

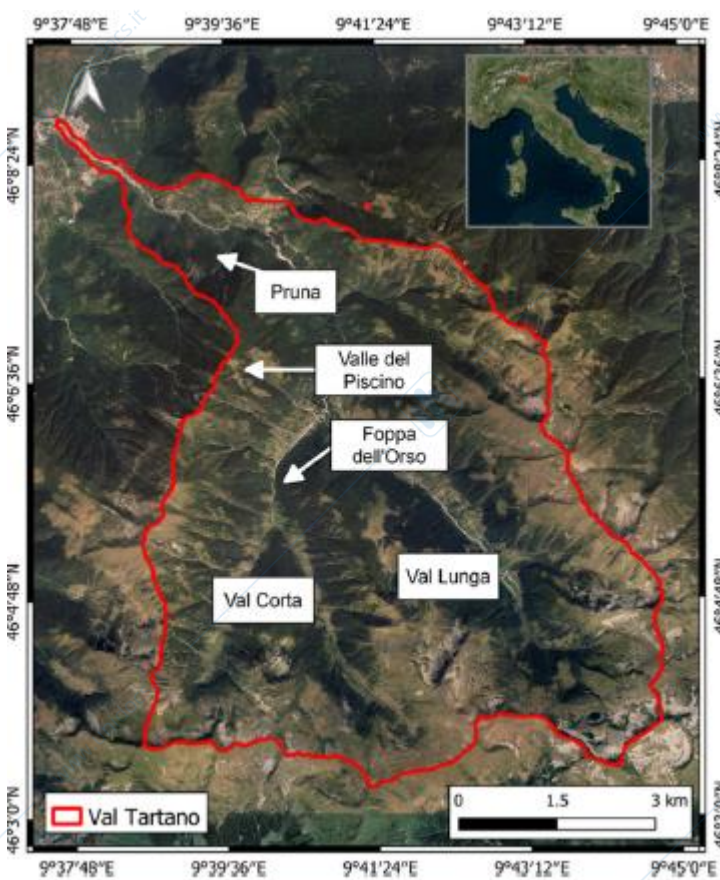
ANALISI SISMICA A RIFRAZIONE PER LA CARATTERIZZAZIONE DEL SOTTOSUOLO

L'analisi sismica a rifrazione è una tecnica ampiamente utilizzata nella geofisica applicata per caratterizzare il sottosuolo.

Nel metodo sismico, vengono generate onde sismiche artificiali (ad esempio tramite impulsi generati da un martello o esplosioni controllate) e viene registrato il tempo impiegato dalle onde per propagarsi attraverso il terreno e tornare ai rilevatori. Analizzando i tempi di arrivo delle diverse onde sismiche registrate, è possibile ottenere informazioni sulle proprietà del terreno, come la velocità di propagazione delle onde e la struttura geologica sottostante.

VAL TARTANO

Il territorio soggetto a studio è situato nella Val Tartano, collocata sul versante Valtellinese della catena orobica nel Nord della Lombardia, in provincia di Sondrio.



Prima di recarsi sul sito per effettuare la prova sismica è necessario essere in possesso di conoscenze litologiche del territorio per assicurarsi che effettivamente la prova sia effettuabile. In riferimento al piano di gestione del SIC IT2040029, che comprende l'area di nostro interesse, si scopre il prevalere di filladi ed i micascisti filladici che occupano parte della Val Lunga.

La prova risulta fattibile considerando che la velocità dello strato superficiale, più poroso, risulterà con buona probabilità inferiore rispetto allo strato roccioso metamorfico sottostante.

Inoltre, conoscenze preliminari del territorio permettono di scegliere uno stendimento dei geofoni che risulta ottimale per studiare la velocità di propagazione nei diversi strati, ipotizzando la distanza di cross-over, in corrispondenza della quale le onde rifratte saranno le prime ad essere rilevate dai geofoni.

Infine, conoscenze pregresse consentono di implementare un primo modello approssimativo della velocità di propagazione delle onde p, il quale è necessario come input per il metodo di inversione tomografica.

STRUMENTAZIONE UTILIZZATA



La perturbazione propagata nel terreno è stata creata da due tipologie di sorgenti differenti, ovvero una massa battente di 8 kg, utile a indagare il sottosuolo fino a modeste profondità (30/40 m) e un fucile sismico che permette di indagare zone più profonde (100 m). Le onde generate vengono rilevate da un sismografo a 24 canali, il quale è progettato per registrare simultaneamente le onde sismiche provenienti da diverse direzioni e posizioni nel terreno. Questo strumento consente di ottenere una registrazione tridimensionale o una mappa delle onde sismiche. Ogni canale del sismografo è collegato a un geofono, che è un sensore sismico con risonanza di 8Hz utilizzato per rilevare e convertire le onde sismiche in segnali elettrici. Lo stendimento dei geofoni è stato posizionato inizialmente longitudinalmente al corso del fiume, intervallando ogni rilevatore di 2 metri. Successivamente i geofoni sono stati posizionati ortogonalmente al primo stendimento con una spaziatura di 1 metro.

La posizione dei geofoni è stata geolocalizzata attraverso una battitura con stazione totale per poter implementare nello studio topografico del sito anche la porzione di territorio soggetta a studi geofisici. Di seguito viene riportato un'immagine di nuvola di punti ottenuta con laser-scanner con la posizione georeferenziata dello stendimento dei geofoni:

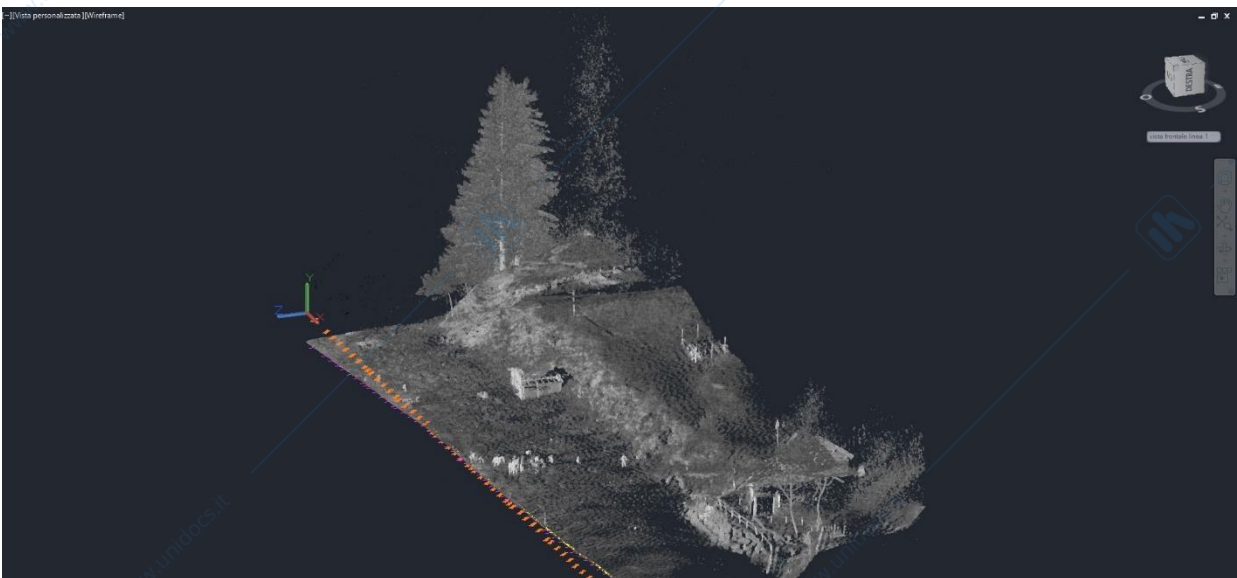


Figura 1 Profilo LONG

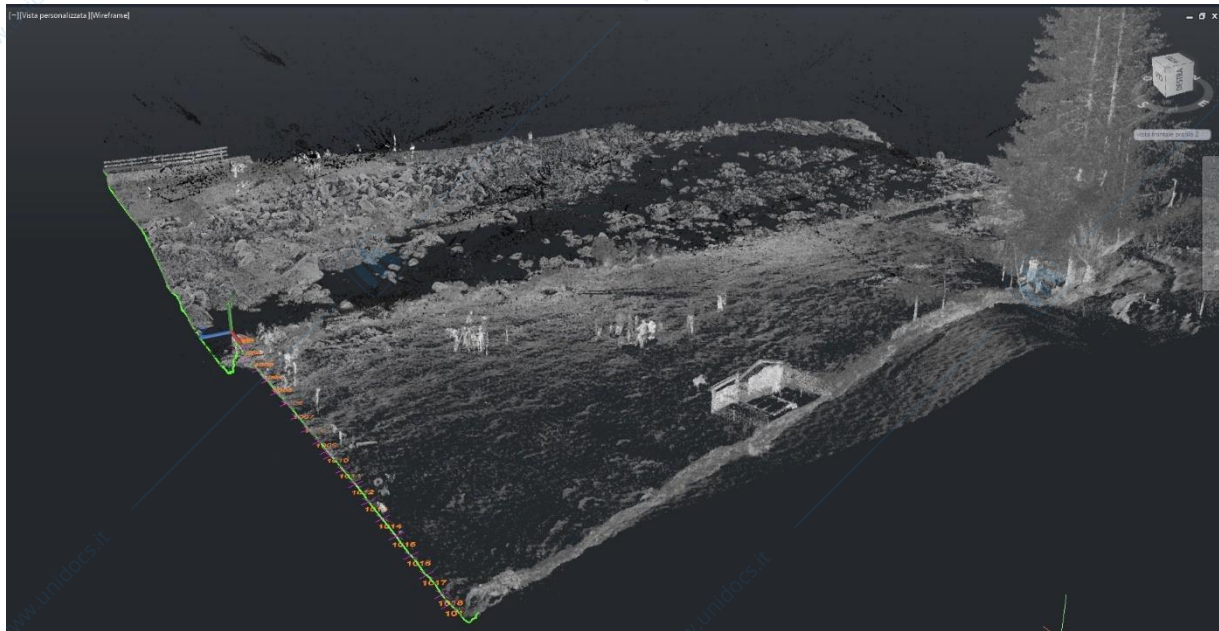


Figura 2 Profilo CROSS

Per ottenere risultati soddisfacenti sono stati previsti diversi punti di generazione dell'impulso lungo gli stendimenti posizionandoli in maniera simmetrica.

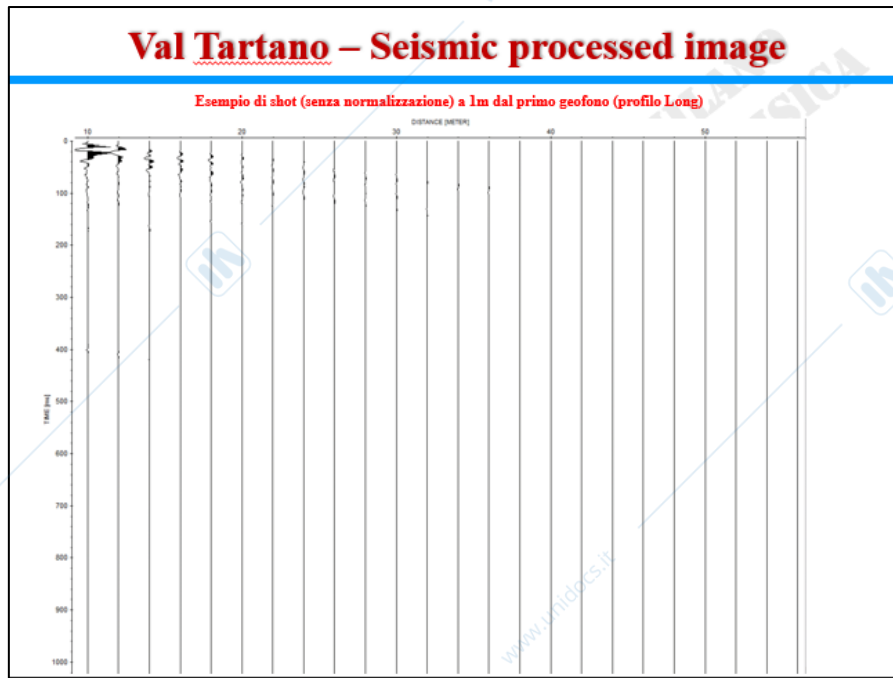
[IMMAGINE]

Avere molteplici punti di sorgente serve per avere ridondanza sui dati che vengono registrati dal sismografo, minimizzando errori che possono essere commessi durante la registrazione delle onde dai sismografi e nella successiva analisi dei dati, come l'eventuale presenza di mis-picking nella visualizzazione delle dromocrone.

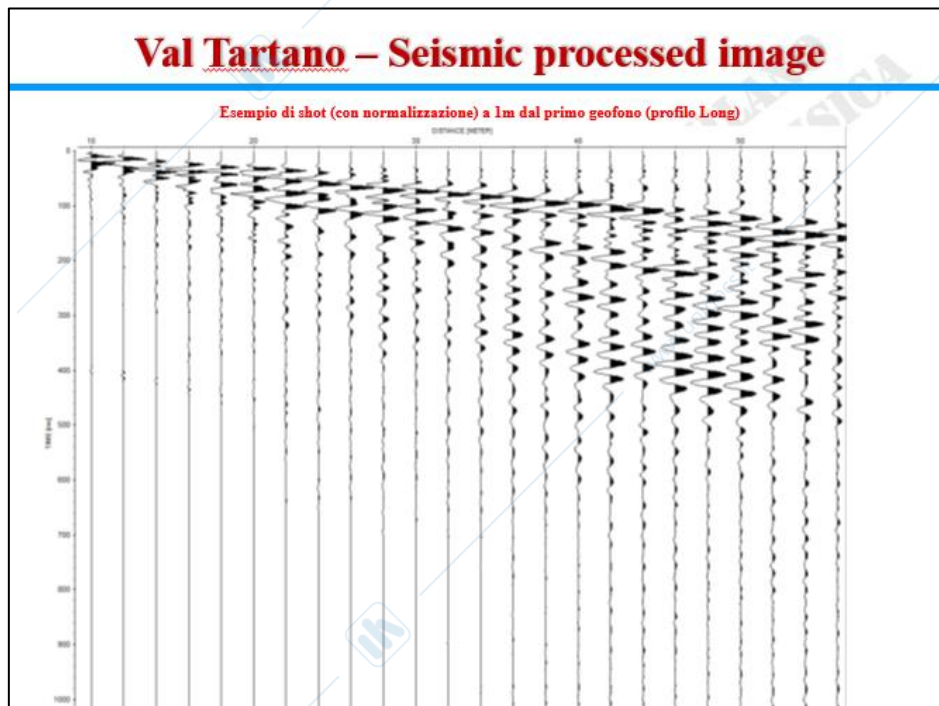
METODO DI ANALISI

L'analisi dei dati registrati dal sismografo si basa sul metodo di inversione tomografica, il quale permette di ottenere un modello di propagazione delle velocità delle onde p nel sottosuolo grazie a un processo di iterazione.

Per questo metodo è necessario conoscere i tempi di arrivo delle onde ai geofoni. A tale scopo si effettua un processo di picking dei dati partendo dai dati registrati dal sismografico a seguito di una perturbazione.

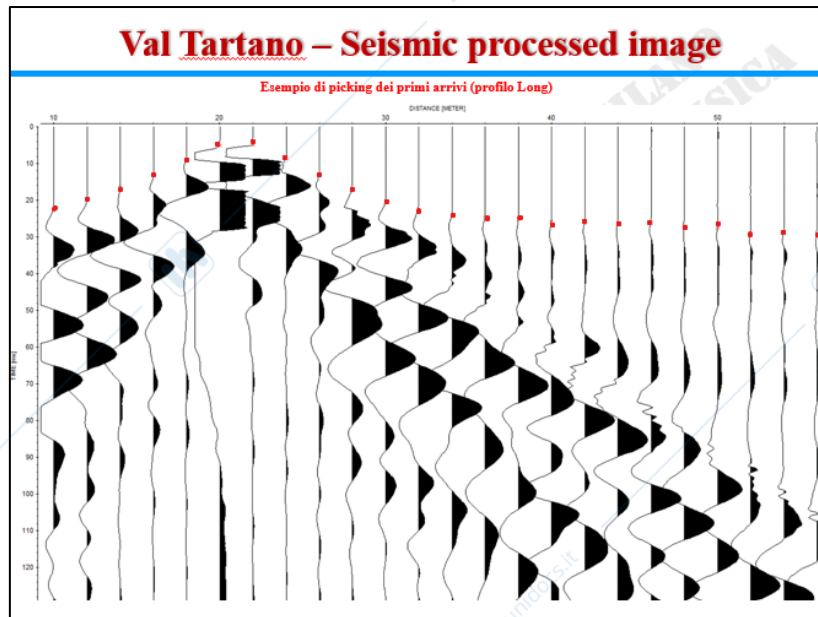


Risulta visibile come i dati siano difficilmente leggibili dal secondo geofono in poi, in quanto il segnale risulta debole. È necessario quindi effettuare un processo di normalizzazione per rendere indipendente ogni traccia dalle altre, così da rendere facilmente visibili i primi arrivi.



A seguito della normalizzazione e ad uno zoom sulla parte alta del grafico si esegue la procedura di picking, la quale può essere eseguita manualmente dall'operatore o automaticamente da un software specializzato. Tale procedura permette di ottenere le dromocrone per tutti i colpi che sono stati effettuati lungo lo stendimento.

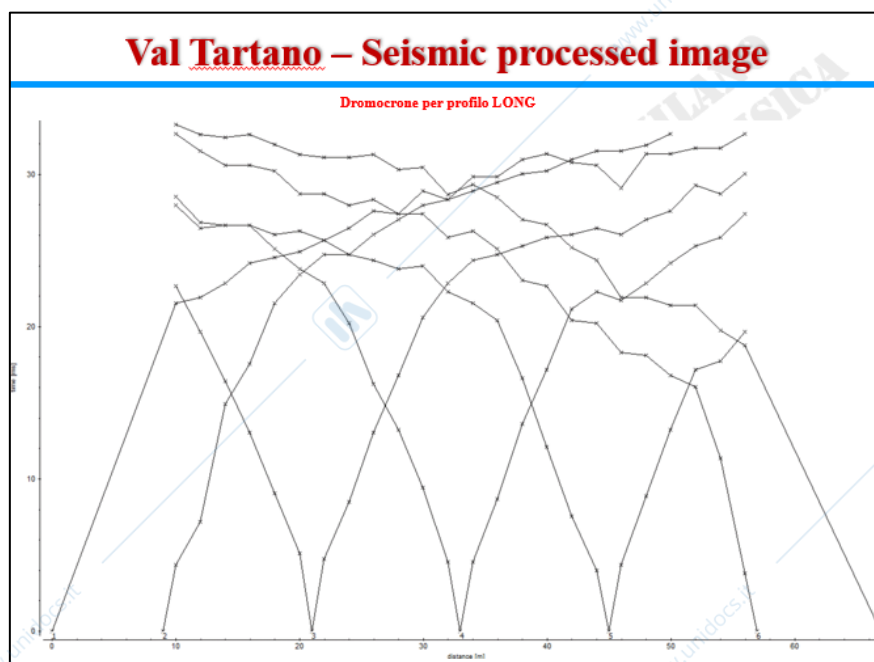
In accordo con il principio di funzionamento del trigger posizionato sullo strumento con cui si genera l'impulso sul terreno, si considera per il picking il primo punto utile dove si distingue l'onda p.

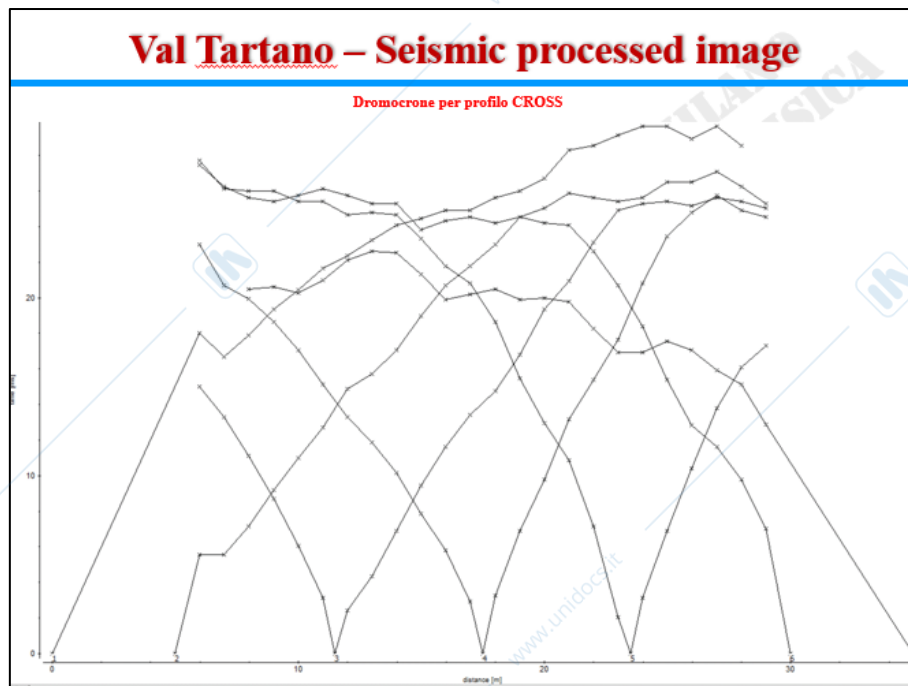


È importante osservare come le onde p risultano meno intense rispetto al ground-roll che viene rilevato successivamente, costituito da onde in prevalenza superficiali. Risulta fondamentale effettuare un buon processo di picking in quanto i tempi di arrivo vengono poi utilizzati per calcolare la velocità di propagazione delle onde sismiche nel terreno. La precisione nella selezione dei tempi di arrivo delle onde sismiche influisce direttamente sui risultati dell'analisi a rifrazione; infatti, misurazioni errate o imprecise possono portare a stime inaccurate delle velocità del terreno e delle caratteristiche del sottosuolo.

Terminato il processo di picking per ogni shot effettuato si rappresenta su un grafico tempo [ms] distanza [m] i punti rilevati ottenendo una serie di dromocrone che vengono visualizzate unitamente per un'analisi di congruenza dei risultati e prime osservazioni sullo strato sottostante del terreno.

Si propongono le dromocrone ottenute per il profilo longitudinale e trasversale:





Le dromocrone visualizzate per lo stendimento longitudinale sono soddisfacenti, in quanto coprono quasi totalmente l'intero stendimento dei geofoni. Inoltre, le velocità di propagazione delle onde risultano coerenti, come evidenziato dal parallelismo delle curve, specialmente per le onde dirette. Il cambio di pendenza è facilmente identificabile e indica l'acquisizione delle onde rifratte che si propagano nel secondo mezzo a velocità superiore. Questo tratto della curva evidenzia mis-picking frequenti, ma facilmente minimizzabili grazie alla ridondanza delle misurazioni effettuate. Le dromocrone acquisite per lo stendimento trasversale risultano meno precise rispetto a quelle appena analizzate. Anche in questo caso è stato possibile rilevare il primo arrivo delle onde p per la quasi totalità dei geofoni nelle varie battute.

RISULTATI E COMMENTI

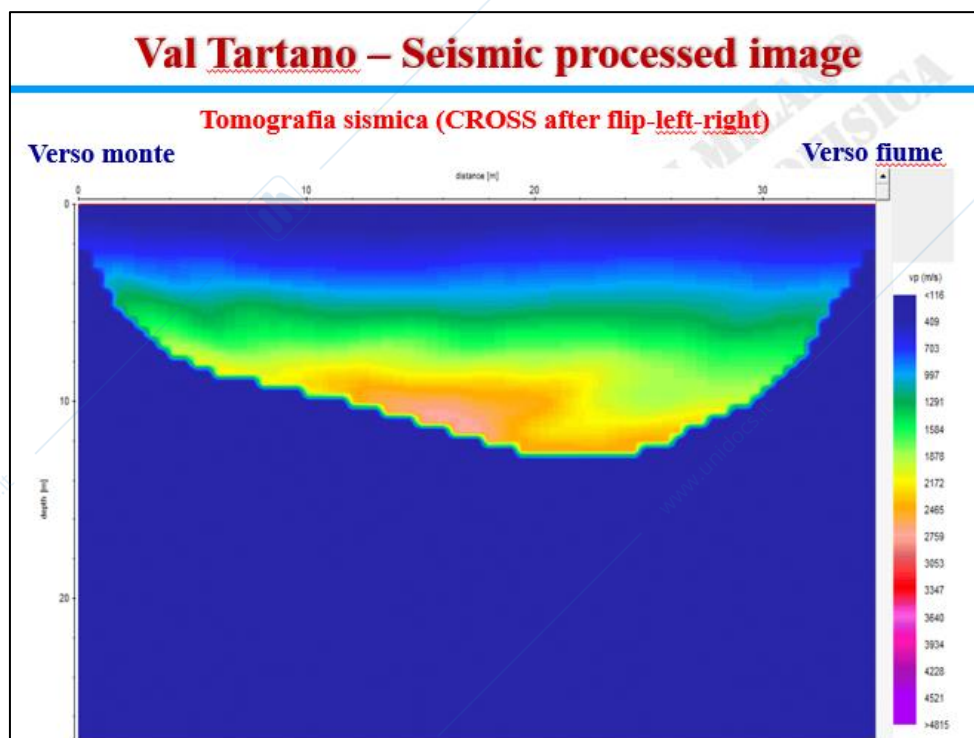
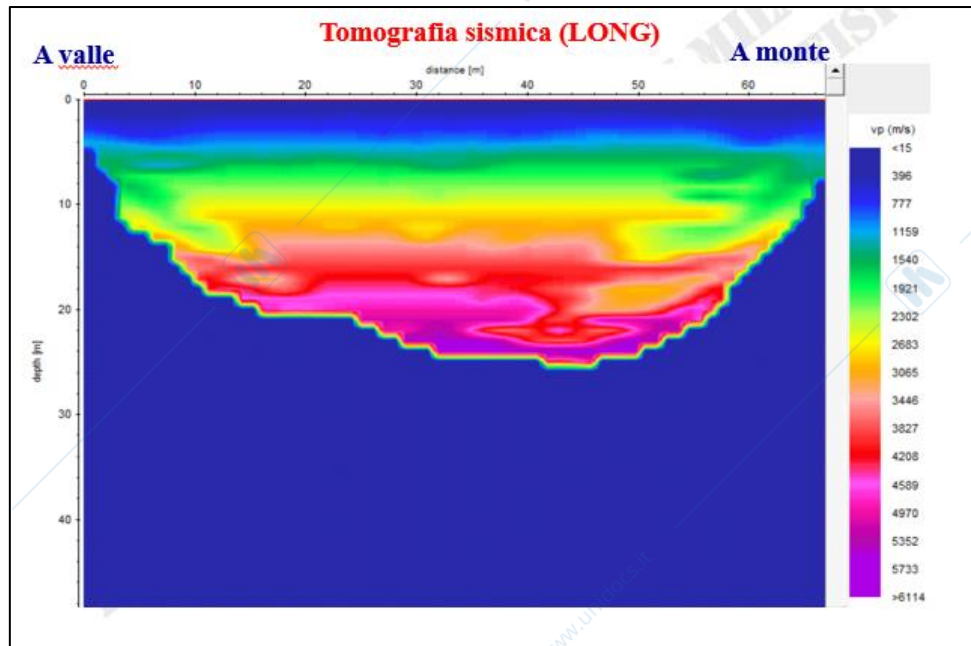
Ottenuti i tempi di arrivo delle onde dirette e rifratte è possibile impostare il sistema non lineare per il metodo di inversione tomografica. Il metodo si basa su un sistema del tipo:

$$\sum_k S_{i,j,k} * W_k = t'_{i,j}$$

Sviluppando due sistemi per lo stendimento longitudinale trasversale si ottengono due sistemi di 168 equazioni. I sistemi sono non lineari in quanto i fattori a sinistra dell'uguale sono incogniti; non si conoscono le traiettorie delle onde e l'inverso della velocità di propagazione.

Sviluppando un primo modello di velocità sulla base delle conoscenze pregresse si riesce a iniziare, grazie a software specifici, un processo iterativo che permette di ottenere un modello conclusivo che soddisfa un test di convergenza con la soluzione ottenuta nella iterazione precedente.

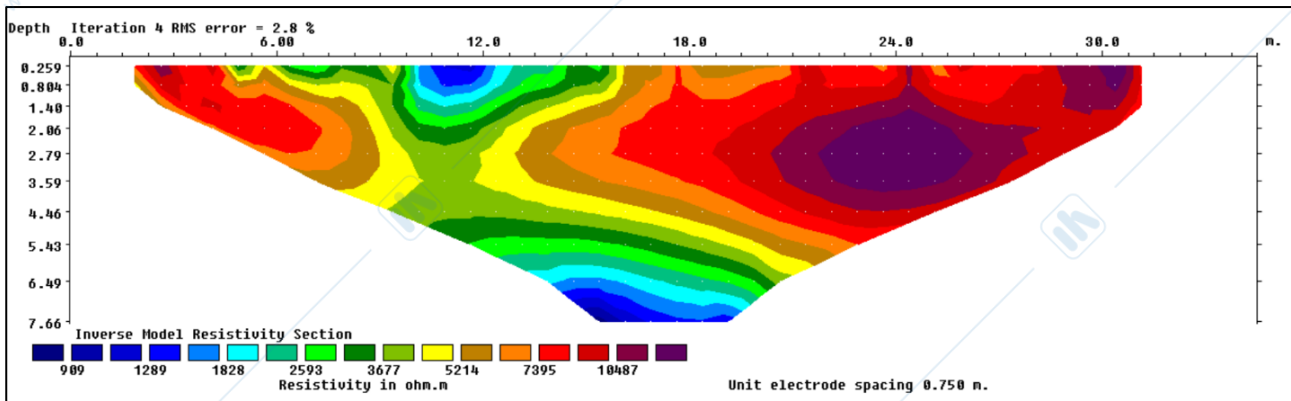
I due modelli di propagazione che si ottengono sono i seguenti:



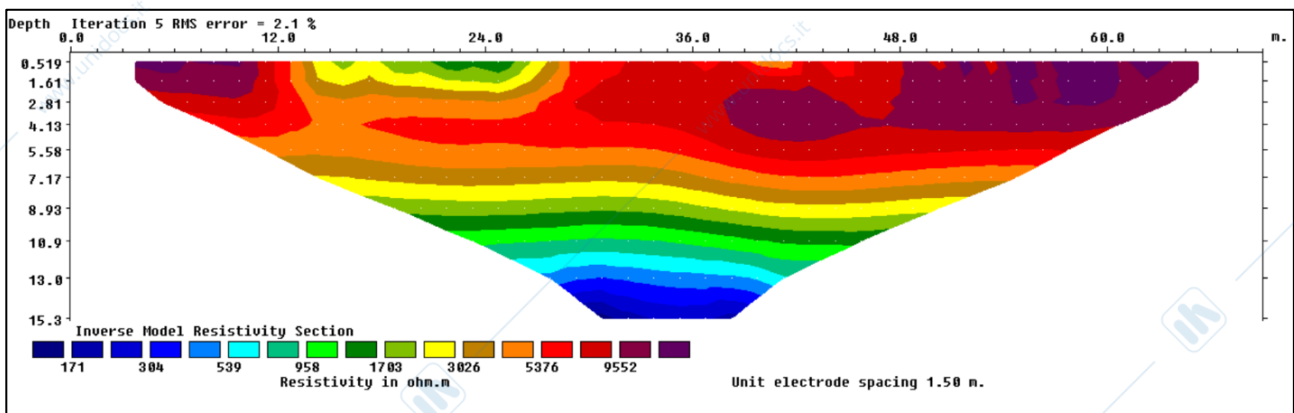
Si nota come per lo stendimento longitudinale è possibile raggiungere profondità maggiori rispetto a quello trasversale, essendo più elevata la distanza coperta dallo stendimento dei geofoni.

I dati raccolti dalla tomografia sismica permettono di fare ipotesi sugli strati di sottosuolo incontrati dalle onde, integrando a questi risultati le analisi effettuate con il metodo ERT e le analisi infiltrometriche dell'acqua svolte sugli strati di terreno superficiali.

PROFILO CROSS – METODO ERT



PROFILO LONG – METODO ERT



Superficialmente fino a una profondità di poco più di due metri si rilevano velocità di propagazione basse tra i 200 e i 700 m/s. Questo indica la presenza di un terreno non consolidato ed areato come sabbia, limo o argilla, i quali a causa della loro struttura poco rigida e della presenza di spazi vuoti o di porosità giustificano tale velocità di propagazione. Questa ipotesi trova riscontro da analisi di infiltrazione dell'acqua, le quali hanno caratterizzato un terreno prevalentemente argilloso.

Al di sotto di questo primo strato superficiale vi è un rapido aumento della velocità di propagazione che passa da 1500 m/s a 5 metri di profondità a quasi 3000 m/s a circa 10 metri.

Questi valori possono essere riferiti alla presenza di uno strato di sabbia cementata a matrice argillosa che essendo compatto e coeso porta a un significativo aumento della velocità di propagazione.

Si nota congruenza tra le due tomografie che riportano all'incirca gli stessi valori di propagazione a queste profondità, le quali sono il massimo raggiunto per lo stendimento trasversale.

Analizzando profondità ancora maggiori la velocità di propagazione aumenta fino a 5000 m/s.

Una prima ipotesi si appoggia sulle conoscenze litologiche della Val Tartano: i valori indicativi di propagazione di filladi e micascisti è tra i 3000 – 5000 m/s, che corrispondono con le velocità trovate negli strati meno superficiali del sottosuolo. I dati in possesso non permettono di determinare con precisione quale roccia è presente anche per una variabilità indotta da molteplici fattori quali l'anisotropia elastica che è dovuta alla scistosità in questo specifico caso se consideriamo la presenza di rocce metamorfiche. In genere la velocità parallela alla scistosità è maggiore che in direzione perpendicolare.

Prendendo in considerazione il metodo ERT si nota una diminuzione di resistività, la quale è indicativa di una possibile falda a circa 15 metri di profondità.

È possibile giustificare la presenza di una falda anche analizzando il modello di inversione tomografica, affermando che valori superiori a 4500 m/s rappresentati con un colore viola siano indicativi di una matrice completamente satura, la quale porta a un aumento considerevole della propagazione delle onde p. Se si considera tale osservazione come corretta, avvalorata dai risultati del metodo elettrico, è poco plausibile ipotizzare la presenza a tali profondità di rocce metamorfiche come le filladi e i micascisti filladici, le quali, in seguito ai processi metamorfici ad elevata pressione, risultano generalmente poco porosi.

Visionando lo stendimento trasversale si nota una significativa diminuzione di velocità negli strati più vicini al letto del fiume. L'ipotesi più plausibile è la presenza di terreno con elevata percentuale di umidità dovuta all'infiltrazione di acqua nelle porosità del terreno. Si nota inoltre che spostandosi verso monte la velocità aumenta significativamente a profondità minori, indicando un terreno compatto e con minore umidità.

Per lo stendimento longitudinale si notano delle aree a profondità maggiori di 14 m che presentano una diminuzione di velocità rispetto alla zona circostante. Non è possibile determinare con certezza quale sia la causa, ma è possibile ipotizzare l'eventuale fratturazione della roccia o una possibile infiltrazione di acqua.

Sia a monte che a valle di questo stendimento si notano due regioni estese dai 12 ai 14m in verde chiaro, il quale indica una velocità di circa 2000 m/s. Coerentemente con l'ipotesi che a queste profondità si trova un terreno cementato, si ipotizza la presenza di elevata umidità che porta a una diminuzione della velocità di propagazione.

Infine, analizzando i due modelli non si nota un'infiltrazione di acqua negli strati superficiali, in contrasto con quanto osservato dai modelli ottenuti con il metodo elettrico. Infatti si ha una continuità dei colori negli strati superficiali in corrispondenza della diminuzione di resistività riscontrata.

METODO DEI TEMPI INTERCETTI PER DUE DROMOCRONE

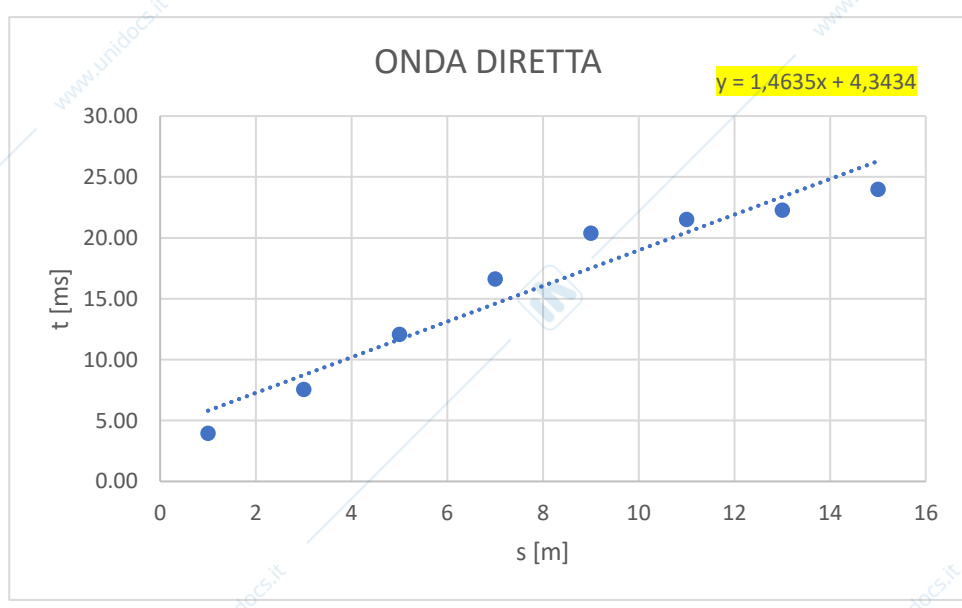
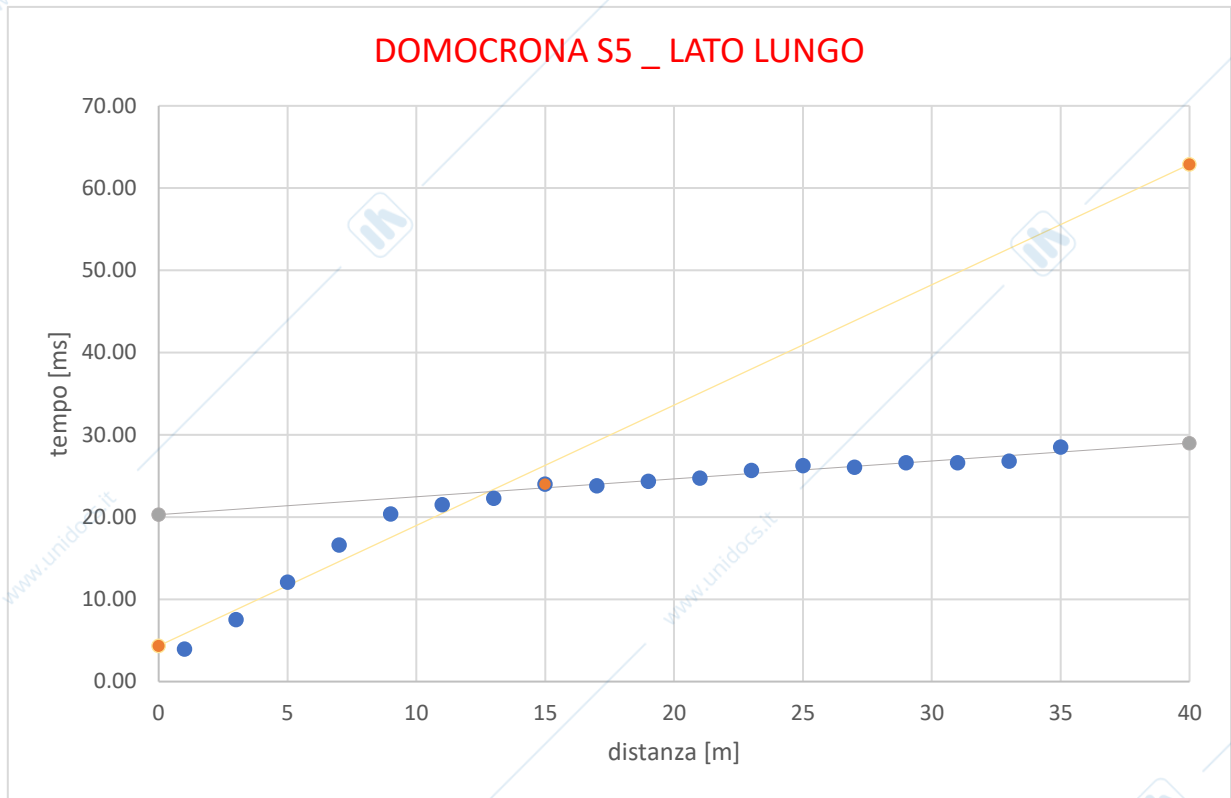
Per la singola dromocrona è possibile effettuare il metodo dei tempi intercetti, il quale risulta di facile esecuzione e permette di misurare le velocità di propagazione delle onde e la profondità del primo strato. Si basa sul considerare le curve delle onde come due rette, calcolando quindi l'equazione della retta che interpola al meglio i punti tramite la regressione lineare.

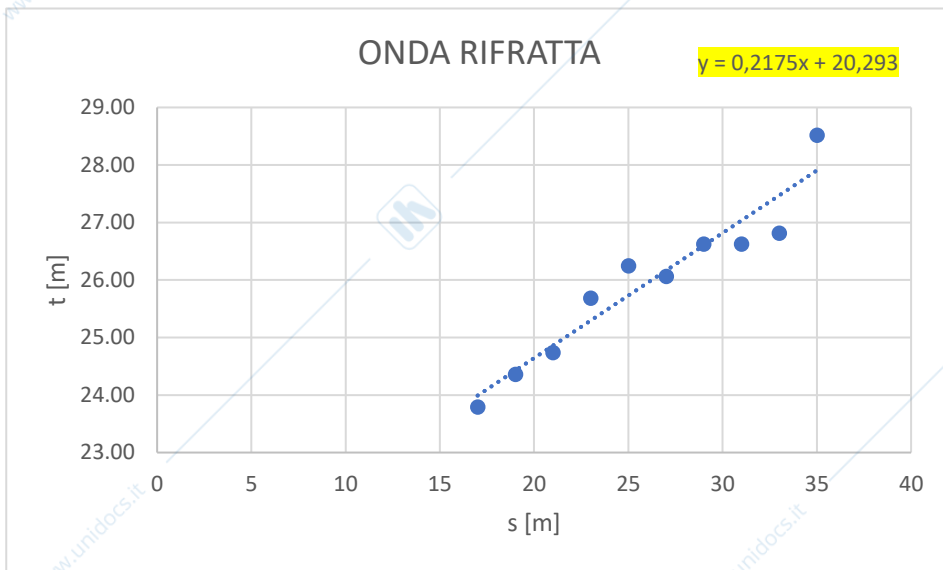
Definendo le due velocità di propagazione nei due strati dell'onda diretta e rifratta è possibile calcolare l'angolo critico di incidenza.

Prolungando la retta dell'onda rifratta fino a intersecare l'asse del tempo si trova il tempo quando si considera nulla la distanza percorsa nel secondo strato.

Ricordando la formula di propagazione delle onde rifratte è possibile calcolare l'incognita che è lo spessore del primo strato.

il metodo è stato sviluppato su Excel attraverso i grafici, la funzione regressione lineare e semplici formule matematiche che permettono di ottenere il risultato desiderato.





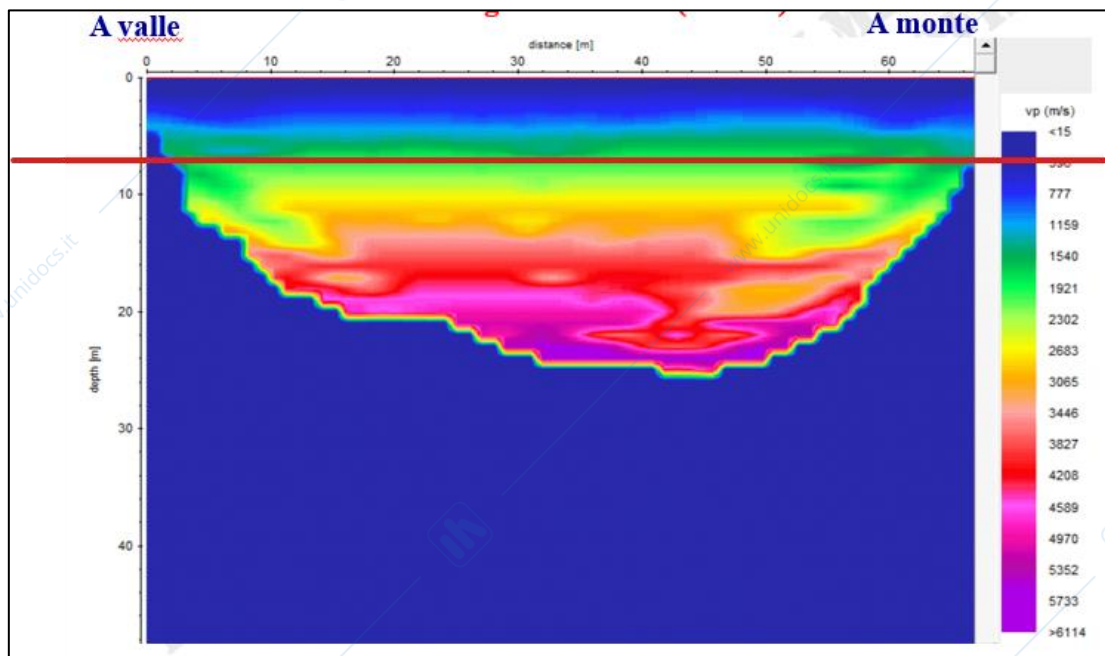
| CALCOLO DI V1 | | CALCOLO DI V2 | |
|-------------------------------|----|--------------------|--------|
| Y | X | Y | X |
| 4,3434 | | 0 | 20,293 |
| 62,8834 | 40 | 28,993 | 40 |
| V1 [m/s]= 636,09792 | | V2 [m/s]= 1379,643 | |
| ANGOLO CRITICO | | | |
| ic = | | 0,479189 | |
| CALCOLO SPESSORE PRIMO STRATO | | | |
| P [m]= | | 7,273374 | |

Per la seconda dromocrona, lungo lo stendimento corto trasversale, è stato effettuato lo stesso procedimento, trovando lo spessore del primo strato, che differisce dallo spessore precedentemente trovato.

| CALCOLO DI V1 | | CALCOLO DI V2 | |
|-------------------------------|----|------------------|----|
| Y | X | Y | X |
| 4,3434 | 0 | 22,014 | 0 |
| 69,539 | 30 | 27,711 | 30 |
| V1 [m/s]= 431,41 | | V2 [m/s]= 1082,6 | |
| ANGOLO CRITICO | | | |
| ic = 0,4099 | | | |
| CALCOLO SPESSORE PRIMO STRATO | | | |
| P [m]= 5,1774 | | | |

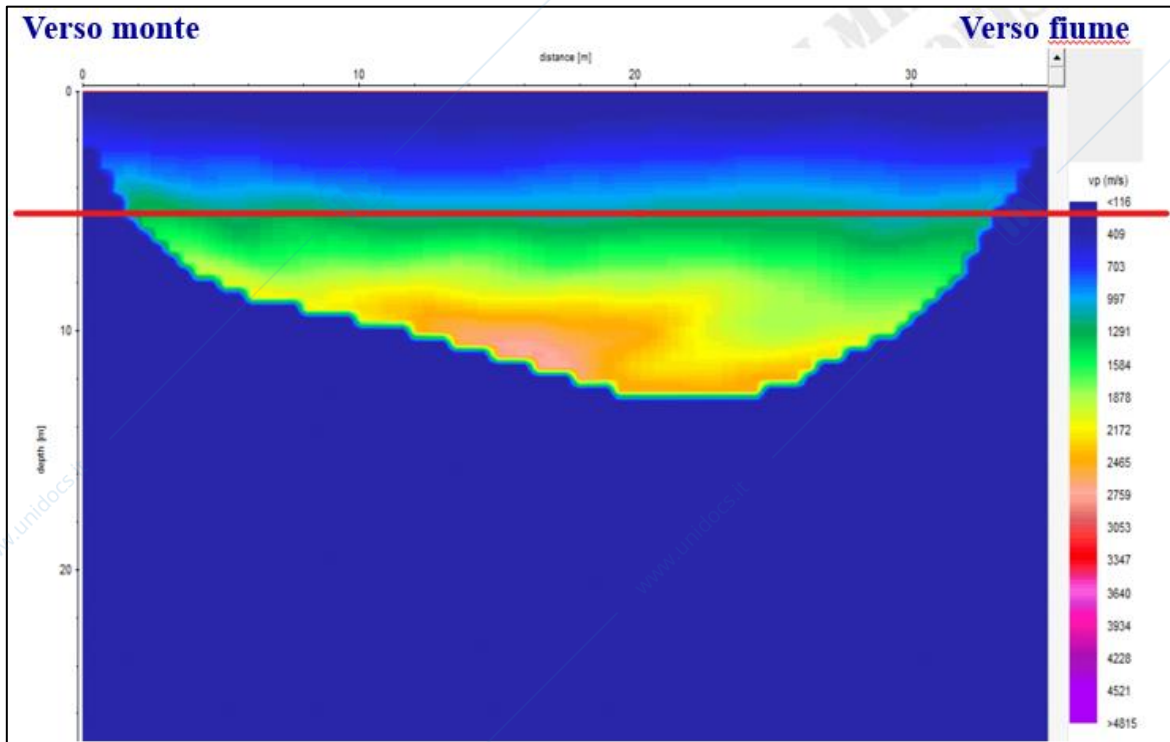
Questo metodo distingue nettamente due strati differentemente dal metodo dell'inversione tomografica che rende più omogeneo il risultato finale.

Per lo stendimento longitudinale si ottiene:



Il metodo dei tempi intercetti considera il primo strato orizzontale, non tenendo conto di eventuali variazioni di profondità. In questo caso il risultato è concorde con il modello di propagazione ottenuto in quanto a sette metri è visibile come la velocità di propagazione sia notevolmente aumenta rispetto a qualche metro sopra, evidenziando come si sia già superato il primo strato.

Per lo stendimento corto:



In questo caso i due metodi concordano. Infatti, considerando la dromocrona ottenuta considerando lo shot 6 si ottiene una profondità di circa 5m, che coincide anche con il netto cambio di velocità che si può osservare anche dal metodo tomografico.