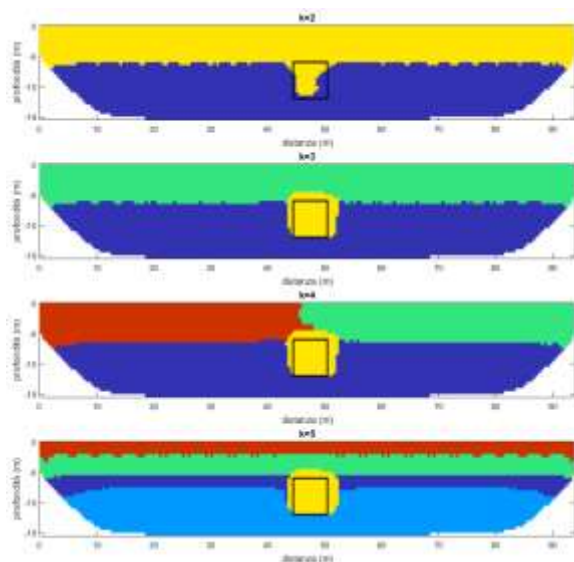


Figura 17. Modello A: Cluster analysis.

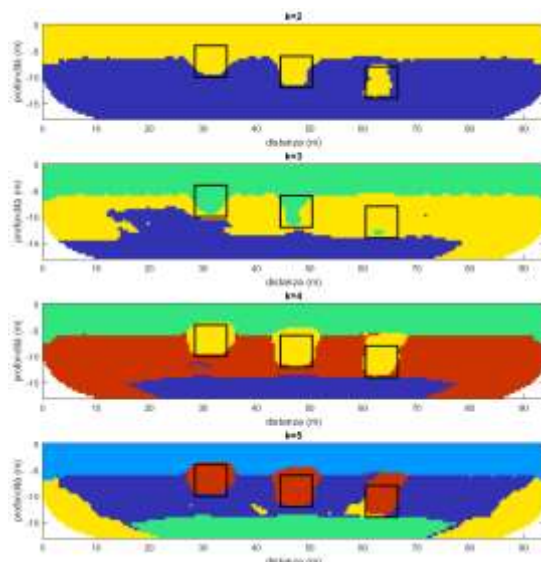


Figura 18. Modello B: Cluster analysis.

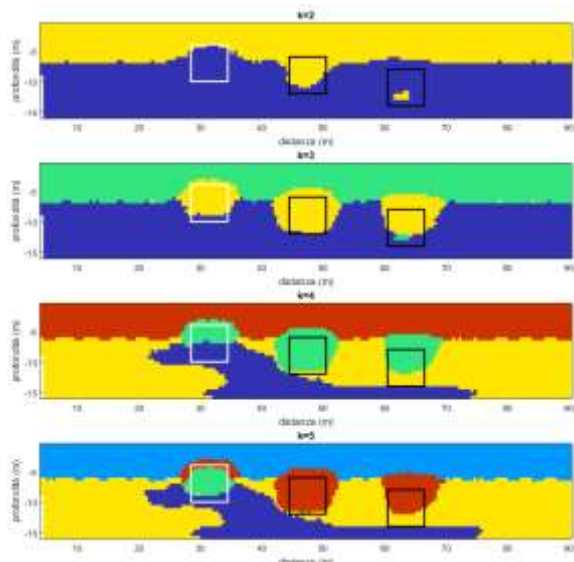


Figura 19. Modello C1: Cluster analysis.

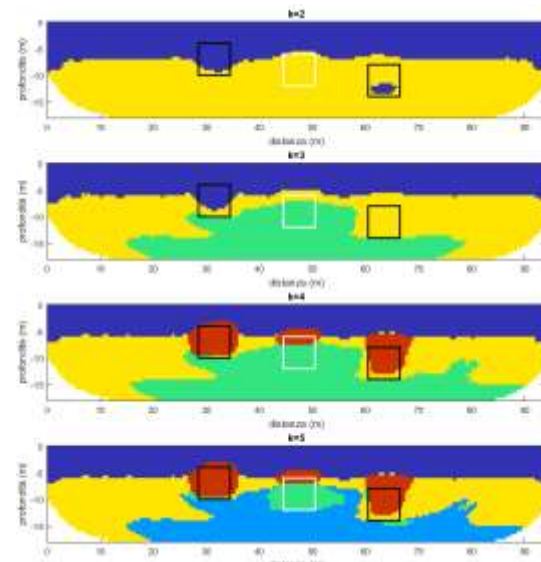


Figura 20. Modello C2: Cluster analysis.

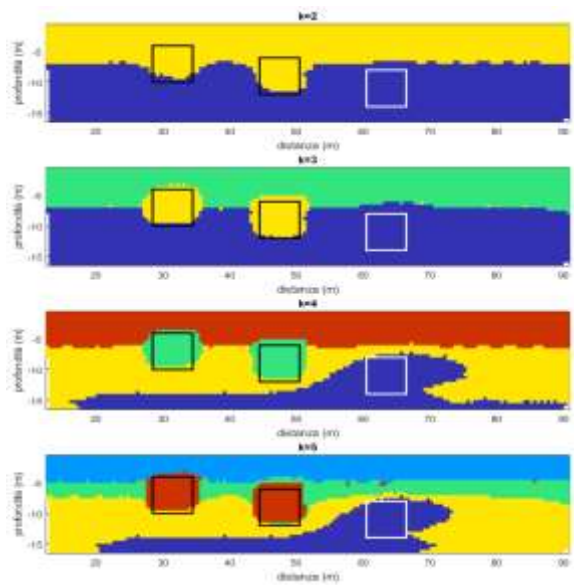


Figura 21. Modello C3: Cluster analysis.

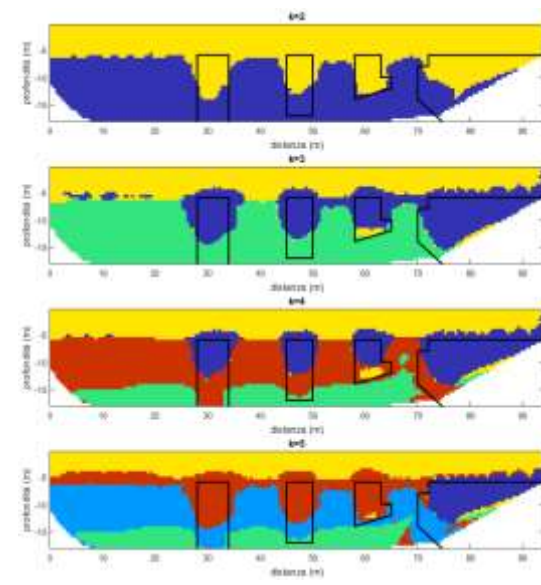


Figura 22. Modello D: Cluster analysis.

I dati sperimentali ottenuti sono stati confrontati con la relativa modellazione sintetica, per ottimizzare il processo di inversione e semplificare la fase di interpretazione dei dati stessi. L'analisi delle correlazioni tra l'inversione geoelettrica e quella sismica non vincolata (Fig. 23), partendo da un modello di velocità iniziale a gradiente verticale, ha evidenziato zone con valori prossimi allo 0, in corrispondenza delle cavità (alti valori di resistività elettrica, bassi valori delle velocità delle onde P, alta densità dei raggi). Attraverso la cluster analysis è stato possibile discriminare due aree ben distinte, caratterizzate da parametri ricadenti nello stesso raggruppamento, coincidenti con le aree caratterizzate dalla presenza di cavità nel sottosuolo (Fig. 24).

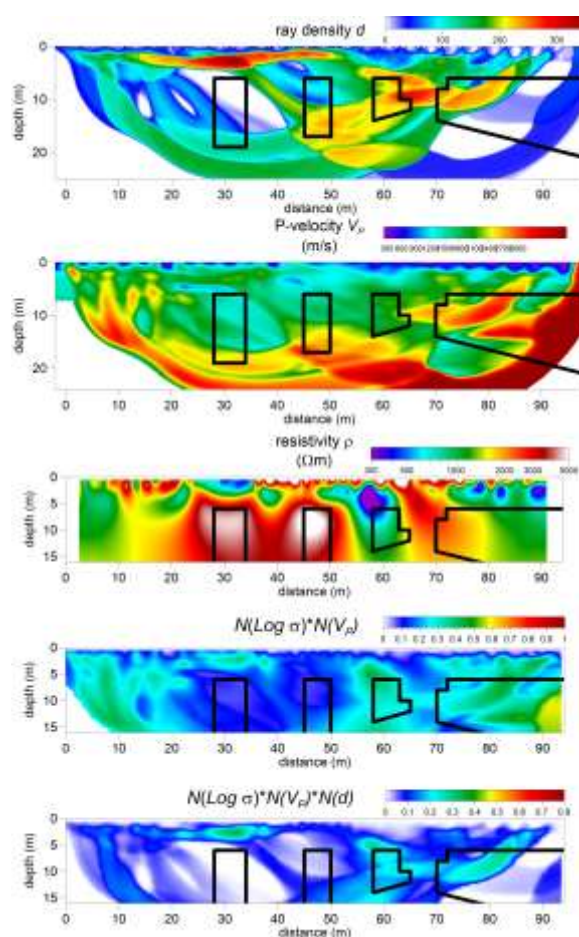


Figura 23. Risultati sperimentali ottenuti con il modello di velocità non vincolato.

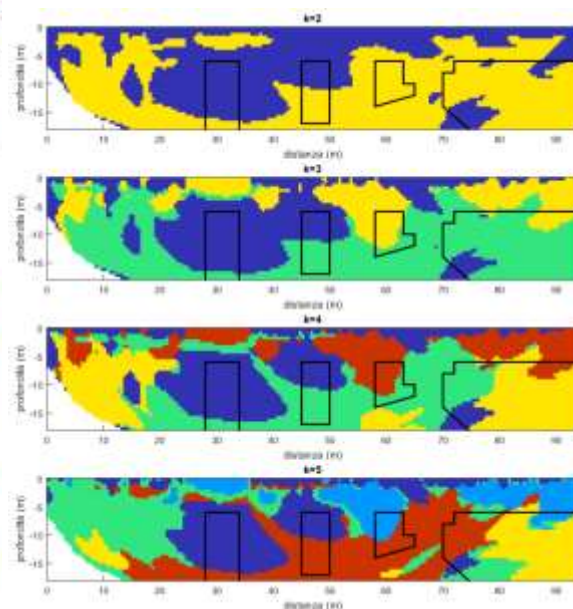


Figura 24. Cluster analysis ottenuta con il modello di velocità sismica non vincolato.

È stato realizzato un confronto, inoltre, tra l'inversione di tomografia sismica dei dati sperimentali vincolata al modello della cava (ricostruito tramite rilievo topografico del sito), e quella vincolata al modello caratterizzato solo da vuoti con continuità laterale rispetto all'allineamento sperimentale (Fig. 27). In entrambe le immagini (Fig. 25 e Fig. 26) vengono individuate le cavità poste ai primi metri rispetto all'origine del profilo, ma non viene discriminata la cavità che nel modello sintetico della cava è situata tra 58 m e 65 m dall'inizio del profilo. Dal confronto delle cluster analysis, vengono individuate due cavità, caratterizzate dallo stesso cluster in corrispondenza dei primi metri rispetto l'origine del profilo (Fig. 28 e Fig. 29).

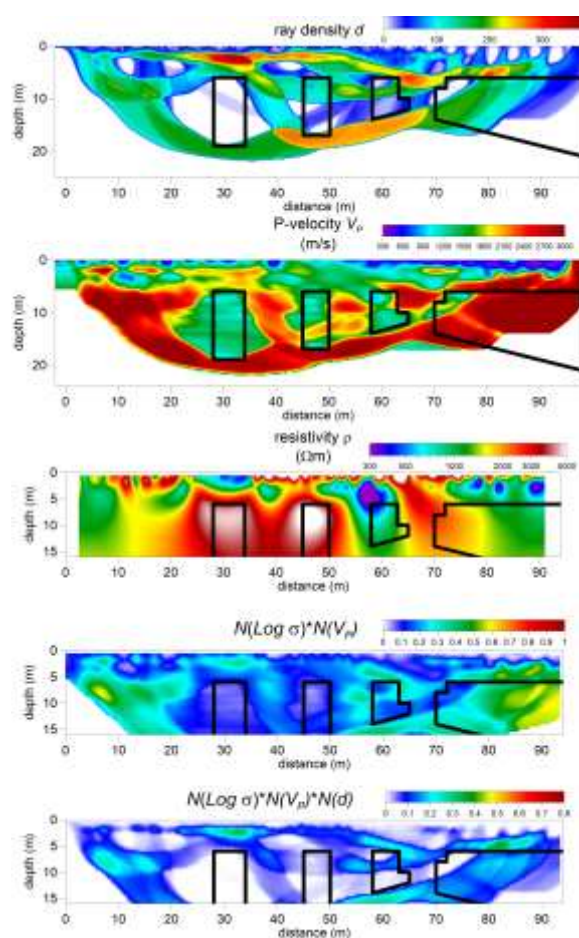


Figura 25. Risultati sperimentali per il modello vincolato dalla sezione in Fig. 12.

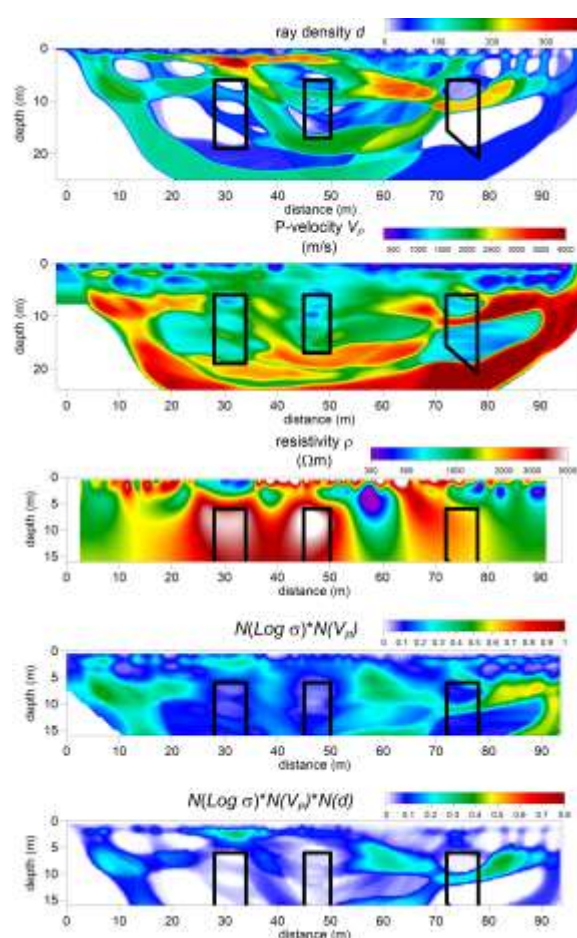


Figura 26. Risultati sperimentali per il modello vincolato dalla sezione in Fig. 27.

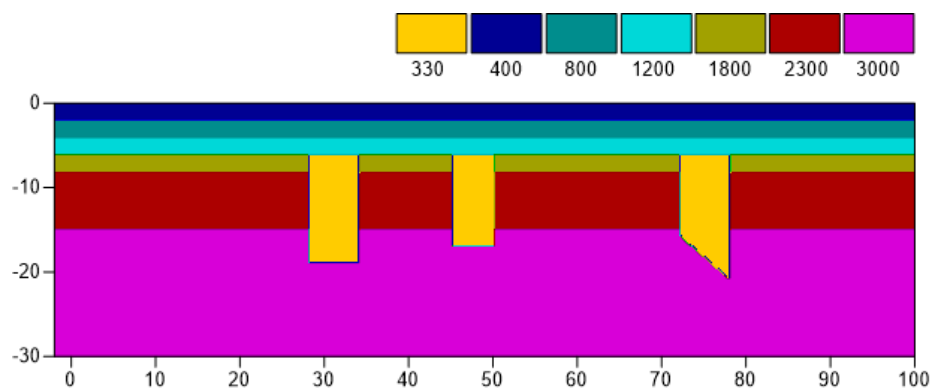


Figura 27. Modello sintetico costruito solo con cavità approssimativamente 2D.

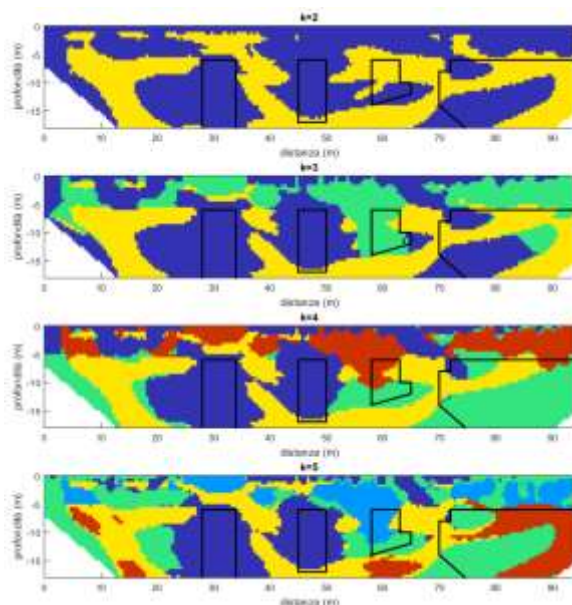


Figura 28. Cluster analysis ottenuta con il modello di velocità vincolato con la sezione di Fig. 12.

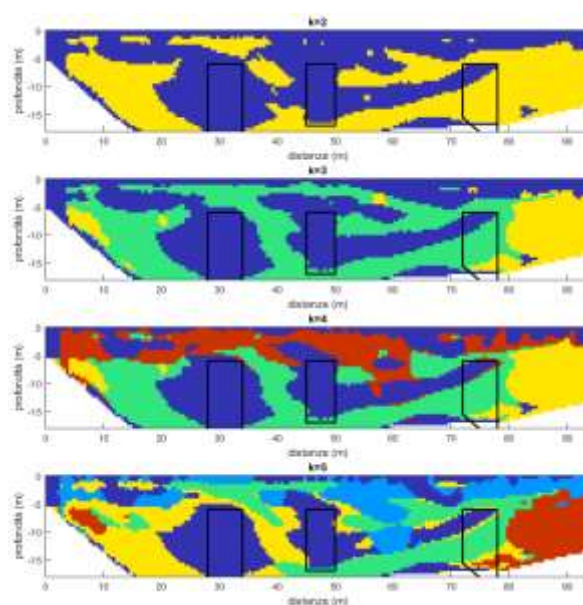


Figura 29. Cluster analysis ottenuta con il modello di velocità vincolato con la sezione di Fig. 27.

Infine, è stato realizzato un ulteriore confronto tra la tomografia sismica non vincolata e quella vincolata dal modello contenente solo cavità con geometria 2D. Ciò ha permesso di evidenziare maggiori similarità tra le cluster analysis. Si percepisce, inoltre, la somiglianza delle due analisi, evidenziando come le misurazioni di tomografia sismica vengano poco influenzate dalla presenza di vuoti non continui lateralmente, così come le misure di tomografia elettrica.