



PRESIDENZA DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI
MESSA IN SICUREZZA DEL SISTEMA ACQUEDOTTISTICO
DEL PESCHIERA PER L'APPROVVIGIONAMENTO IDRICO
DI ROMA CAPITALE E DELL'AREA METROPOLITANA

IL COMMISSARIO STRAORDINARIO ING. PhD MASSIMO SESSA

SUB COMMISSARIO ING. MASSIMO PATERNOSTRO

acea
acqua
ACEA ATO 2 SPA



IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

Ing. PhD Alessia Delle Site

SUPPORTO AL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

Dott. Avv. Vittorio Gennari
Sig.ra Claudia Iacobelli
Ing. Barnaba Paglia

acea
Ingegneria
e servizi



CONSULENTE

Ing. Biagio Eramo

ELABORATO

A194PD R002 8

COD. ATO2 APE10116

DATA OTTOBRE 2019

SCALA

Progetto di sicurezza e ammodernamento
dell'approvvigionamento della città
metropolitana di Roma

"Messa in sicurezza e ammodernamento del sistema
idrico del Peschiera",
L.n.108/2021, ex DL n.77/2021 art. 44 Allegato IV

**NUOVO TRONCO SUPERIORE ACQUEDOTTO
DEL PESCHIERA
dalle Sorgenti alla Centrale di Salisano**

CUP G33E17000400006

AGG. N.	DATA	NOTE	FIRMA
1	DIC-19	AGGIORNAMENTO PER SIA	
2	MAR-20	AGGIORNAMENTO ELABORATI	
3	LUG-20	AGGIORNAMENTO ELABORATI	
4	GEN-21	AGGIORNAMENTO PARERE CSLLPP VOTO DEL 14/10/2020	
5	SETT-21	AGGIORNAMENTO ELABORATI	
6	GIU-22	AGGIORNAMENTO ELABORATI	
7	OTT-22	AGGIORNAMENTO UVP	
8	APR-23	INTEGRAZIONI ED AGGIORNAMENTI IN AMBITO AUTORIZZATIVO	
9			
10			

PROGETTO DEFINITIVO

TEAM DI PROGETTAZIONE

CAPO PROGETTO

Ing. Angelo Marchetti

IDRAULICA

Ing. Eugenio Benedini

GEOLOGIA E IDROGEOLOGIA

Geol. Stefano Tosti

GEOTECNICA E STRUTTURE

Ing. Angelo Marchetti

ASPETTI AMBIENTALI

Ing. Nicoletta Stracqualursi

ATTIVITA' TECNICHE DI SUPPORTO

Geom. Stefano Francisci

ATTIVITA' PATRIMONIALI

Geom. Fabio Pompei

Hanno collaborato:

Ing. Geol. Eliseo Paolini

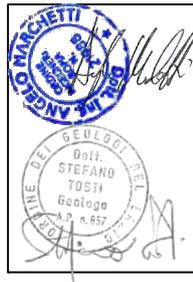
Geol. Yousef Abu Sabha

Geol. PhD Paolo Caporossi

Geol. Simone Febo

Geol. Filippo Arsie

Geol. Marco Marrocco



RELAZIONE GEOLOGICA

ALLEGATO 15

CONSULENTI

CERI - Centro di Ricerca Previsione, Prevenzione e Controllo dei Rischi Geologici

LABORATORIO MATERIALI DA COSTRUZIONE
LABORATORIO TERRE E ROCCE
INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE

GEOPROVE
S.R.L.

COMUNE DI RIETI

PROVINCIA DI RIETI

COMMITTENTE: ACEA ELABORI S.P.A.

**INDAGINI GEOGNOSTICHE FINALIZZATE ALLA
PROGETTAZIONE DEL NUOVO TRONCO SUPERIORE
DELL'ACQUEDOTTO DEL PESCHIERA
CONTRATTO QUADRO N. 3900005591**

Ruffano, Giugno 2019

IL DIRETTORE TECNICO
Dott. Geol. Marcello DE DONATIS

Autorizzazione ministeriale all'attività e all'effettuazione
di esecuzioni in materia del 12 giugno 2010

Autorizzazione esecutiva all'attività e all'effettuazione prove in terra
emessa in data del 27/11/13 (giugno 2010)

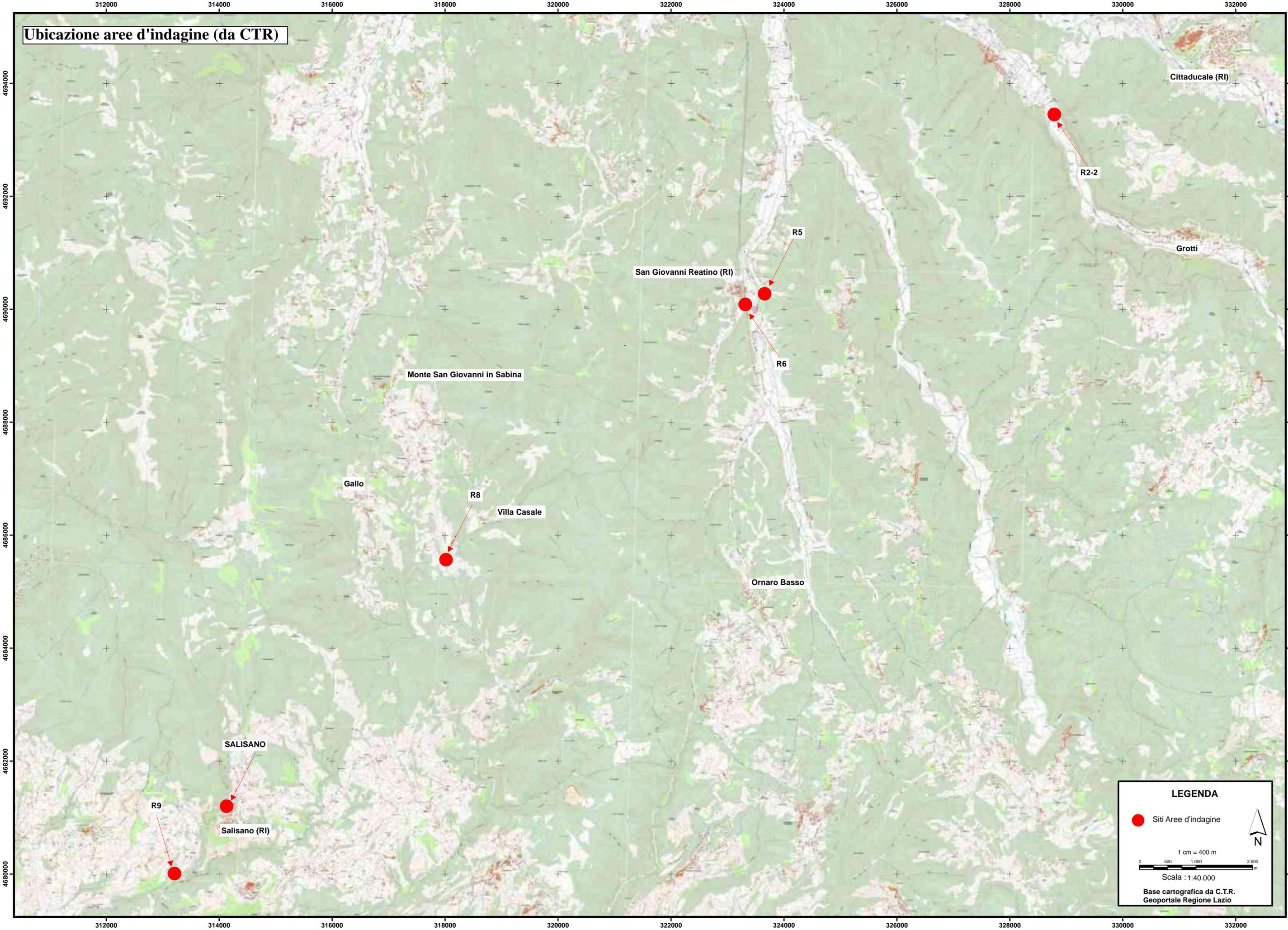


GEOPROVE S.R.L. P. IVA 03440560750 • Capitale Sociale € 300.000,00 • Iscrizione alla CCIAA 235978

Sede legale a Ruffano, Via V. Cignoni, 2, 03049 Ruffano (RI) • Laboratorio Materiali Via Sanabato Fabrice loc. 25 73049 Ruffano (RI) •

Ufficio sede Via Claudio, Zona industriale Sesto, 73010 (Cassa) (RI) • Telefono +39 0832 893992 • Tel. 329 339 9093 | www.geoprove.it • info@geoprove.it

Ubicazione aree d'indagine (da CTR)



LEGENDA

● Siti Aree d'indagine

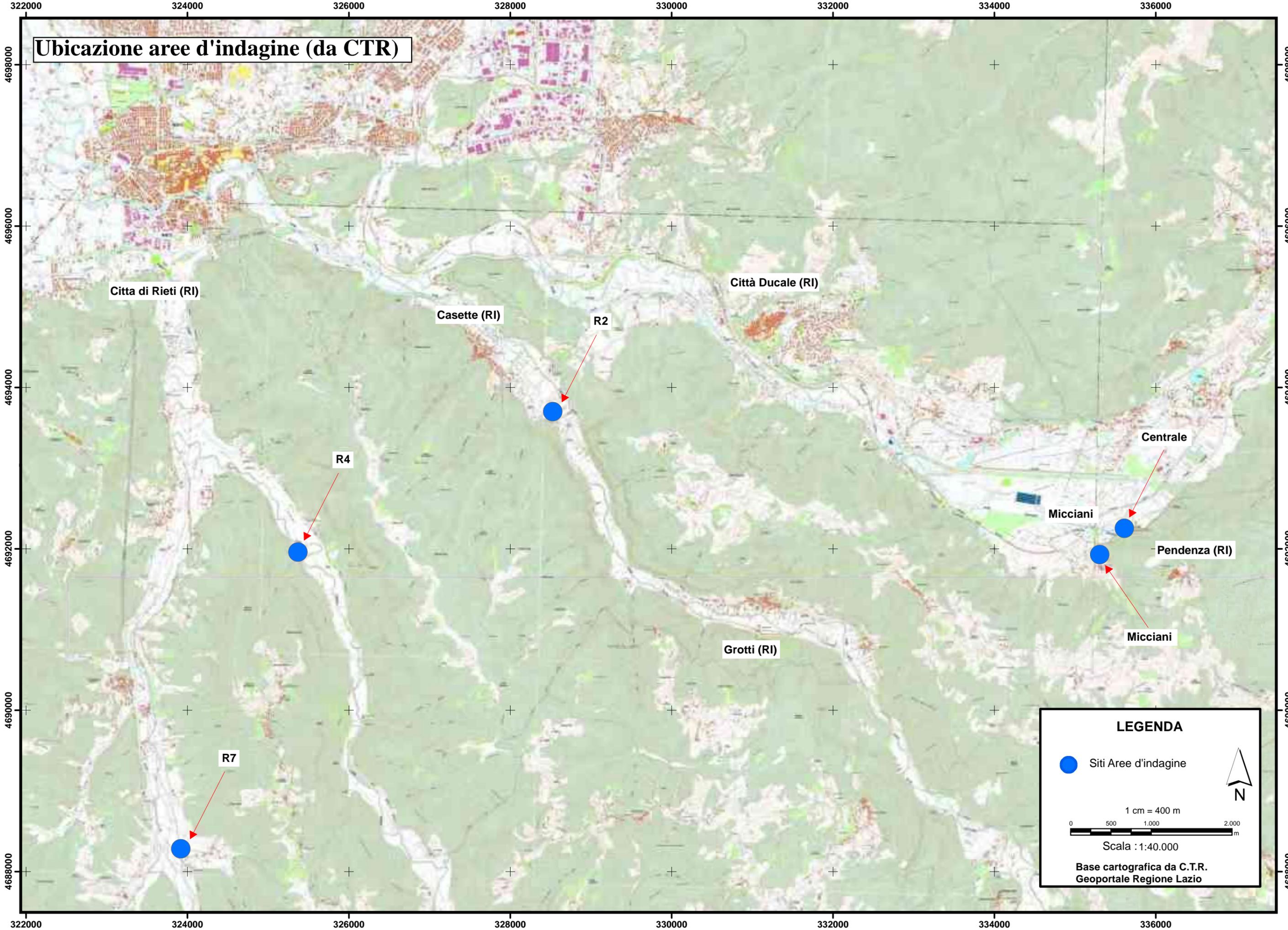
1 cm = 400 m

0 500 1.000 2.000 m

Scala : 1:140.000

Base cartografica da C.T.R.
Geoportale Regione Lazio

Ubicazione aree d'indagine (da CTR)



LEGENDA

● Siti Aree d'indagine

1 cm = 400 m

0 500 1.000 2.000 m

Scala : 1:40.000

Base cartografica da C.T.R.
Geoportale Regione Lazio

Indice

1	PREMESSA	2
2	Misure GPS	3
3	PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE	4
3.1	Cenni sulla metodologia di sismica a rifrazione	4
3.2	Metodo adottato	6
3.3	Tomografia Sismica	9
3.4	Attrezzature e tecniche operative	10
3.5	Tecniche operative	11
3.6	Analisi dei dati	12
3.7	Risultati	13
4	PROSPEZIONE SISMICA A RIFLESSIONE	15
4.1	Cenni sulla metodologia di sismica a riflessione	15
4.2	Principi Generali	16
4.3	Configurazione adottata	20
4.4	Attrezzature utilizzate	21
4.5	Data Processing	21
4.6	tecniche operative	24
4.7	Analisi dei dati	25
4.8	Risultati	27

ALLEGATI

- Ubicazione area d’indagine (da CTR) - scala 1:5.000
- Ubicazione misure sismiche (da Ortofoto-CTR) - scala 1:2.000
- Sismogrammi sismica a rifrazione onde longitudinali (onde P)
- Sismogrammi sismica a rifrazione onde trasversali (onde Sh)
- Dromocrone onde longitudinali (onde P)
- Dromocrone onde trasversali (onde Sh)
- Tomografie sismiche ed interpretazioni sismostratigrafiche
- Esempio di sismogramma a 48 tracce (sismica a riflessione)
- Sismogrammi a 24 tracce utilizzati per l’analisi in Common Mid Point
- Analisi prospezione sismica a riflessione
- Documentazione fotografica

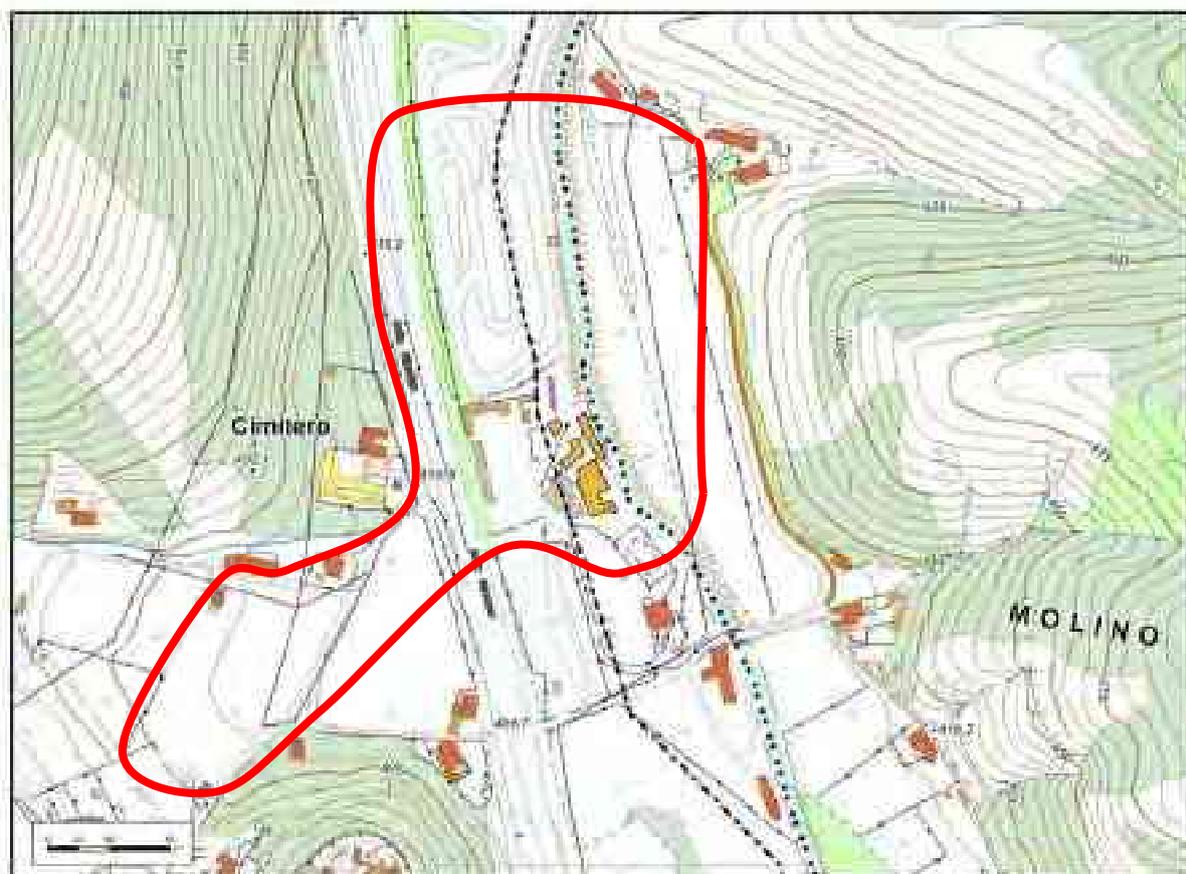
1 PREMESSA

Per incarico conferito alla “GEOPROVE S.r.l.” da “ACEA ELABORI S.P.A.” è stata eseguita una campagna di prospezioni sismiche nell’ambito delle **“INDAGINI GEOGNOSTICHE FINALIZZATE ALLA PROGETTAZIONE DEL NUOVO TRONCO SUPERIORE DELL’ACQUEDOTTO DEL PESCHIERA – CONTRATTO QUADRO N. 3900005591”**.

E’ stato indagato un sito dislocato lungo due valli, la cui ubicazione è mostrata di seguito e riportata in scala 1:5.000 in allegato. Sono state effettuate le seguenti indagini:

N° 7 profili sismici a rifrazione in onde P ed Sh;

N° 2 profili sismici a riflessione.



Area indagata

2 Misure GPS

Tutte le misure eseguite, laddove vi era copertura satellitare, sono state ubicate con sistema GPS mediante strumento GPS Leica GS15.

Lo strumento è dotato di 120 canali GNSS ed è in grado di ricevere fino a 60 satelliti tracciati simultaneamente su due frequenze.



Il GPS Leica GS15 è dotato di un’avanzatissima tecnologia brevettata “Leica SmartTrack+” composta da:

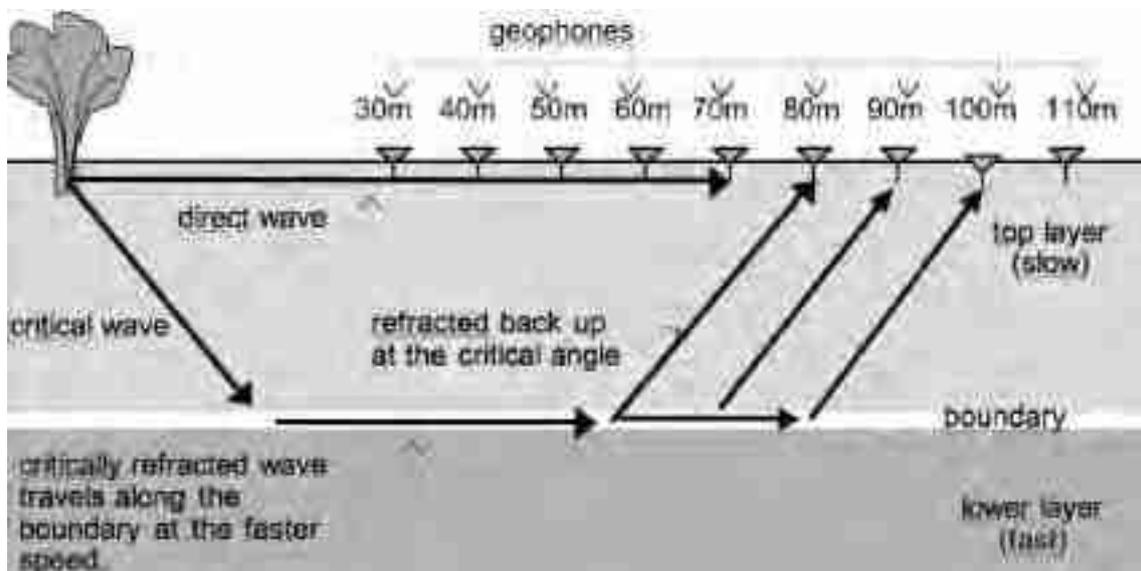
- Motore di calcolo avanzato
- Ricezione protetta dalle interferenze
- Controllo multipath di alta precisione per le misure pseudo-range
- Tracciamento eccellente a basse elevazioni
- Misure GNSS di fase a basso disturbo, precisione <math><0.5\text{ mm}</math>
- Tempi di acquisizione minimi.

3 PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE

3.1 Cenni sulla metodologia di sismica a rifrazione

La sismica a rifrazione è la metodologia più speditiva nell’ambito delle prospezioni geofisiche e studia i tempi di arrivo delle prime onde sismiche.

Presupposto fondamentale perché possa essere impiegata è che la velocità di propagazione delle onde sismiche aumenti con la profondità. I raggi rifratti viaggiano, infatti, parallelamente alla superficie di discontinuità con la stessa velocità dello strato “ più veloce ” rifrangendo l’energia elastica verso lo strato “ più lento ”.

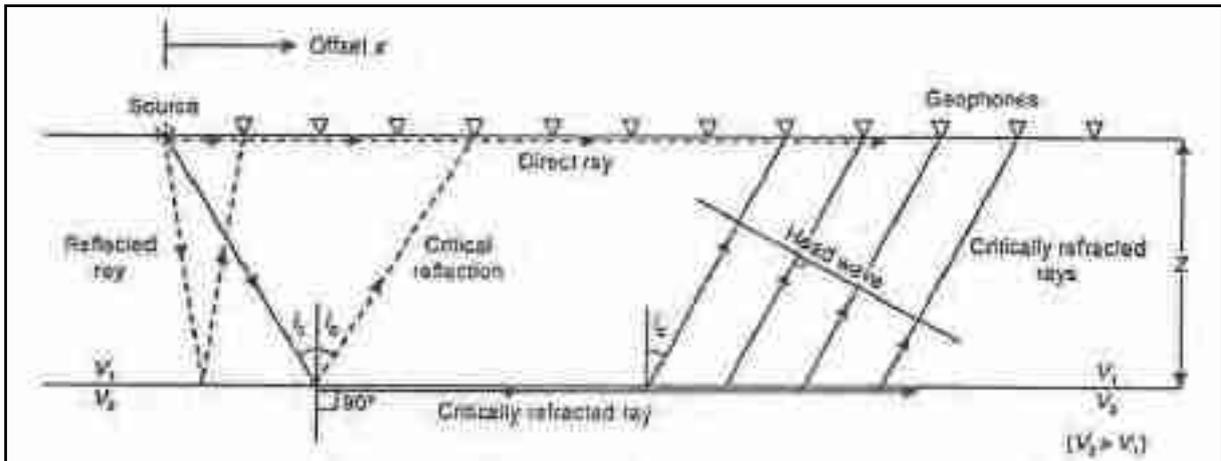


Percorso del raggio rifratto lungo la superficie di discontinuità in stati con velocità crescente verso il basso

Uno dei principi su cui si basa lo studio dei fenomeni di rifrazione è il principio di Fermat che stabilisce che un raggio d'onda nello spostarsi da un punto (sorgente) ad un altro punto (ricevente) attraverso un insieme qualsiasi di mezzi (strati), percorre, tra tutti i possibili cammini, quello che implica il minor tempo possibile, il quale risulta essere non sempre il cammino più breve in termini di lunghezza. Secondo la Prima Legge di Snell questo percorso è contenuto in un piano perpendicolare a quello del rifrattore che contiene sia la sorgente che il ricevitore ed è espresso dalla seguente relazione:

$$V_2 \sin i = V_1 \sin r$$

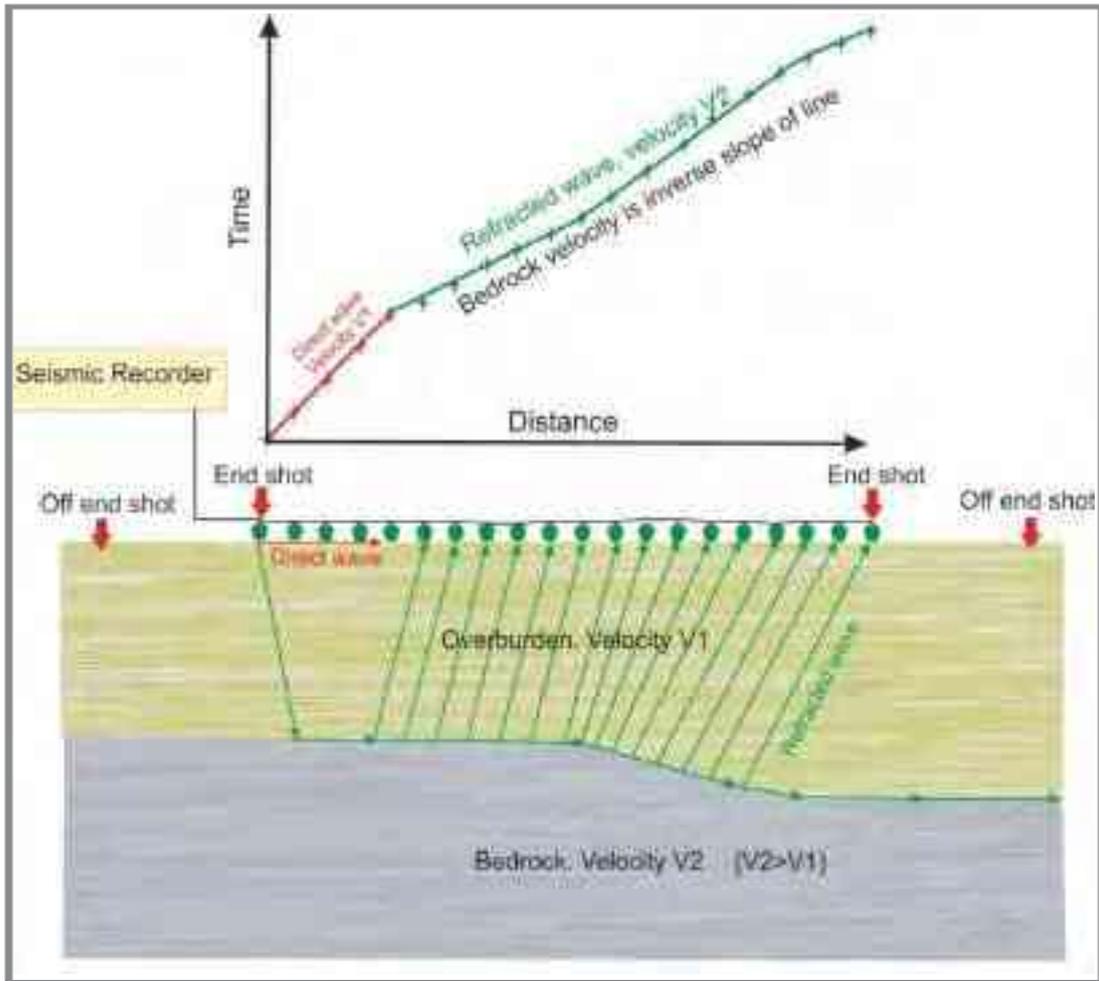
dove V_2 e V_1 sono le velocità degli strati, con $V_2 > V_1$, i è l’angolo di incidente ed r è l’angolo di rifrazione del raggio sismico.



Percorso raggi diretti, rifratti e riflessi in strati dove $V_1 < V_2$ (da Reynolds, 1997).

Ad ogni geofono infatti arrivano tutte le onde generate dalla sorgente (dirette, riflesse, rifratte). L’onda che arriva per prima al ricevitore è sempre quella diretta che viaggia nel primo strato con velocità V_1 . Ma in punto posto ad una certa distanza dalla sorgente, detto punto di ginocchio, arriveranno contemporaneamente anche le onde rifratte che avranno compiuto un percorso sufficiente con velocità V_2 . Da questo punto in poi arriveranno sempre per prime le onde rifratte. La distanza dalla sorgente del punto di ginocchio aumenta con lo spessore dello strato indagato e con il diminuire del contrasto di velocità tra i due mezzi.

Conoscendo la distanza tra la sorgente e ciascun geofono ed i tempi di percorrenza delle onde è possibile costruire un grafico distanza - tempo che indica appunto i tempi di propagazione di un onda sismica in funzione della distanza e prende il nome di dromocrona.



Dromocrona onde rifratte (<http://www.cflhd.gov>).

Ciascun segmento della dromocrona è caratterizzato da un'inclinazione sull'asse delle ascisse, che equivale all'inverso della velocità delle onde nello strato a cui esso si riferisce. Questi segmenti consentono il calcolo degli spessori e delle profondità degli strati.

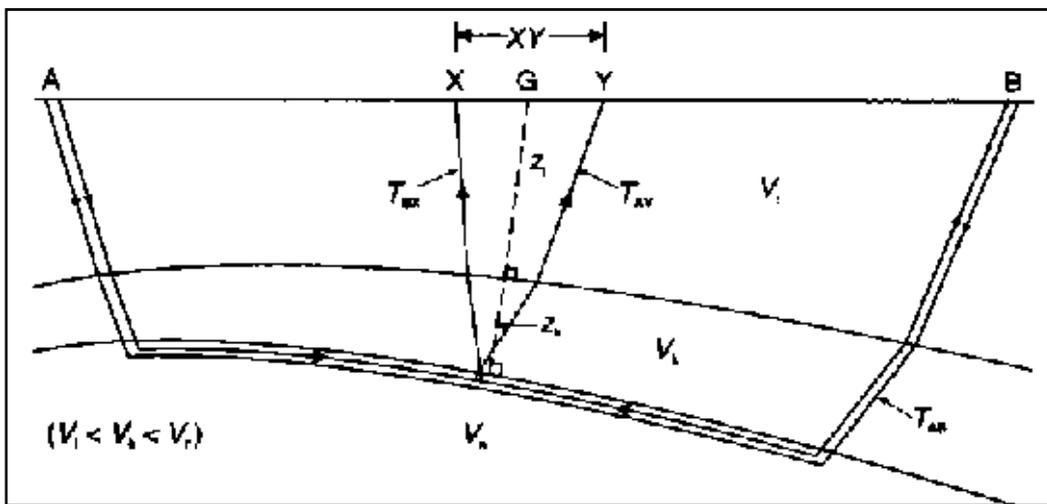
3.2 Metodo adottato

Per il calcolo degli spessori degli strati si possono impiegare vari metodi quali il Metodo delle “Intercette” valido per strati paralleli orizzontali o sub-orizzontali con inclinazione uniforme; il Metodo del Reciproco Generalizzato (G.R.M.) per strati con morfologie articolate e inclinazioni $> 20^\circ$; il Metodo del Reciproco di Hawkins o Delay Time per strati con morfologie articolate e inclinazioni $< 20^\circ$. Di seguito si tratterà il **metodo del G.R.M.** essendo quello impiegato nell’ambito di questa indagine.

METODO DEL RECIPROCO GENERALIZZATO (G.M.R.):

Introdotta da Palmer nel 1980, si applica nei casi in cui le geometrie dei rifrattori sono molto articolate e ha come vantaggio quello di prescindere dall’assunzione che la velocità resti costante per ciascuno strato.

E’ una tecnica di inversione che presuppone che vengano effettuati più scoppi da entrambi gli estremi dello stendimento e che raggiungono due ricevitori posti ad una distanza XY. Lo scopo è quello di calcolare con precisione la distanza XY ottimale per cui ai ricevitori arrivi il segnale proveniente dallo stesso punto del rifrattore. In questo modo è possibile valutare tutte le variazioni laterali di velocità del rifrattore e ricostruire morfologie complesse.



Schema dei parametri usati nel metodo G.R.M. (da Reynolds, 1997).

Si effettuano gli scoppi in più punti in modo da individuare lungo tutto lo stendimento i tempi relativi allo stesso rifrattore e plottare correttamente la relativa dromocrona.

Si procede quindi con il calcolo della funzione analisi - velocità definita dall’equazione:

$$T_v = \frac{(T_{AY} - T_{BX}) - T_{AB}}{2}$$

Il valore di questa funzione si riferisce ad un punto intermedio tra X e Y per ogni distanza XY considerata ottenendo tante curve quante sono le distanze analizzate e si ricava la velocità del rifrattore dalla pendenza della dromocrona più lineare.

Si calcola poi la funzione tempo - profondità che fornisce la profondità del rifrattore in unità di tempo:

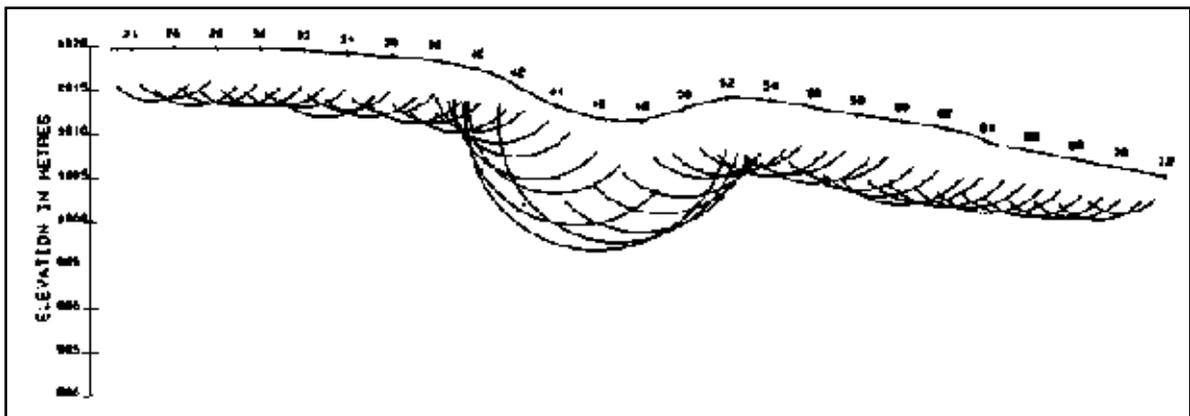
$$T_G = \left(r_{AY} - r_{BX} - \left(r_{AB} + \frac{XY}{V_R} \right) \right)$$

Analogamente a quanto visto per la velocità si ottengono una serie di curve, per ogni valore XY considerato, di cui la più articolata è relativa alla distanza ottimale e rappresenta meglio la morfologia del rifrattore.

Una volta definita la funzione tempo - profondità si calcola mediante un fattore di conversione la profondità in metri del rifrattore al di sotto di ogni geofono:

$$z = T_G \sqrt{\frac{V_R \cdot XY}{2T_G}}$$

L’esatta morfologia del rifrattore, infine, è individuata dall’involuppo delle semicirconferenze di raggio z.



Esempio morfologia del rifrattore dall’involuppo delle circonferenze (da Reynolds, 1997).

3.3 Tomografia Sismica

La tomografia permette di individuare anomalie nella velocità di propagazione delle onde sismiche e di ricostruire la stratigrafia, con alto potere risolutivo, anche in situazioni complesse.

Si ottengono rappresentazioni bi-tridimensionali di oggetti mediante un numero definito di proiezioni monodimensionali variamente orientate. Attraverso fasi di calcolo successive si elabora un modello di velocità del sottosuolo che aumenta la qualità del dato e della risoluzione attraverso iterazioni di un processo di sovrapposizione tra dati sperimentali e sintetici fino al raggiungimento del “ fitting ” ottimale. A partire dalle sole misure dei tempi di arrivo è possibile tramite software ricavare la distribuzione delle velocità delle onde sismiche nel semispazio considerato e ricostruire immagine bi-tridimensionali verosimili del sottosuolo indagato.

Il grande vantaggio di questa tecnica rispetto alle altre è quello di prescindere dal modello di sottosuolo a strati regolari e con proprietà elastiche costanti cosa che consente di gestire situazioni con forti variazioni laterali di velocità e morfologie complesse e dominate dalla tettonica.

Il **software** impiegato per l’elaborazione è il **Rayfract version 2.71** (della Intelligent Resources Inc) che opera in modo da combinare ogni raggio di inversione con un raggio rifratto reale e che questi emergano dal un punto comune del rifrattore.

L’algoritmo implementato utilizza un codice di modellizzazione tomografica chiamato WET (Wavepath Eikonal Traveltime) che opera attraverso le soluzioni alle differenze finite dell’equazione che descrive le modalità di propagazione di un’onda in un mezzo isotropo (Schuster e Quintus - Bosz, 1993). Con questa tecnica la velocità di propagazione viene sostituita dal suo reciproco che indica la capacità di assorbimento dell’onda sismica da parte dello strato attraversato. Il percorso seguito dal raggio sismico viene suddiviso in celle e per ogni cella viene calcolata la velocità del percorso e viene assegnato un peso a ciascuna traiettoria. Si discretizza il calcolo attraverso un numero finito di celle pesate e si risolve il problema di sovrapposizione tra dati reali e sintetici

mediante iterazioni di un modello di velocità di partenza, iterazione che si arresta nel momento in cui viene soddisfatto l’algoritmo che individua il fitting ottimale.

Alla fine di questo processo il software elabora i risultati sotto forma di un’immagine bidimensionale che rappresenta il modello di velocità del sottosuolo, distinguendo i diversi valori di velocità per mezzo di una scala cromatica.

3.4 Attrezzature e tecniche operative

Per l’acquisizione dei dati sono state utilizzate le seguenti attrezzature:

- Un sismografo DAQ LINK – III a 24 bit della “Seismic Source Co” con intervallo minimo di campionamento di 0.0208 ms e altissima risoluzione (118 db).



- Un cavo con 24 collegamenti per i geofoni;
- Ventiquattro geofoni a componente verticale a frequenza di 14 Hz;
- Ventiquattro geofoni a componente orizzontale a frequenza di 14 Hz;
- Sorgente sismica onde longitudinali ad energia propulsiva (PEG-40);
- Massa battente da 8 Kg, su piastra per generare le onde longitudinali e su trave per generare le onde trasversali e bidirezionali.

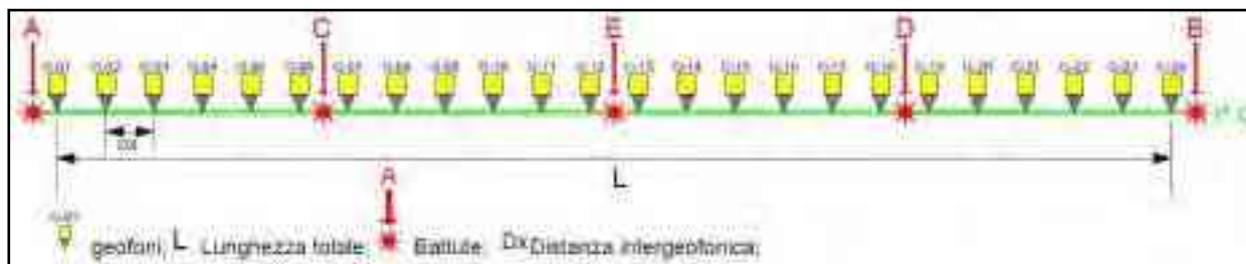
3.5 Tecniche operative

Sono stati effettuati sette profili sismici a rifrazione in onde P ed Sh utilizzando geofoni a 14 Hz. Le tracce sono state registrate impostando i seguenti parametri:

	frequenza di campionamento	Lunghezza registrazioni	sorgente
Onde P	0.0625 millisecondi	500 ms	Martello/PEG
Onde Sh	0.125 millisecondi	1 secondo	martello

Di seguito sono tabellate le caratteristiche dei profili acquisiti:

Denominazione	Lunghezza	Distanza geofonica	Numero scoppi	N. Canali
Profilo 1÷7	120 m	5.0 m	5.0	24



Schema geometrico di acquisizione

3.6 Analisi dei dati

Per prima cosa sono stati individuati sui sismogrammi i tempi dei primi arrivi delle onde P. Questa operazione è definita picking e si effettua dopo aver registrato e opportunamente filtrato il segnale acquisito.

I file così ottenuti vengono caricati nel software **TomTime** della **Geotom, LCC** che consente di amplificare il segnale in modo da facilitare l’operazioni di picking e registra i valori dei tempi del reale punto di primo arrivo. I tempi vengono importati in un altro software Gremix (Interpex Limited, 1990) che a partire da questi dati e dalle geometrie dello stendimento traccia le dromocrone.

Attraverso un’interpolazione grafica manuale ottimizzata dalle funzioni del software si ottiene, attraverso il metodo del G.R.M operato dal Gremix, lo spessore relativo degli strati presenti e le rispettive velocità. Si visualizza graficamente il modello ottenuto in funzione della velocità e profondità dei rifrattori.

E’ stata successivamente eseguita l’interpretazione tomografica che a partire da una simulazione numerica del fenomeno di propagazione dell’impulso sismico, individua i campi incogniti di velocità delle onde calcolando i tempi di percorrenza e fornisce una discretizzazione del sottosuolo restituendo un’ immagine bidimensionale.

Il software utilizzato per la tomografia è il **Rayfract v. 2.71** (della Intelligent Resources Inc), che applica un metodo di inversione che ricostruisce i fronti d’onda e le geometrie dei percorsi rifratti e l’angolo con cui riemergono al ricevitore.

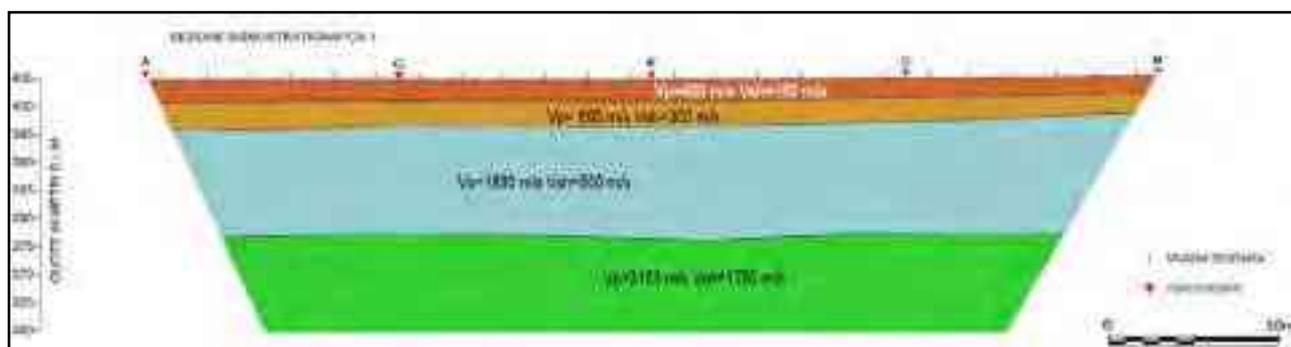
Importati i tempi dei primi arrivi e le geometrie si visualizzano le dromocrone e tramite il comando “Smooth Invert/WET with gradient initial model” è stato avviato il processo di inversione. Quando il risultato non è stato ritenuto soddisfacente, si è provveduto a variare le impostazioni di default del comando regolando alcuni parametri tramite il comando “Interactive WET Tomography” e “ Maximum Valid Velocity”. Aggiornato il modello, sono stati riavviati tutti i calcoli iterativi di inversione fino al raggiungimento dei requisiti che soddisfano l’algoritmo che individua la soluzione ottimale.

Infine sono stati verificati i risultati ottenuti e verificata la coerenza della rappresentazione grafica in scala cromatica.

3.7 Risultati

L’elaborazione dei dati ha permesso di ricostruire il sottosuolo secondo 4 “sismostrati”, così caratterizzati:

1. **Il primo sismostrato** (con una profondità media di circa 3 mt dal p.c.) ha velocità V_p compresa tra 400-430 m/s e V_{sh} compresa tra 130-180 m/s;
2. **Il secondo sismostrato** (con una profondità media di circa 9 mt dal p.c.) ha velocità V_p compresa tra 890-930 m/s e V_{sh} compresa tra 260-310 m/s;
3. **Il terzo sismostrato** (con una profondità media di circa 20 mt dal p.c.) ha velocità V_p compresa tra 1800-1910 m/s e V_{sh} compresa tra 440-500 m/s;
4. **Il substrato rifrattore** ha velocità V_p compresa tra 3150-3260 m/s e V_{sh} compresa tra 1700-1800 m/s.



Nella tabella che segue sono mostrati tutti i valori delle velocità sismiche, il coefficiente di Poisson ed i valori dei moduli dinamici E (di Young), G (di taglio) e K (di compressibilità), espressi in Kg/cm^2 . Questi valori sono calcolati considerando un peso di volume unitario, pertanto, per ottenere i moduli reali, è necessario moltiplicarli per il peso di volume dei litotipi presenti.

Profilo 1

Spessori medi sismostrati (m)	V_p	V_{sh}	σ	γ	E	G	K
1° sismostrato 0÷3.0	400	160	0.40	1	734	261	1284
2° sismostrato 3.0÷7.0	890	300	0.44	1	2637	918	6858
3° sismostrato 7.0÷28.0	1800	500	0.46	1	7440	2551	29660
substrato rifrattore >28.0	3150	1700	0.29	1	76351	29490	61930

Profilo 2

Spessori medi sismostrati (m)	Vp	Vsh	σ	γ	E	G	K
1° sismostrato 0÷3.0	400	160	0.40	1	734	261	1284
2° sismostrato 3.0÷7.0	890	300	0.44	1	2637	918	6858
3° sismostrato 7.0÷25.0	1800	500	0.46	1	7440	2551	29660
substrato rifrattore >25.0	3150	1700	0.29	1	76351	29490	61930

Profilo 3

Spessori medi sismostrati (m)	Vp	Vsh	σ	γ	E	G	K
1° sismostrato 0÷3.0	400	130	0.44	1	497	172	1403
2° sismostrato 3.0÷8.0	910	260	0.46	1	2008	690	7530
3° sismostrato 8.0÷22.0	1840	440	0.47	1	5807	1976	31913
substrato rifrattore >22.0	3230	1720	0.30	1	78615	30188	66208

Profilo 4

Spessori medi sismostrati (m)	Vp	Vsh	σ	γ	E	G	K
1° sismostrato 0÷3.0	400	130	0.44	1	497	172	1403
2° sismostrato 3.0÷8.0	910	260	0.46	1	2008	690	7530
3° sismostrato 8.0÷20.0	1840	440	0.47	1	5807	1976	31913
substrato rifrattore >20.0	3230	1720	0.30	1	78615	30188	66208

Profilo 5

Spessori medi sismostrati (m)	Vp	Vsh	σ	γ	E	G	K
1° sismostrato 0÷3.5	400	130	0.44	1	497	172	1403
2° sismostrato 3.5÷7.5	910	260	0.46	1	2008	690	7530
3° sismostrato 7.5÷17.0	1840	440	0.47	1	5807	1976	31913
substrato rifrattore >17.0	3230	1720	0.30	1	78615	30188	66208

Profilo 6

Spessori medi sismostrati (m)	Vp	Vsh	σ	γ	E	G	K
1° sismostrato 0÷2.5	430	180	0.39	1	922	331	1446
2° sismostrato 2.5÷10.0	930	310	0.44	1	2819	981	7518
3° sismostrato 10.0÷21.0	1910	470	0.47	1	6617	2254	34220
substrato rifrattore >21.0	3260	1800	0.28	1	84684	33061	64363

Profilo 7

Spessori medi sismostrati (m)	Vp	Vsh	σ	γ	E	G	K
1° sismostrato 0÷2.5	430	180	0.39	1	922	331	1446
2° sismostrato 2.5÷10.0	930	310	0.44	1	2819	981	7518
3° sismostrato 10.0÷25.0	1910	470	0.47	1	6617	2254	34220
substrato rifrattore >25.0	3260	1800	0.28	1	84684	33061	64363

V_p = velocità onde longitudinali in m/s

V_s = velocità onde trasversali in m/s

σ = coefficiente di Poisson

γ = peso di volume in g/cm³

E = modulo dinamico di Young in Kg/cm²

G = modulo dinamico di taglio in Kg/cm²

K = modulo dinamico di compressibilità in Kg/cm²

4 PROSPEZIONE SISMICA A RIFLESSIONE

4.1 Cenni sulla metodologia di sismica a riflessione

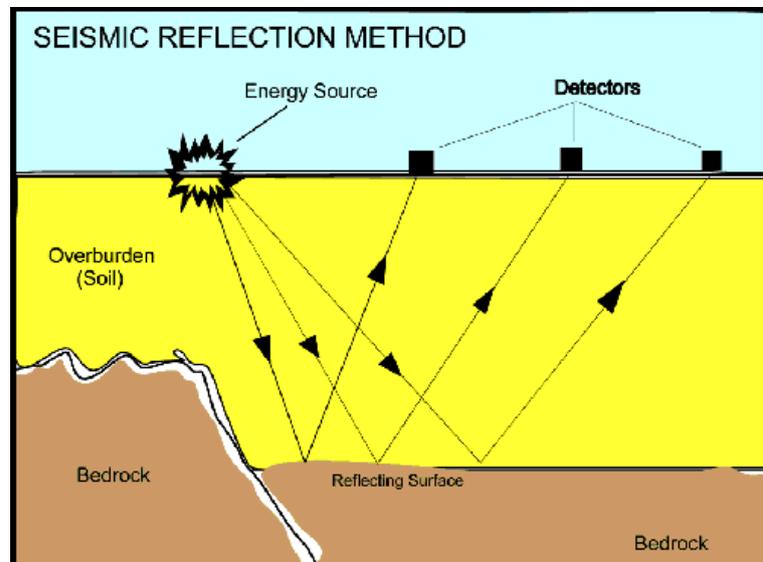
La sismica a riflessione è una metodologia largamente utilizzata nell’esplorazione del sottosuolo per riconoscere l’assetto stratigrafico e strutturale dei corpi geologici: geometrie deposizionali, stratificazione, superfici di discordanza, faglie, sovrascorrimenti, etc.. Essa permette di effettuare una ricostruzione, talora molto fedele, delle porzioni sepolte della superficie terrestre e può essere applicata in qualsiasi ambiente: terrestre, marino e di transizione (fluviale, lacustre, deltizio, ecc.).

La sismica a riflessione si è sviluppata a grandi passi a partire dagli anni '50 con il sostegno delle grandi compagnie petrolifere, direttamente interessate all’individuazione dei giacimenti di idrocarburi e spesso uniche detentrici della costosa strumentazione necessaria. Negli ultimi decenni la dilagante diffusione della tecnologia digitale ed il conseguente abbattimento dei costi strumentali ha consentito sempre maggiori e più valide applicazioni in svariati campi (dall’ingegneria civile, agli studi ambientali, alla ricerca di base).

La sismica a riflessione è un metodo di prospezione di tipo attivo che consiste nel generare onde sismiche nel sottosuolo e misurare i tempi di arrivo delle onde riflesse dagli strati posti a diverse profondità. Questo tempo viene definito come Two-way Travel Time (TWTT) poiché si considerano insieme tempo di andata e tempo di ritorno.

Viene inoltre effettuata una accurata analisi dei treni d'onda ricevuti, attraverso la quale è possibile riconoscere i segnali provenienti dalle superfici di separazione di terreni caratterizzati da differenti velocità sismiche. I dati vengono quindi elaborati per risalire alla profondità delle diverse superfici incontrate e stabilire con esattezza la geometria, l’estensione e le reciproche relazioni tra i corpi che esse suddividono. Si ottengono quindi profili sismici ed immagini che descrivono le geometrie e gli spessori del sottosuolo, strutture, variabilità litologiche e composizionali.

La strumentazione è costituita da una sorgente, che può essere una massa battente o una carica esplosiva; uno stendimento di ricevitori (geofoni o idrofoni) ed un sismografo multicanale per l’acquisizione e registrazione dei dati.

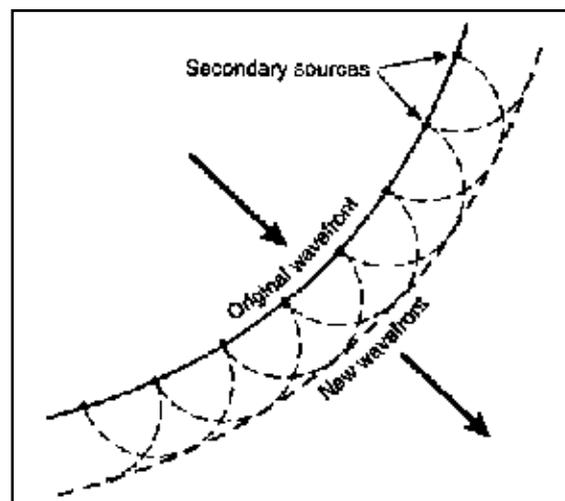


Schema rappresentativo di una prospezione sismica a riflessione

4.2 Principi Generali

Uno dei principi basilari nello studio delle onde sismiche e dei fenomeni di riflessione in terreni stratificati è quello di Huyghens.

Principio di Huyghens: data una superficie generica investita da un fronte d’onda, tutti i punti diventano sorgenti di onde sferiche elementari. Per cui il nuovo fronte d’onda è dato dalla superficie di involuppo alle onde elementari.



Inviluppo fronti d’onda secondo il principio di Huyghens (da Reynolds, 1997).

Per questo, al fine di semplificare la trattazione analitica, piuttosto che riferirsi ai fronti d’onda si fa riferimento ai relativi raggi sismici lungo cui si propaga l’energia, intesi come le normali ai fronti d’onda. In questo modo è possibile operare in termini di tempo e spazio, tralasciando trattazioni più complesse che coinvolgerebbero ampiezze, frequenze e fasi.

All’interfaccia tra due strati la velocità di propagazione delle onde sismiche varia nel momento in cui incontra diverse proprietà fisiche. L’energia viene in parte trasmessa, rifratta e riflessa. L’ampiezza dell’onda riflessa dipenderà non solo dall’angolo dell’onda incidente sulla superficie di separazione, ma anche dalle velocità e densità degli strati stessi. Si definisce quindi **l’impedenza acustica** come: $Z = \rho V$, cioè il prodotto tra la densità (ρ) e la velocità (V).

Tale grandezza quantifica la diversità tra i due mezzi a contatto e quanto maggiore è la differenza tra le caratteristiche fisiche dei due mezzi tanto maggiore è la differenza tra le relative impedenze acustiche.

Il grado di riflessione per un raggio che incide normalmente o con basso angolo sulla superficie di separazione, è descritto dal coefficiente di riflessione (R) che rappresenta il rapporto di ampiezza tra raggio incidente e raggio riflesso. In termini di impedenza acustica corrisponde al rapporto tra la differenza e la somma delle impedenze: $R = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1)$. Il **coefficiente di riflessione** assume quindi valori che sono minori o uguali a ± 1 .

$R < 0.1$ riflessione debole

$0.1 < R < 0.2$ riflessione moderata

$R > 0.2$ riflessione elevata

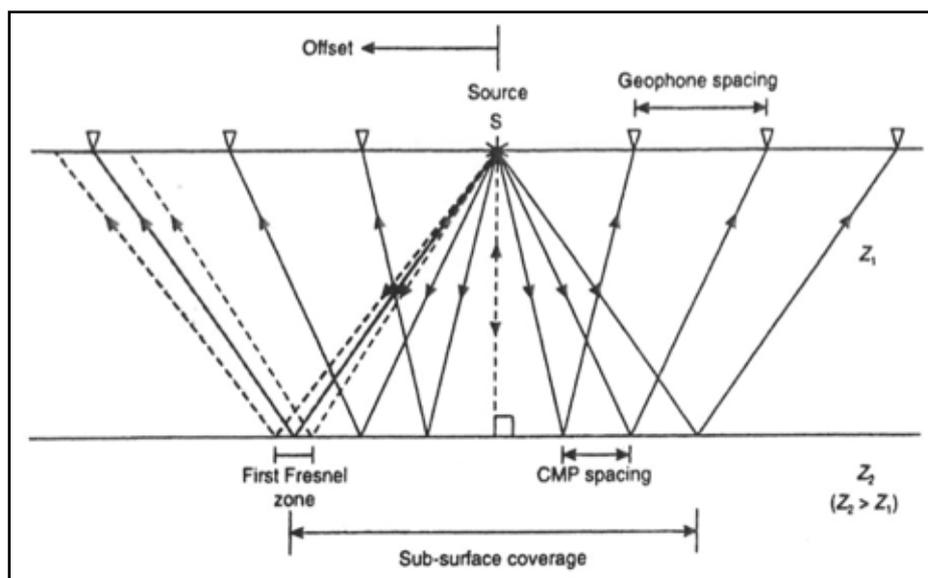
Bisogna inoltre considerare che la somma dell’energia riflessa e di quella trasmessa deve essere pari a 1. Pertanto se il coefficiente di riflessione risulta essere ± 1 o l’energia riflessa è pari ad 1 si deduce che tutta l’energia incidente è riflessa e non viene trasmessa. Viceversa se $R=0$, o l’energia riflessa è pari a 0, tutta l’energia viene trasmessa. Questo implica che all’interfaccia tra gli strati non cambia il valore dell’impedenza acustica, ma non implica che non cambino le velocità e i valori di densità.

In realtà la riflessione non è generata da un punto dell’interfaccia tra strati, come si semplifica nelle trattazioni, ma da un’area finita nota come prima zona di Fresnel, pertanto il coefficiente di riflessione per una data superficie è la risposta media della zona di Fresnel. La dimensione di tale zona è definita dal suo raggio: $r \approx (\lambda h/2)^{1/2}$ dove λ è la lunghezza d’onda e h la distanza tra la sorgente e il riflettore. Si ha quindi che le dimensioni della zona di Fresnel aumentano con la profondità e la lunghezza d’onda e quindi col decremento della frequenza.

Tutte le onde che incidono al di sopra di questa zona vengono riflesse in superficie. Se si effettua uno scoppio in un punto S , le onde riflesse verranno rilevate dai geofoni in linea a destra e sinistra dello scoppio. La distanza tra la sorgente ed un qualsiasi geofono dello stendimento è detta offset.

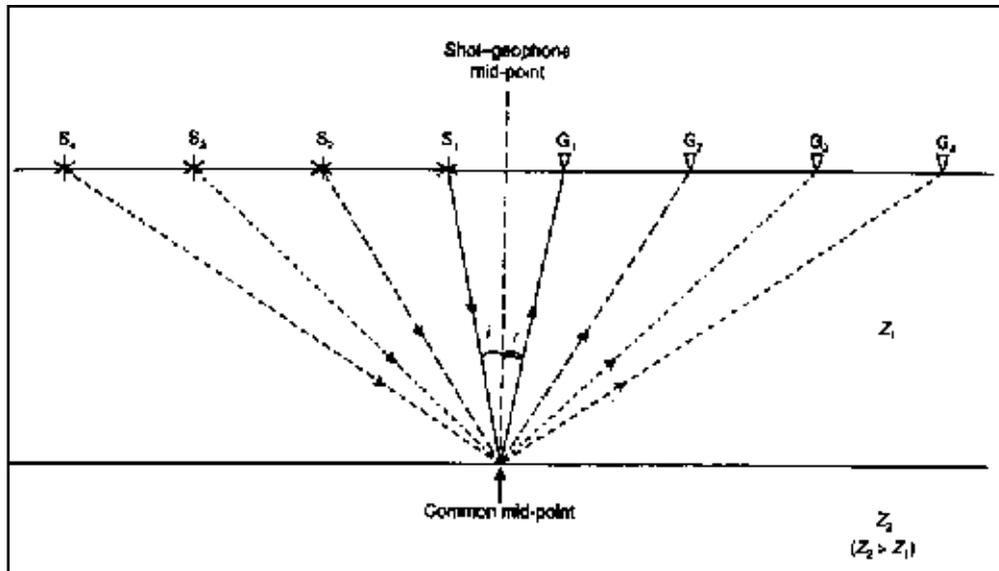
Nel caso di una superficie di separazione orizzontale i raggi riflessi seguiranno le geometrie della seguente figura da cui è facile notare come il raggio incidente venga riflesso dal substrato in un punto situato a metà strada tra la sorgente dello scoppio S ed il geofono che registra il relativo raggio riflesso.

Pertanto i punti di riflessione lungo l’interfaccia disteranno tra loro di uno spazio pari a metà della distanza intergeofonica. Risulta inoltre evidente che l’estensione totale della superficie indagata dipende direttamente dalle dimensioni dello stendimento, ovvero la sua lunghezza corrisponderà sempre a metà della lunghezza di quest’ultimo.



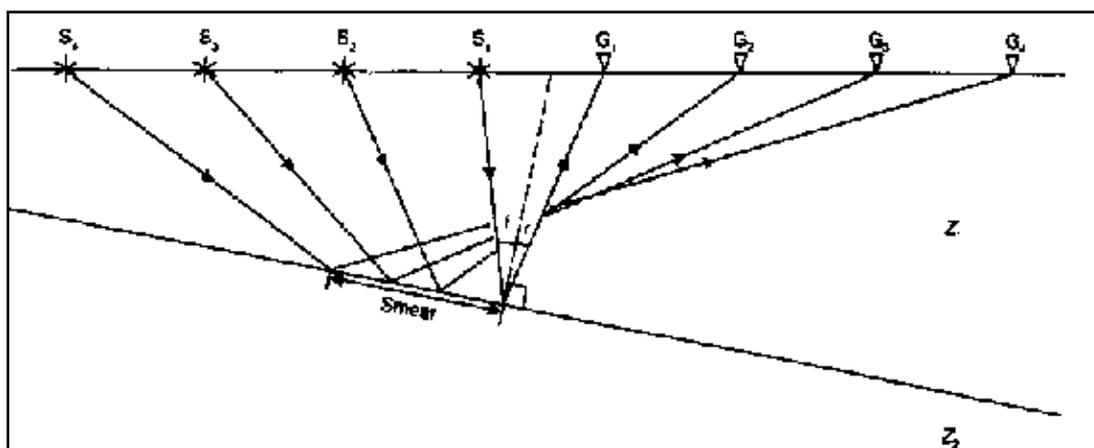
Geometria raggi riflessi da un’interfaccia orizzontale (da Reynolds, 1997).

Nel caso in cui vengano effettuati più scoppi in presenza di un’interfaccia orizzontale, i raggi riflessi da uno stesso punto saranno rilevati da geofoni diversi. Si definisce così il Common Mid-Point (CMP) come punto comune di riflessione.



Common Mid-Point (da Reynolds, 1997).

Nel caso si abbia, invece, un’ interfaccia inclinata, i punti di riflessione saranno distribuiti lungo la stessa e aumentando l’offset si sposteranno verso posta a minore profondità.



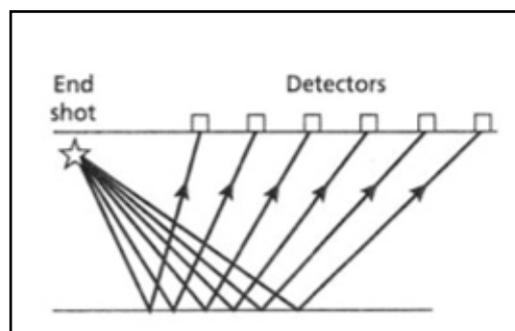
Geometria raggi riflessi da un’interfaccia inclinata (da Reynolds, 1997).

Con il termine “fold of coverage” si indica il numero di volte che viene registrato un impulso proveniente dallo stesso punto.

4.3 Configurazione adottata

Nei profili a riflessione (prospezioni in due dimensioni), i dati vengono campionati lungo una linea che comprende i punti di scoppio e i geofoni. A seconda dell’estensione dell’area da indagare e del range di profondità che si deve indagare, si dispongono i punti di scoppio e i ricevitori in base a diverse configurazioni.

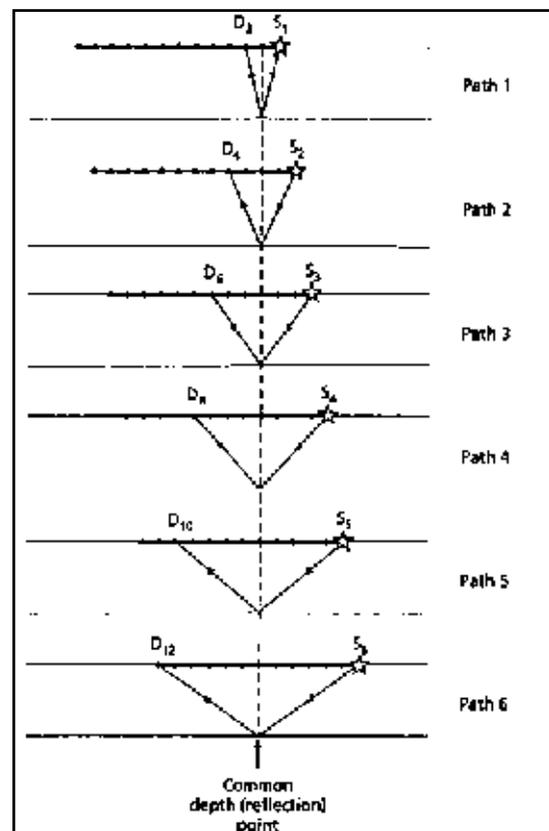
Nella presente indagine i punti di scoppio sono stati collocati secondo la **configurazione single-ended spread** che prevede che il punto di scoppio sia collocato da un solo estremo dello stendimento dei ricevitori.



Single - ended spread (da Kearey, 1991).

E’ stata adottata la tecnica **Common Mid Point (CMP)** che permette per diversi valori di offset, di acquisire tracce che registrano gli impulsi dei raggi riflessi da un punto comune del riflettore posto ad una certa profondità.

Nel nostro caso la “copertura” del riflettore è stata 600%, disponendo un punto sorgente ogni due stazioni geofoniche.



4.4 Attrezzature utilizzate

Per l’acquisizione dei dati sono state utilizzate le seguenti attrezzature:

- Due sismografi DAQ LINK – III a 24 bit della “Seismic Source Co” con intervallo minimo di campionamento di 0.0208 ms e altissima risoluzione (118 db).



- Due cavi con 24 collegamenti per i geofoni;
- Quarantotto geofoni a componente verticale a frequenza di 14 Hz con shunt (filtri passivi);
- Sorgente sismica onde longitudinali ad energia propulsiva (PEG-40);
- Piattello in alluminio.

4.5 Data Processing

Per ottenere delle sezioni sismiche che siano una rappresentazione reale della situazione geologica delle aree di studio, è stato effettuato un processing dei dati consistito in una serie di operazioni volte ad eliminare i disturbi che complicano la lettura e l’interpretazione dei sismogrammi. Per le elaborazioni di calcolo è stato necessario disporre delle informazioni derivanti dalla sismica a rifrazione.

Correzione statica dei Tempi sulle Tracce

La correzione statica dei tempi di riflessione si applica lì dove si riscontrano delle differenze dei travel times introdotte da irregolarità topografiche. Queste irregolarità sono principalmente dovute a differenze di quota tra i punti di scoppio e i geofoni o alla presenza di uno strato alterato a bassa velocità sismica che determina un ritardo nelle onde che lo attraversano.

Per effettuare il calcolo della correzione è necessario conoscere la velocità e lo spessore dello strato alterato e di quello sottostante, per questo si effettuano misure sismiche a rifrazione.

Analisi Spettrale

Il segnale sismico si può considerare come una funzione variabile nel tempo, per tanto può essere scomposto in un numero caratteristico di funzioni sinusoidali di cui è possibile stabilire il contributo in ampiezza e in frequenza.

Nell’analisi dei dati è molto utile effettuare tale scomposizione per studiare il segnale non solo nel dominio del tempo, ma anche in quello delle frequenze. Per passare in questo dominio si utilizza la trasformata di Fourier che consente quindi di rappresentare tutte le frequenze del segnale sismico con relative ampiezze.

Studiando lo spettro di ampiezza del segnale si stabiliscono i limiti di frequenza entro i quali i geofoni amplificano allo stesso modo tutte le frequenze proprie del segnale in esame.

Questo permette di ottimizzare la successiva scelta del filtro che deve eliminare le altre frequenze che costituiscono disturbo.

Filtraggio di Frequenza

Il filtraggio di frequenza permette di mettere maggiormente in risalto le frequenze proprie del segnale che si sta studiando eliminando quelle che creano disturbo.

Esistono diversi tipi di filtro:

- ✓ filtro passa alta: taglia le basse frequenze e lascia passare quelle al di sopra di un limite scelto;
- ✓ filtro passa bassa: taglia le alte frequenze e fa passare quelle al di sotto di un certo limite;
- ✓ filtro passa banda: è l’unione dei primi due, lascia passare una banda di frequenze comprese tra due limiti scelti;
- ✓ filtro arresta banda: blocca una particolare banda di frequenza (50Hz).

A questi filtri si aggiungono anche i filtri anti-alias che eliminano il disturbo indotto da un cattivo campionamento delle frequenze noto come aliasing temporale.

Muting

E’ un operazione che consente di eliminare dal sismogramma i primi arrivi, cioè quelli relativi alle onde dirette e rifratte. Di conseguenza tutte le successive elaborazioni non saranno influenzate dalla presenza di questi segnali. Questo limita le eventuali interferenze con il segnale delle onde riflesse e ne migliora la visibilità.

Analisi di Velocità

Per rimuovere la differenza di travel time sugli offset più lunghi, per angoli di incidenza perpendicolari, ovvero l’effetto del normal moveout (NMO), si effettua una correzione che è funzione dell’offset e della velocità e profondità del riflettore numericamente pari proprio al valore del normal move out.

Nelle indagini in common mid-point il valore del NMO si ricava attraverso l’analisi computerizzata di gruppi di tracce relative allo stesso common mid-point. Si elabora uno spettro di velocità stabilendo un valore di semblance che correla le velocità di più tracce in modo da garantirne la coerenza dei valori di velocità computati rispetto ai valori reali. Dal grafico si individuano i picchi di velocità relativi alle riflessioni e si importa il valore del normal moveout da implementare nella correzione.

Filtraggio di Velocità

Il filtraggio di velocità si usa per rimuovere i disturbi in base all’angolo d’inclinazione che li caratterizza. Quest’angolo è determinato dalla velocità apparente con cui i segnali si propagano lungo lo stendimento dei ricevitori. L’impulso sismico infatti che viaggia lungo la direzione dello stendimento con una velocità v e con un angolo α , si propagherà con una velocità apparente $v_a = v / \sin \alpha$. Scomponendo tale impulso nelle sue componenti sinusoidali è possibile considerare tutte le frequenze in funzione del rispettivo numero d’onda apparente (k_a): $f = v_a k_a$. Mettendo in grafico questi valori si ottiene una retta la cui inclinazione corrisponde al valore v_a , pertanto per ogni impulso si ha una curva $f - k$ inclinata del valore della velocità apparente con cui è

stato registrato l’evento. è così possibile filtrare i dati in base alla velocità apparente. Tramite la trasformata di Fourier si commutano i dati sismici dal dominio del tempo in quello delle frequenze in modo da scegliere il filtro $f - k$ più opportuno per rimuovere gli eventi di disturbo con velocità apparente che complica il segnale ed una volta effettuato il filtraggio si ritorna nel dominio $t - x$. Questo filtro è utile soprattutto per rimuovere il noise dovuto ground roll (effetto delle onde che viaggiano con grande ampiezza e bassa frequenza e mascherano i segnali riflessi e rifratti).

Deconvoluzione

Il segnale sismico man mano che si propaga nel sottosuolo subisce una perdita progressiva delle alte frequenze, poiché il terreno agisce come un filtro passa banda che lascia passare più agevolmente le basse frequenze. Questo fenomeno comporta una riduzione del potere risolutivo del segnale dato dall’allungamento del periodo centrale e quindi dal conseguente aumento della lunghezza d’onda.

Con la deconvoluzione si elabora un filtraggio inverso che cerca di attribuire al segnale le alte frequenze per accorciare il periodo e ottenere un guadagno in termini di risoluzione. In questo modo vengono rimossi anche gli effetti delle multiple (segnali che vengono riflessi da più interfacce generalmente caratterizzati da frequenze più basse rispetto alle riflessioni primarie).

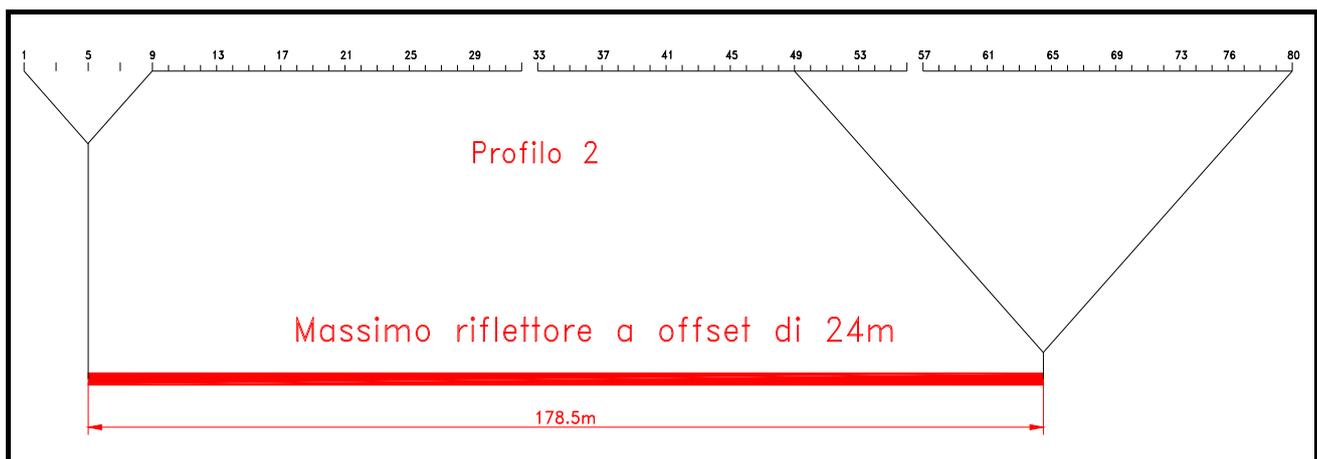
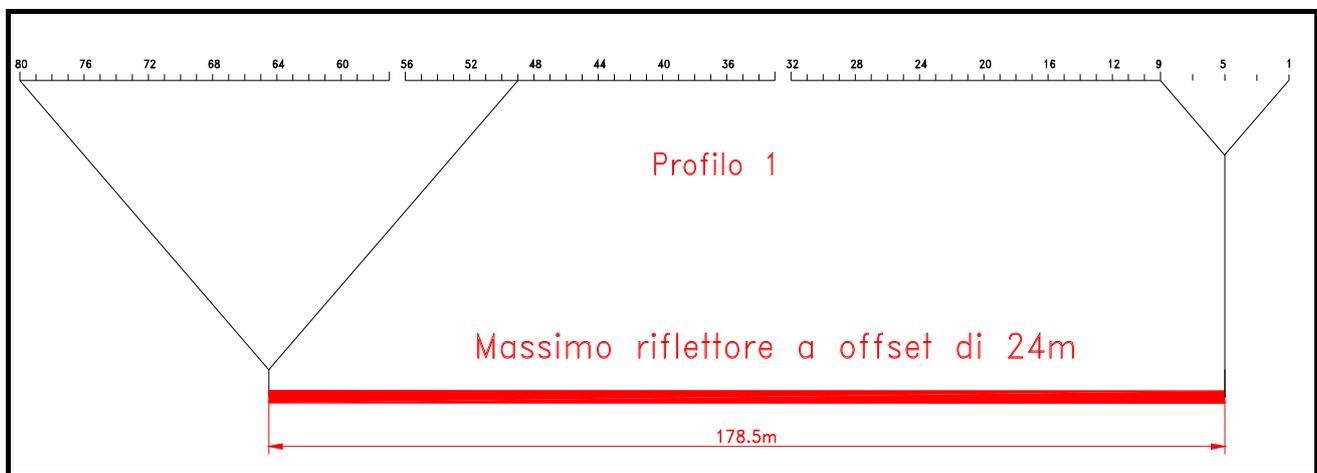
4.6 tecniche operative

Sono stati effettuati due profili sismici a riflessione utilizzando geofoni a 14 Hz shuntati con filtro passivo, in grado di spostare la banda di risposta dei geofoni verso frequenze più alte. Le tracce sono state registrate con i seguenti parametri:

frequenza di campionamento	Lunghezza registrazioni	sorgente
0.0625 millisecondi	1 secondo	Peg-40

Di seguito sono tabellate le caratteristiche del profilo acquisito:

Denominazione	Lunghezza	Distanza geofonica	Numero scoppi	N. Stazioni
Profilo 1÷2	240 m	3.0 m	27	80



Schemi geometrici di acquisizione

4.7 Analisi dei dati

I dati della sismica a riflessione sono stati trattati col software Seistrix 3 (Interpex L.t.d., 1993). Uno dei grandi vantaggi di questo software è la capacità di gestire le geometrie complesse, dovendo trattare dati acquisiti secondo la tecnica del Common Mid Point Multi-Offset.

Sono stati acquisiti sismogrammi a 48 tracce, in allegato viene riportato un solo sismogramma acquisito.

Per prima cosa sono stati caricati nel programma tutti i file a 24 tracce con punto sorgente a distanza uguale e impostate le geometrie di ogni profilo.

Si è poi proceduto all’analisi delle linee sismiche per ogni singolo offset, in seguito è stato esaminato solo il profilo ad offset più indicativo (offset a 12 metri).

Sono state impostate le geometrie è stato effettuato il “sort” dei dati. Questa operazione serve a riorganizzare i dati secondo le geometrie di common mid-point e nel rispetto delle distanze di offset. Infatti al momento dell’acquisizione i dati sono memorizzati in base alle posizioni degli scoppi e dei ricevitori, con il sorting vengono riorganizzati in modo da raggruppare per ogni coppia scoppio-ricevitore le tracce relative ai segnali provenienti dallo stesso mid-point.

Successivamente le operazioni di processing sui dati sono le seguenti:

- ✓ Correzione Statica dei Tempi sulle Tracce
- ✓ Filtro Passa Banda
- ✓ Mute
- ✓ Normal Move Out
- ✓ Filtraggio $f - k$
- ✓ Trace Mix

Esse sono state ampiamente descritte nella relazione generale.

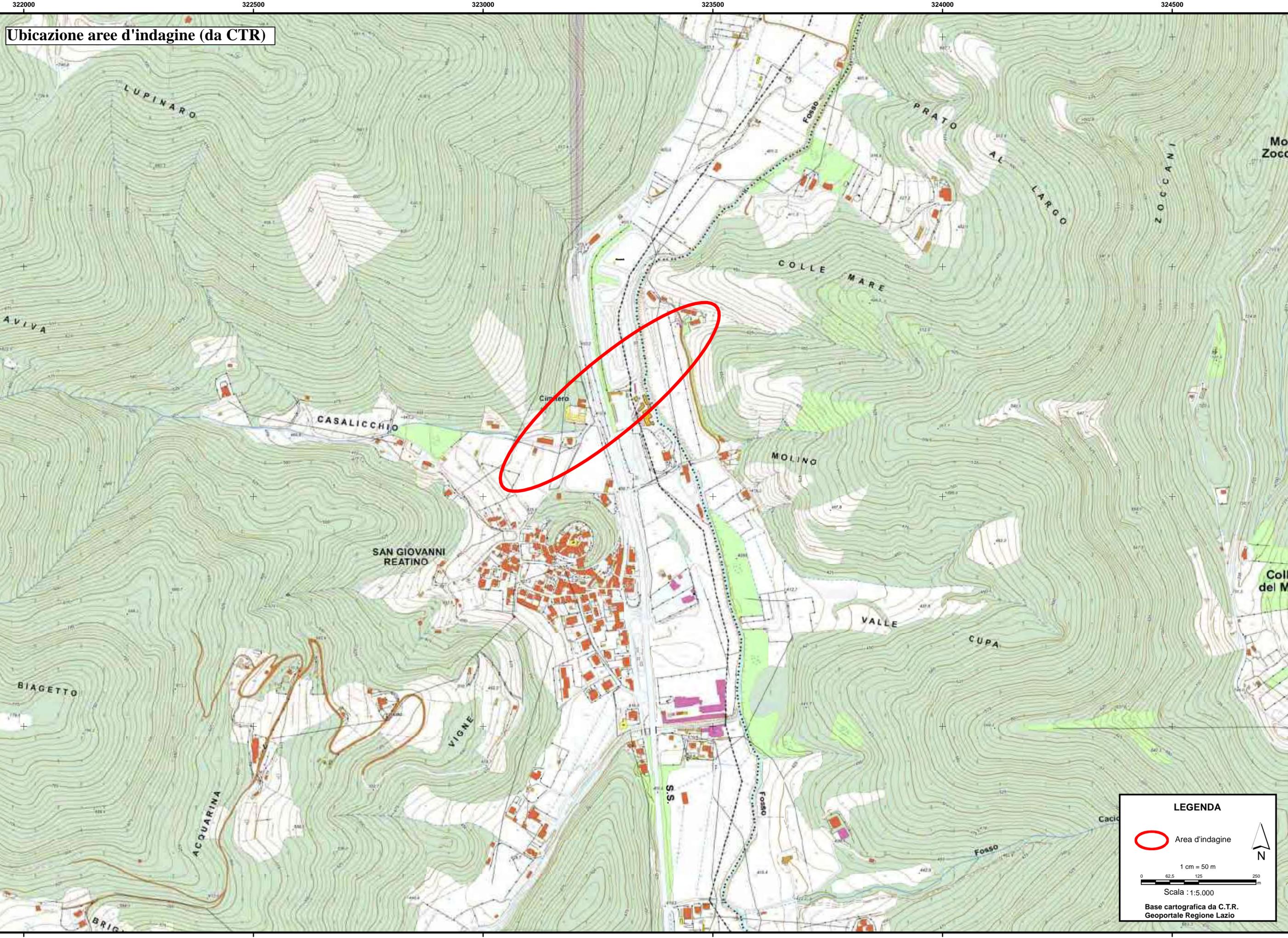
4.8 Risultati

Dall’analisi delle “sezioni tempo”, riportate in allegato “analisi profili 1-2 sismica a riflessione”, si evince la presenza **di tre riflettori**, piuttosto energetici, il primo riflettore è posto tra circa **40 e 50 millisecondi**; il secondo riflettore è posizionato tra circa **100 e 120 millisecondi**; il terzo riflettore si posiziona tra circa **190 e 210 millisecondi**.

Per ciò che concerne le profondità associabili alle sezioni tempo, queste sono state ottenute utilizzando, per i terreni superficiali, velocità e spessori ricavati dall’elaborazione tomografica del sottosuolo effettuata con la sismica a rifrazione e, per i sedimenti più profondi, effettuando un’analisi di velocità dei sismogrammi relativi alla sismica a riflessione.

In virtù delle considerazioni fatte, e, quindi, passando da sezioni tempo a sezione profondità, vedi figura “Analisi profili 1-2 sismica a riflessione”, la prima riflessione individuata risulta posizionabile a circa **25-30 metri di profondità**, la seconda riflessione si posiziona a circa **100-120 metri di profondità**, infine, la terza riflessione risulta posizionabile a circa **160-170 metri di profondità**. Inoltre, sono state individuate per il profilo 1 quattro discontinuità subverticali posizionate tra le stazione 41-38, 24-21, 18, e 15-13, mentre per il profilo 2 sono state rilevate due discontinuità subverticali posizionate tra le stazioni 17-18 e 23-24.

Ubicazione aree d'indagine (da CTR)



LEGENDA

 Area d'indagine

1 cm = 50 m

0 62.5 125 250 m

Scala : 1:5.000

Base cartografica da C.T.R.
Geoportale Regione Lazio



ALLEGATO INDAGINE SISMICA

LABORATORIO MATERIALI DA COSTRUZIONE
LABORATORIO TERRE E ROCCE
INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE

GEOPROVE S.R.L.

- Relazione esplicativa
- Ubicazione misure sismiche (da Ortofoto-CTR) –scala 1:2.000
- Sismogrammi sismica a rifrazione onde longitudinali (onde P)
- Sismogrammi sismica a rifrazione onde trasversali (onde SH)
- Dromocrone onde longitudinali (onde P)
- Dromocrone onde trasversali (onde SH)
- Tomografia sismica ed interpretazione sismostratigrafica
- Esempio di sismogramma a 48 tracce (sismica a riflessione)
- Sismogrammi a 24 tracce utilizzati per l'analisi in Common Mid Point
- Analisi prospezione sismica a riflessione
- Documentazione fotografica

Affidatario: **MIT** - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Via di Cassia km 16,5 - 00146 Roma (RM) - Tel. 06/50001

Affidatario: **ALIG** - Associazione Nazionale Ingegneri e Geofisici
Via di Cassia km 16,5 - 00146 Roma (RM) - Tel. 06/50001

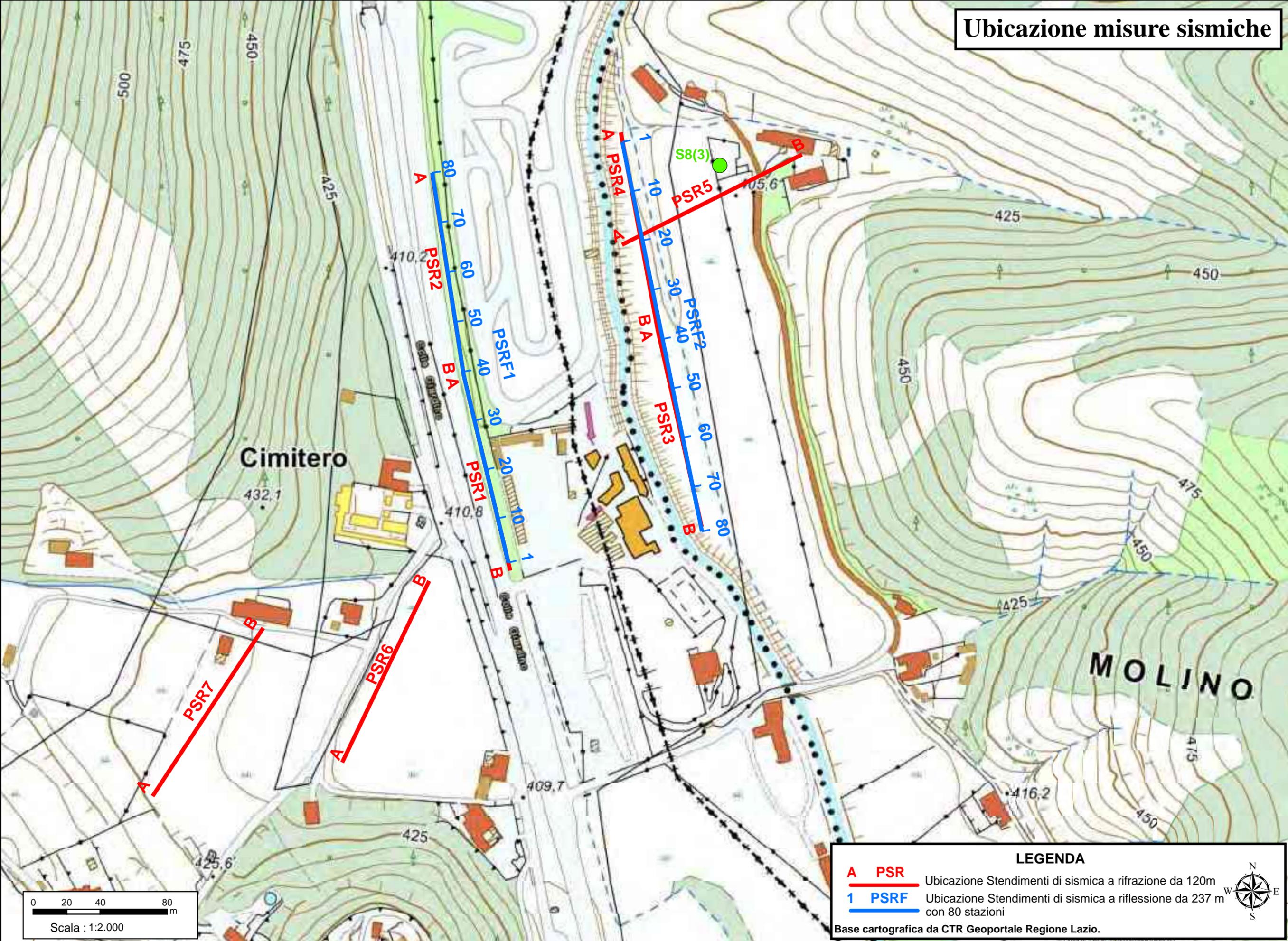


GEOPROVE S.R.L. P. IVA 03940380730 • Capitale Sociale € 500.000,00 • Iscrizione alla CCIAA 255978

Sede Sociale e Direzione: Terre e Rocce Via Il Galgano 2, 73049 Ruffano (FG) • Laboratorio Materiali Via Benedetto Fabiani snc 210149 Ruffano (FG) •

Ufficio Sede Via Claudio, Zona Industriale Sesto, 73010 (Bisceglie) • Telefono Fax 0883 892992 • Cell. 329 334 9993 | www.geoprove.it • info@geoprove.it

Ubicazione misure sismiche

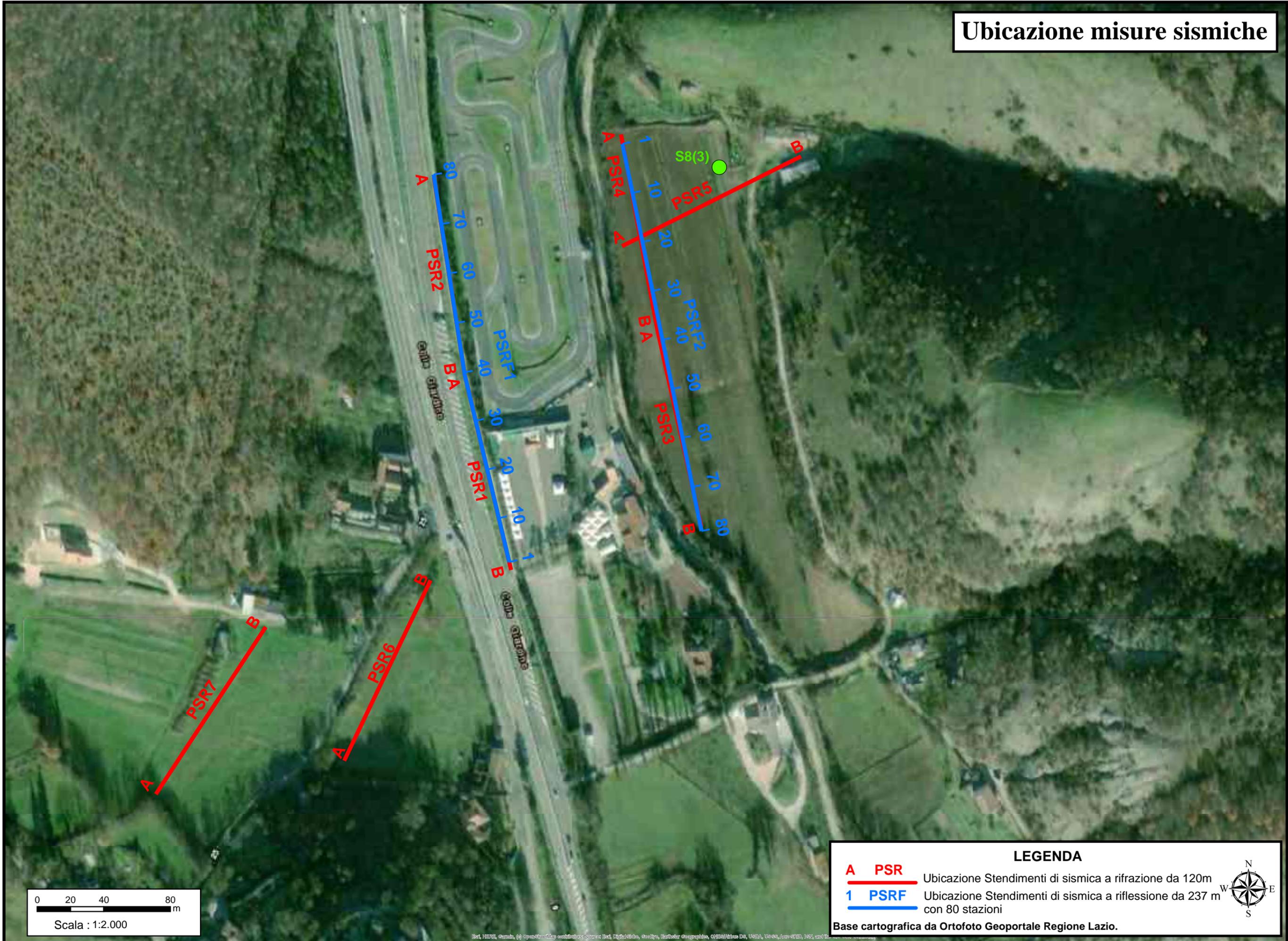


LEGENDA

- A PSR** Ubicazione Stendimenti di sismica a rifrazione da 120m
- 1 PSRF** Ubicazione Stendimenti di sismica a riflessione da 237 m con 80 stazioni

Base cartografica da CTR Geoportale Regione Lazio.

Ubicazione misure sismiche



0 20 40 80 m
Scala : 1:2.000

LEGENDA

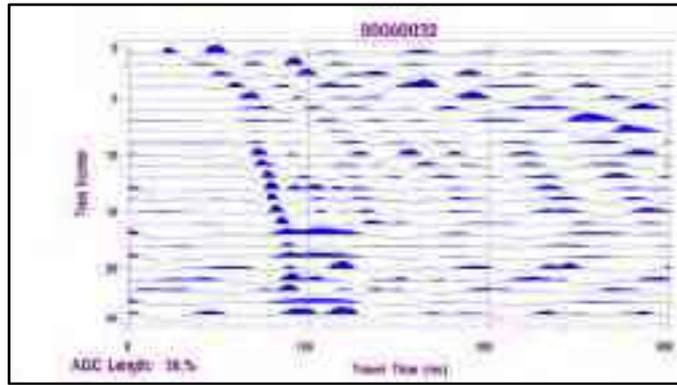
A PSR Ubicazione Stendimenti di sismica a rifrazione da 120m

1 PSRF Ubicazione Stendimenti di sismica a riflessione da 237 m con 80 stazioni

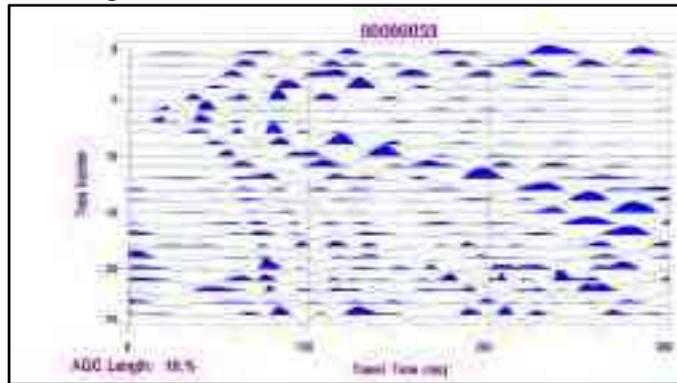
Base cartografica da Ortofoto Geoportale Regione Lazio.



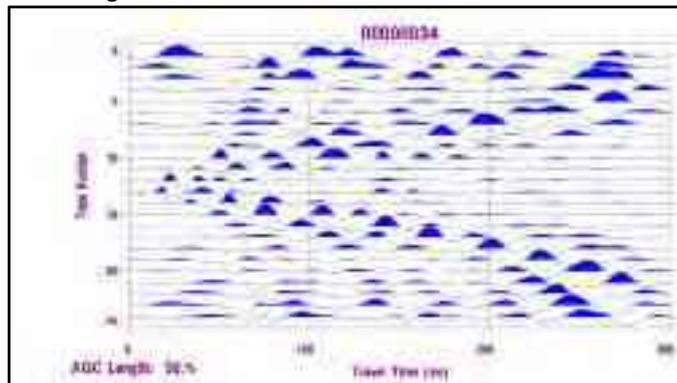
SISMOGRAMMI SISMICA A RIFRAZIONE ONDE LONGITUDINALI (ONDE P) PROFILO 1



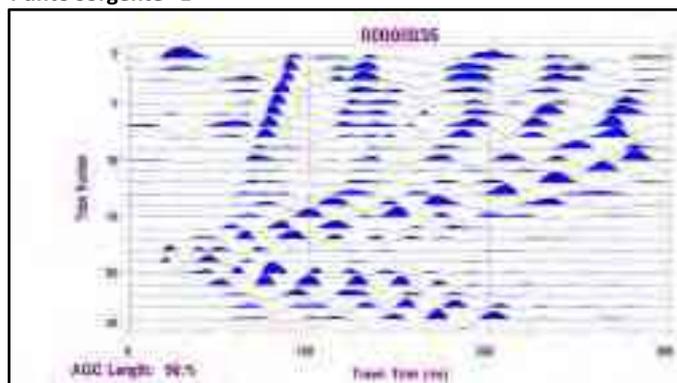
Punto sorgente "A"



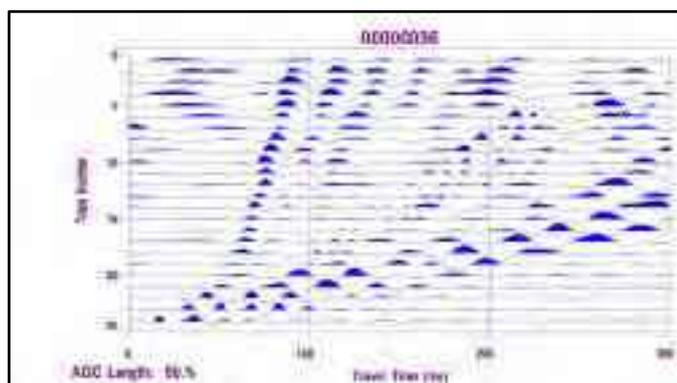
Punto sorgente "C"



Punto sorgente "E"

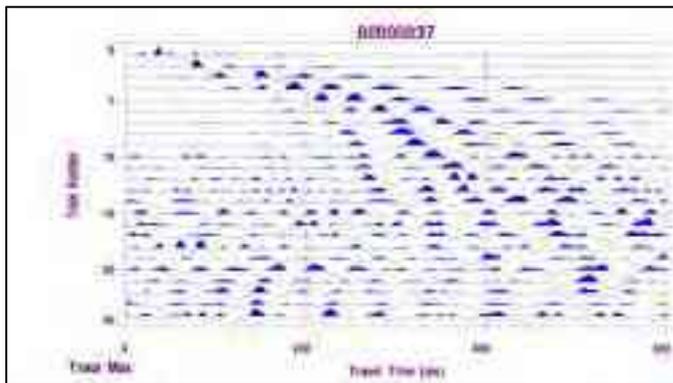


Punto sorgente "D"

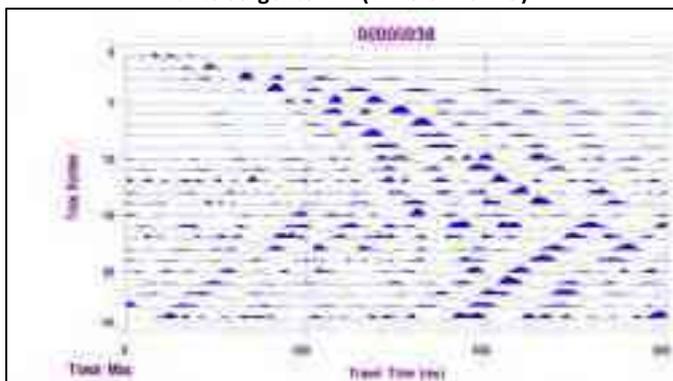


Punto sorgente "B"

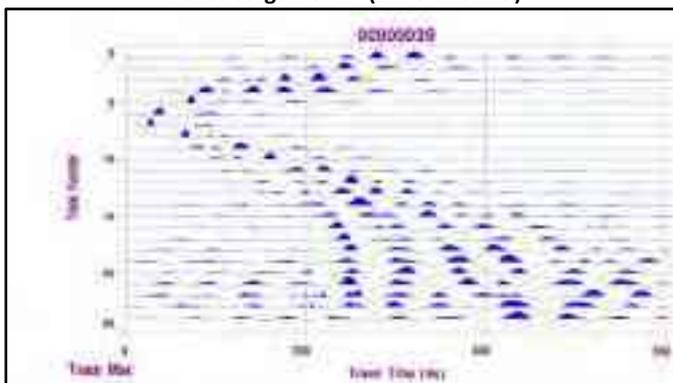
SISMOGRAMMI SISMICA A RIFRAZIONE ONDE TRASVERSALI (ONDE SH) PROFILO 1



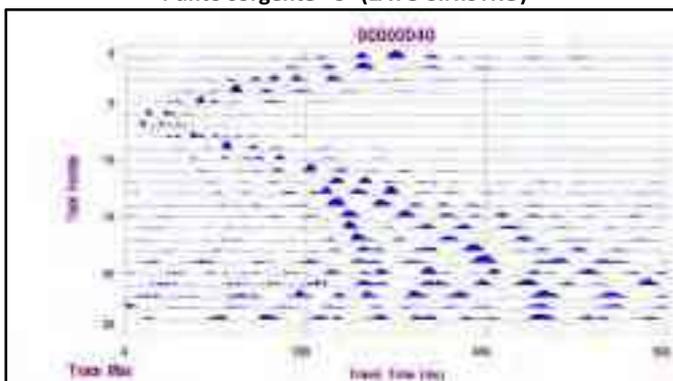
Punto sorgente "A" (LATO SINISTRO)



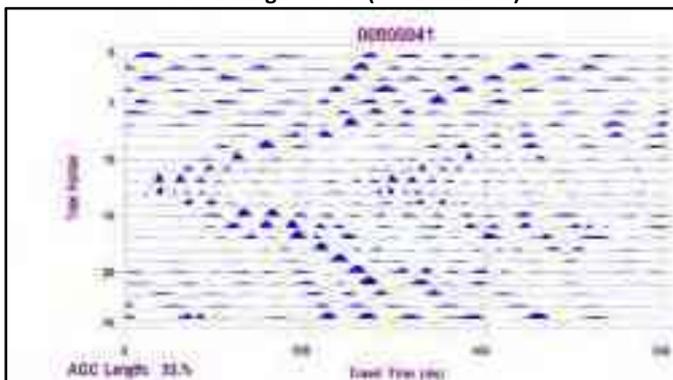
Punto sorgente "A" (LATO DESTRO)



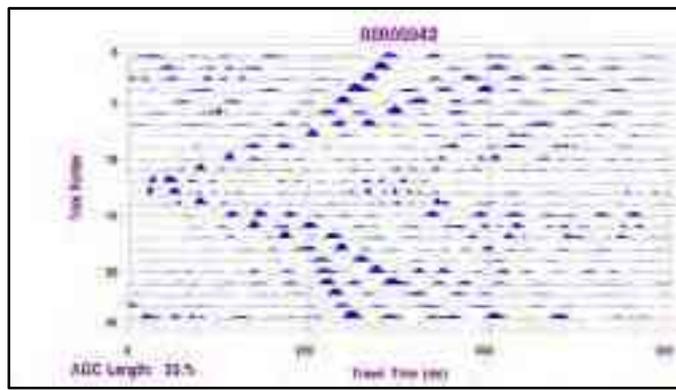
Punto sorgente "C" (LATO SINISTRO)



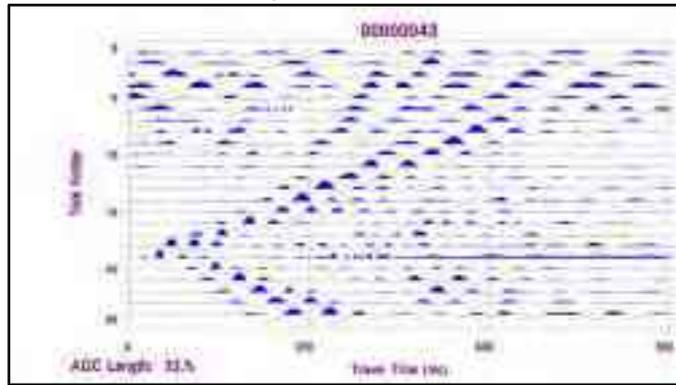
Punto sorgente "C" (LATO DESTRO)



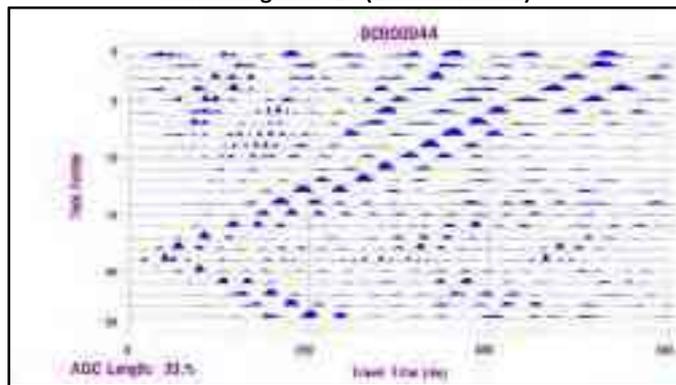
Punto sorgente "E" (LATO SINISTRO)



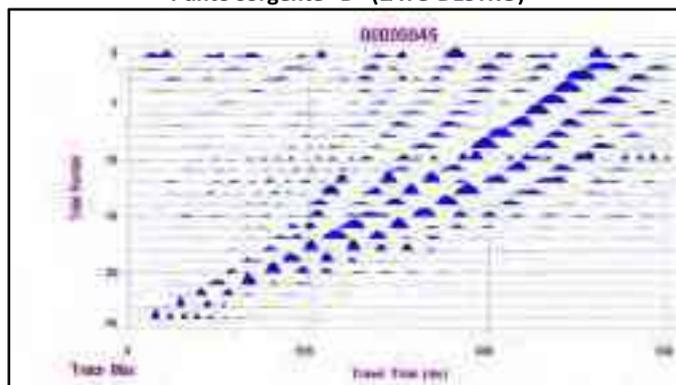
Punto sorgente "E" (LATO DESTRO)



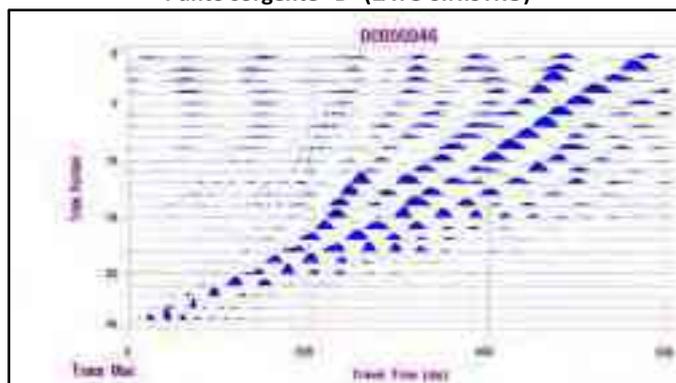
Punto sorgente "D" (LATO SINISTRO)



Punto sorgente "D" (LATO DESTRO)

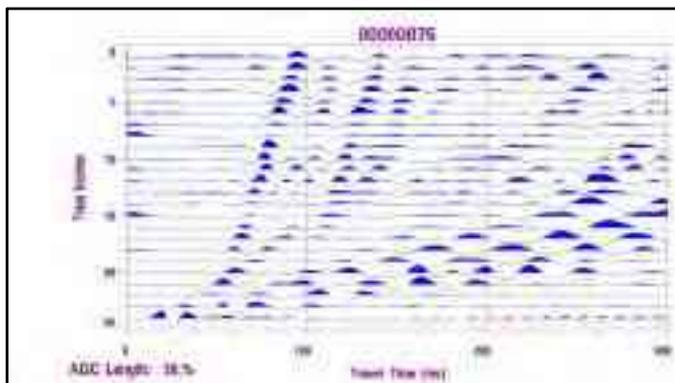


Punto sorgente "B" (LATO SINISTRO)

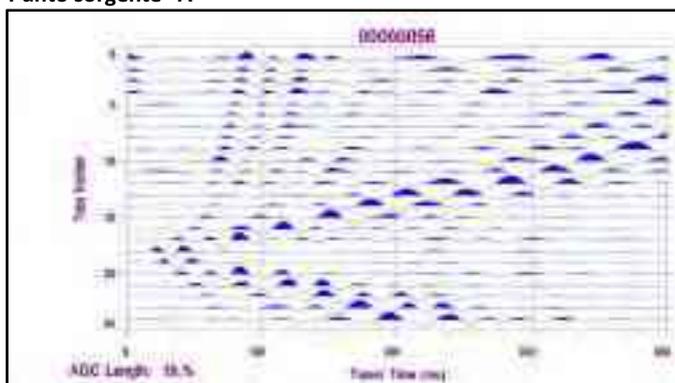


Punto sorgente "B" (LATO DESTRO)

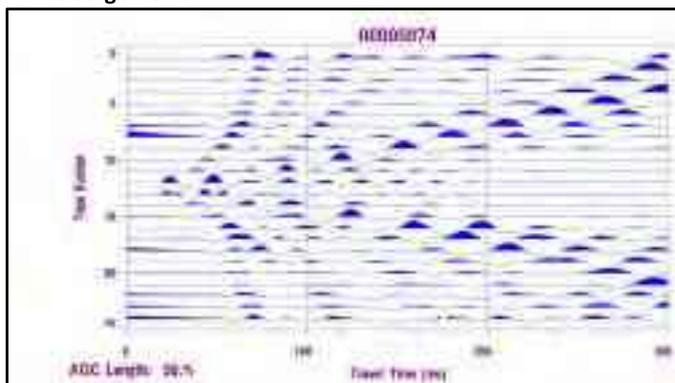
SISMOGRAMMI SISMICA A RIFRAZIONE ONDE LONGITUDINALI (ONDE P) PROFILO 2



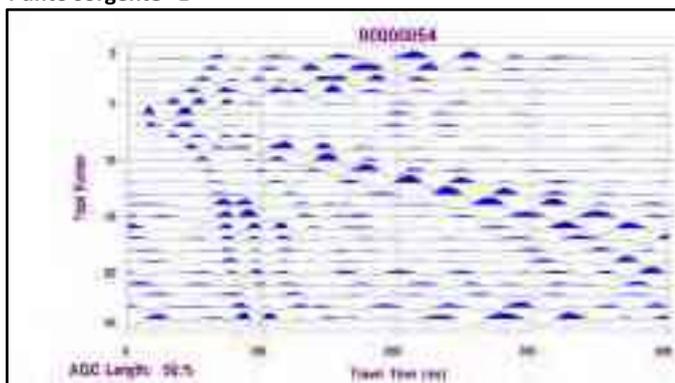
Punto sorgente "A"



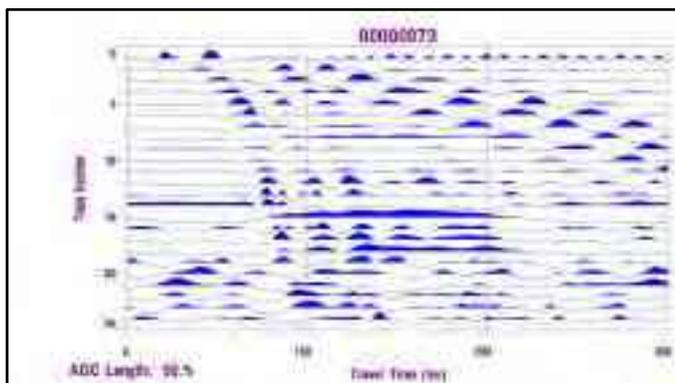
Punto sorgente "C"



Punto sorgente "E"

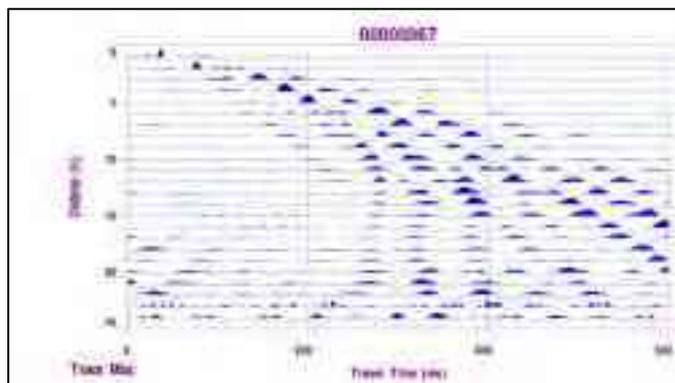


Punto sorgente "D"

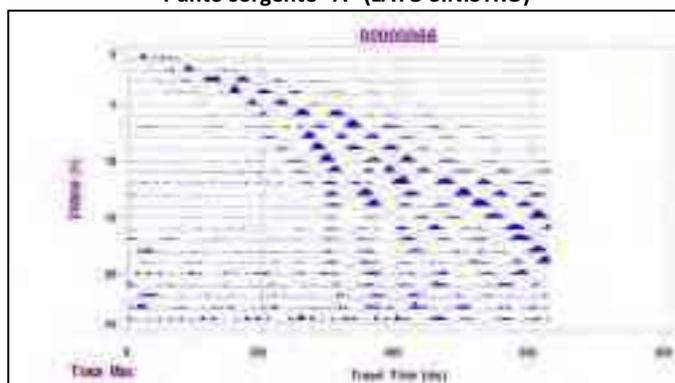


Punto sorgente "B"

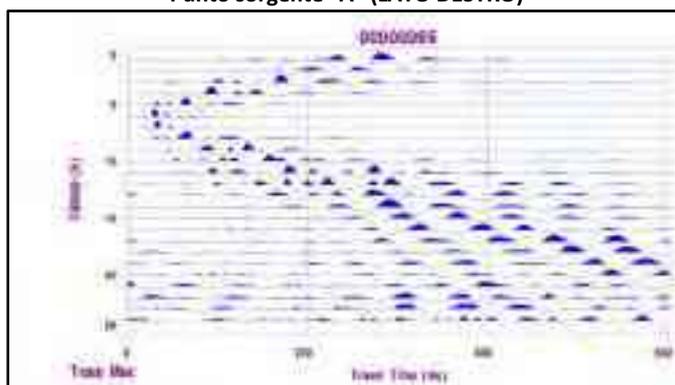
SISMOGRAMMI SISMICA A RIFRAZIONE ONDE TRASVERSALI (ONDE SH) PROFILO 2



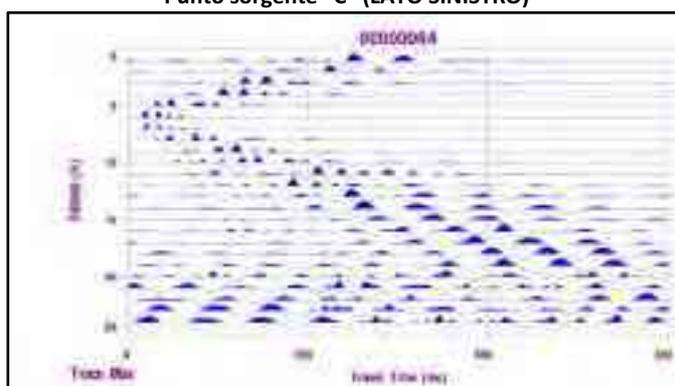
Punto sorgente "A" (LATO SINISTRO)



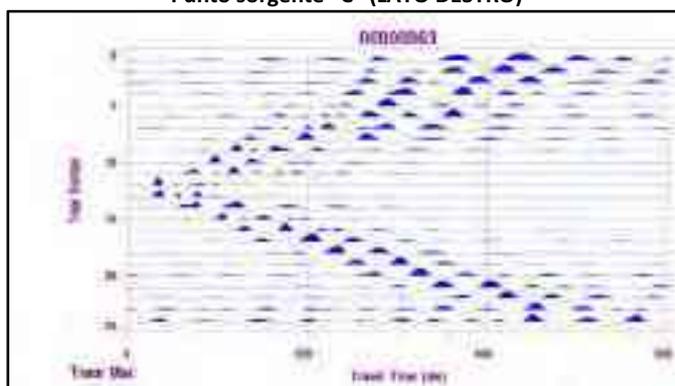
Punto sorgente "A" (LATO DESTRO)



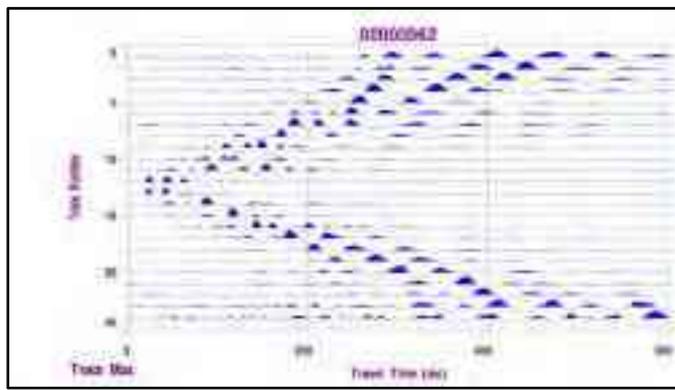
Punto sorgente "C" (LATO SINISTRO)



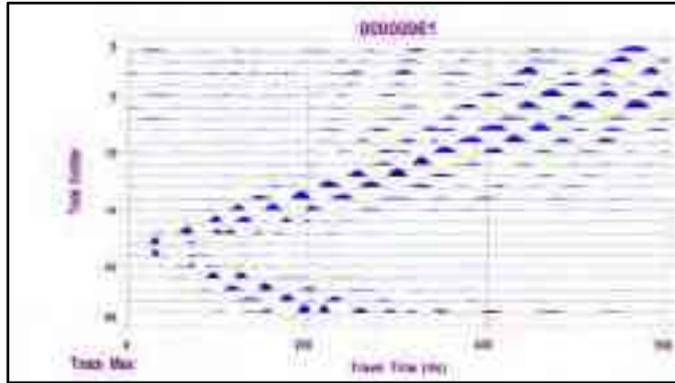
Punto sorgente "C" (LATO DESTRO)



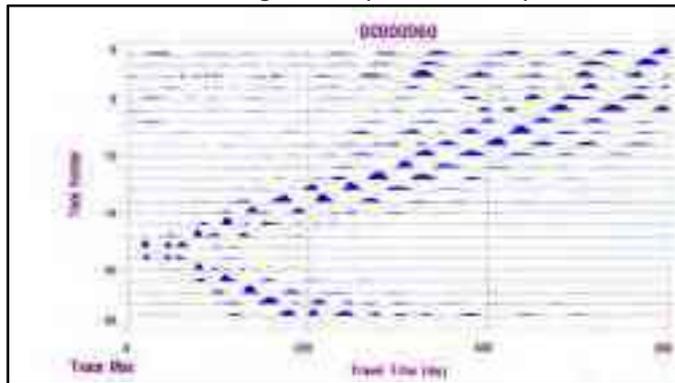
Punto sorgente "E" (LATO SINISTRO)



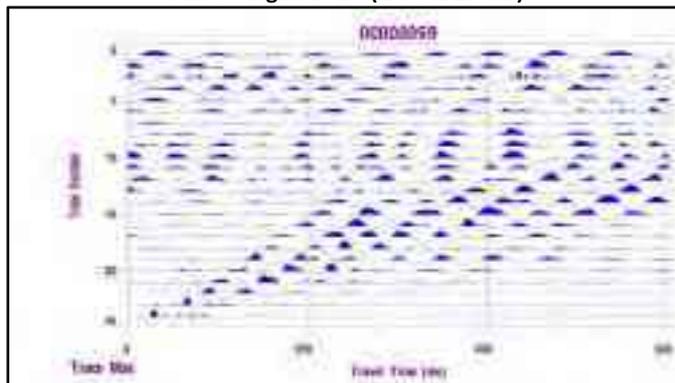
Punto sorgente "E" (LATO DESTRO)



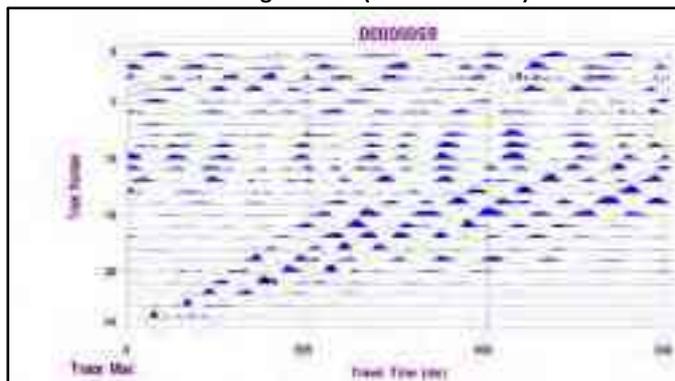
Punto sorgente "D" (LATO SINISTRO)



Punto sorgente "D" (LATO DESTRO)

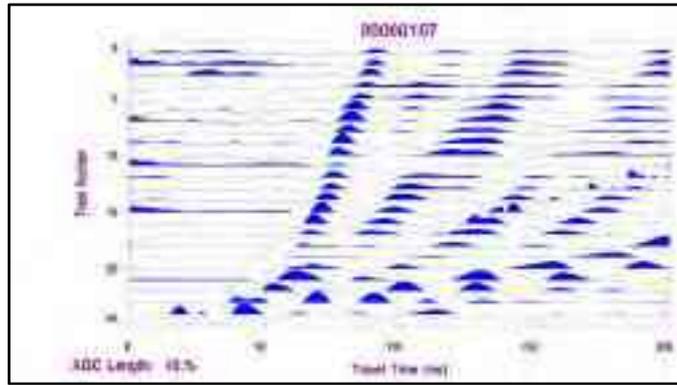


Punto sorgente "B" (LATO SINISTRO)

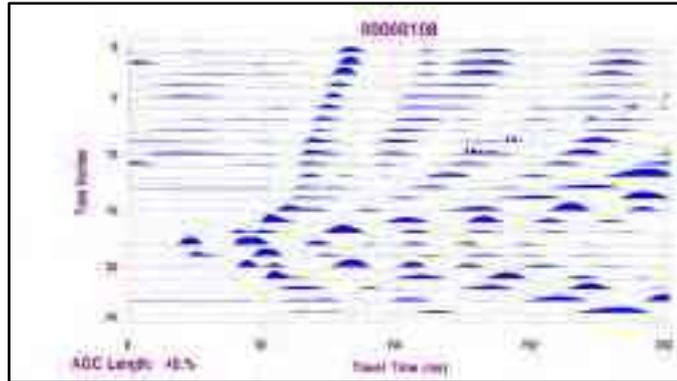


Punto sorgente "B" (LATO DESTRO)

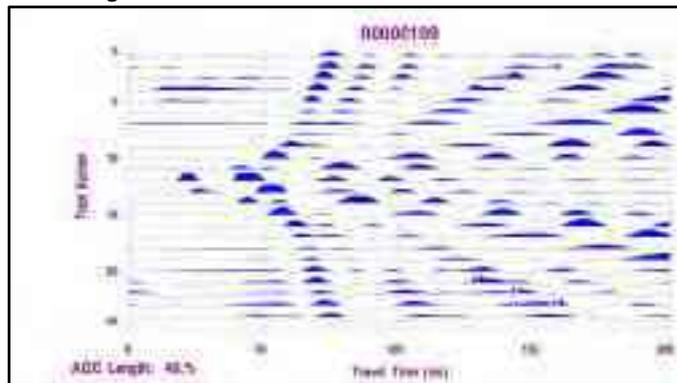
SISMOGRAMMI SISMICA A RIFRAZIONE ONDE LONGITUDINALI (ONDE P) PROFILO 3



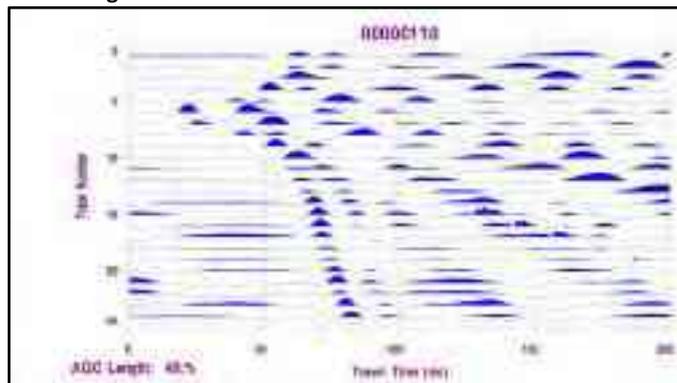
Punto sorgente "A"



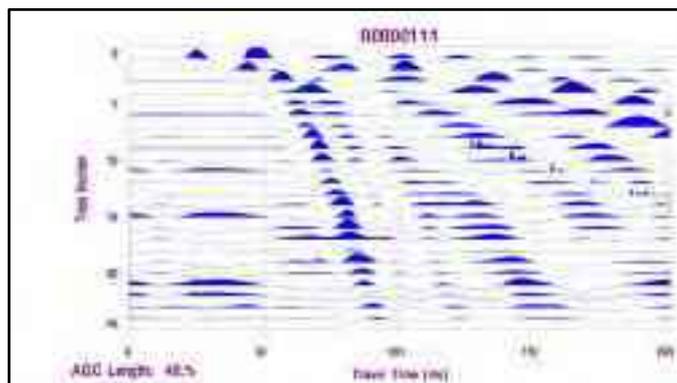
Punto sorgente "C"



Punto sorgente "E"

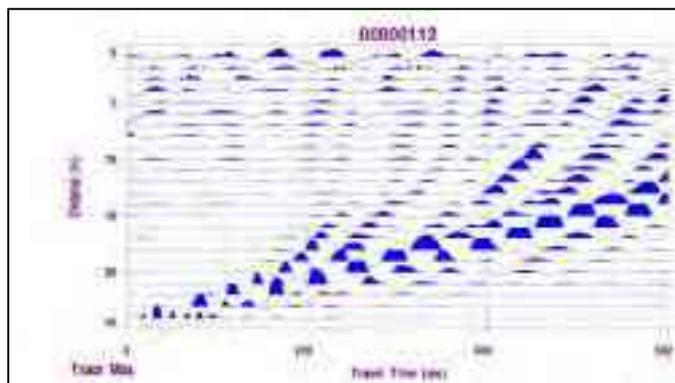


Punto sorgente "D"

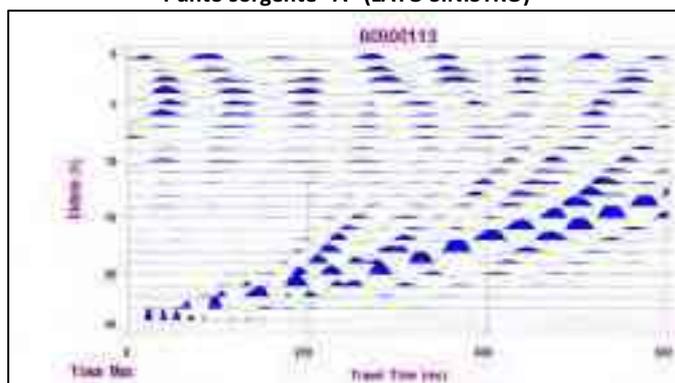


Punto sorgente "B"

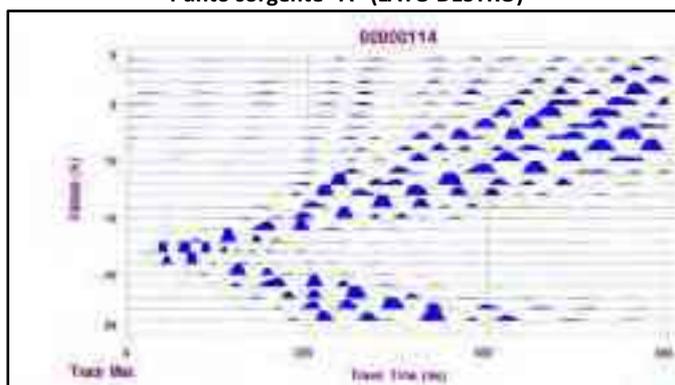
SISMOGRAMMI SISMICA A RIFRAZIONE ONDE TRASVERSALI (ONDE SH) PROFILO 3



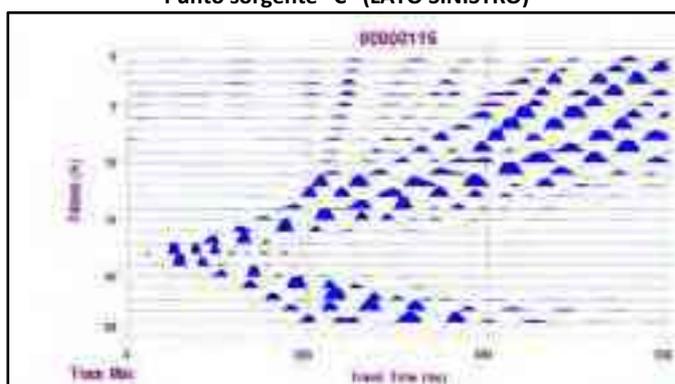
Punto sorgente "A" (LATO SINISTRO)



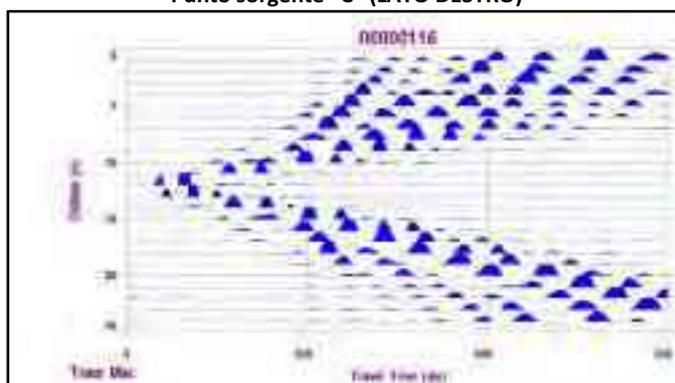
Punto sorgente "A" (LATO DESTRO)



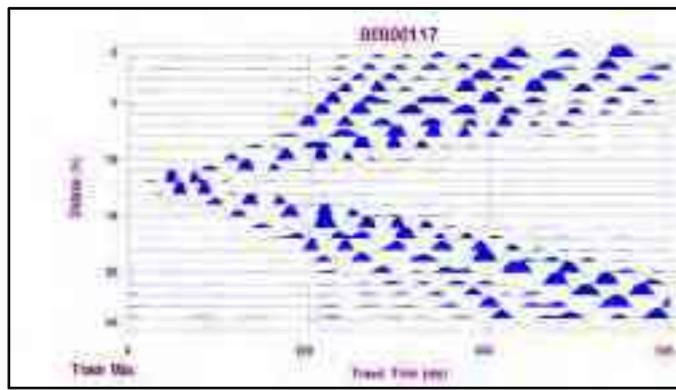
Punto sorgente "C" (LATO SINISTRO)



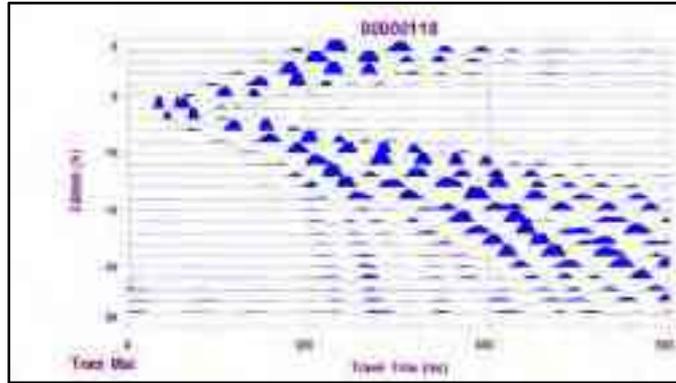
Punto sorgente "C" (LATO DESTRO)



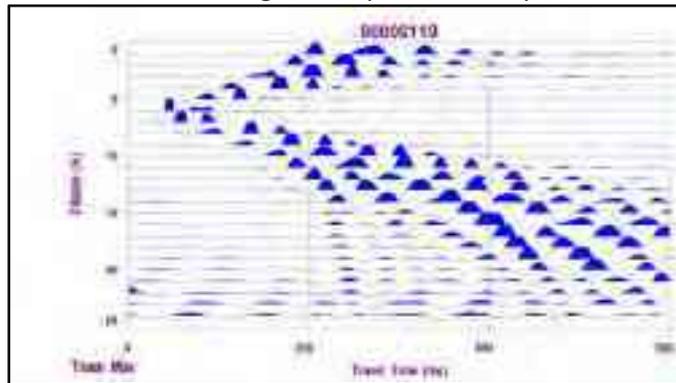
Punto sorgente "E" (LATO SINISTRO)



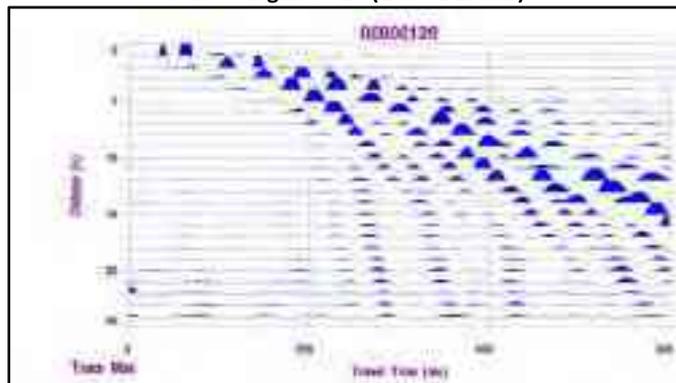
Punto sorgente "E" (LATO DESTRO)



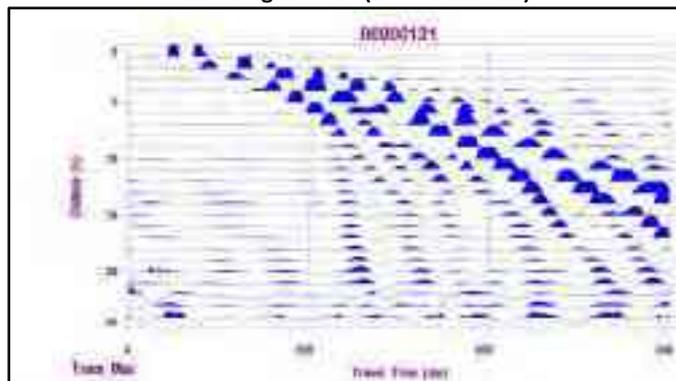
Punto sorgente "D" (LATO SINISTRO)



Punto sorgente "D" (LATO DESTRO)

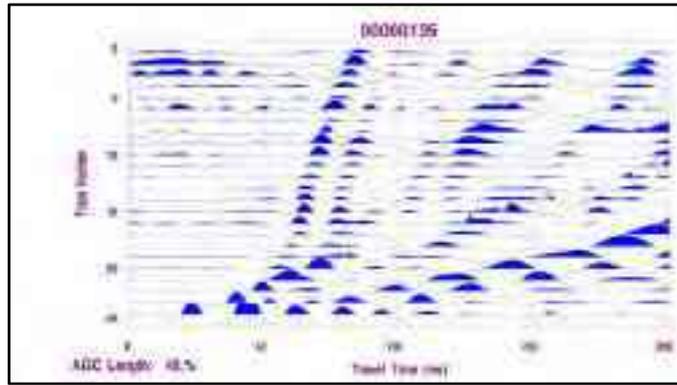


Punto sorgente "B" (LATO SINISTRO)

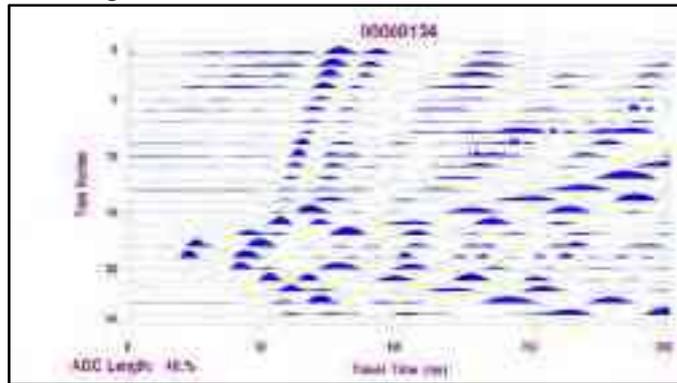


Punto sorgente "B" (LATO DESTRO)

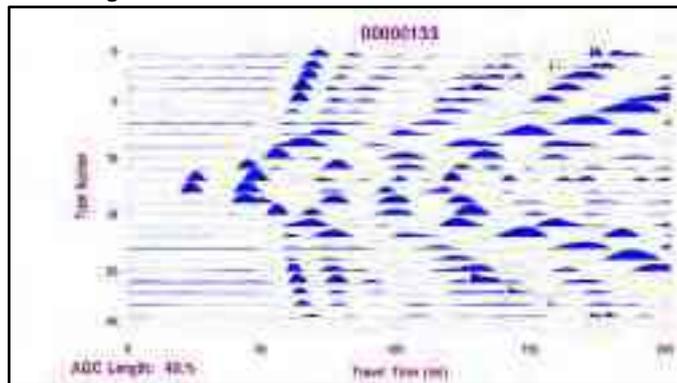
SISMOGRAMMI SISMICA A RIFRAZIONE ONDE LONGITUDINALI (ONDE P) PROFILO 4



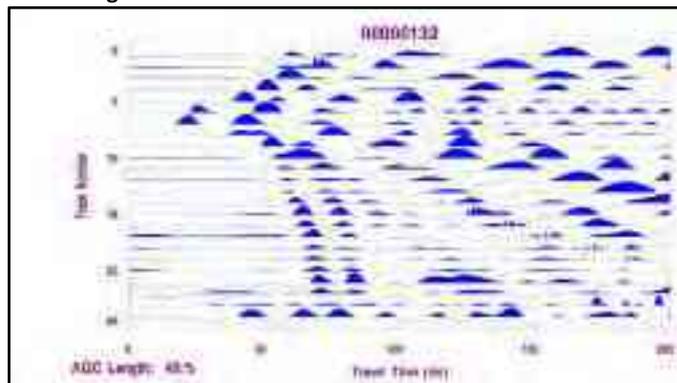
Punto sorgente "A"



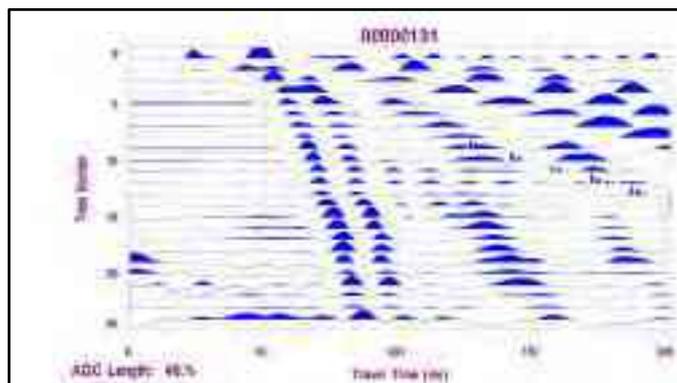
Punto sorgente "C"



Punto sorgente "E"

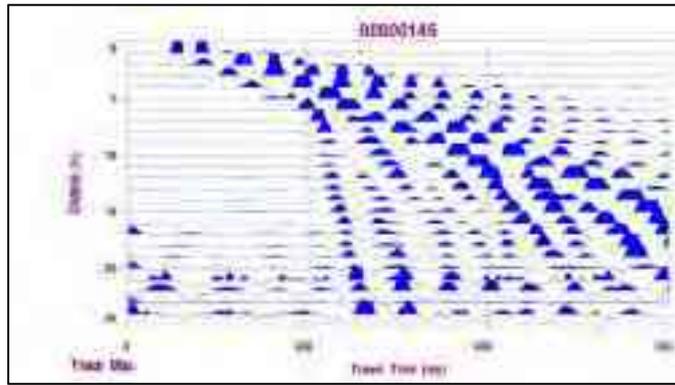


Punto sorgente "D"

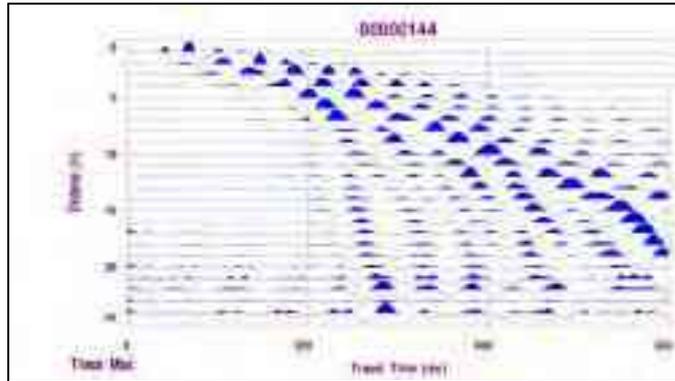


Punto sorgente "B"

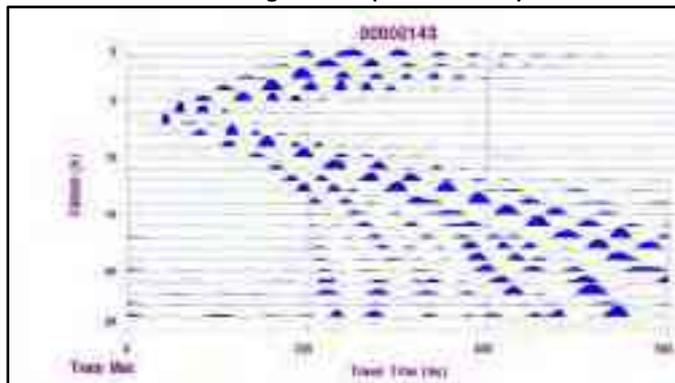
SISMOGRAMMI SISMICA A RIFRAZIONE ONDE TRASVERSALI (ONDE SH) PROFILO 4



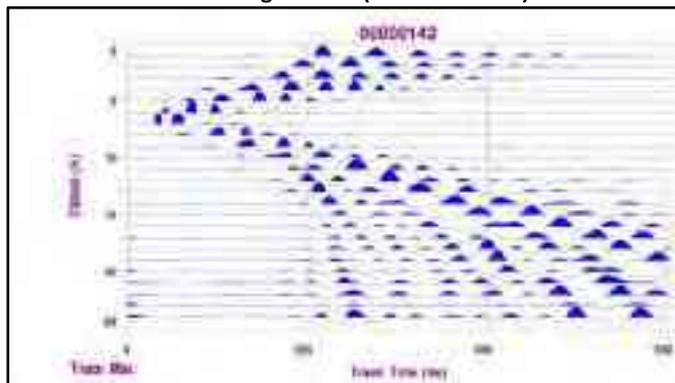
Punto sorgente "A" (LATO SINISTRO)



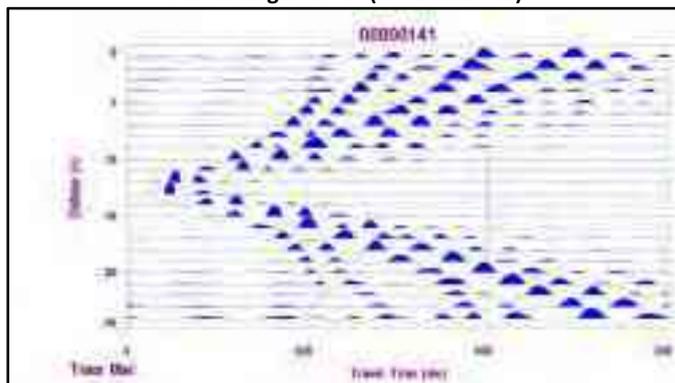
Punto sorgente "A" (LATO DESTRO)



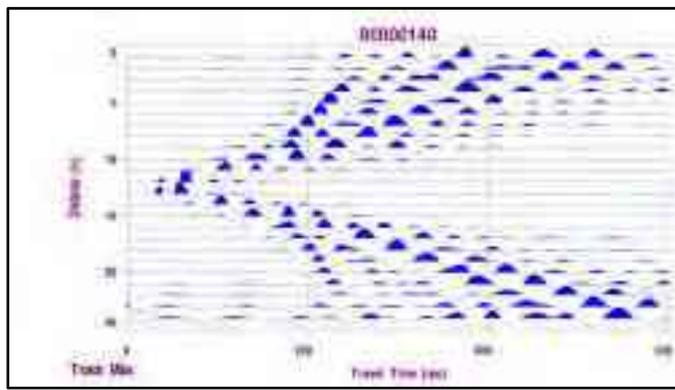
Punto sorgente "C" (LATO SINISTRO)



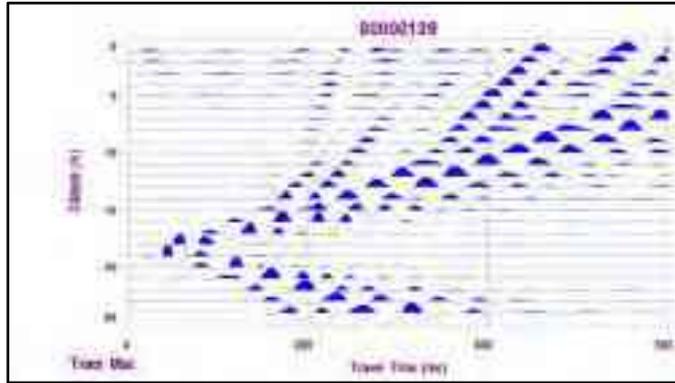
Punto sorgente "C" (LATO DESTRO)



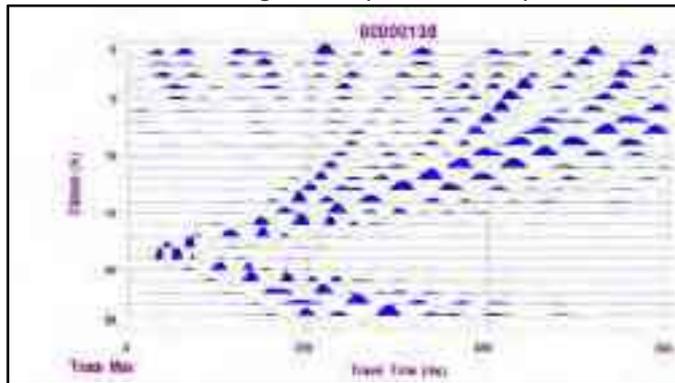
Punto sorgente "E" (LATO SINISTRO)



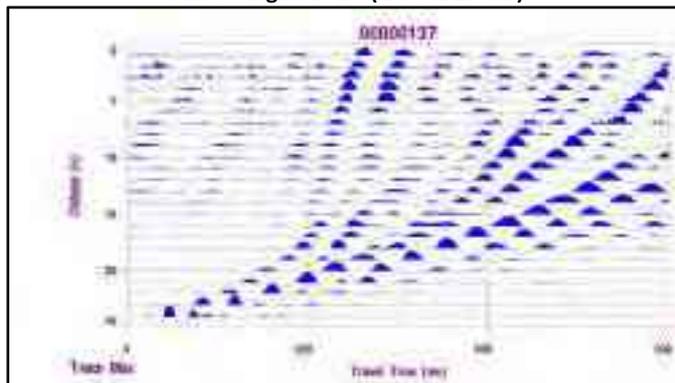
Punto sorgente "E" (LATO DESTRO)



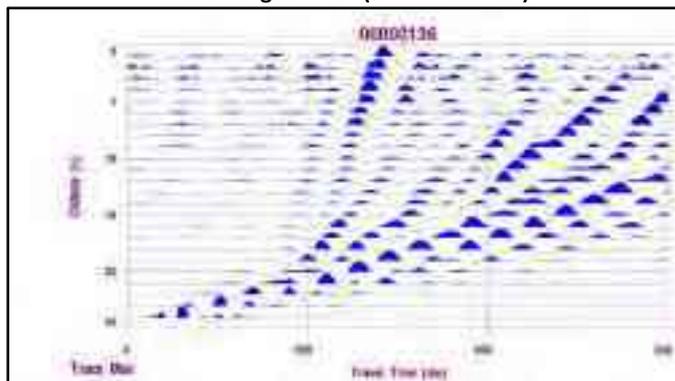
Punto sorgente "D" (LATO SINISTRO)



Punto sorgente "D" (LATO DESTRO)

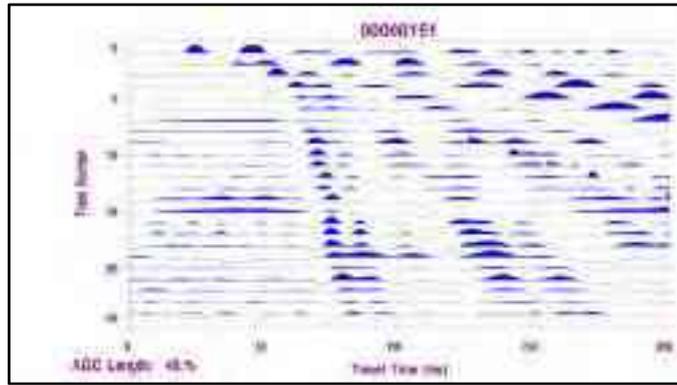


Punto sorgente "B" (LATO SINISTRO)

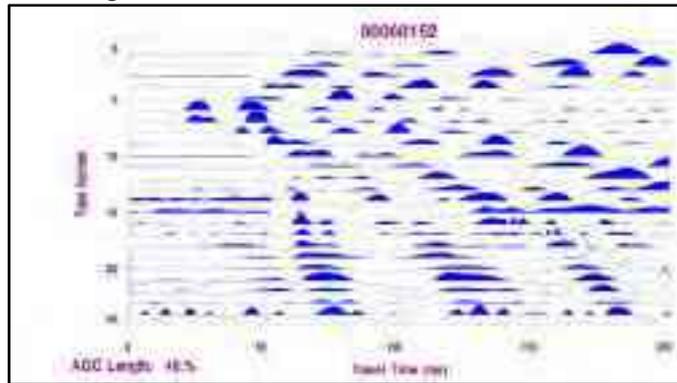


Punto sorgente "B" (LATO DESTRO)

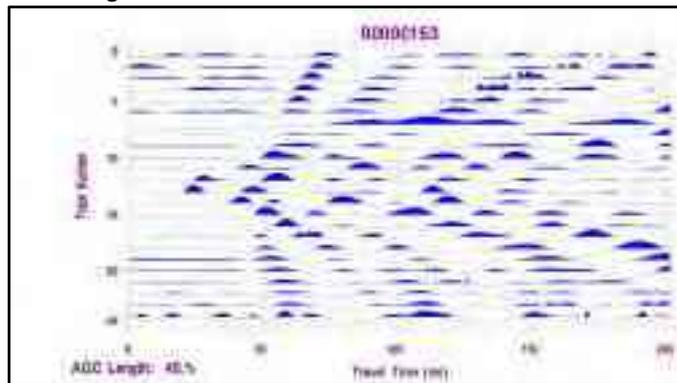
SISMOGRAMMI SISMICA A RIFRAZIONE ONDE LONGITUDINALI (ONDE P) PROFILO 5



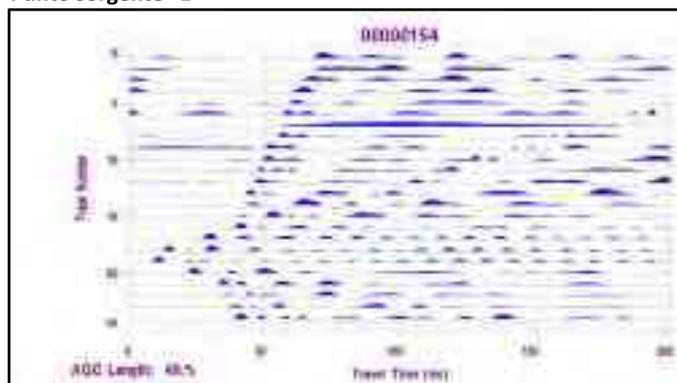
Punto sorgente "A"



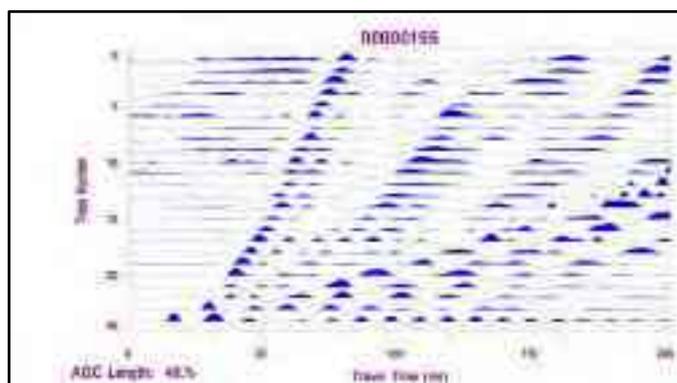
Punto sorgente "C"



Punto sorgente "E"

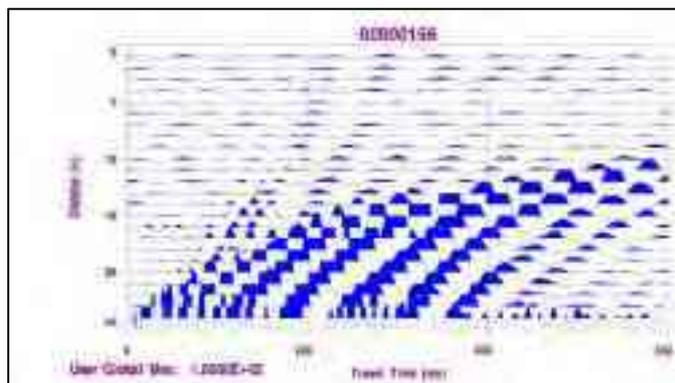


Punto sorgente "D"

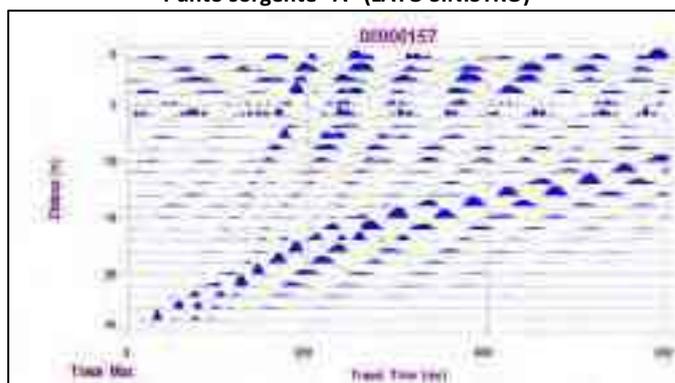


Punto sorgente "B"

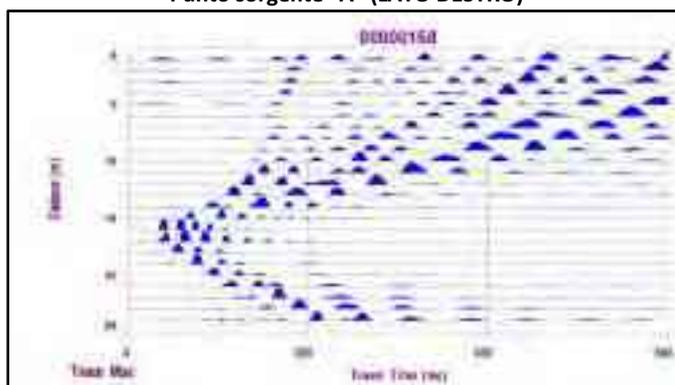
SISMOGRAMMI SISMICA A RIFRAZIONE ONDE TRASVERSALI (ONDE SH) PROFILO 5



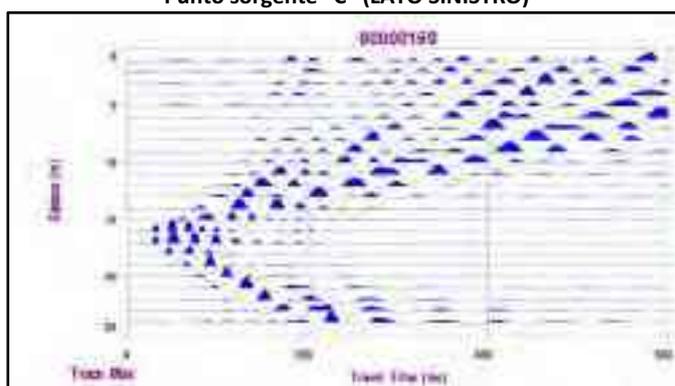
Punto sorgente "A" (LATO SINISTRO)



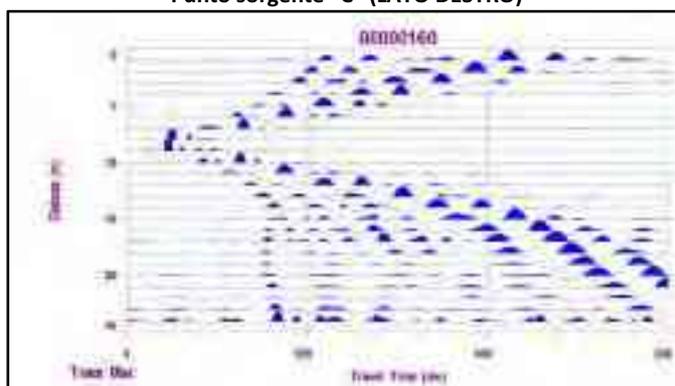
Punto sorgente "A" (LATO DESTRO)



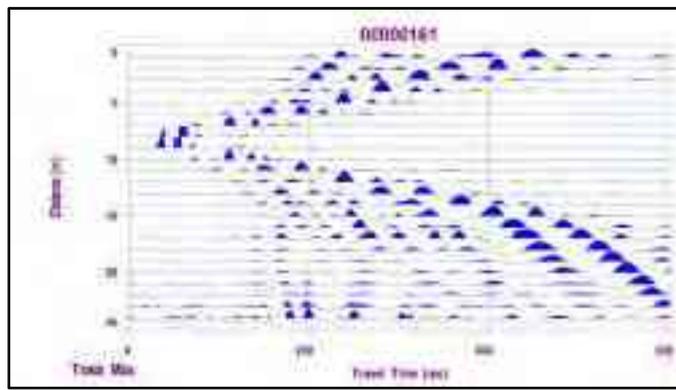
Punto sorgente "C" (LATO SINISTRO)



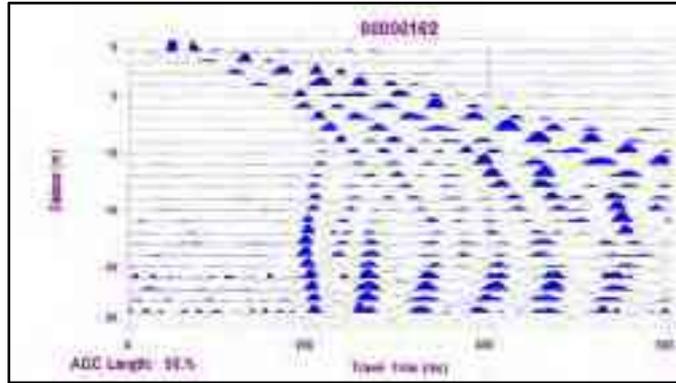
Punto sorgente "C" (LATO DESTRO)



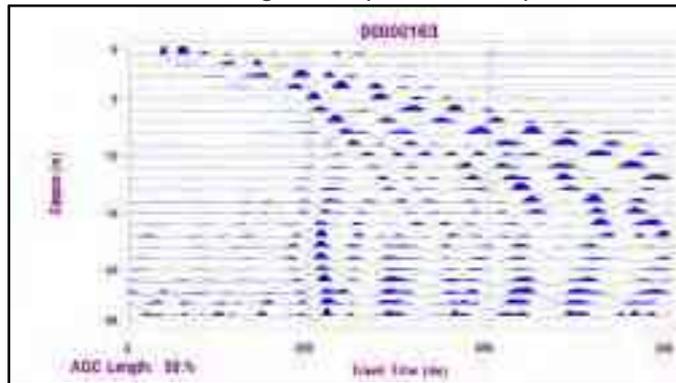
Punto sorgente "D" (LATO SINISTRO)



Punto sorgente "D" (LATO DESTRO)

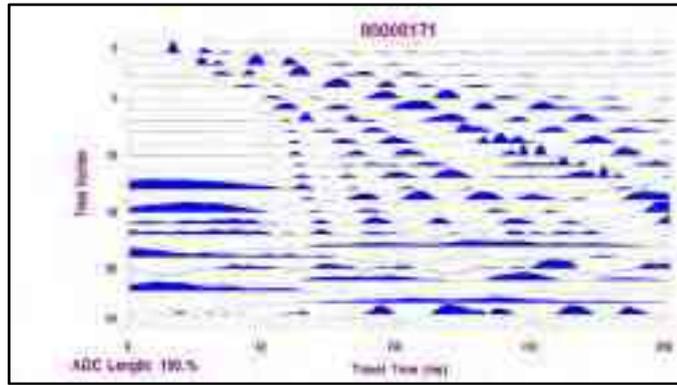


Punto sorgente "B" (LATO SINISTRO)

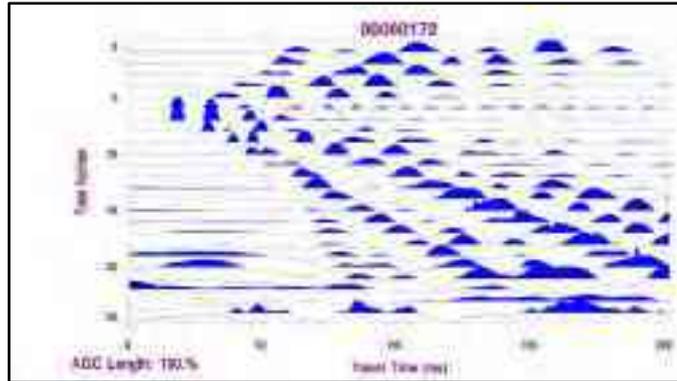


Punto sorgente "B" (LATO DESTRO)

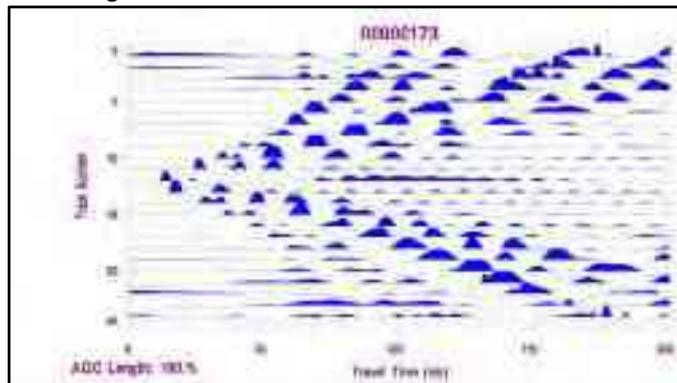
SISMOGRAMMI SISMICA A RIFRAZIONE ONDE LONGITUDINALI (ONDE P) PROFILO 6



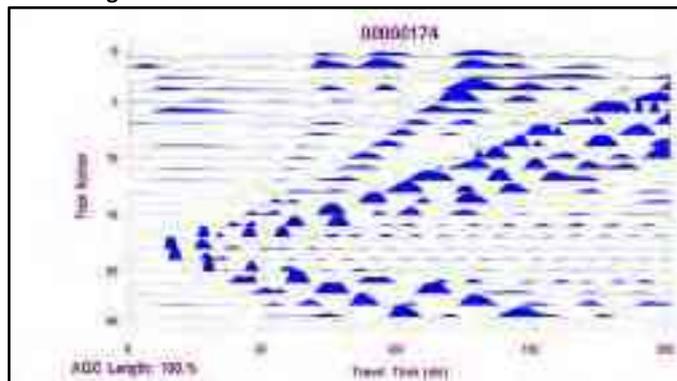
Punto sorgente "A"



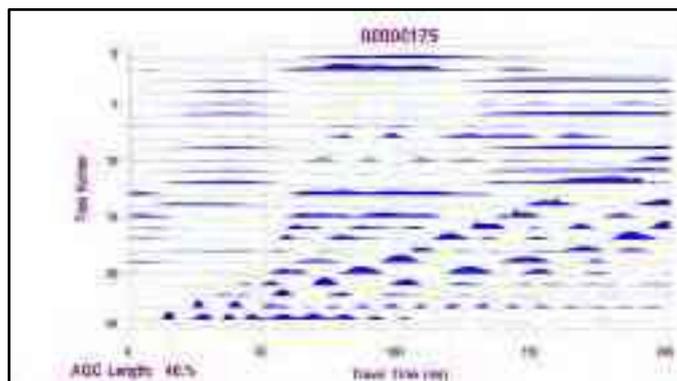
Punto sorgente "C"



Punto sorgente "E"

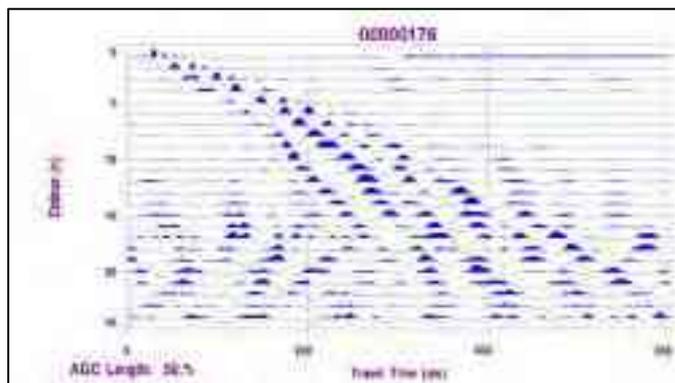


Punto sorgente "D"

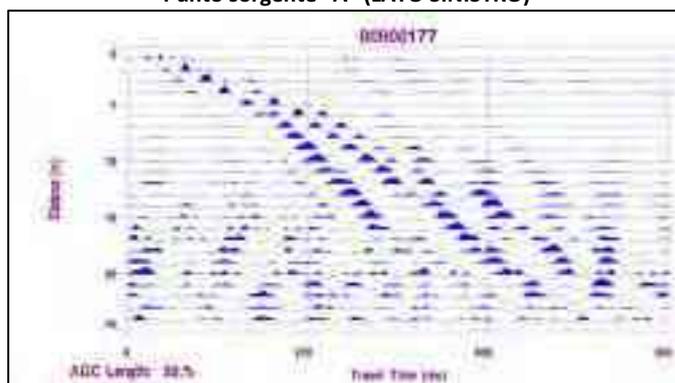


Punto sorgente "B"

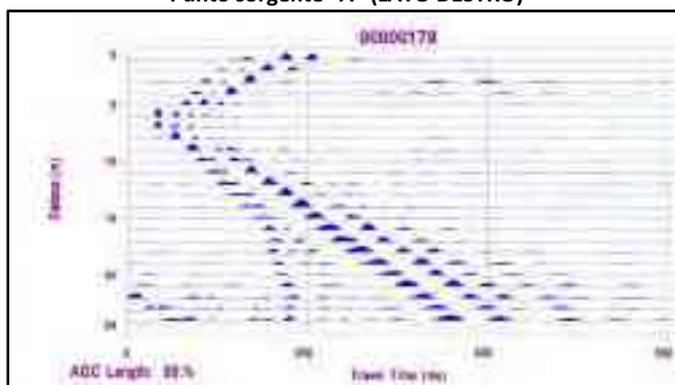
SISMOGRAMMI SISMICA A RIFRAZIONE ONDE TRASVERSALI (ONDE SH) PROFILO 6



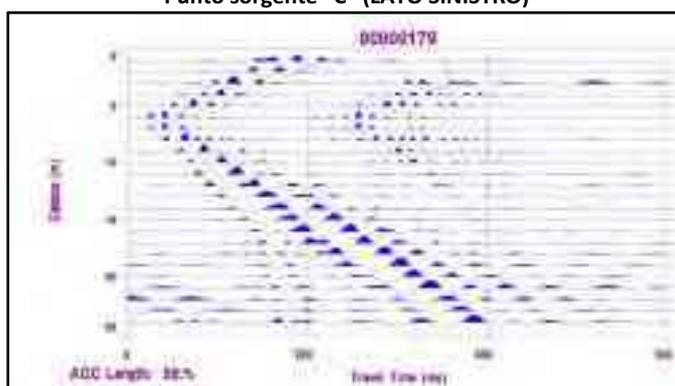
Punto sorgente "A" (LATO SINISTRO)



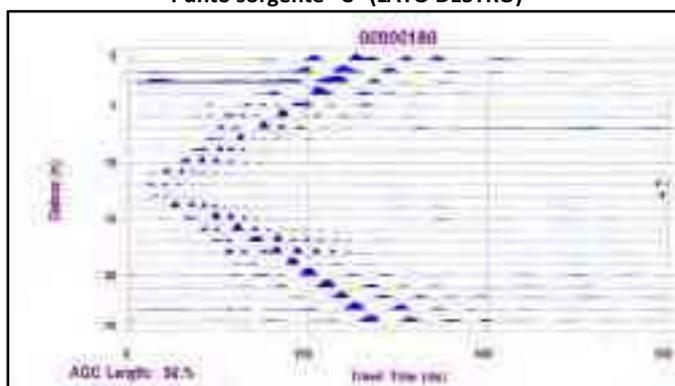
Punto sorgente "A" (LATO DESTRO)



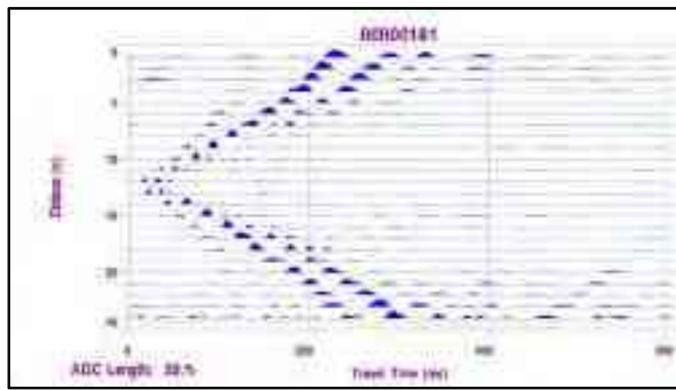
Punto sorgente "C" (LATO SINISTRO)



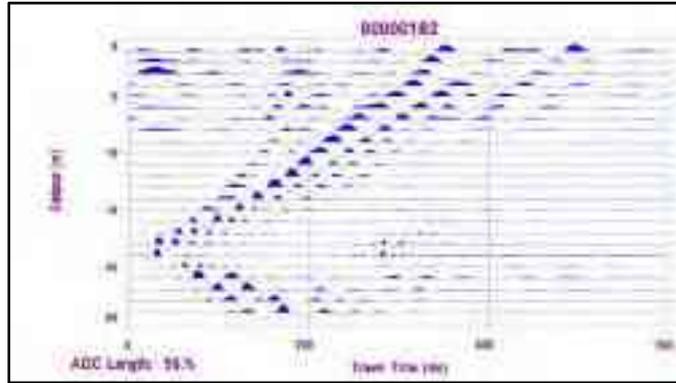
Punto sorgente "C" (LATO DESTRO)



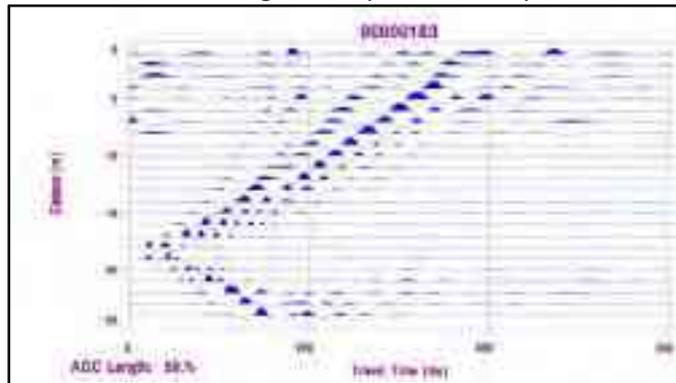
Punto sorgente "E" (LATO SINISTRO)



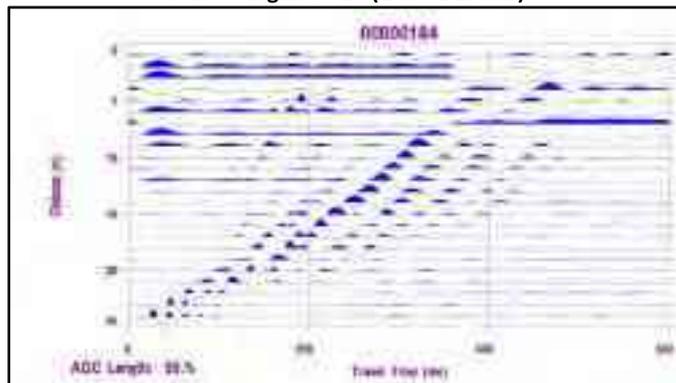
Punto sorgente "E" (LATO DESTRO)



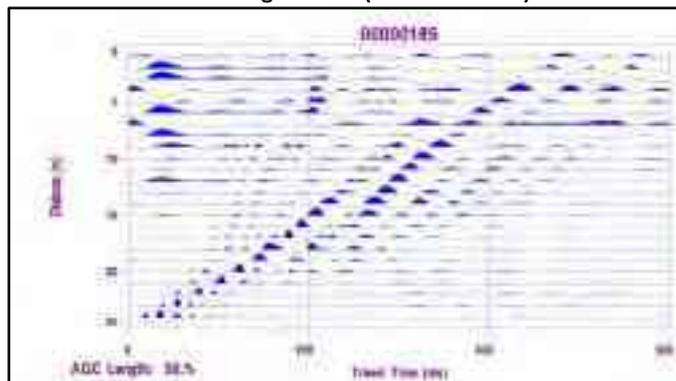
Punto sorgente "D" (LATO SINISTRO)



Punto sorgente "D" (LATO DESTRO)

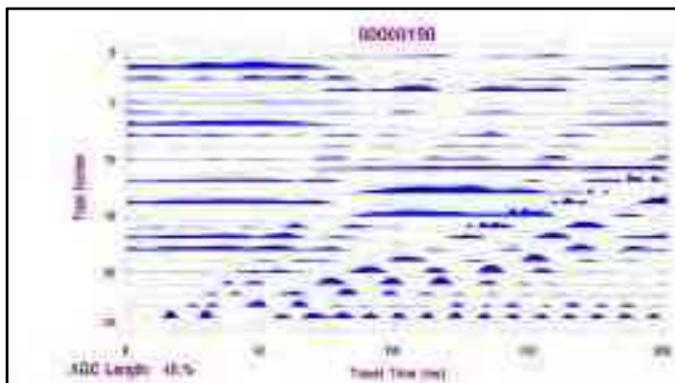


Punto sorgente "B" (LATO SINISTRO)

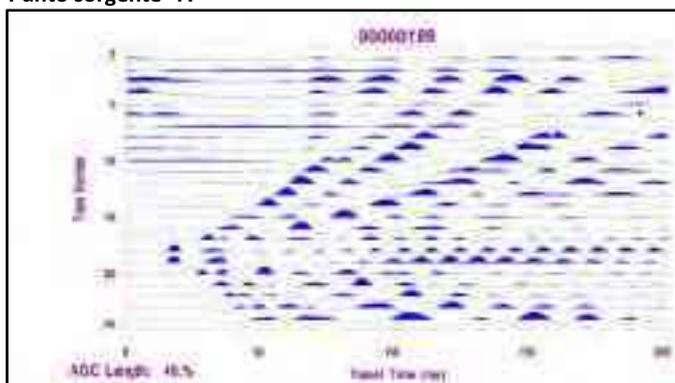


Punto sorgente "B" (LATO DESTRO)

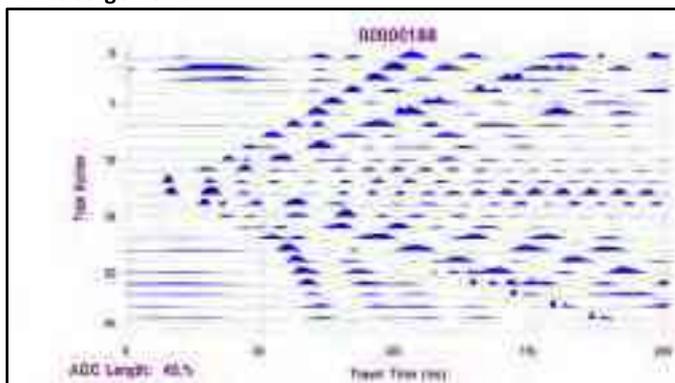
SISMOGRAMMI SISMICA A RIFRAZIONE ONDE LONGITUDINALI (ONDE P) PROFILO 7



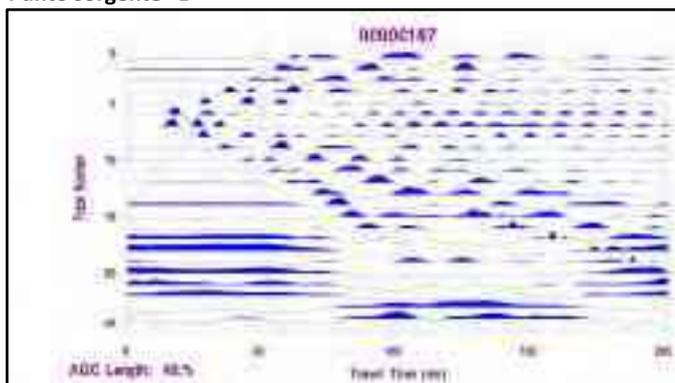
Punto sorgente "A"



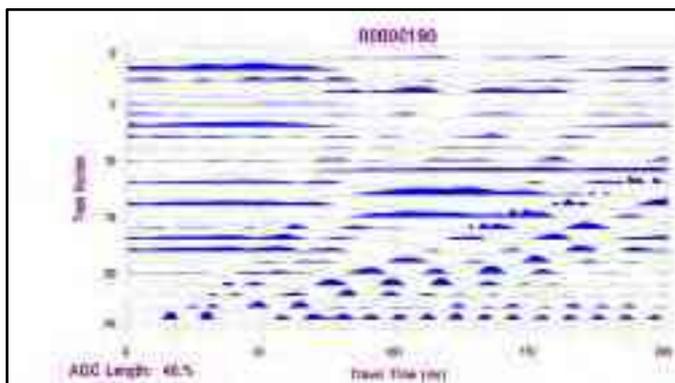
Punto sorgente "C"



Punto sorgente "E"

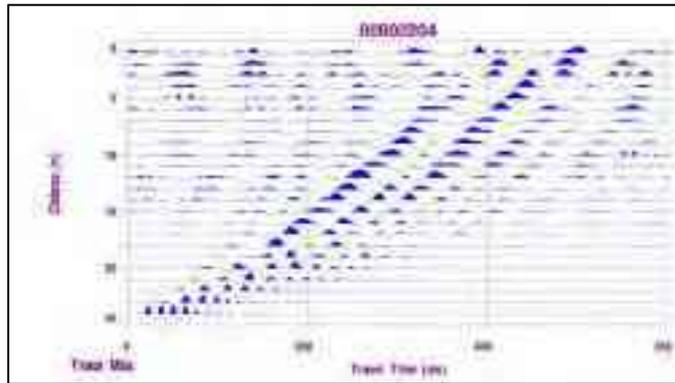


Punto sorgente "D"

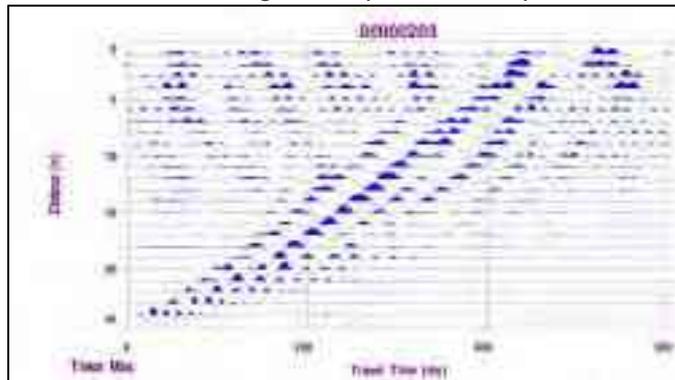


Punto sorgente "B"

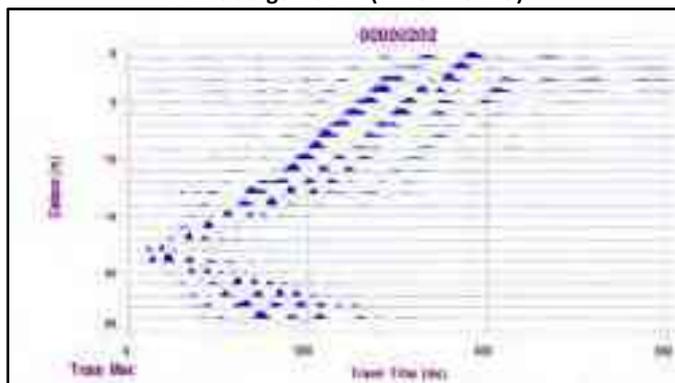
SISMOGRAMMI SISMICA A RIFRAZIONE ONDE TRASVERSALI (ONDE SH) PROFILO 7



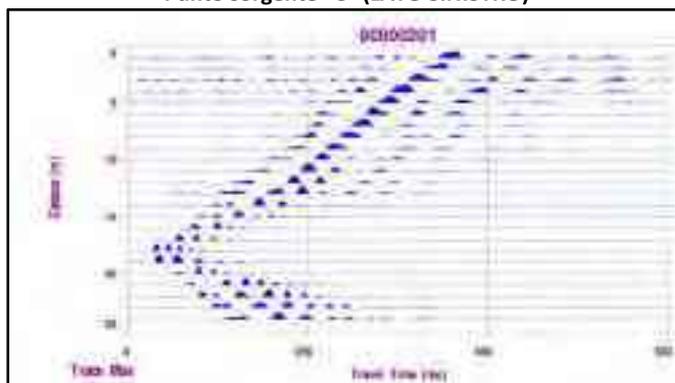
Punto sorgente "A" (LATO SINISTRO)



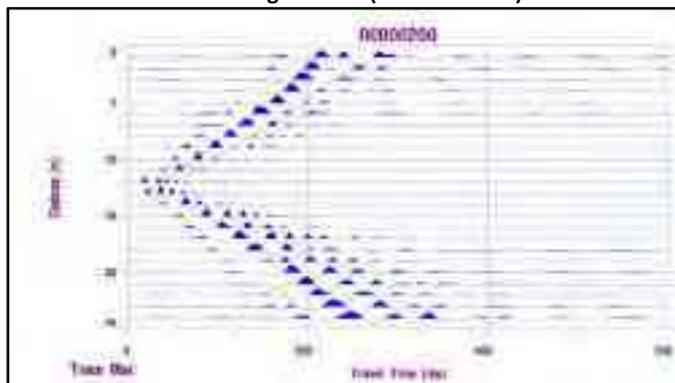
Punto sorgente "A" (LATO DESTRO)



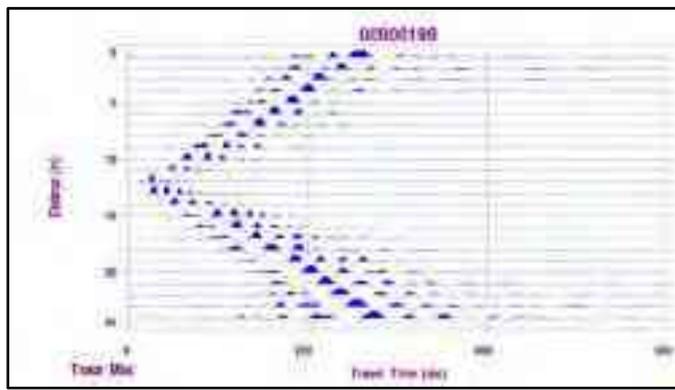
Punto sorgente "C" (LATO SINISTRO)



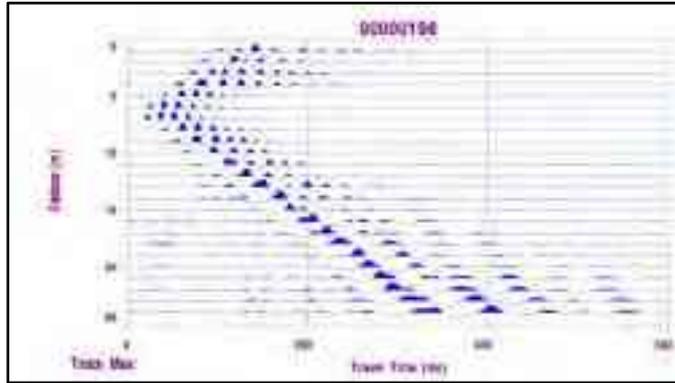
Punto sorgente "C" (LATO DESTRO)



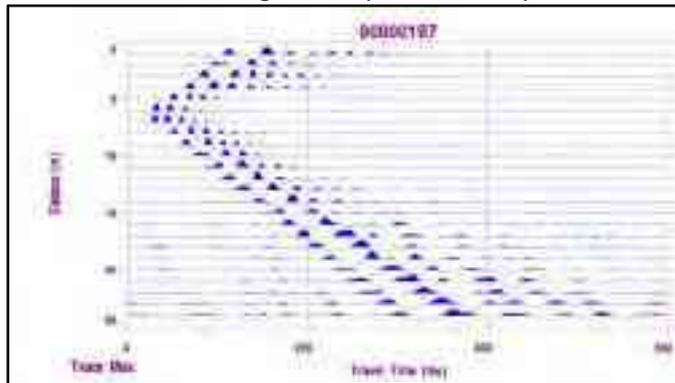
Punto sorgente "E" (LATO SINISTRO)



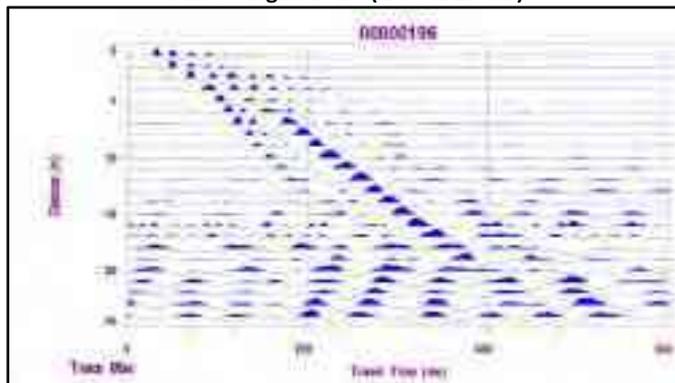
Punto sorgente "E" (LATO DESTRO)



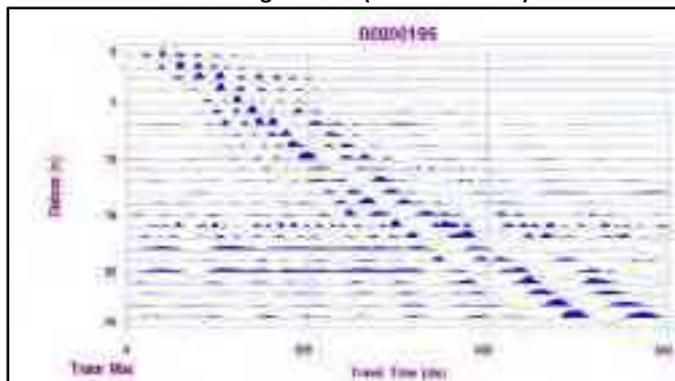
Punto sorgente "D" (LATO SINISTRO)



Punto sorgente "D" (LATO DESTRO)

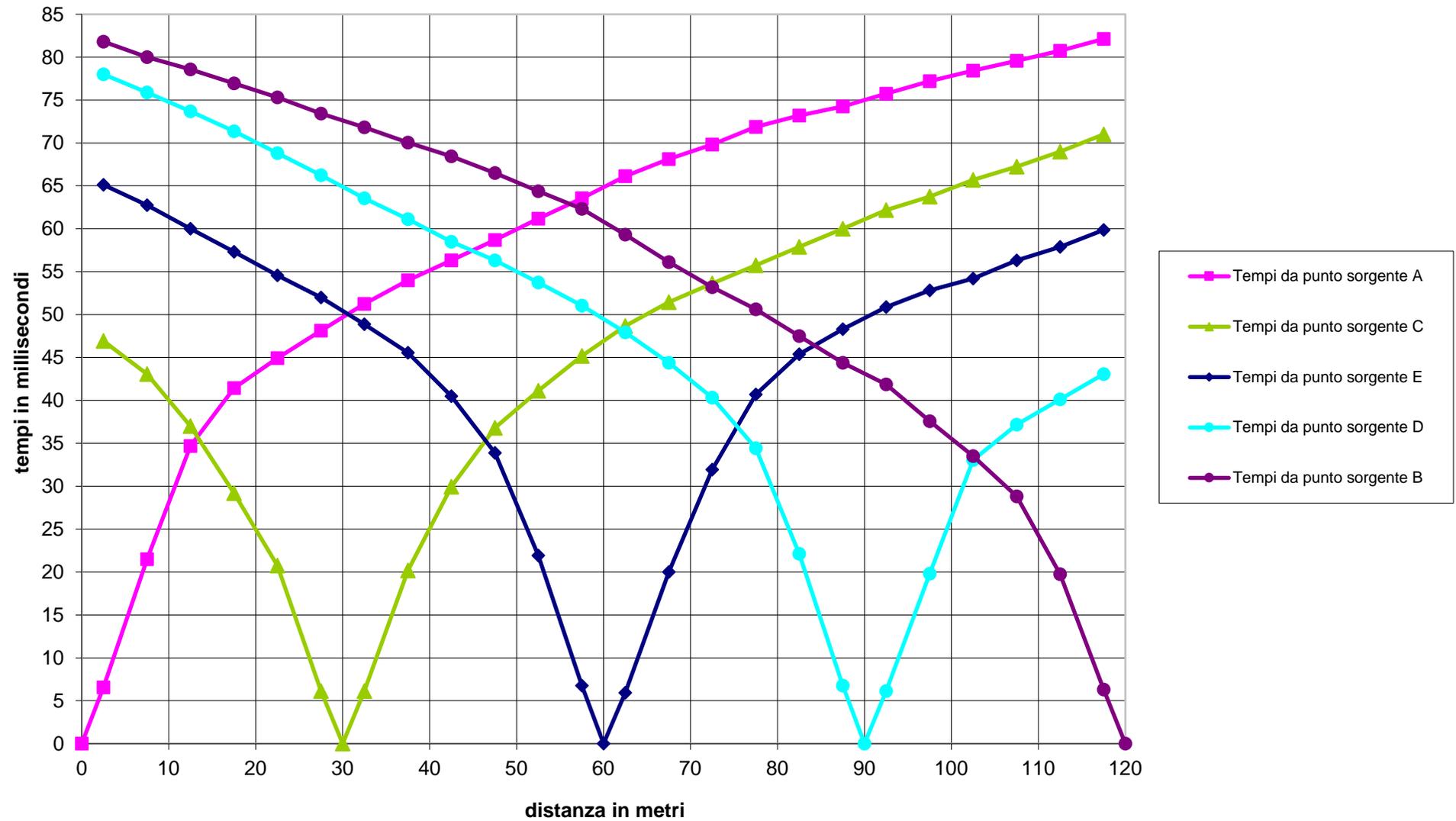


Punto sorgente "B" (LATO SINISTRO)

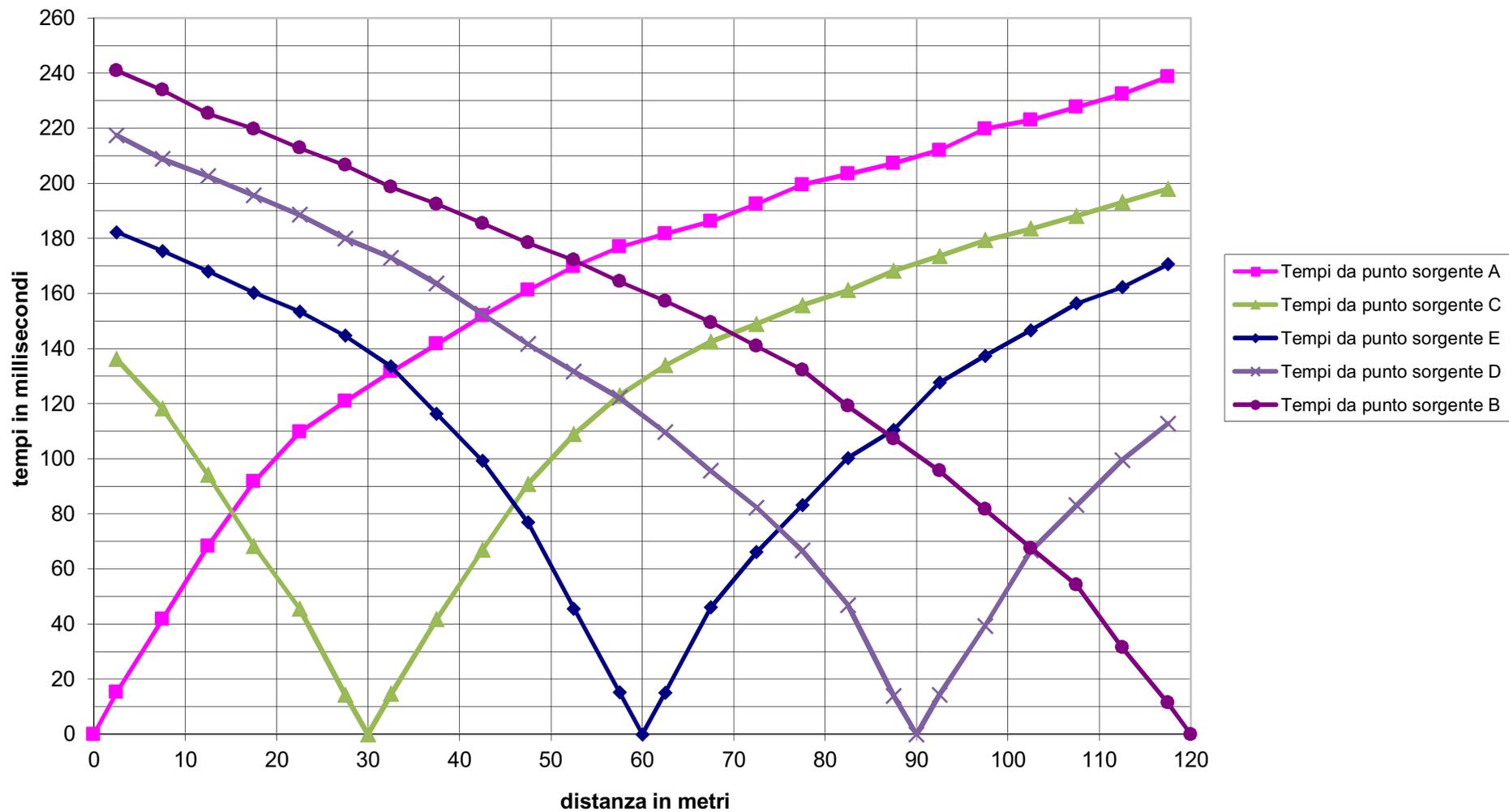


Punto sorgente "B" (LATO DESTRO)

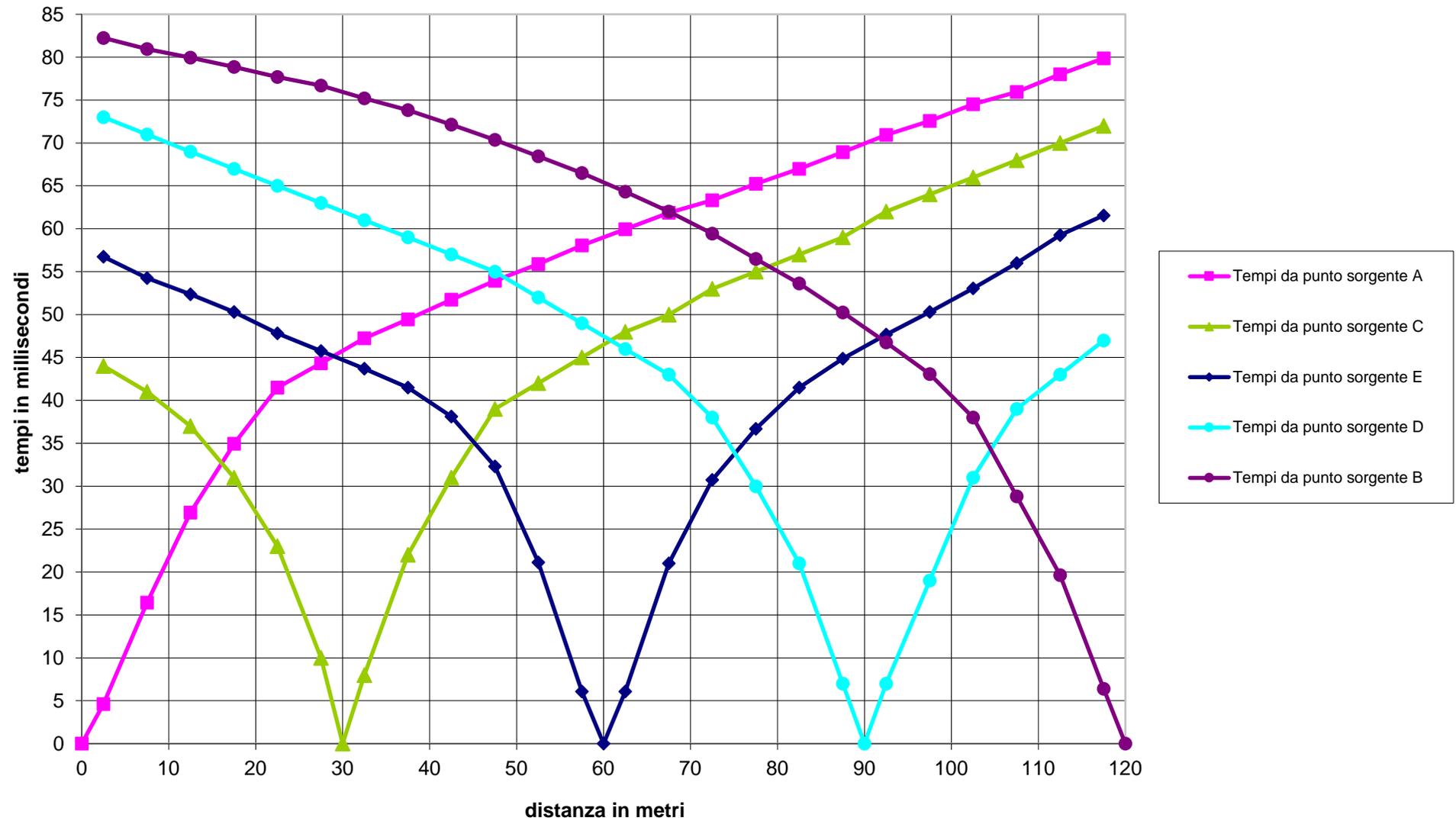
Dromocrone profilo sismico 1 - ONDE LONGITUDINALI



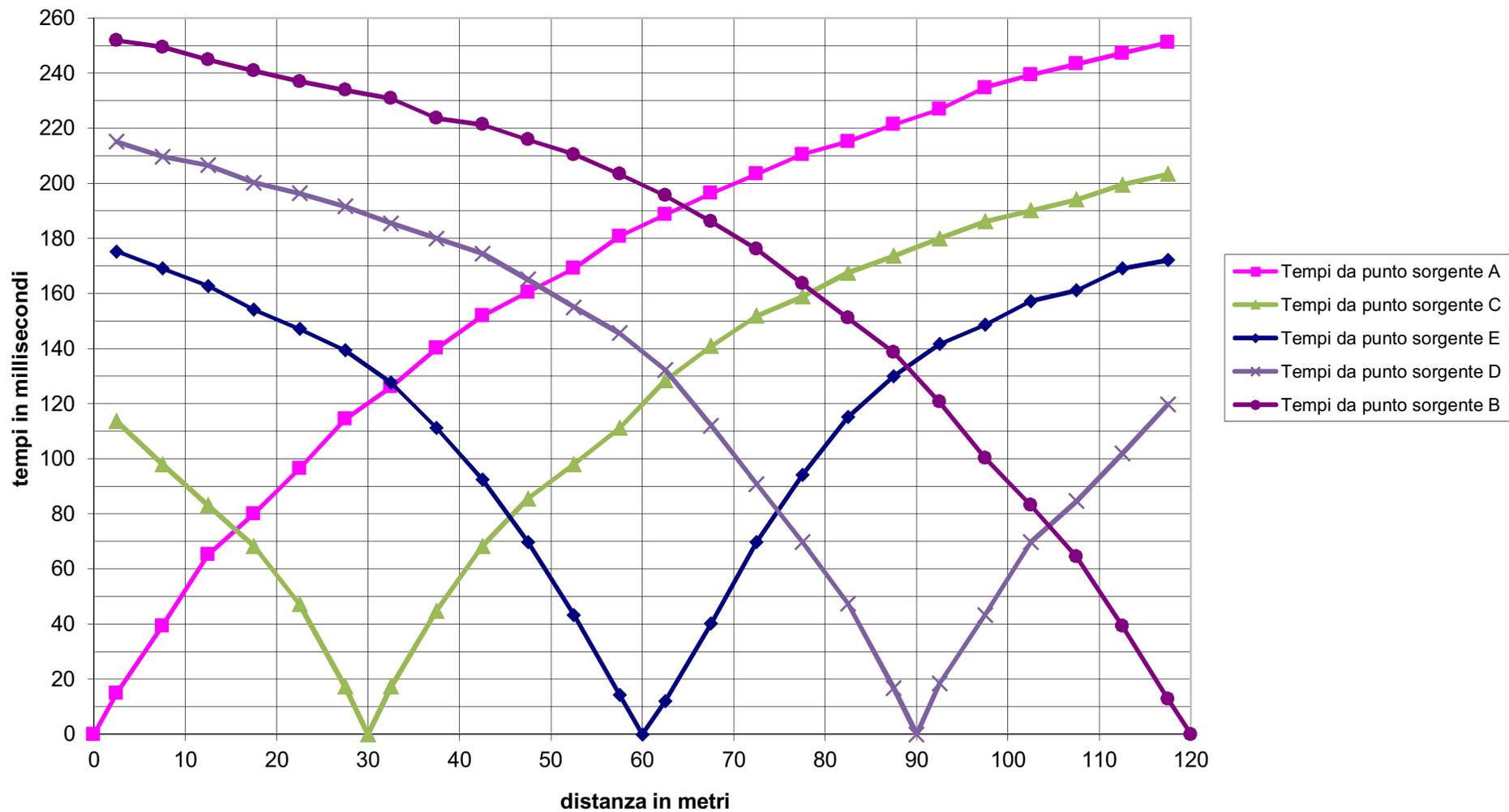
Dromocrone profilo sismico 1 - ONDE TRASVERSALI



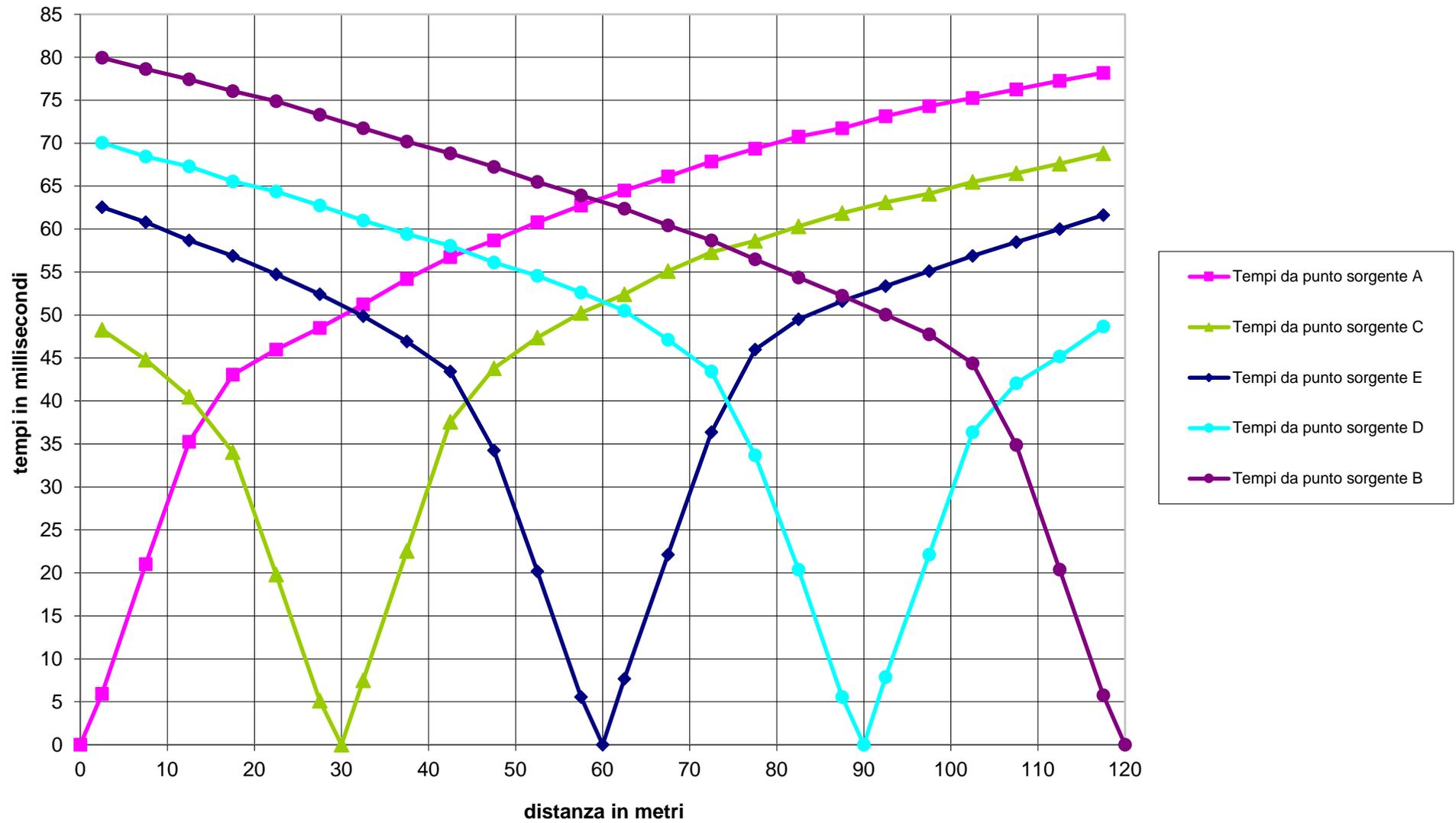
Dromocrone profilo sismico 2 - ONDE LONGITUDINALI



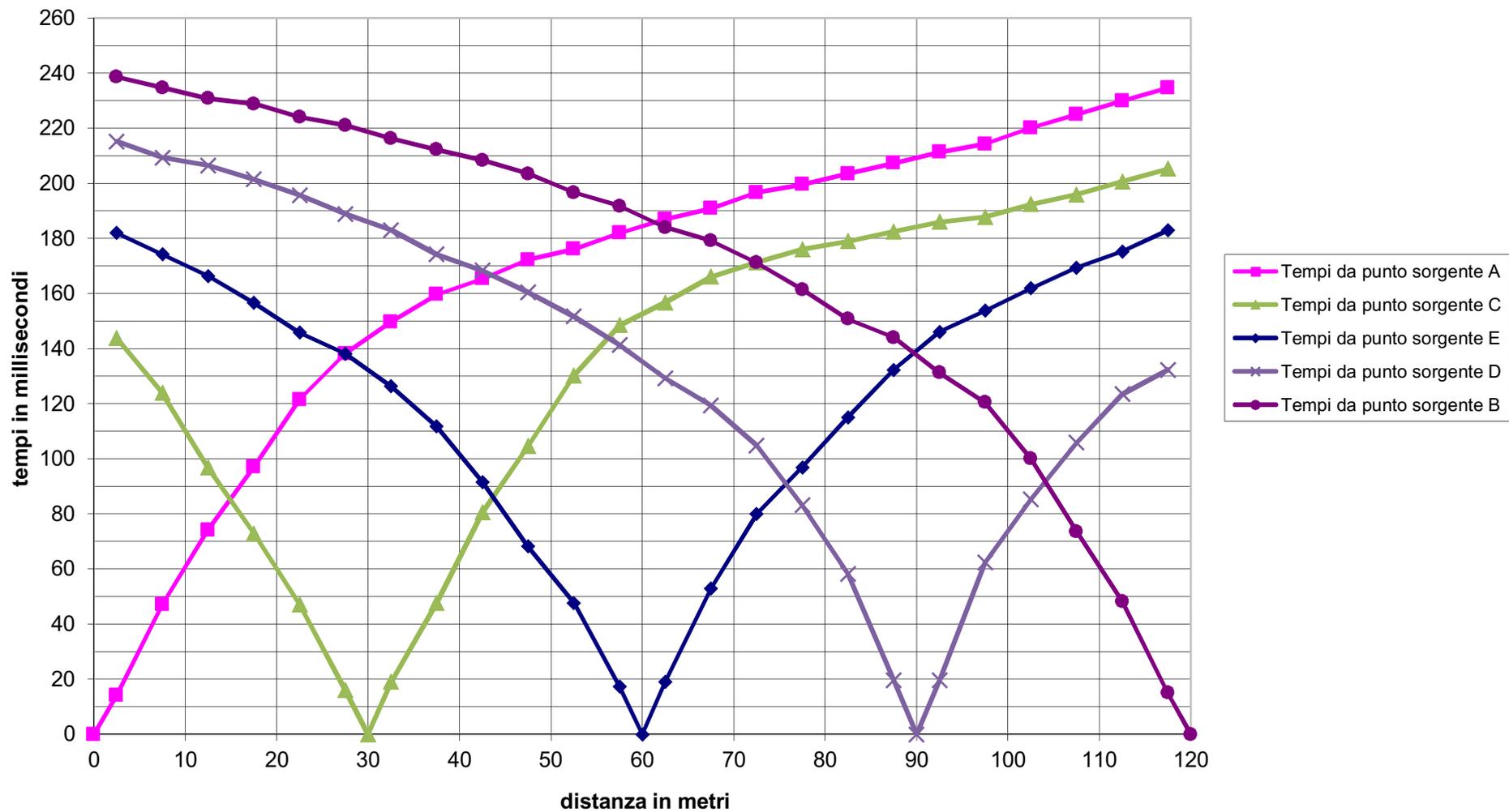
Dromocrone profilo sismico 2 - ONDE TRASVERSALI



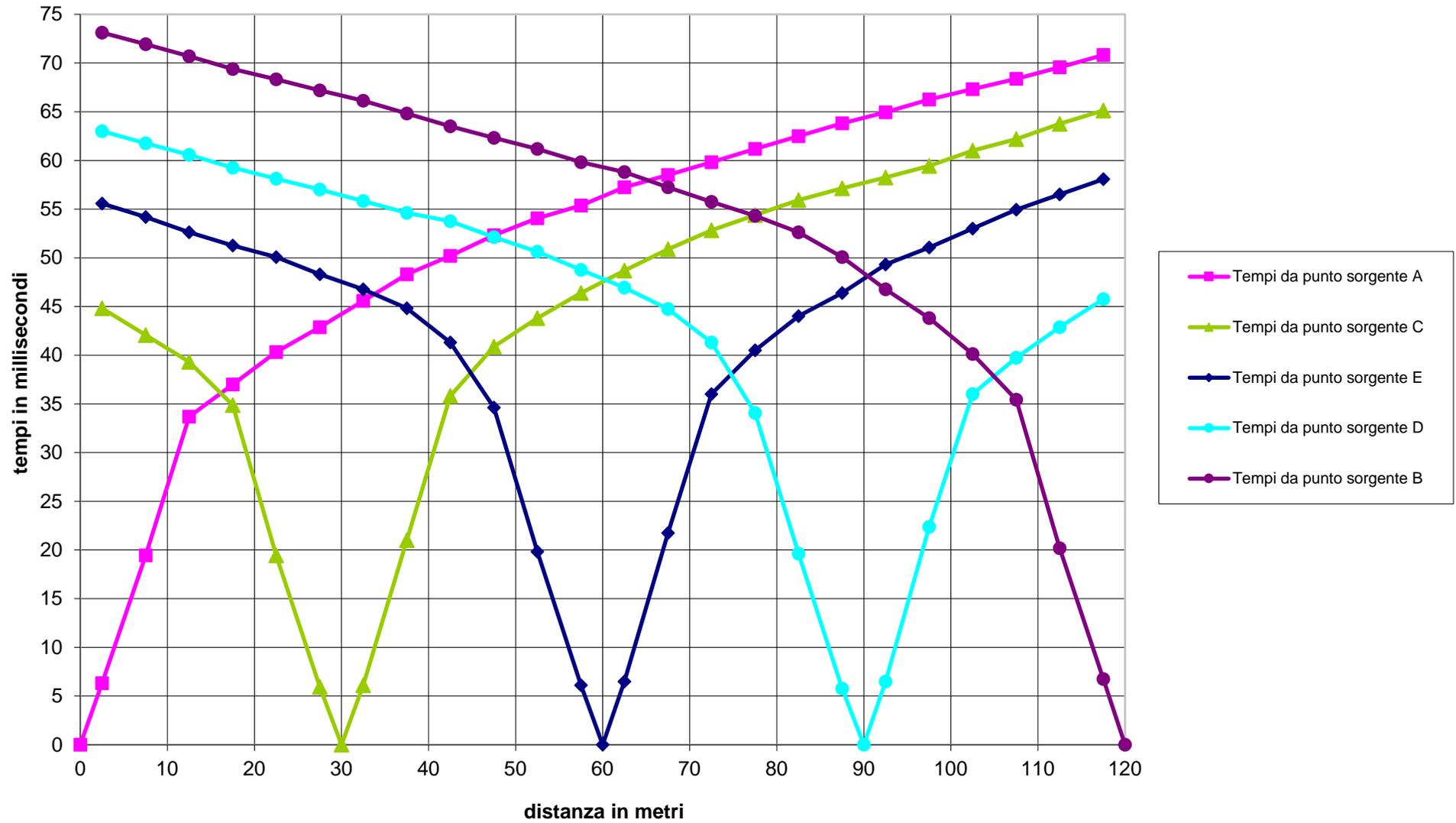
Dromocrone profilo sismico 3 - ONDE LONGITUDINALI



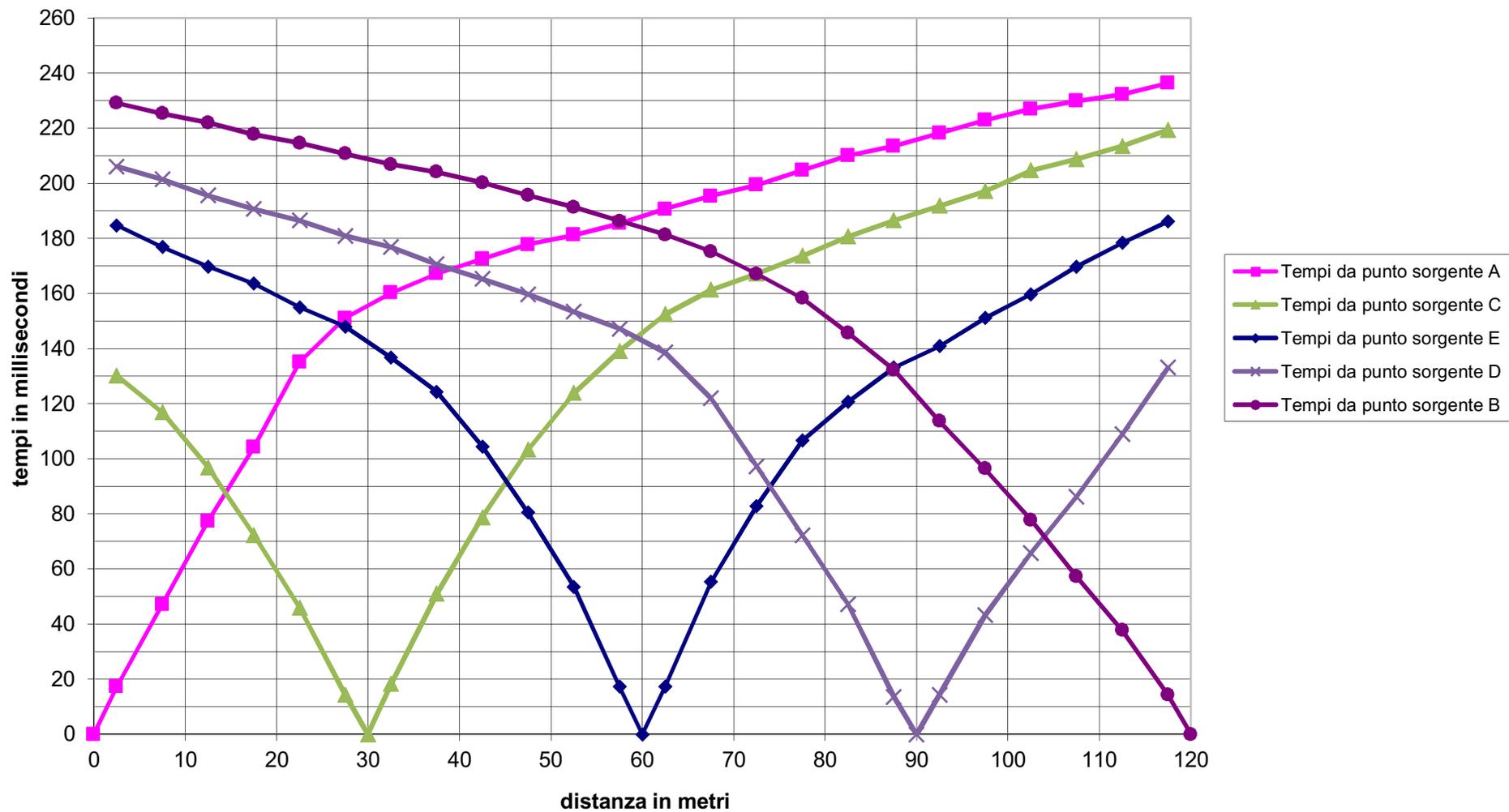
Dromocrone profilo sismico 3 - ONDE TRASVERSALI



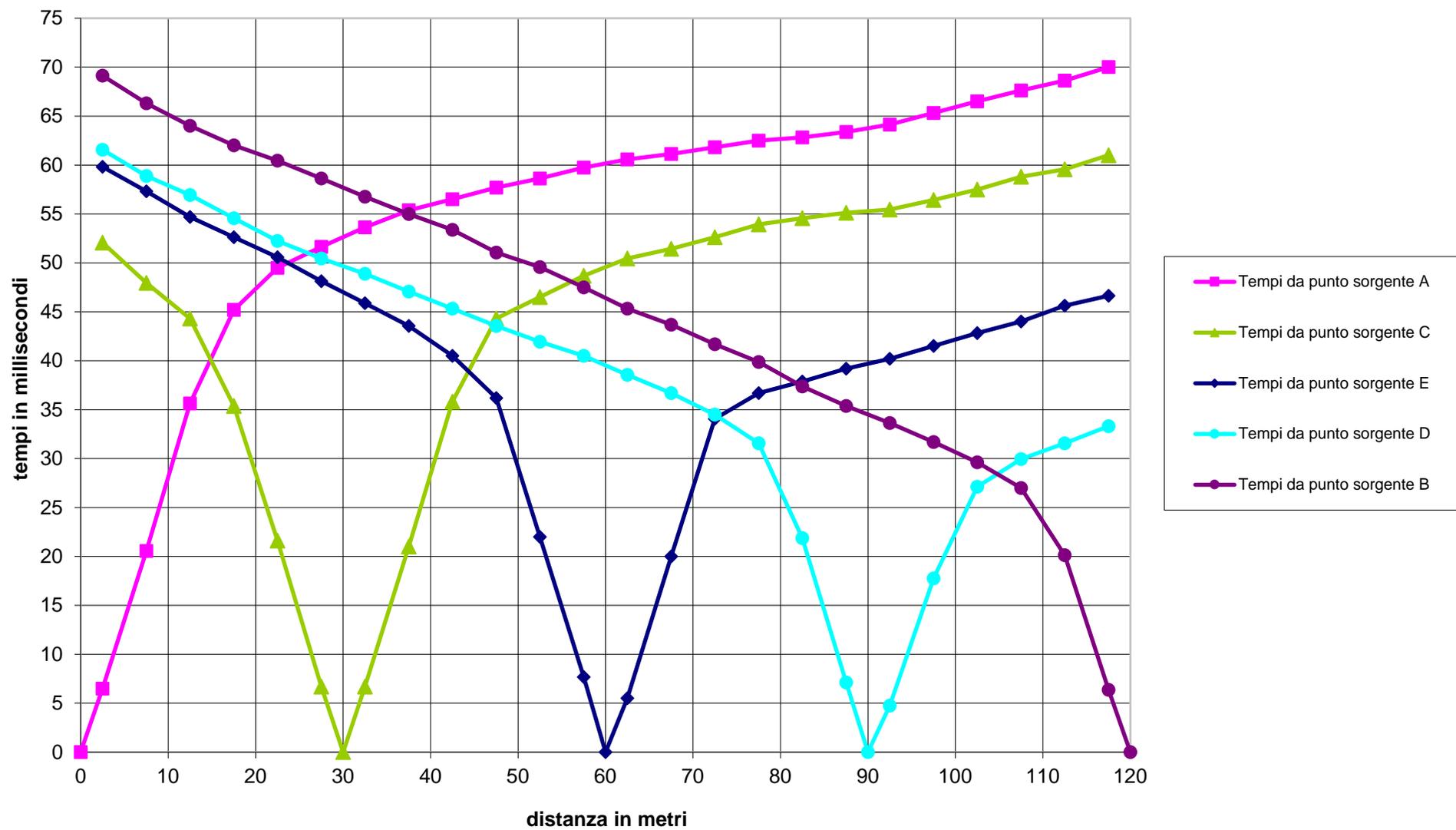
Dromocrone profilo sismico 4 - ONDE LONGITUDINALI



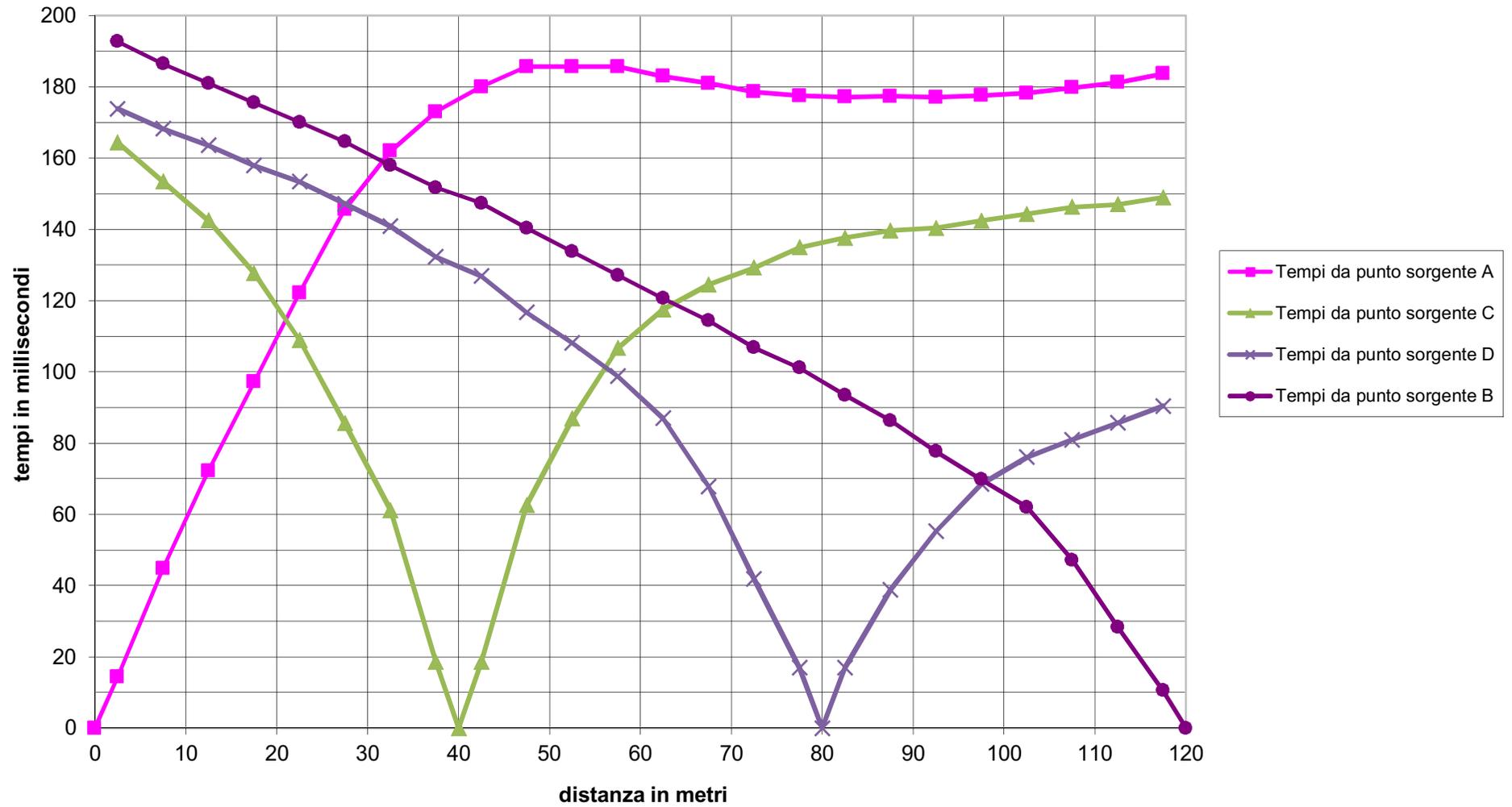
Dromocrone profilo sismico 4 - ONDE TRASVERSALI



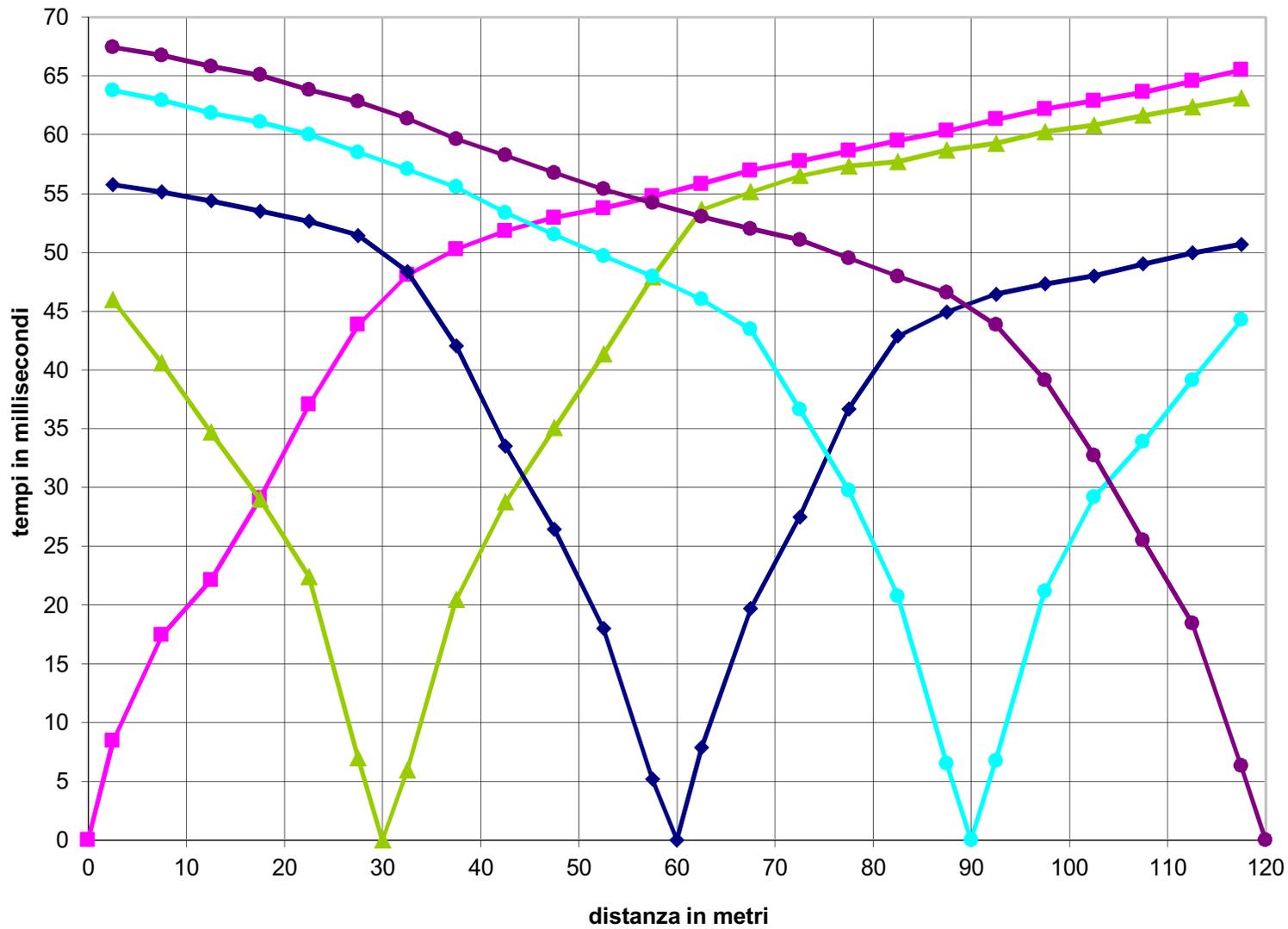
Dromocrone profilo sismico 5 - ONDE LONGITUDINALI



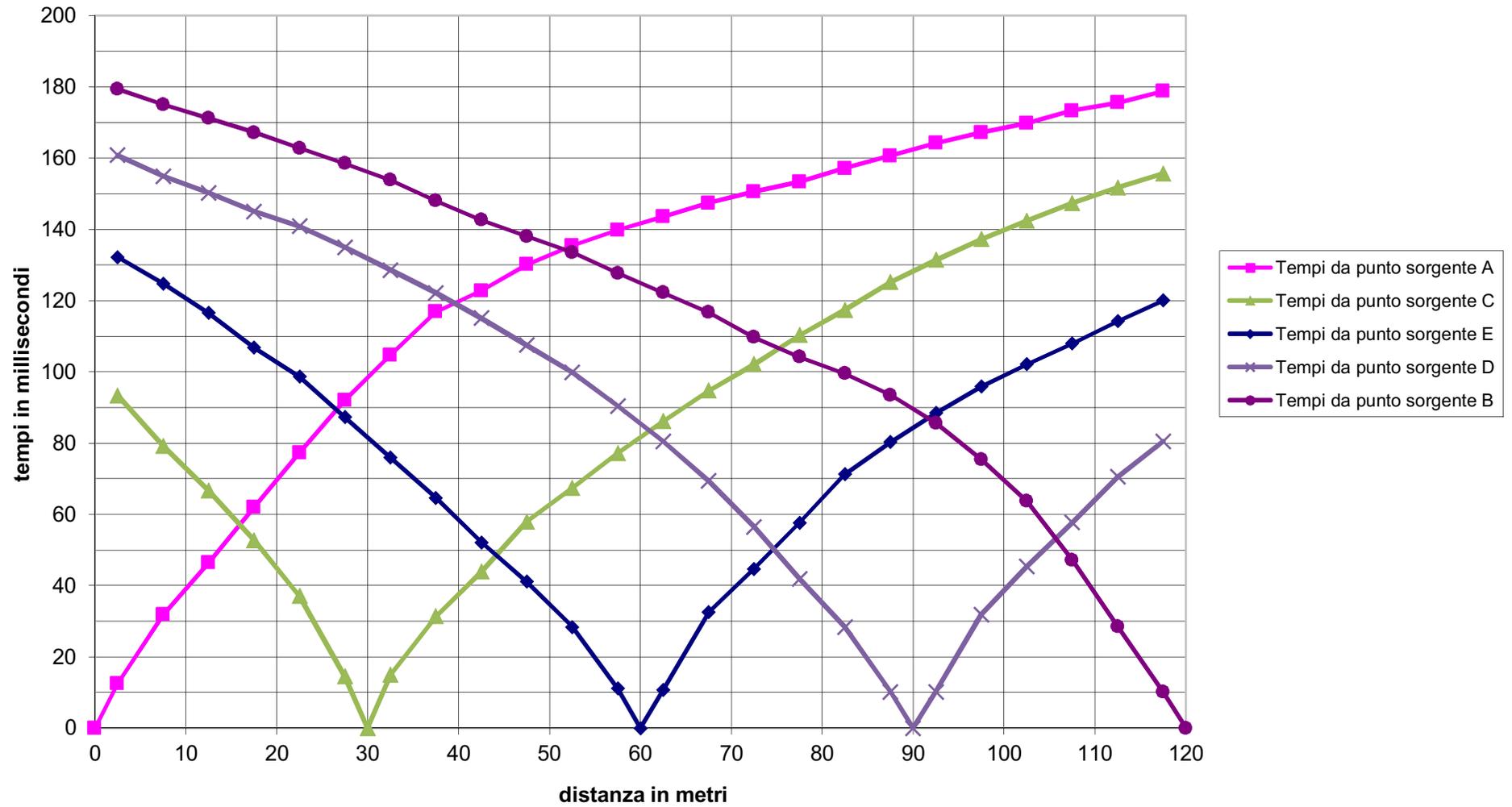
Dromocrone profilo sismico 5- ONDE TRASVERSALI



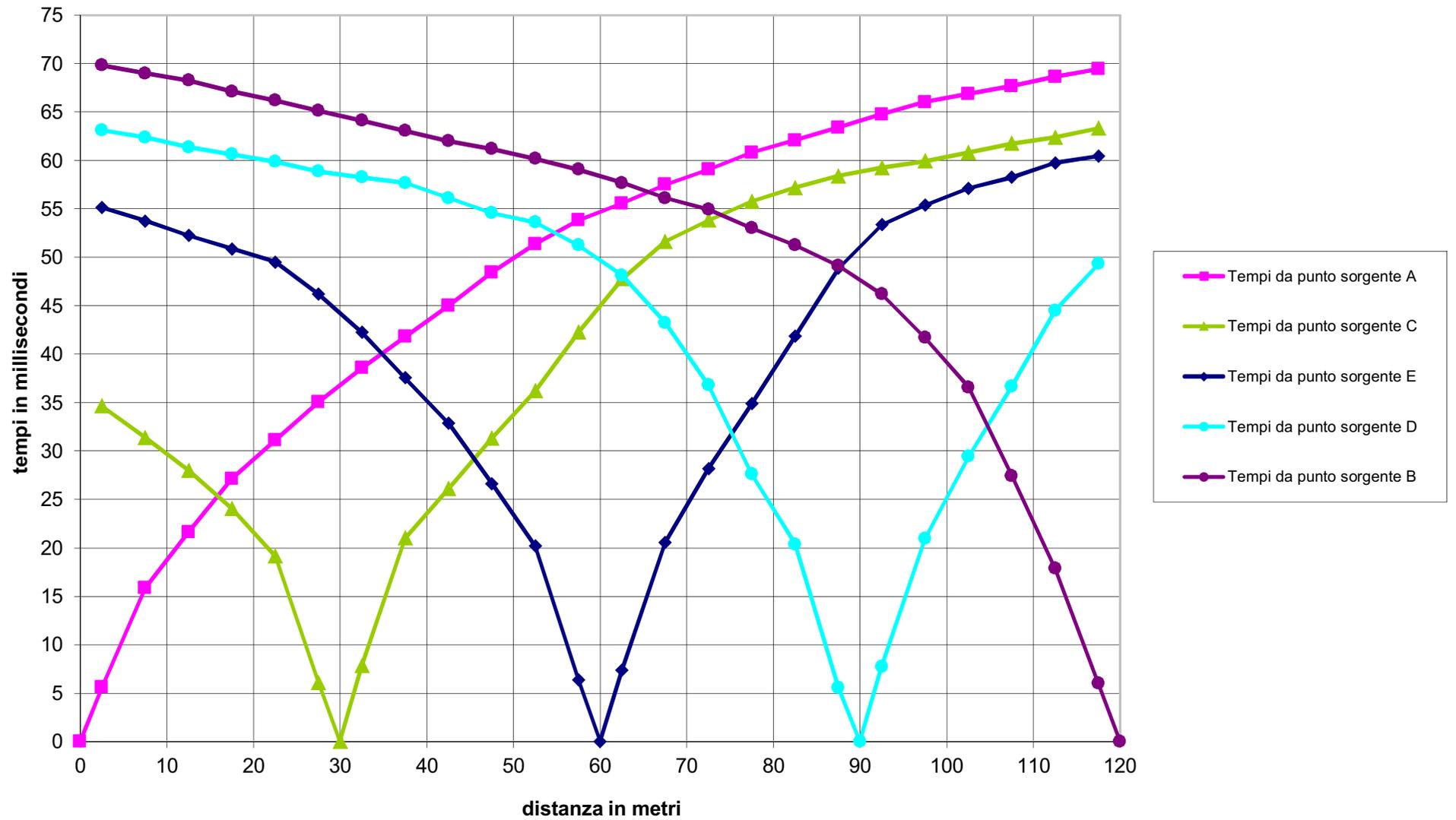
Dromocrone profilo sismico 6 - ONDE LONGITUDINALI



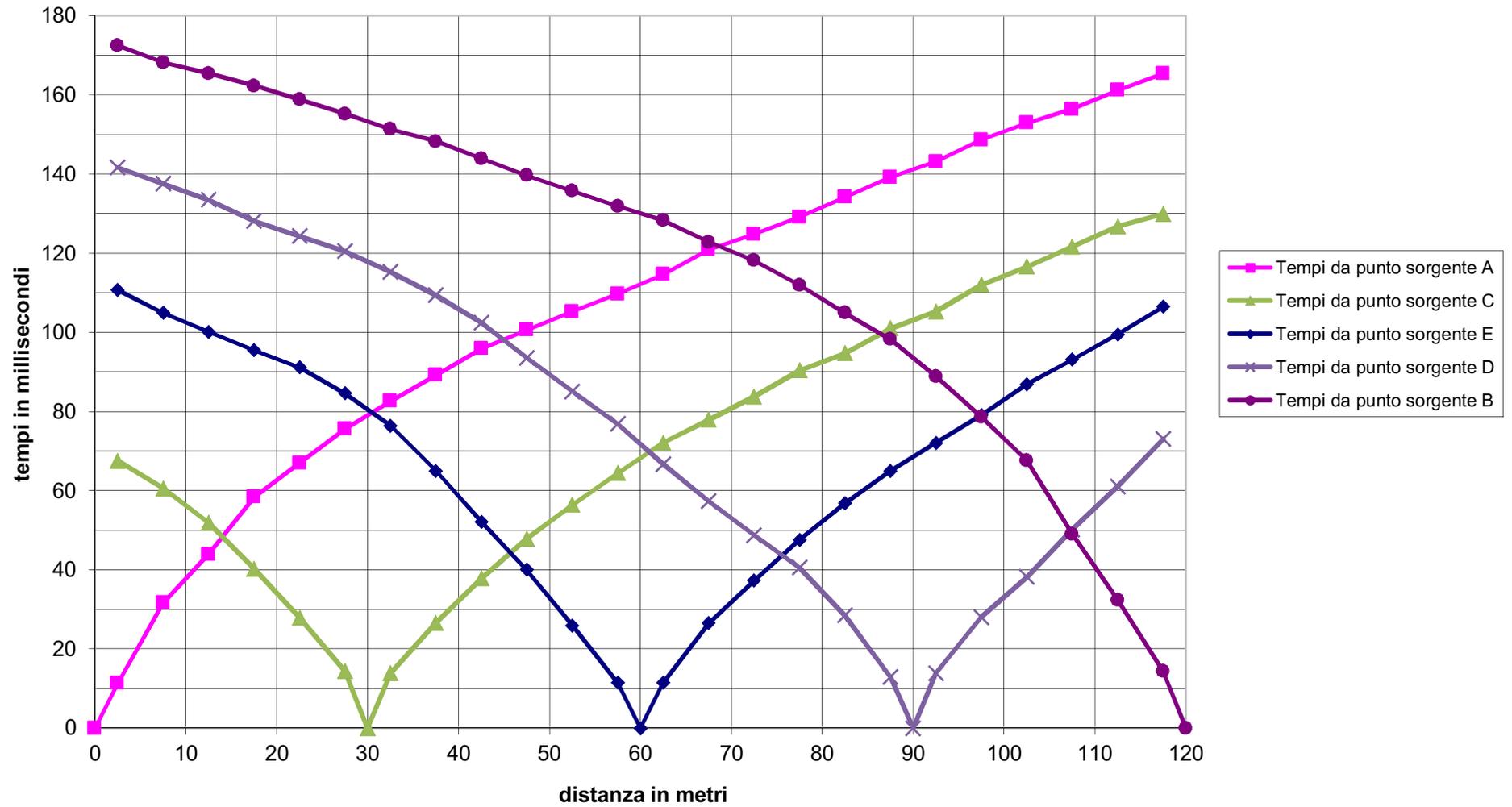
Dromocrone profilo sismico 6- ONDE TRASVERSALI

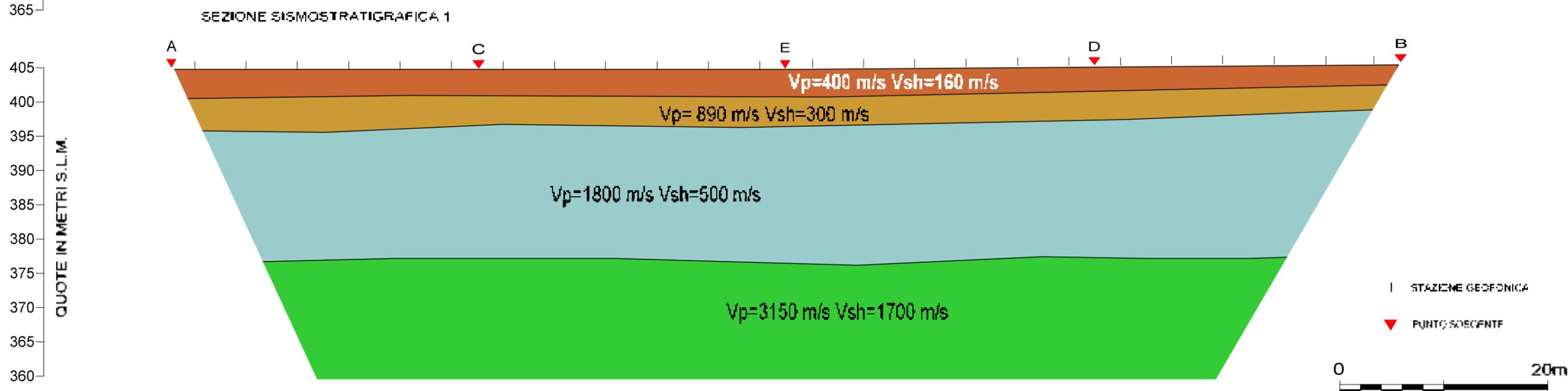
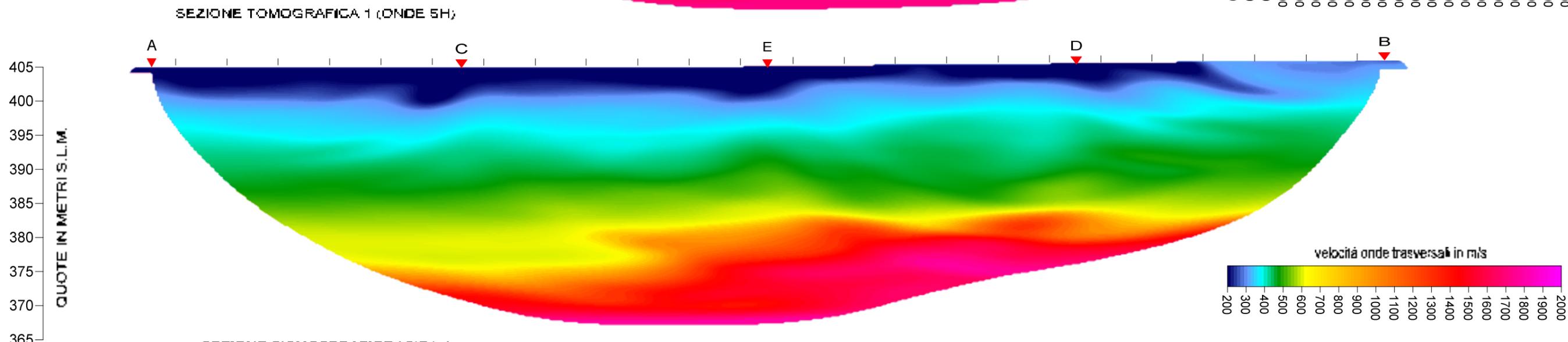
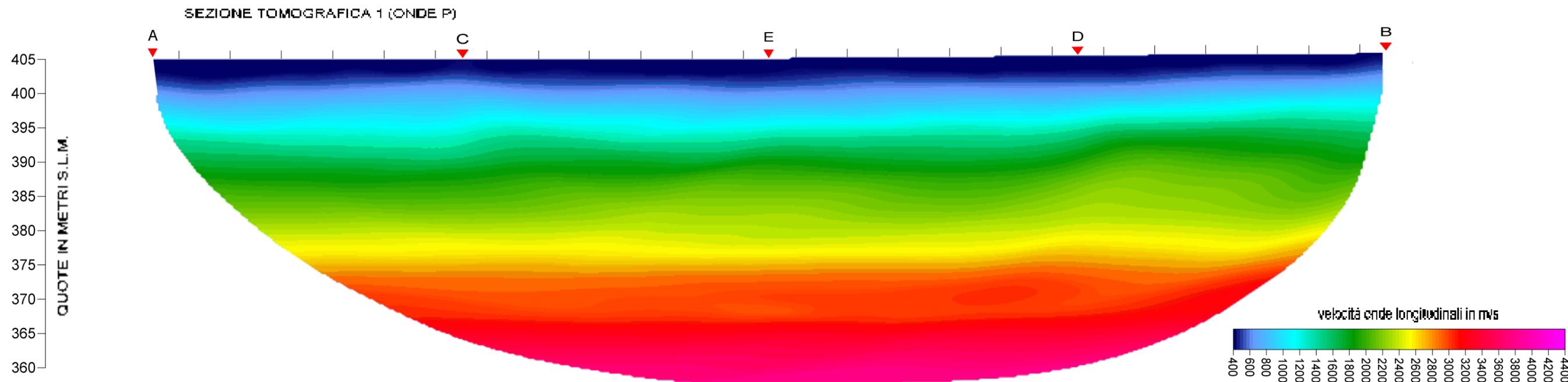


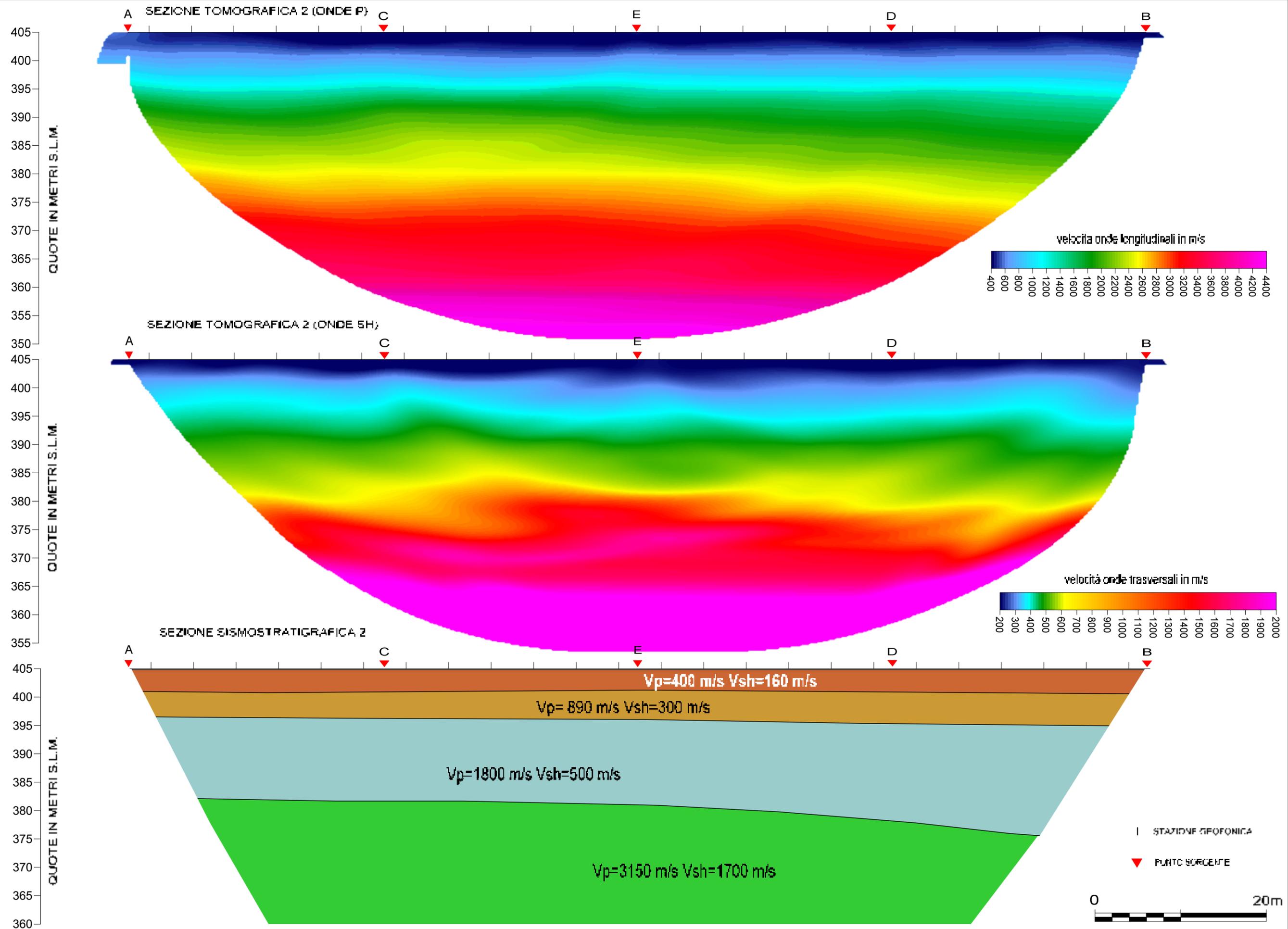
Dromocrone profilo sismico 7 - ONDE LONGITUDINALI

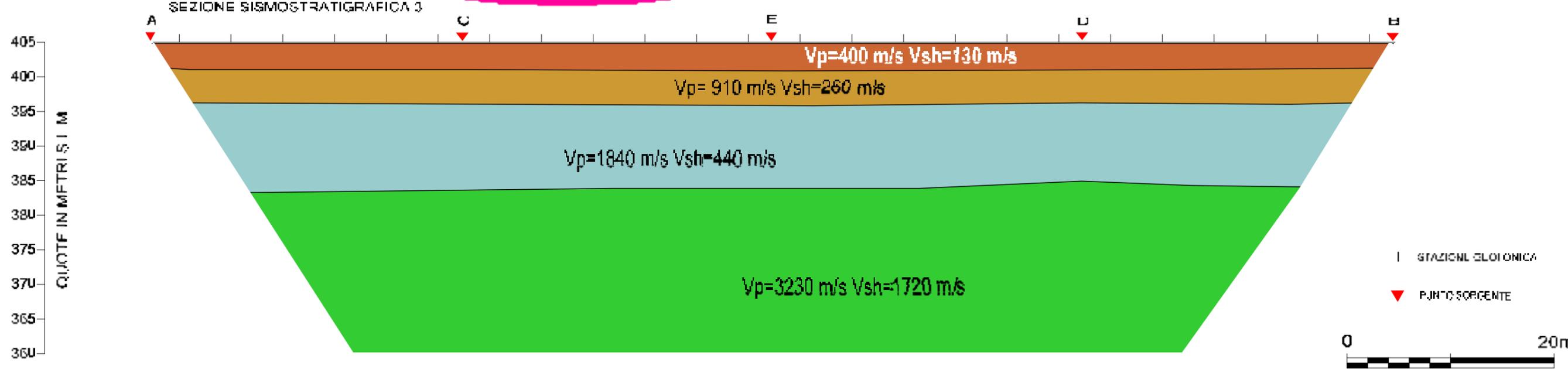
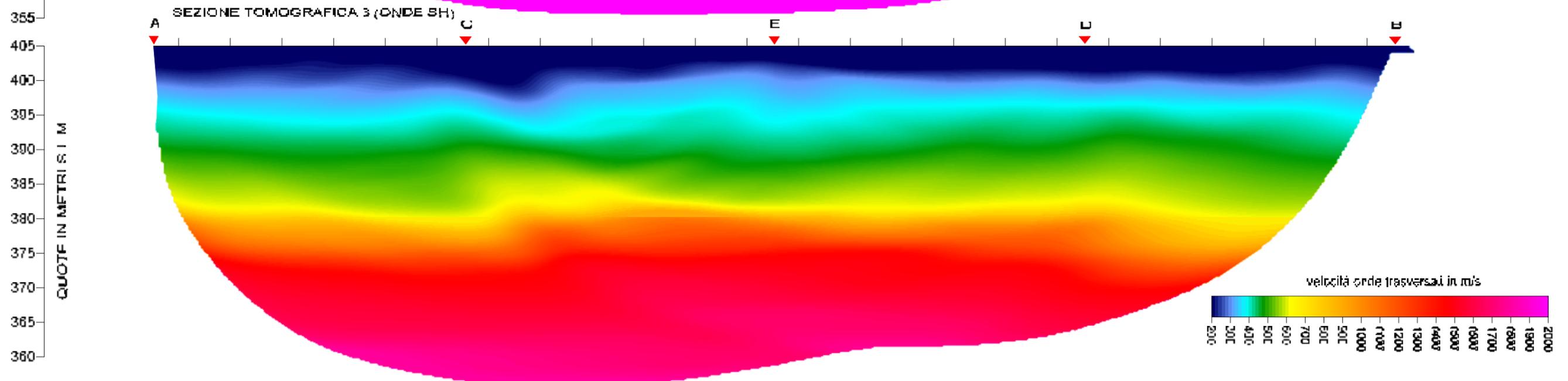
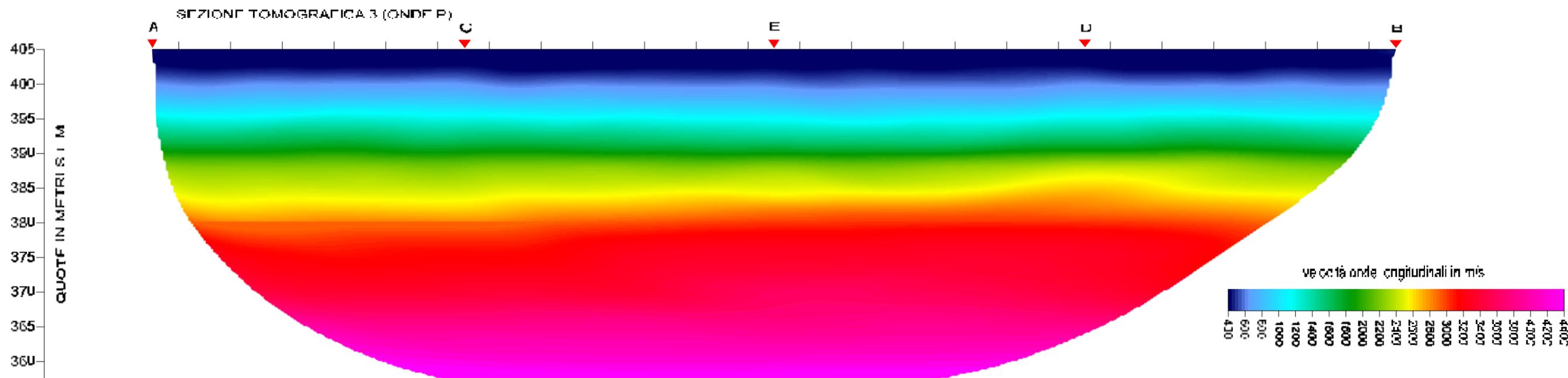


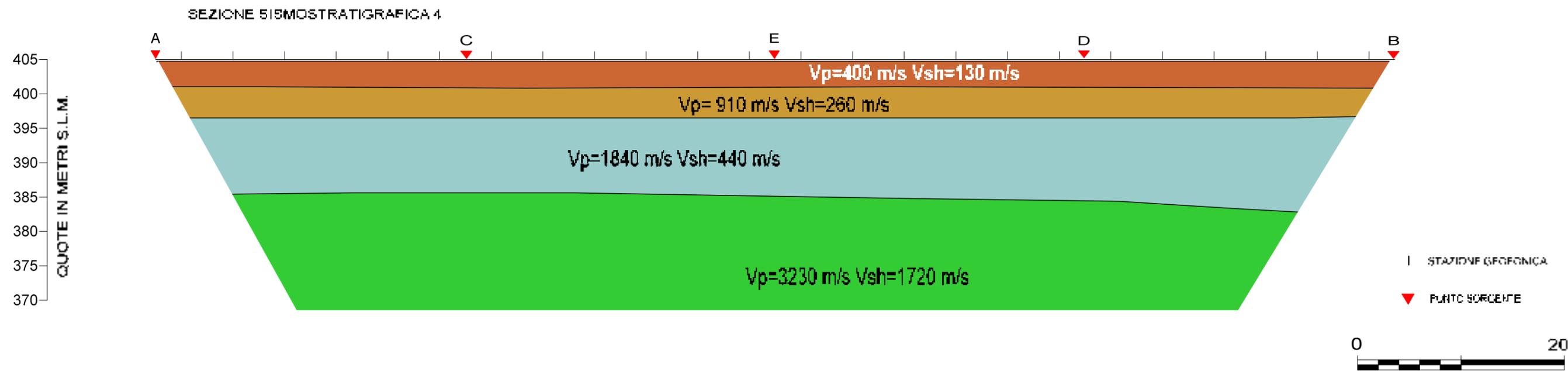
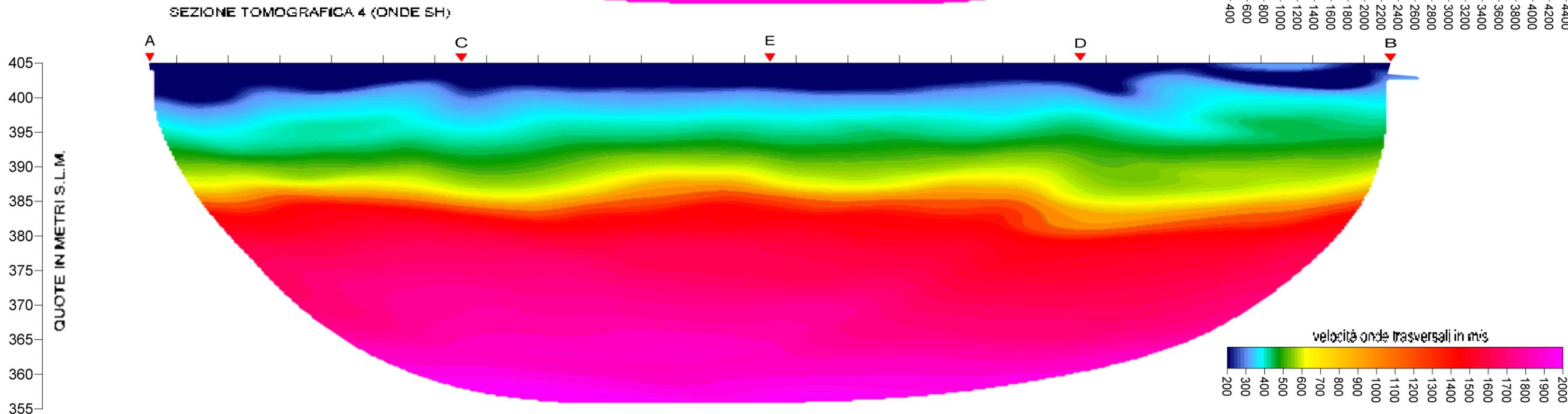
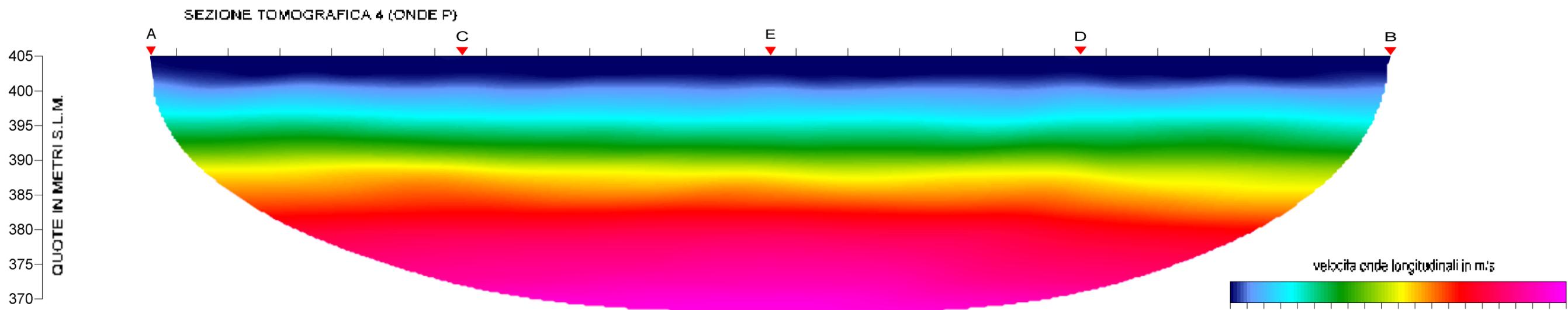
Dromocrone profilo sismico 7- ONDE TRASVERSALI

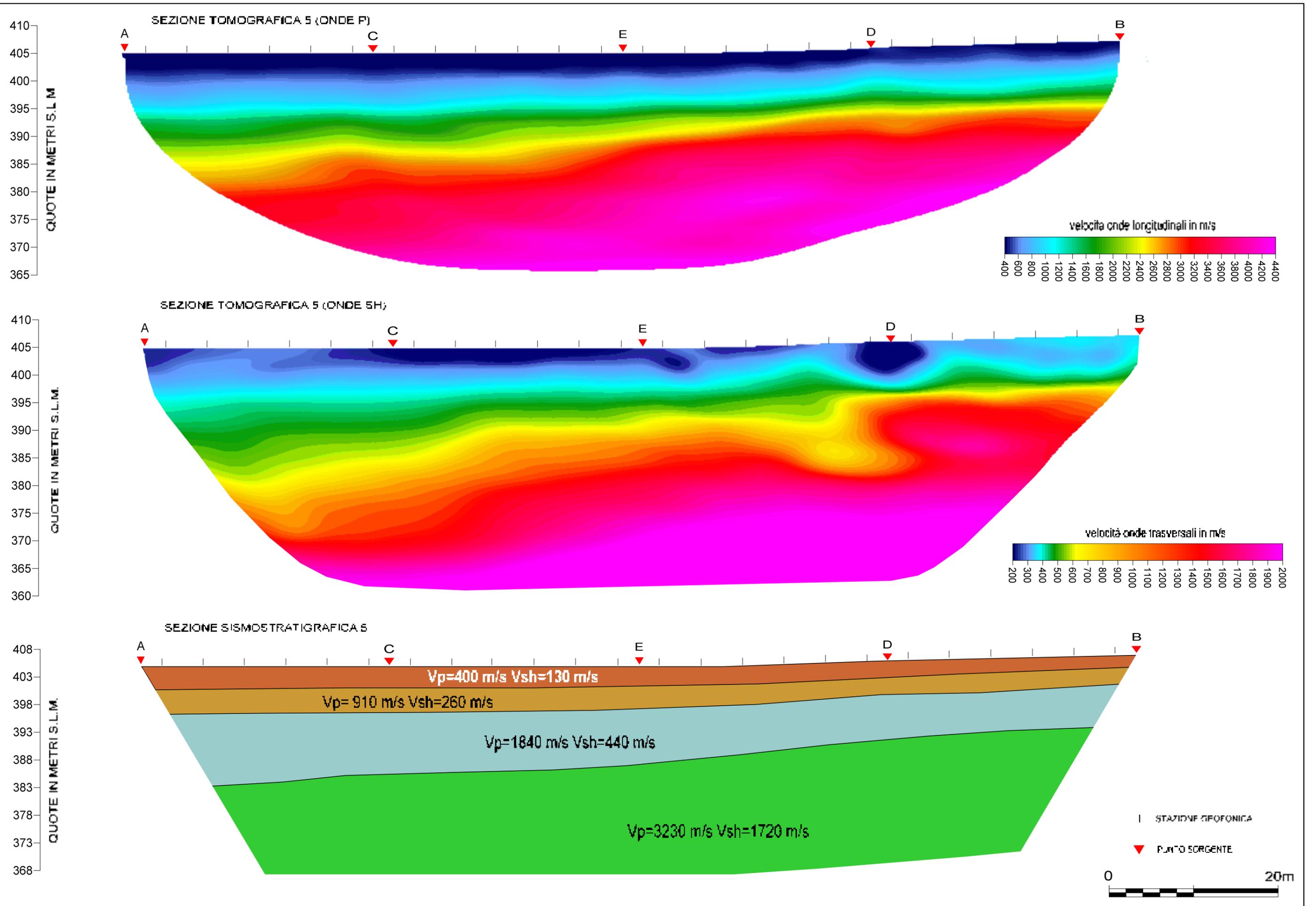


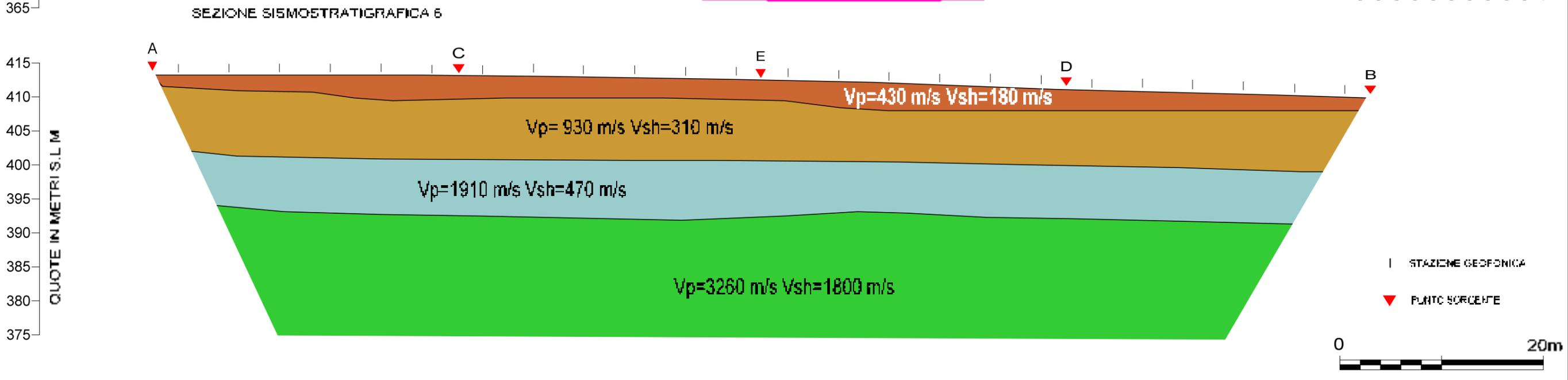
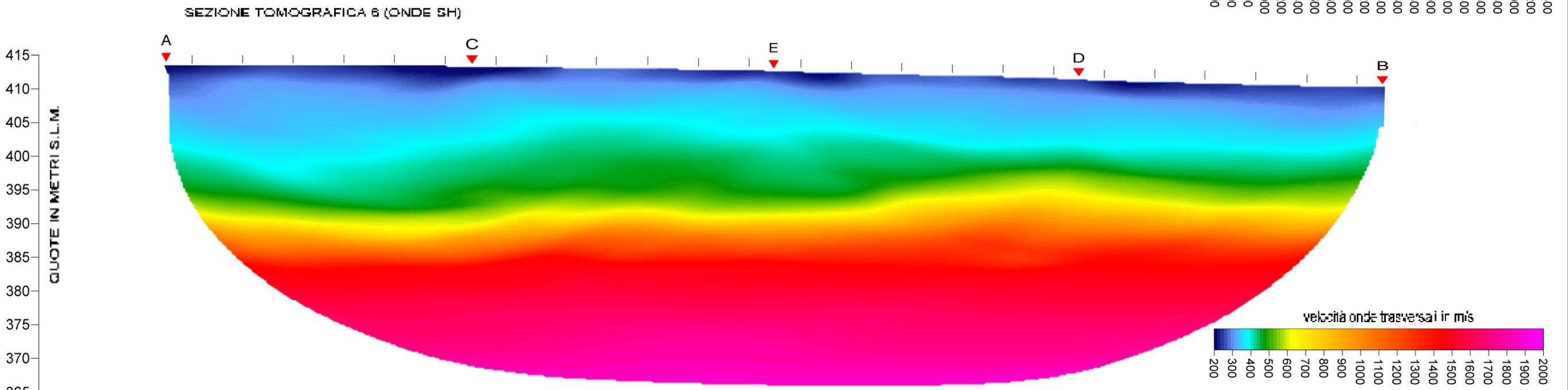
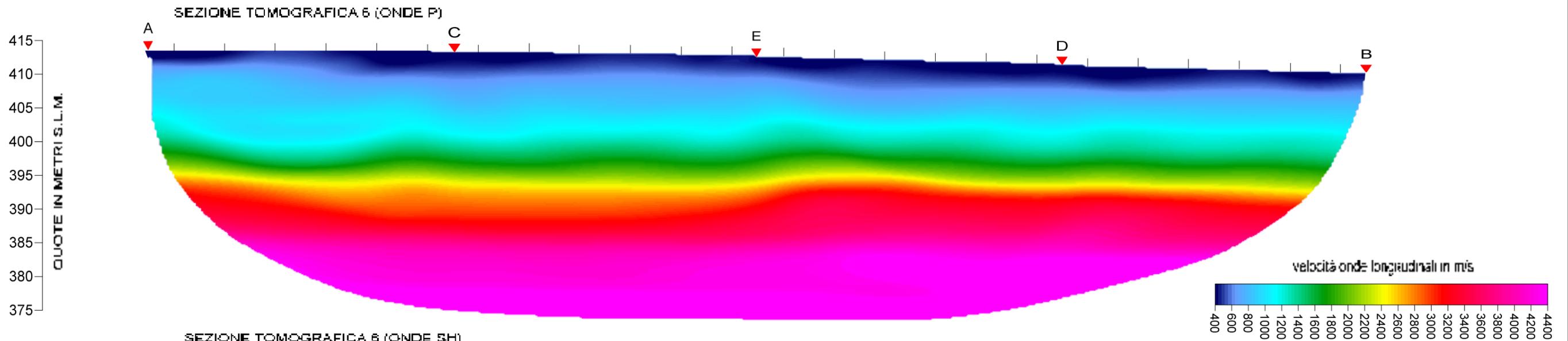


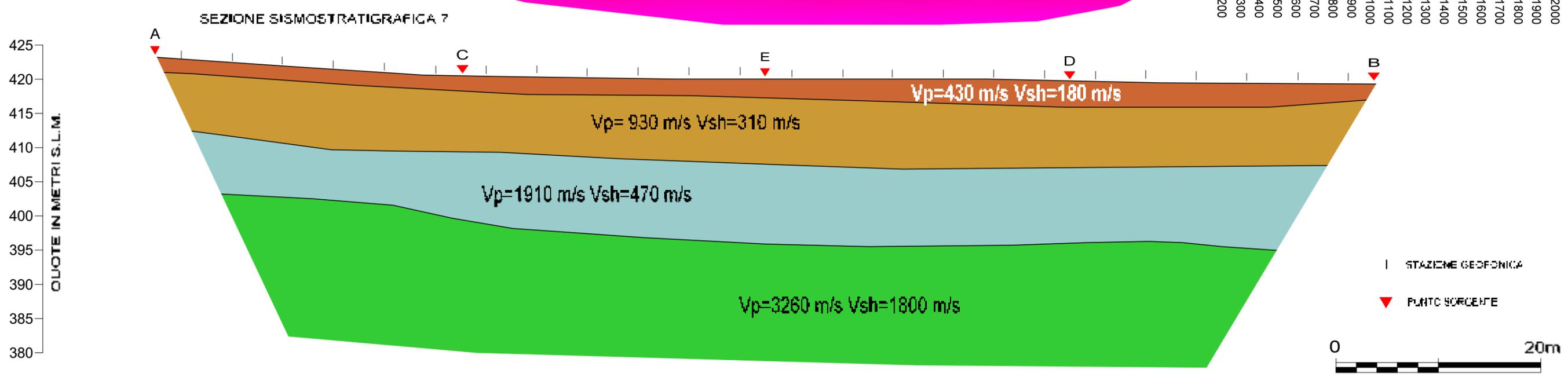
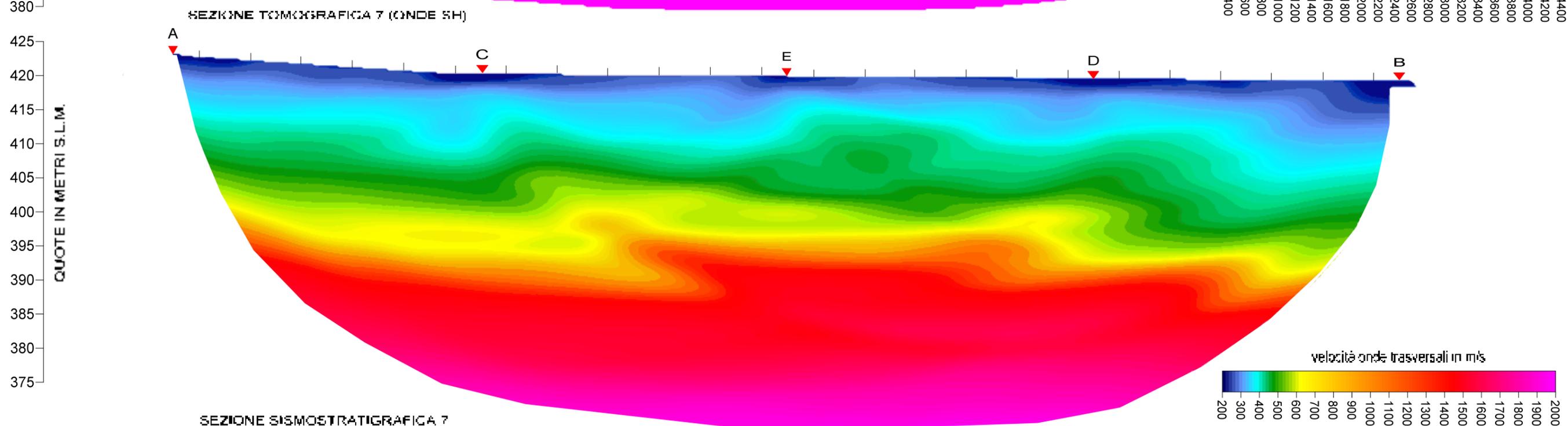
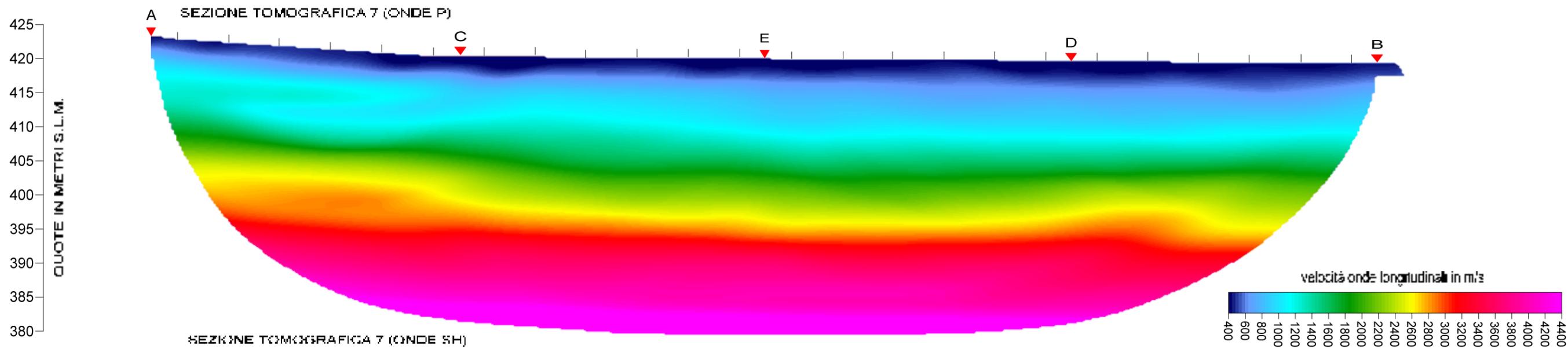




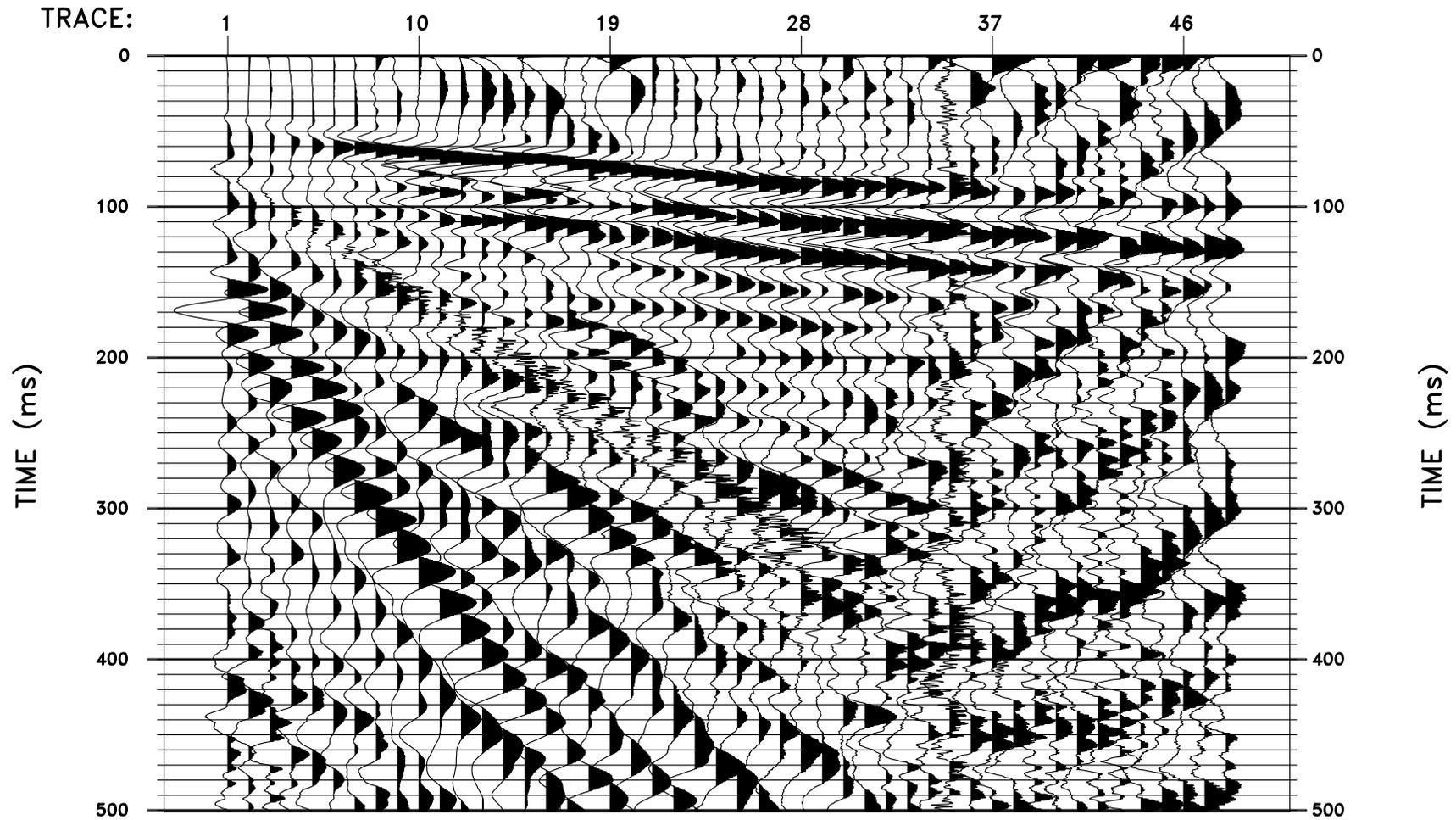




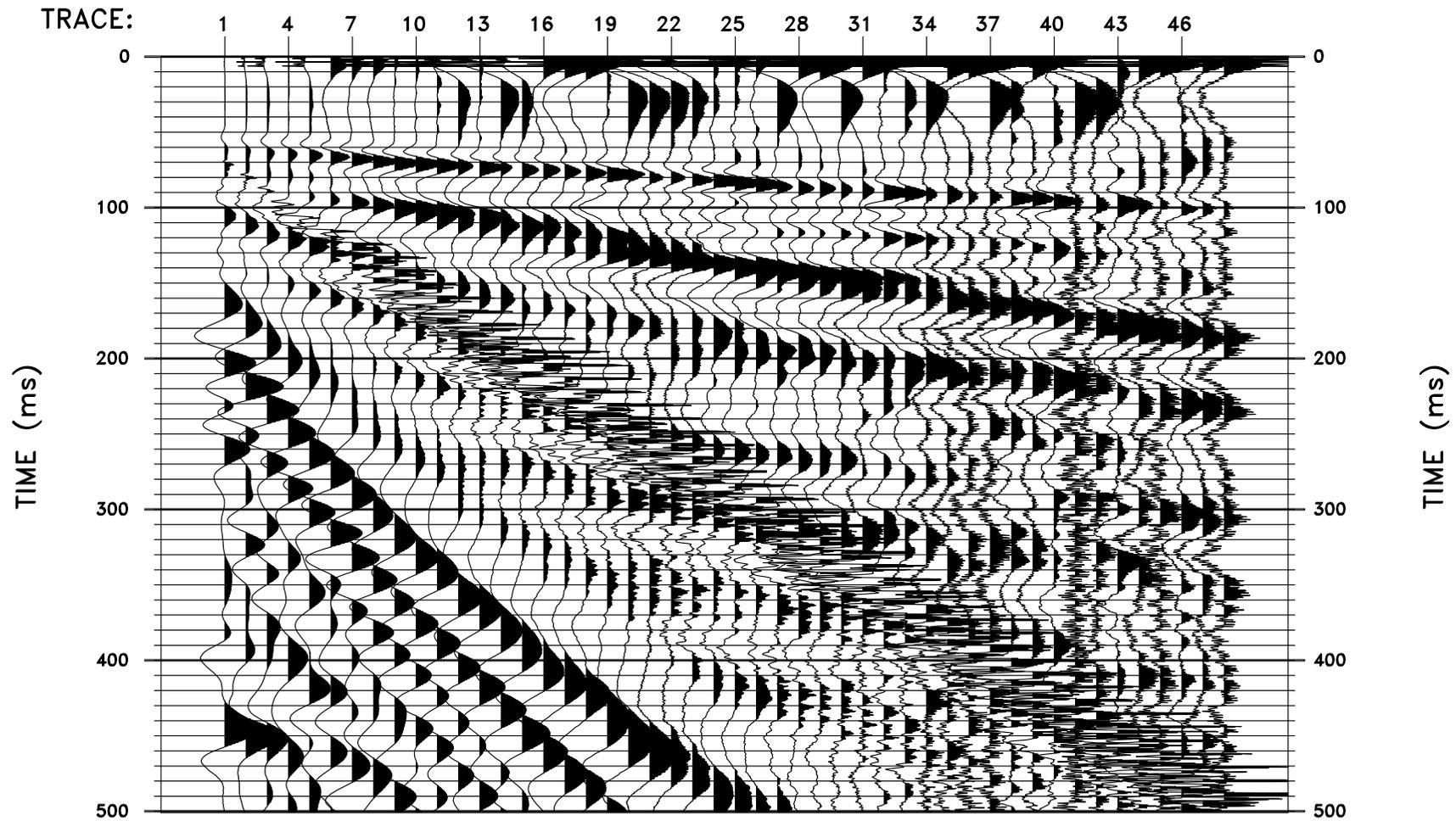




Sismogramma a 48 tracce
Profilo 1 stazione 1

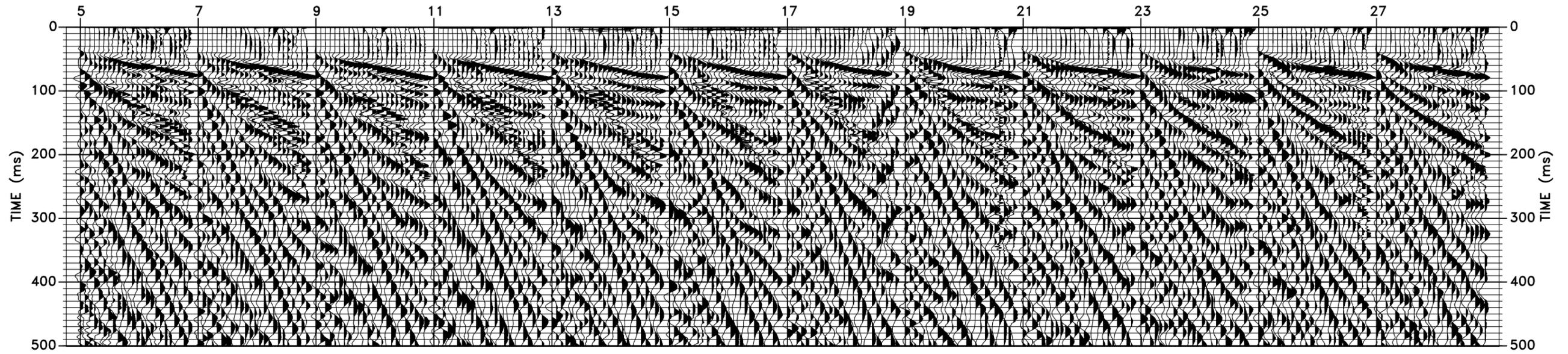


Sismogramma a 48 tracce
Profilo 2 stazione 1

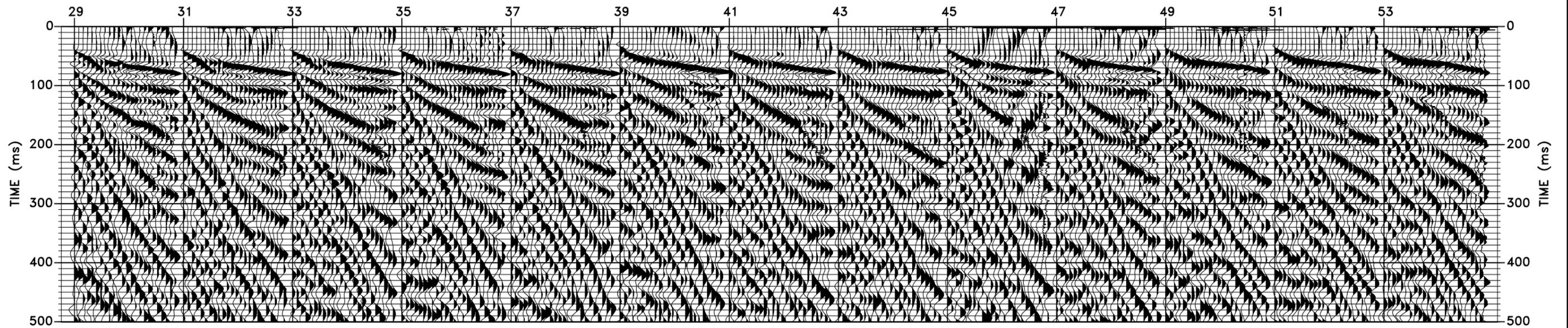


SISMOGRAMMI A 24 TRACCE UTILIZZATI
PER L'ANALISI IN COMMON MID POINT
PROFILO 1

Stazioni sorgente sismica

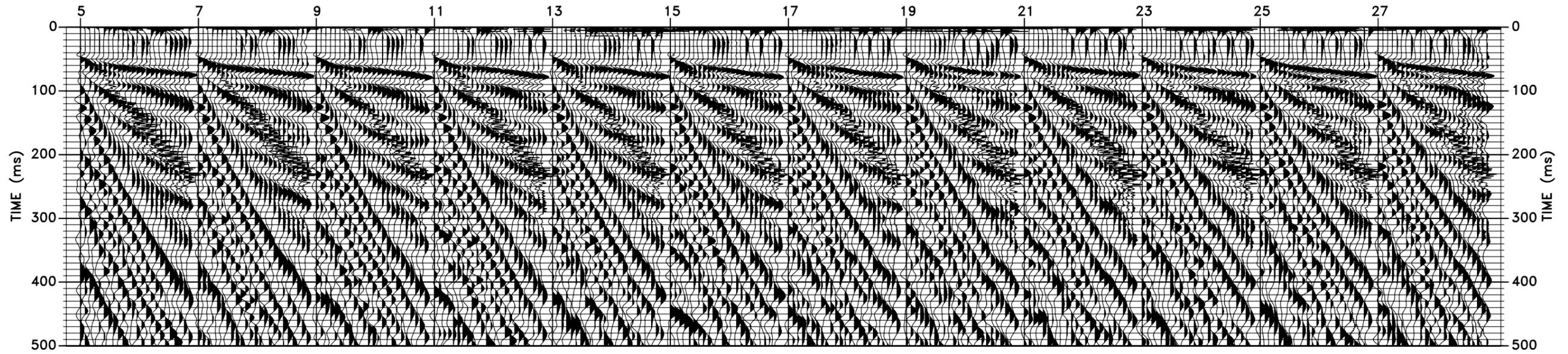


Stazioni sorgente sismica

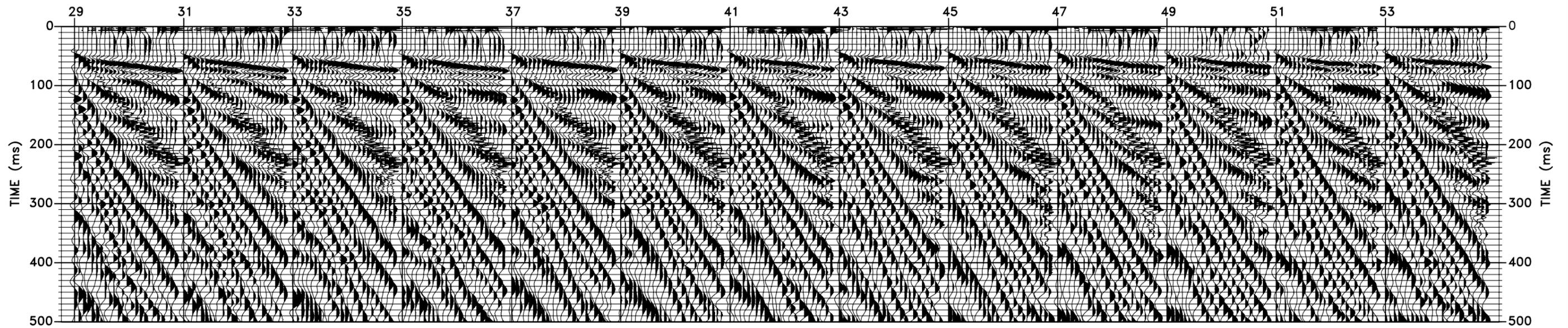


SISMOGRAMMI A 24 TRACCE UTILIZZATI
PER L'ANALISI IN COMMON MID POINT
PROFILO 2

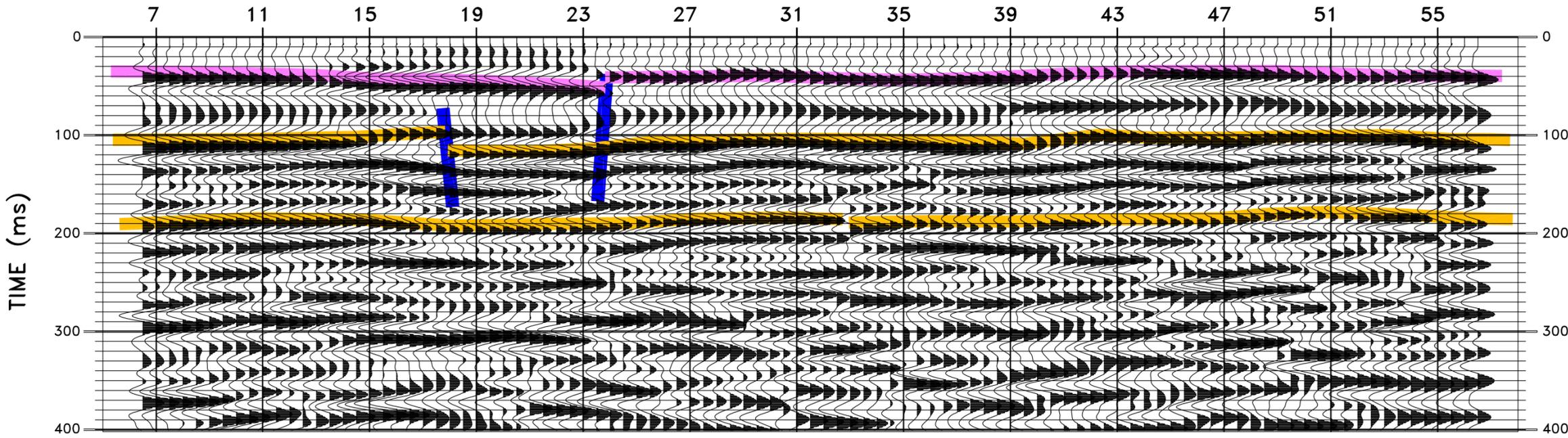
Stazioni sorgente sismica



Stazioni sorgente sismica



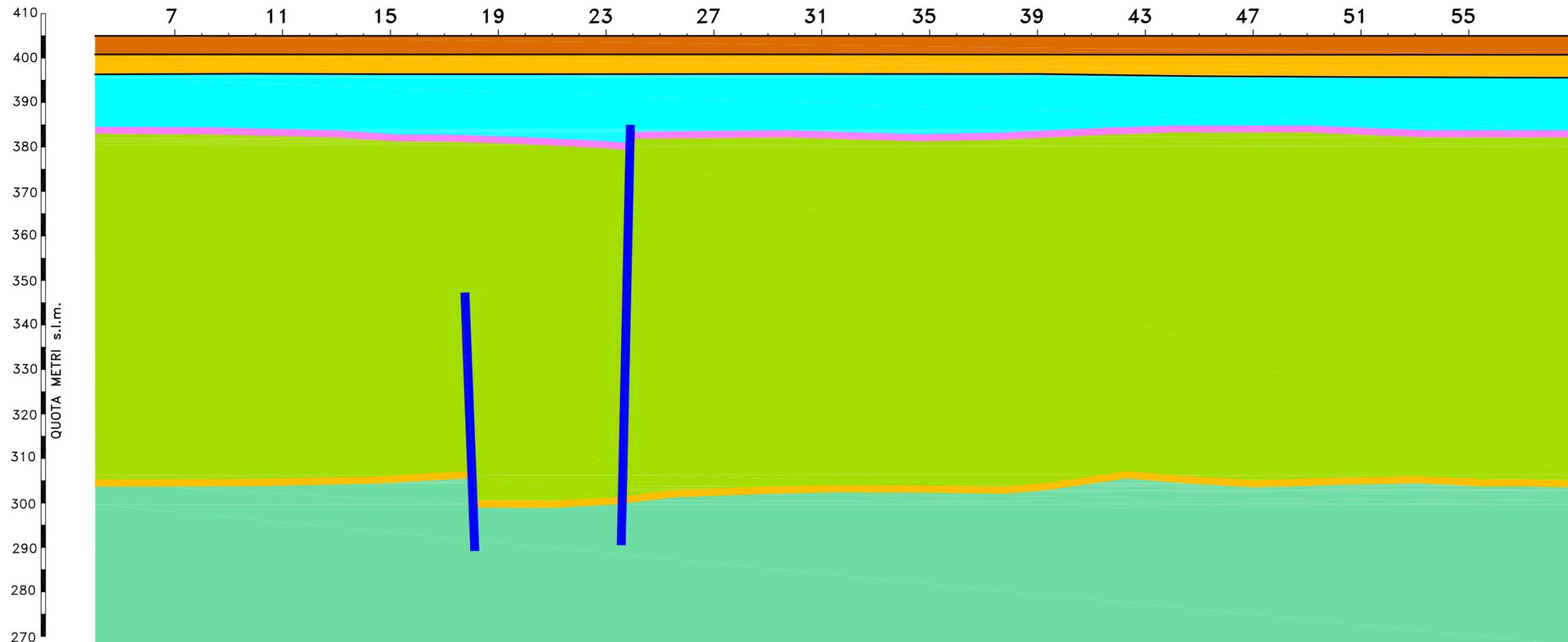
NUMERO STAZIONI



ANALISI PROFILO 2 SISMICA A RIFLESSIONE

SEZIONE TEMPO

NUMERO STAZIONI

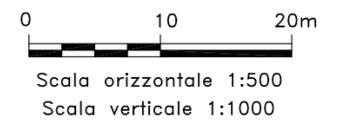


SEZIONE PROFONDITA'

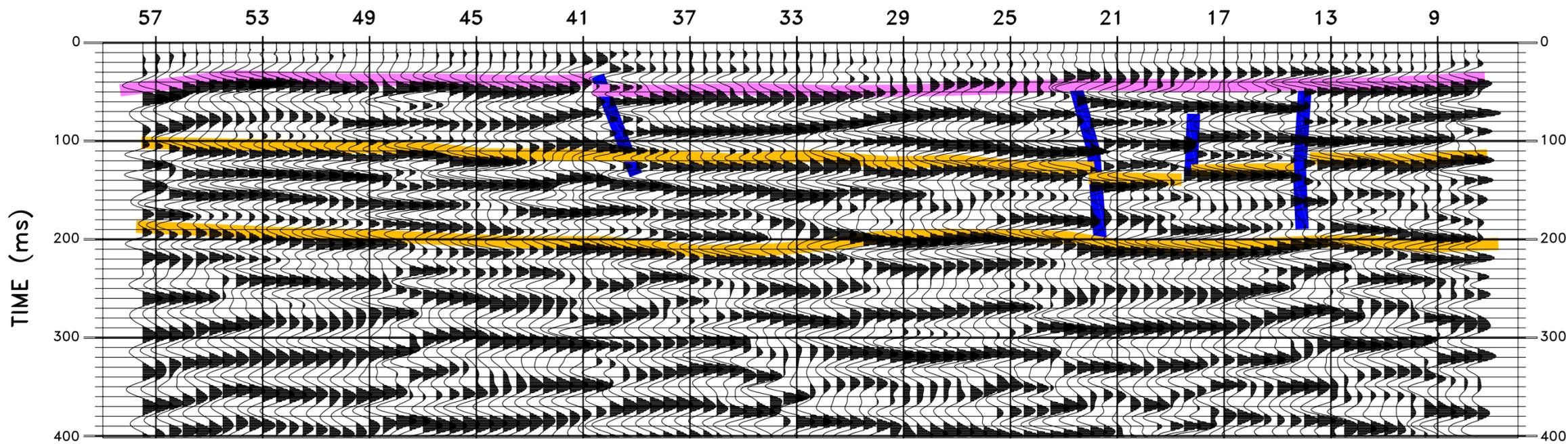
dati estrapolati anche dall'indagine di sismica a rifrazione

LEGENDA

- 24 | Numero stazioni
- Strati riflettenti
- Discontinuità verticale
- Sismostrato $V_p=400$ m/s $V_{sh}=130$ m/s
- Sismostrato $V_p=910$ m/s $V_{sh}=260$ m/s
- Sismostrato $V_p=1840$ m/s $V_{sh}=440$ m/s
- Sismostrato $V_p=3230$ m/s $V_{sh}=1720$ m/s
- Sismostrato $V_p=/>3230$ m/s



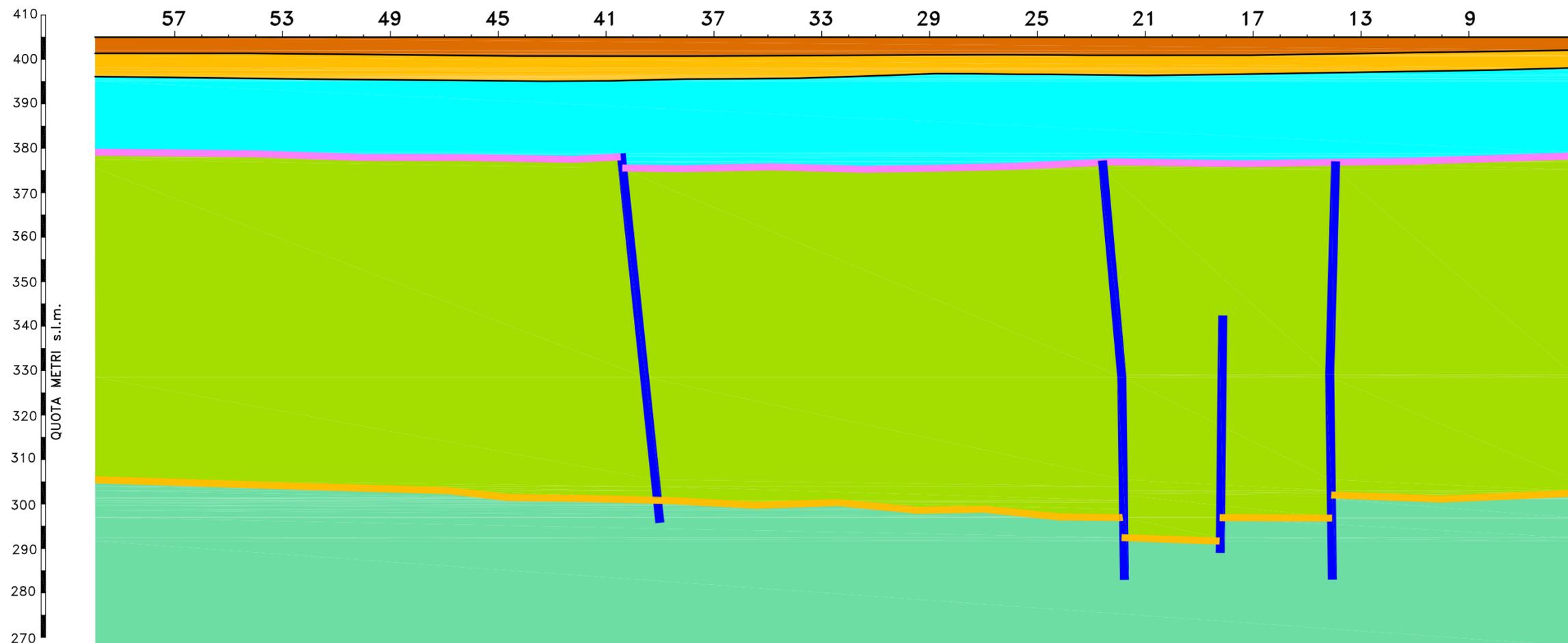
NUMERO STAZIONI



ANALISI PROFILO 1 SISMICA A RIFLESSIONE

SEZIONE TEMPO

NUMERO STAZIONI

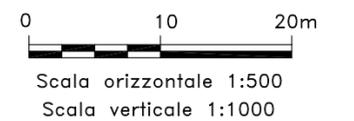


SEZIONE PROFONDITA'

dati estrapolati anche dall'indagine di sismica a rifrazione

LEGENDA

- 24 | Numero stazioni
- Yellow bar | Strati riflettenti
- Blue line | Discontinuità verticale
- Brown bar | Sismostrato $V_p=400$ m/s $V_{sh}=160$ m/s
- Yellow bar | Sismostrato $V_p=890$ m/s $V_{sh}=300$ m/s
- Cyan bar | Sismostrato $V_p=1800$ m/s $V_{sh}=500$ m/s
- Green bar | Sismostrato $V_p=3150$ m/s $V_{sh}=1700$ m/s
- Light green bar | Sismostrato $V_p \geq 3150$ m/s



DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE LONGITUDINALI (ONDE P) TRASVERSALI (ONDE SH) E SISMICA A RIFLESSIONE



Energizzazione onde longitudinale (Onde P) con generatore ad energia propulsiva di onde sismiche "Peg40" (Profilo 1 sismica a riflessione)



Acquisizione dati misure sismiche (Profilo 1 sismica a riflessione)



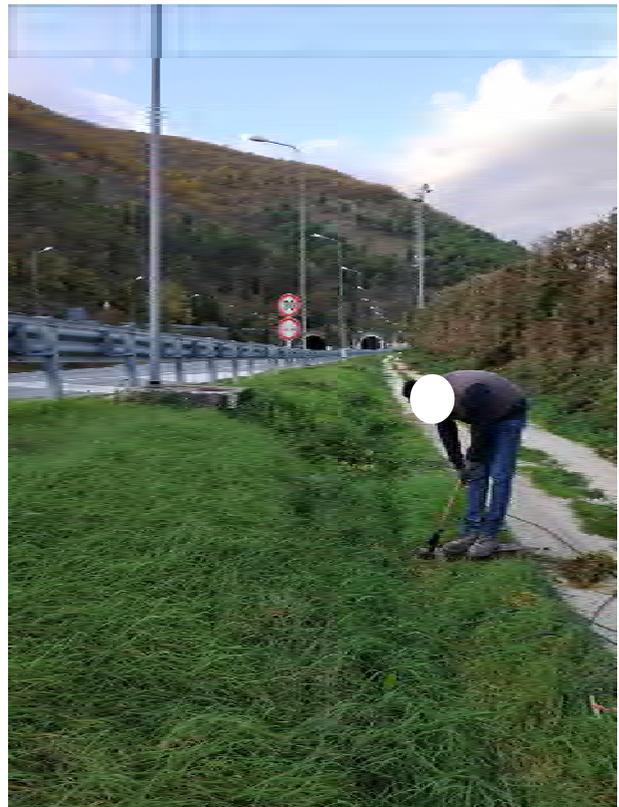
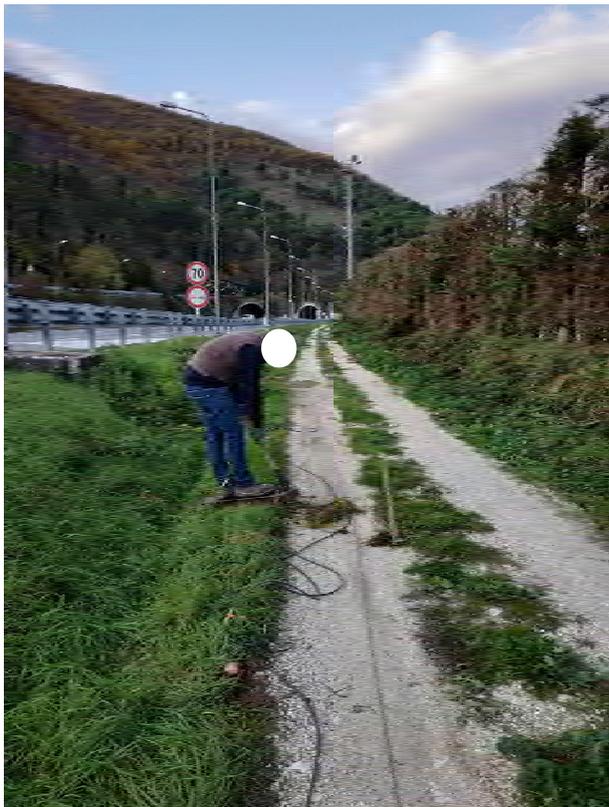
Energizzazione con mazza battente onde longitudinale (Onde P)- (Profilo 1 sismica a rifrazione)



Energizzazione con mazza battente onde trasversali (Onde Sh)-(Profilo 1 sismica a rifrazione)



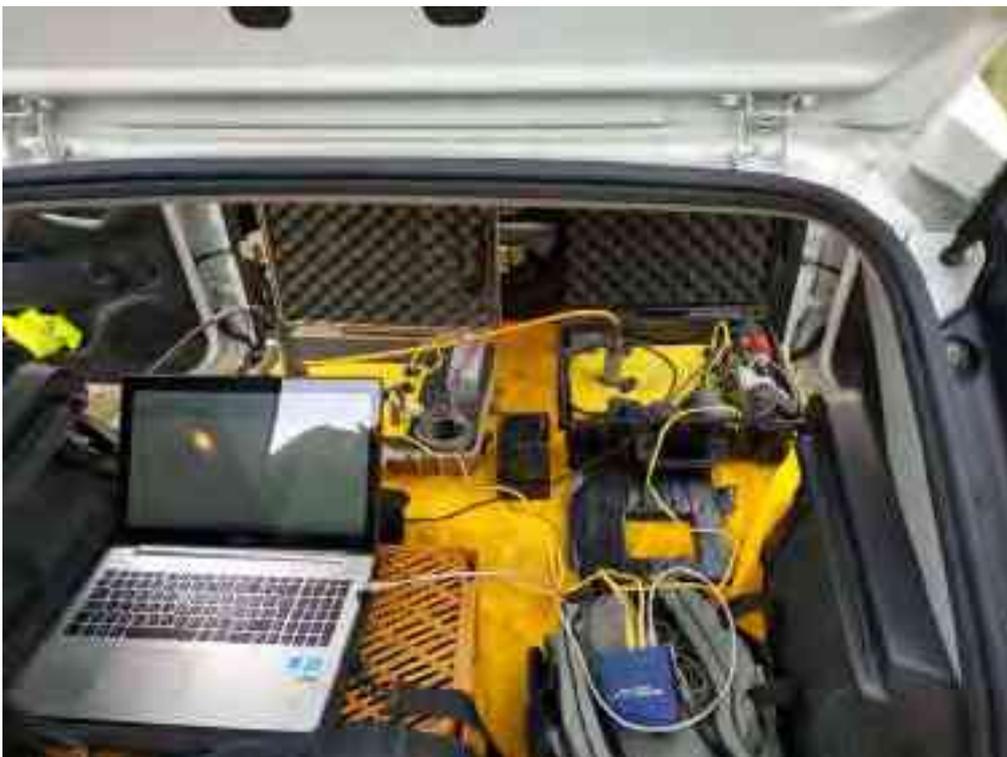
Energizzazione con mazza battente onde longitudinale (Onde P)-(Profilo 2 sismica a rifrazione)



Energizzazione con mazza battente onde trasversali (Onde Sh)-(Profilo 2 sismica a rifrazione)



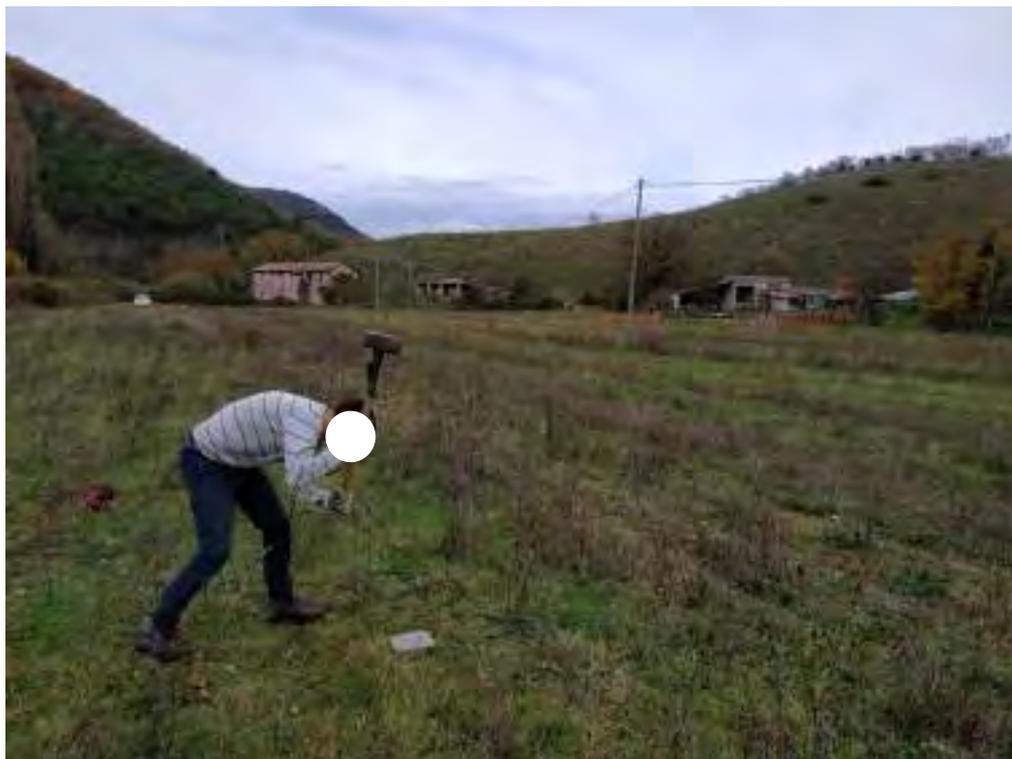
Energizzazione onde longitudinale (Onde P) con generatore ad energia propulsiva di onde sismiche "Peg40" (Profilo 2 sismica a riflessione)



Acquisizione dati misure sismiche (Profilo 2 sismica a riflessione)



Energizzazione con mazza battente onde trasversali (Onde Sh)-(Profilo 3 sismica a rifrazione)



Energizzazione con mazza battente onde longitudinale (Onde P)- (Profilo 4 sismica a rifrazione)



Energizzazione con mazza battente onde trasversali (Onde Sh)-(Profilo 3 sismica a rifrazione)



Acquisizione dati misure sismiche (Profilo 6 sismica a rifrazione)



Energizzazione con mazza battente onde longitudinale (Onde P)- (Profilo 6 sismica a rifrazione)



Energizzazione con mazza battente onde trasversali (Onde Sh)-(Profilo 6 sismica a rifrazione)



Energizzazione con mazza battente onde longitudinale (Onde P)- (Profilo 7 sismica a rifrazione)



Energizzazione con mazza battente onde trasversali (Onde Sh)-(Profilo 7 sismica a rifrazione)

LABORATORIO MATERIALI DA COSTRUZIONE
LABORATORIO TERRE E ROCCE
INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE

GEOPROVE S.R.L.

COMUNE DI RIETI

PROVINCIA DI RIETI

COMMITTENTE: ACEA ELABORI S.P.A.

**INDAGINI GEOGNOSTICHE FINALIZZATE ALLA
PROGETTAZIONE DEL NUOVO TRONCO SUPERIORE
DELL'ACQUEDOTTO DEL PESCHIERA
CONTRATTO QUADRO N. 3900005591**

Ruffano, Giugno 2019

IL DIRETTORE TECNICO
Dott. Geol. Marcello DE DONATIS

Autenticazione elettronica del documento e verifica presso
il tribunale di Cassazione n. 134/215 del 12 giugno 2019.

Autenticazione elettronica del documento e verifica presso il tribunale
di Cassazione n. 134/215 del 12 giugno 2019.



GEOPROVE S.R.L. P. IVA 03940380730 • Capitale Sociale € 500.000,00 • Iscrizione alla CODA 255978

Sede Sociale e Laboratorio Terre e Rocce Via Il Gigante 2, 73049 Ruffano (FG) • Laboratorio Materiali Via Benedetto Fabiani snc 217049 Ruffano (FG) •

Ufficio Sede Via Clavio, Zona Industriale Sacco, 73010 (Acquafredda) • Telefono Fax 0873 492992 • Cell. 329 334 9093 | www.geoprove.it • info@geoprove.it

Indice

1	PREMESSA	2
2	Misure GPS	3
3	PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE.....	4
3.1	Cenni sulla metodologia di sismica a rifrazione.....	4
3.2	Metodo adottato.....	6
3.3	Tomografia Sismica.....	9
3.4	Attrezzature e tecniche operative.....	10
4	PROSPEZIONE SISMICA A RIFLESSIONE.....	11
4.1	Cenni sulla metodologia di sismica a riflessione.....	11
4.2	Principi Generali.....	12
4.3	Configurazione adottata.....	16
4.4	Attrezzature utilizzate.....	17
4.5	Data Processing.....	17
4.5.1	Correzione statica dei Tempi sulle Tracce.....	17
4.5.2	Analisi Spettrale.....	18
4.5.3	Filtraggio di Frequenza.....	18
4.5.4	Muting.....	19
4.5.5	Analisi di Velocità.....	19
4.5.6	Filtraggio di Velocità.....	19
4.5.7	Deconvoluzione.....	20

ALLEGATI

Ubicazione aree d’indagine (da CTR) - scala 1:40.000

Allegato indagine sismica sito Acea-centrale

Allegato indagine sismica sito Micciani

Allegato indagine sismica sito R2

Allegato indagine sismica sito R4

1 PREMESSA

Per incarico conferito alla “GEOPROVE S.r.l.” da “ACEA ELABORI S.P.A.” è stata eseguita una campagna di prospezioni sismiche nell’ambito delle **“INDAGINI GEOGNOSTICHE FINALIZZATE ALLA PROGETTAZIONE DEL NUOVO TRONCO SUPERIORE DELL’ACQUEDOTTO DEL PESCHIERA – CONTRATTO QUADRO N. 3900005591”**.

Sono stati indagati complessivamente 4 siti differenti, la cui ubicazione è riportata nell’allegato in scala 1:40.000. Per ogni sito si elencano le indagini effettuate:

Sito Acea-centrale – 4 profili sismici a rifrazione in onde P;

Sito Micciani – 1 profilo sismico a rifrazione in onde P ed 1 profilo sismico a riflessione;

Sito R2 – 2 profili sismici a rifrazione in onde P ed Sh e 1 profilo sismico a riflessione;

Sito R4 – 2 profili sismici a rifrazione in onde P ed Sh e 1 profilo sismico a riflessione;

2 Misure GPS

Tutte le misure eseguite, laddove vi era copertura satellitare, sono state ubicate con sistema GPS mediante strumento GPS Leica GS15.

Lo strumento è dotato di 120 canali GNSS ed è in grado di ricevere fino a 60 satelliti tracciati simultaneamente su due frequenze.



Il GPS Leica GS15 è dotato di un’avanzatissima tecnologia brevettata “Leica SmartTrack+” composta da:

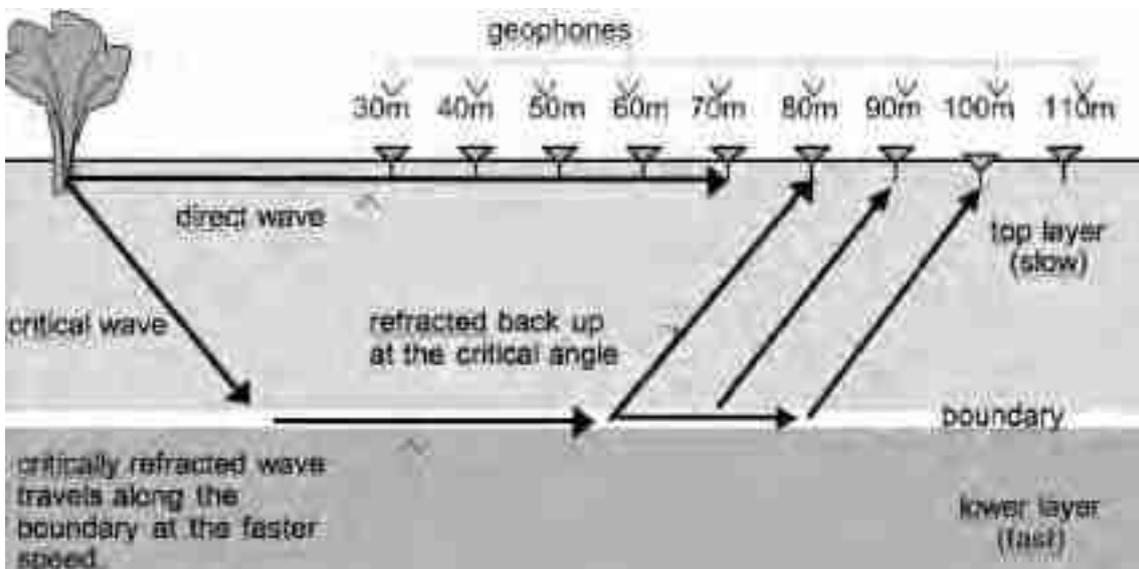
- Motore di calcolo avanzato
- Ricezione protetta dalle interferenze
- Controllo multipath di alta precisione per le misure pseudo-range
- Tracciamento eccellente a basse elevazioni
- Misure GNSS di fase a basso disturbo, precisione <math><0.5\text{ mm}</math>
- Tempi di acquisizione minimi.

3 PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE

3.1 Cenni sulla metodologia di sismica a rifrazione

La sismica a rifrazione è la metodologia più speditiva nell’ambito delle prospezioni geofisiche e studia i tempi di arrivo delle prime onde sismiche.

Presupposto fondamentale perché possa essere impiegata è che la velocità di propagazione delle onde sismiche aumenti con la profondità. I raggi rifratti viaggiano, infatti, parallelamente alla superficie di discontinuità con la stessa velocità dello strato “ più veloce ” rifrangendo l’energia elastica verso lo strato “ più lento ”.

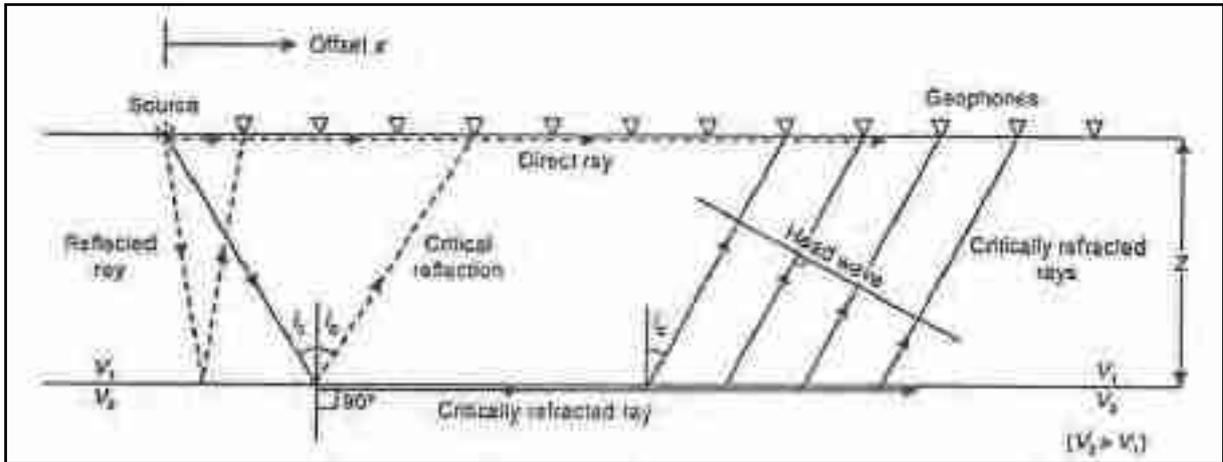


Percorso del raggio rifratto lungo la superficie di discontinuità in strati con velocità crescente verso il basso

Uno dei principi su cui si basa lo studio dei fenomeni di rifrazione è il principio di Fermat che stabilisce che un raggio d'onda nello spostarsi da un punto (sorgente) ad un altro punto (ricevente) attraverso un insieme qualsiasi di mezzi (strati), percorre, tra tutti i possibili cammini, quello che implica il minor tempo possibile, il quale risulta essere non sempre il cammino più breve in termini di lunghezza. Secondo la Prima Legge di Snell questo percorso è contenuto in un piano perpendicolare a quello del rifrattore che contiene sia la sorgente che il ricevitore ed è espresso dalla seguente relazione:

$$V_2 \sin i = V_1 \sin r$$

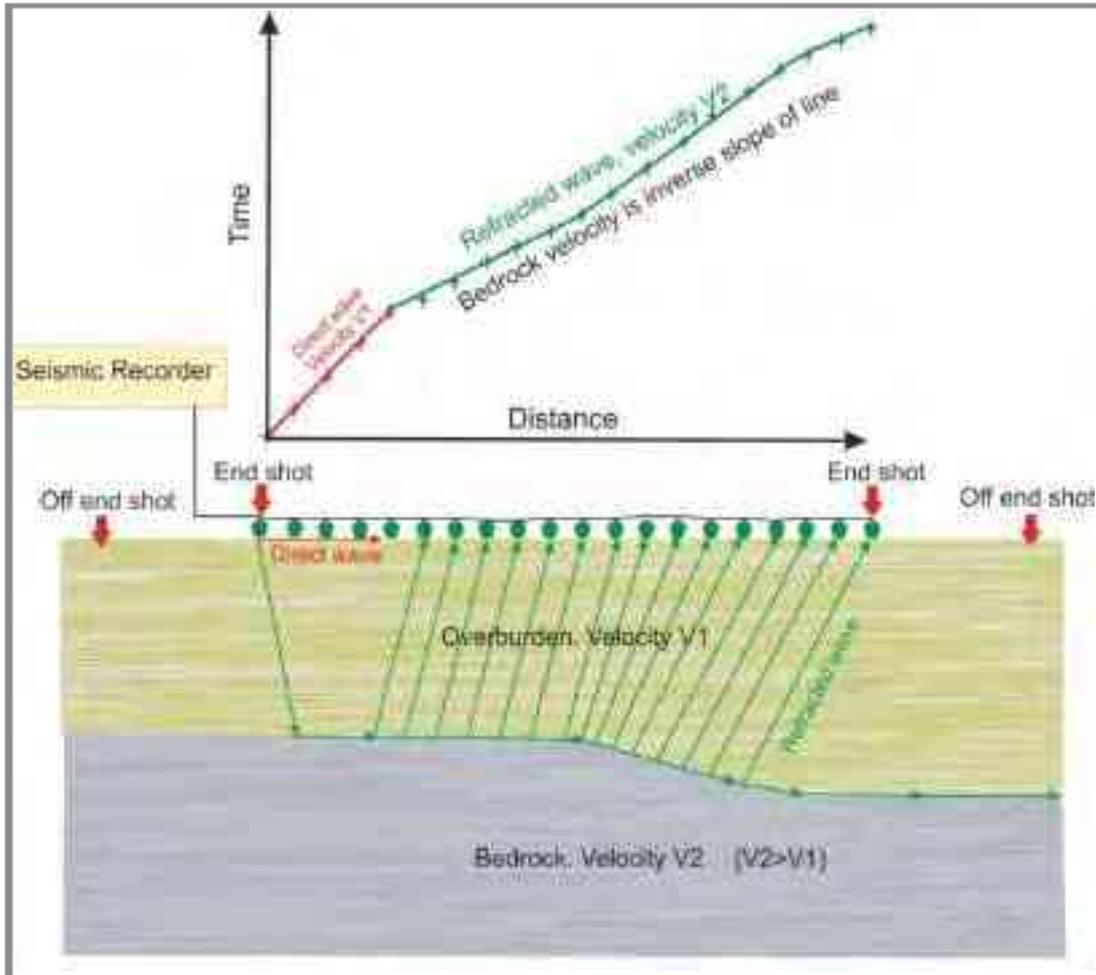
dove V_2 e V_1 sono le velocità degli strati, con $V_2 > V_1$, i è l’angolo di incidente ed r è l’angolo di rifrazione del raggio sismico.



Percorso raggi diretti, rifratti e riflessi in strati dove $V_1 < V_2$ (da Reynolds, 1997).

Ad ogni geofono infatti arrivano tutte le onde generate dalla sorgente (dirette, riflesse, rifratte). L’onda che arriva per prima al ricevitore è sempre quella diretta che viaggia nel primo strato con velocità V_1 . Ma in punto posto ad una certa distanza dalla sorgente, detto punto di ginocchio, arriveranno contemporaneamente anche le onde rifratte che avranno compiuto un percorso sufficiente con velocità V_2 . Da questo punto in poi arriveranno sempre per prime le onde rifratte. La distanza dalla sorgente del punto di ginocchio aumenta con lo spessore dello strato indagato e con il diminuire del contrasto di velocità tra i due mezzi.

Conoscendo la distanza tra la sorgente e ciascun geofono ed i tempi di percorrenza delle onde è possibile costruire un grafico distanza - tempo che indica appunto i tempi di propagazione di un onda sismica in funzione della distanza e prende il nome di dromocrona.



Dromocrona onde rifratte (<http://www.cflhd.gov>).

Ciascun segmento della dromocrona è caratterizzato da un'inclinazione sull'asse delle ascisse, che equivale all'inverso della velocità delle onde nello strato a cui esso si riferisce. Questi segmenti consentono il calcolo degli spessori e delle profondità degli strati.

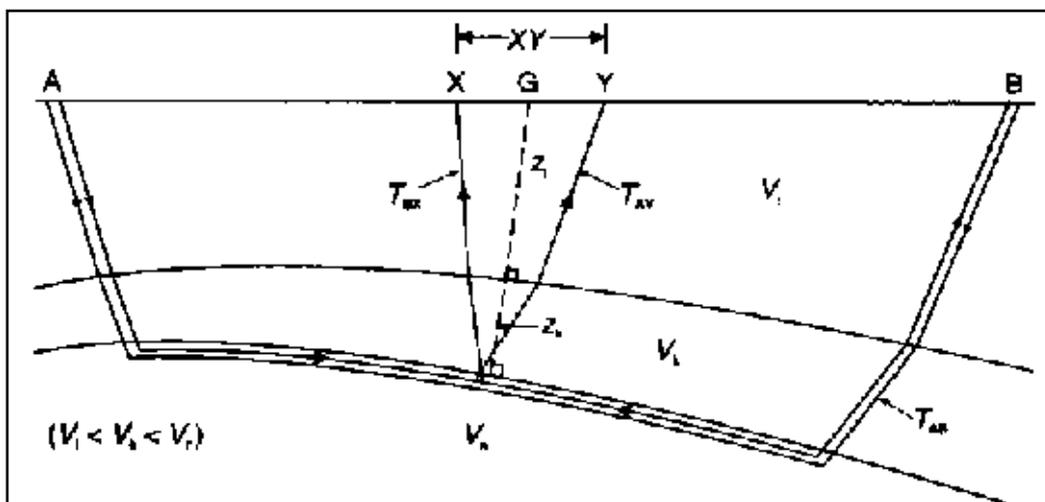
3.2 Metodo adottato

Per il calcolo degli spessori degli strati si possono impiegare vari metodi quali il Metodo delle “Intercette” valido per strati paralleli orizzontali o sub-orizzontali con inclinazione uniforme; il Metodo del Reciproco Generalizzato (G.R.M.) per strati con morfologie articolate e inclinazioni $> 20^\circ$; il Metodo del Reciproco di Hawkins o Delay Time per strati con morfologie articolate e inclinazioni $< 20^\circ$. Di seguito si tratterà il **metodo del G.R.M.** essendo quello impiegato nell’ambito di questa indagine.

METODO DEL RECIPROCO GENERALIZZATO (G.M.R.):

Introdotta da Palmer nel 1980, si applica nei casi in cui le geometrie dei rifrattori sono molto articolate e ha come vantaggio quello di prescindere dall’assunzione che la velocità resti costante per ciascuno strato.

E’ una tecnica di inversione che presuppone che vengano effettuati più scoppi da entrambi gli estremi dello stendimento e che raggiungono due ricevitori posti ad una distanza XY. Lo scopo è quello di calcolare con precisione la distanza XY ottimale per cui ai ricevitori arrivi il segnale proveniente dallo stesso punto del rifrattore. In questo modo è possibile valutare tutte le variazioni laterali di velocità del rifrattore e ricostruire morfologie complesse.



Schema dei parametri usati nel metodo G.R.M. (da Reynolds, 1997).

Si effettuano gli scoppi in più punti in modo da individuare lungo tutto lo stendimento i tempi relativi allo stesso rifrattore e plottare correttamente la relativa dromocrona.

Si procede quindi con il calcolo della funzione analisi - velocità definita dall’equazione:

$$T_V = \frac{(T_{AY} - T_{BX}) - T_{AB}}{2}$$

Il valore di questa funzione si riferisce ad un punto intermedio tra X e Y per ogni distanza XY considerata ottenendo tante curve quante sono le distanze analizzate e si ricava la velocità del rifrattore dalla pendenza della dromocrona più lineare.

Si calcola poi la funzione tempo - profondità che fornisce la profondità del rifrattore in unità di tempo:

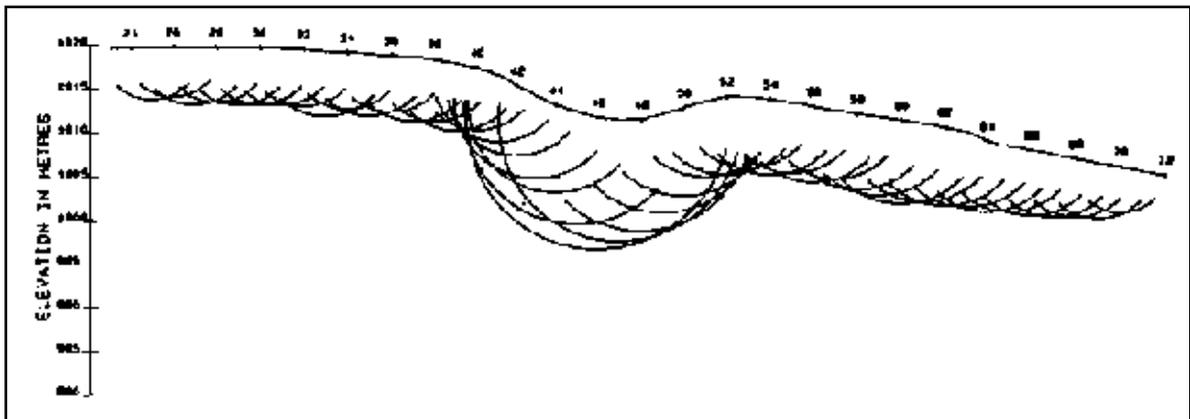
$$T_G = \left(T_{AY} - T_{BX} - \left(T_{AB} + \frac{XY}{V_n} \right) \right)$$

Analogamente a quanto visto per la velocità si ottengono una serie di curve, per ogni valore XY considerato, di cui la più articolata è relativa alla distanza ottimale e rappresenta meglio la morfologia del rifrattore.

Una volta definita la funzione tempo - profondità si calcola mediante un fattore di conversione la profondità in metri del rifrattore al di sotto di ogni geofono:

$$z = T_G \sqrt{\frac{V_n XY}{2T_G}}$$

L’esatta morfologia del rifrattore, infine, è individuata dall’involuppo delle semicirconferenze di raggio z.



Esempio morfologia del rifrattore dall’involuppo delle circonferenze (da Reynolds, 1997).

3.3 Tomografia Sismica

La tomografia permette di individuare anomalie nella velocità di propagazione delle onde sismiche e di ricostruire la stratigrafia, con alto potere risolutivo, anche in situazioni complesse.

Si ottengono rappresentazioni bi-tridimensionali di oggetti mediante un numero definito di proiezioni monodimensionali variamente orientate. Attraverso fasi di calcolo successive si elabora un modello di velocità del sottosuolo che aumenta la qualità del dato e della risoluzione attraverso iterazioni di un processo di sovrapposizione tra dati sperimentali e sintetici fino al raggiungimento del “ fitting ” ottimale. A partire dalle sole misure dei tempi di arrivo è possibile tramite software ricavare la distribuzione delle velocità delle onde sismiche nel semispazio considerato e ricostruire immagine bi-tridimensionali verosimili del sottosuolo indagato.

Il grande vantaggio di questa tecnica rispetto alle altre è quello di prescindere dal modello di sottosuolo a strati regolari e con proprietà elastiche costanti cosa che consente di gestire situazioni con forti variazioni laterali di velocità e morfologie complesse e dominate dalla tettonica.

Il **software** impiegato per l’elaborazione è il **Rayfract version 2.71** (della Intelligent Resources Inc) che opera in modo da combinare ogni raggio di inversione con un raggio rifratto reale e che questi emergano dal un punto comune del rifrattore.

L’algoritmo implementato utilizza un codice di modellizzazione tomografica chiamato WET (Wavepath Eikonal Traveltime) che opera attraverso le soluzioni alle differenze finite dell’equazione che descrive le modalità di propagazione di un’onda in un mezzo isotropo (Schuster e Quintus - Bosz, 1993). Con questa tecnica la velocità di propagazione viene sostituita dal suo reciproco che indica la capacità di assorbimento dell’onda sismica da parte dello strato attraversato. Il percorso seguito dal raggio sismico viene suddiviso in celle e per ogni cella viene calcolata la velocità del percorso e viene assegnato un peso a ciascuna traiettoria. Si discretizza il calcolo attraverso un numero finito di celle pesate e si risolve il problema di sovrapposizione tra dati reali e sintetici

mediante iterazioni di un modello di velocità di partenza, iterazione che si arresta nel momento in cui viene soddisfatto l’algoritmo che individua il fitting ottimale.

Alla fine di questo processo il software elabora i risultati sotto forma di un’immagine bidimensionale che rappresenta il modello di velocità del sottosuolo, distinguendo i diversi valori di velocità per mezzo di una scala cromatica.

3.4 Attrezzature e tecniche operative

Per l’acquisizione dei dati sono state utilizzate le seguenti attrezzature:

- Due sismografi DAQ LINK – III a 24 bit della “Seismic Source Co” con intervallo minimo di campionamento di 0.0208 ms e altissima risoluzione (118 db).



Strumentazione utilizzata

- Due cavi con 24 collegamenti per i geofoni;
- Quarantotto geofoni a componente verticale a frequenza di 14 Hz;
- Ventiquattro geofoni a componente orizzontale a frequenza di 14 Hz;
- Sorgente sismica onde longitudinali ad energia propulsiva (PEG-40);
- Massa battente da 8 Kg, su piastra per generare le onde longitudinali e su trave per generare le onde trasversali e bidirezionali.

4 PROSPEZIONE SISMICA A RIFLESSIONE

4.1 Cenni sulla metodologia di sismica a riflessione

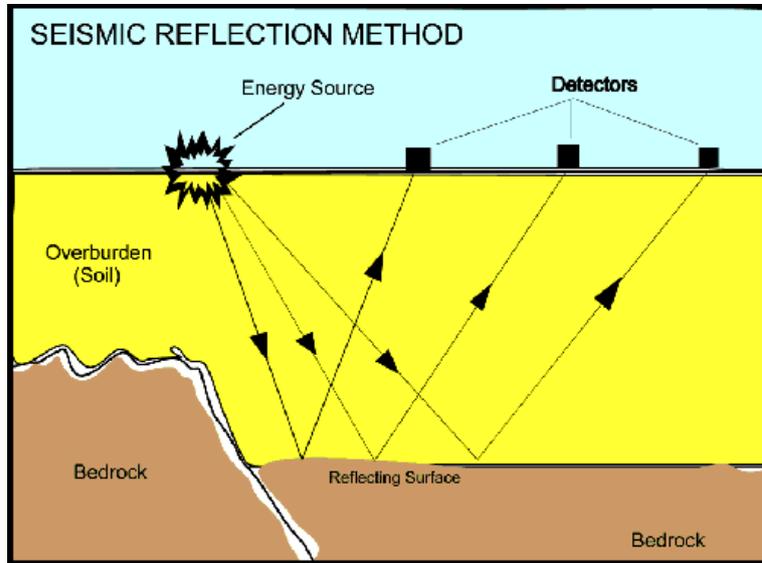
La sismica a riflessione è una metodologia largamente utilizzata nell’esplorazione del sottosuolo per riconoscere l’assetto stratigrafico e strutturale dei corpi geologici: geometrie deposizionali, stratificazione, superfici di discordanza, faglie, sovrascorrimenti, etc.. Essa permette di effettuare una ricostruzione, talora molto fedele, delle porzioni sepolte della superficie terrestre e può essere applicata in qualsiasi ambiente: terrestre, marino e di transizione (fluviale, lacustre, deltizio, ecc.).

La sismica a riflessione si è sviluppata a grandi passi a partire dagli anni '50 con il sostegno delle grandi compagnie petrolifere, direttamente interessate all’individuazione dei giacimenti di idrocarburi e spesso uniche detentrici della costosa strumentazione necessaria. Negli ultimi decenni la dilagante diffusione della tecnologia digitale ed il conseguente abbattimento dei costi strumentali ha consentito sempre maggiori e più valide applicazioni in svariati campi (dall’ingegneria civile, agli studi ambientali, alla ricerca di base).

La sismica a riflessione è un metodo di prospezione di tipo attivo che consiste nel generare onde sismiche nel sottosuolo e misurare i tempi di arrivo delle onde riflesse dagli strati posti a diverse profondità. Questo tempo viene definito come Two-way Travel Time (TWTT) poiché si considerano insieme tempo di andata e tempo di ritorno.

Viene inoltre effettuata una accurata analisi dei treni d'onda ricevuti, attraverso la quale è possibile riconoscere i segnali provenienti dalle superfici di separazione di terreni caratterizzati da differenti velocità sismiche. I dati vengono quindi elaborati per risalire alla profondità delle diverse superfici incontrate e stabilire con esattezza la geometria, l’estensione e le reciproche relazioni tra i corpi che esse suddividono. Si ottengono quindi profili sismici ed immagini che descrivono le geometrie e gli spessori del sottosuolo, strutture, variabilità litologiche e composizionali.

La strumentazione è costituita da una sorgente, che può essere una massa battente o una carica esplosiva; uno stendimento di ricevitori (geofoni o idrofoni) ed un sismografo multicanale per l’acquisizione e registrazione dei dati.

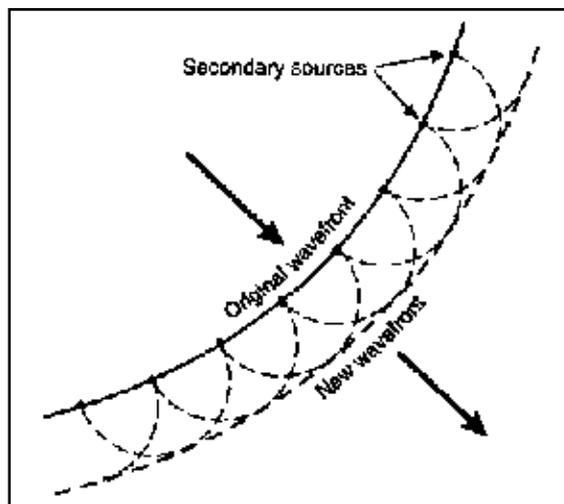


Schema rappresentativo di una prospezione sismica a riflessione

4.2 Principi Generali

Uno dei principi basilari nello studio delle onde sismiche e dei fenomeni di riflessione in terreni stratificati è quello di Huyghens.

Principio di Huyghens: data una superficie generica investita da un fronte d’onda, tutti i punti diventano sorgenti di onde sferiche elementari. Per cui il nuovo fronte d’onda è dato dalla superficie di involuppo alle onde elementari.



Involuppo fronti d’onda secondo il principio di Huyghens (da Reynolds, 1997).

Per questo, al fine di semplificare la trattazione analitica, piuttosto che riferirsi ai fronti d’onda si fa riferimento ai relativi raggi sismici lungo cui si propaga l’energia, intesi come le normali ai fronti d’onda. In questo modo è possibile operare in termini di tempo e spazio, tralasciando trattazioni più complesse che coinvolgerebbero ampiezze, frequenze e fasi.

All’interfaccia tra due strati la velocità di propagazione delle onde sismiche varia nel momento in cui incontra diverse proprietà fisiche. L’energia viene in parte trasmessa, rifratta e riflessa. L’ampiezza dell’onda riflessa dipenderà non solo dall’angolo dell’onda incidente sulla superficie di separazione, ma anche dalle velocità e densità degli strati stessi. Si definisce quindi **l’impedenza acustica** come: $Z = \rho V$, cioè il prodotto tra la densità (ρ) e la velocità (V).

Tale grandezza quantifica la diversità tra i due mezzi a contatto e quanto maggiore è la differenza tra le caratteristiche fisiche dei due mezzi tanto maggiore è la differenza tra le relative impedenze acustiche.

Il grado di riflessione per un raggio che incide normalmente o con basso angolo sulla superficie di separazione, è descritto dal coefficiente di riflessione (R) che rappresenta il rapporto di ampiezza tra raggio incidente e raggio riflesso. In termini di impedenza acustica corrisponde al rapporto tra la differenza e la somma delle impedenze: $R = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1)$. Il **coefficiente di riflessione** assume quindi valori che sono minori o uguali a ± 1 .

$R < 0.1$ riflessione debole

$0.1 < R < 0.2$ riflessione moderata

$R > 0.2$ riflessione elevata

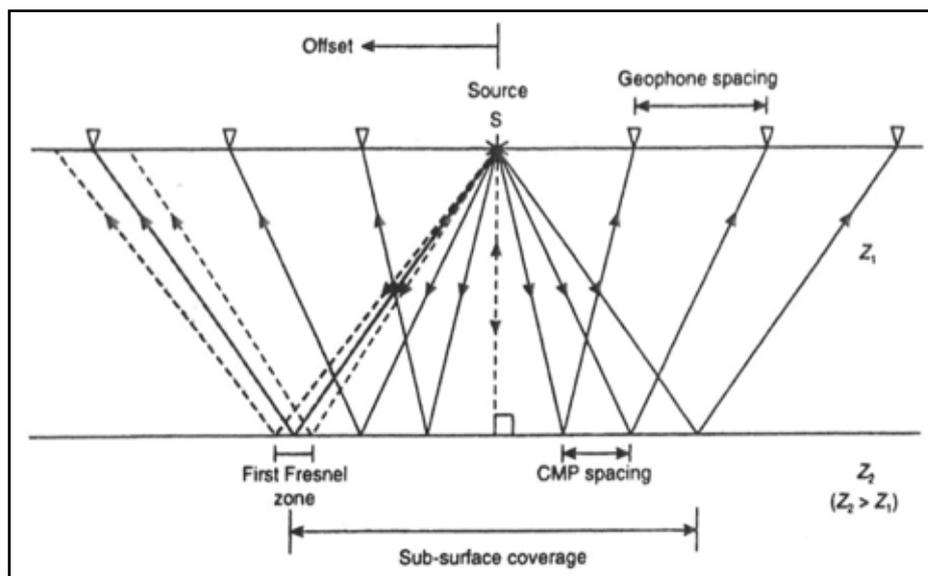
Bisogna inoltre considerare che la somma dell’energia riflessa e di quella trasmessa deve essere pari a 1. Pertanto se il coefficiente di riflessione risulta essere ± 1 o l’energia riflessa è pari ad 1 si deduce che tutta l’energia incidente è riflessa e non viene trasmessa. Viceversa se $R=0$, o l’energia riflessa è pari a 0, tutta l’energia viene trasmessa. Questo implica che all’interfaccia tra gli strati non cambia il valore dell’impedenza acustica, ma non implica che non cambino le velocità e i valori di densità.

In realtà la riflessione non è generata da un punto dell’interfaccia tra strati, come si semplifica nelle trattazioni, ma da un’area finita nota come prima zona di Fresnel, pertanto il coefficiente di riflessione per una data superficie è la risposta media della zona di Fresnel. La dimensione di tale zona è definita dal suo raggio: $r \approx (\lambda h/2)^{1/2}$ dove λ è la lunghezza d’onda e h la distanza tra la sorgente e il riflettore. Si ha quindi che le dimensioni della zona di Fresnel aumentano con la profondità e la lunghezza d’onda e quindi col decremento della frequenza.

Tutte le onde che incidono al di sopra di questa zona vengono riflesse in superficie. Se si effettua uno scoppio in un punto S , le onde riflesse verranno rilevate dai geofoni in linea a destra e sinistra dello scoppio. La distanza tra la sorgente ed un qualsiasi geofono dello stendimento è detta offset.

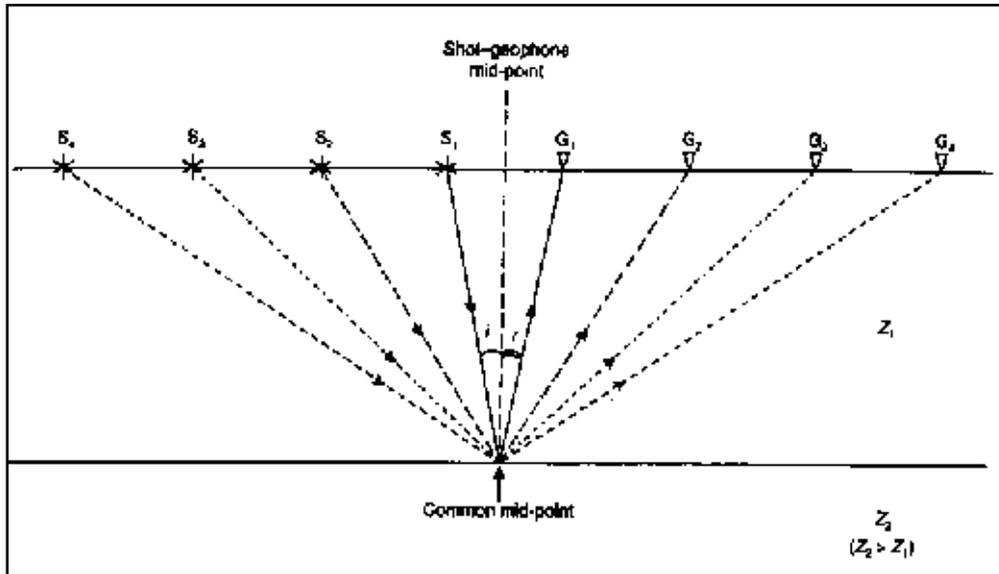
Nel caso di una superficie di separazione orizzontale i raggi riflessi seguiranno le geometrie della seguente figura da cui è facile notare come il raggio incidente venga riflesso dal substrato in un punto situato a metà strada tra la sorgente dello scoppio S ed il geofono che registra il relativo raggio riflesso.

Pertanto i punti di riflessione lungo l’interfaccia disteranno tra loro di uno spazio pari a metà della distanza intergeofonica. Risulta inoltre evidente che l’estensione totale della superficie indagata dipende direttamente dalle dimensioni dello stendimento, ovvero la sua lunghezza corrisponderà sempre a metà della lunghezza di quest’ultimo.



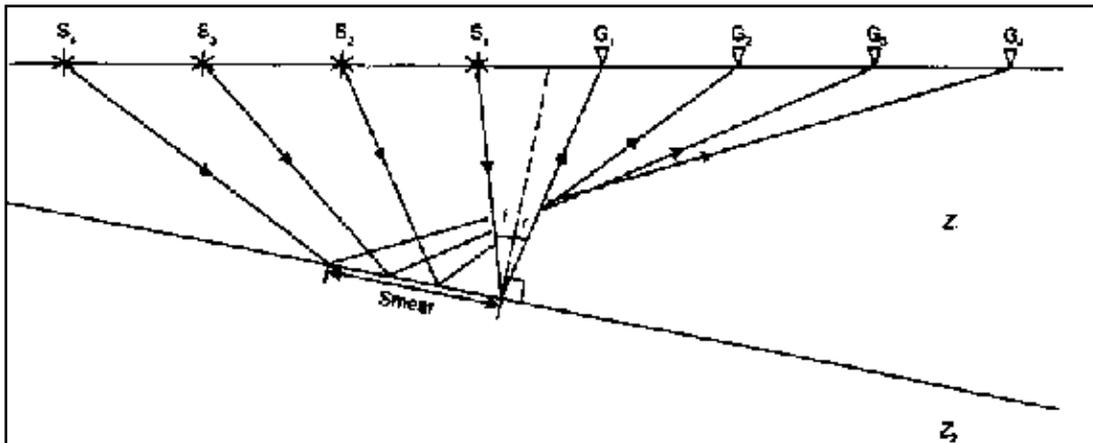
Geometria raggi riflessi da un’interfaccia orizzontale (da Reynolds, 1997).

Nel caso in cui vengano effettuati più scoppi in presenza di un’interfaccia orizzontale, i raggi riflessi da uno stesso punto saranno rilevati da geofoni diversi. Si definisce così il Common Mid-Point (CMP) come punto comune di riflessione.



Common Mid-Point (da Reynolds, 1997).

Nel caso si abbia, invece, un’ interfaccia inclinata, i punti di riflessione saranno distribuiti lungo la stessa e aumentando l’offset si sposteranno verso posta a minore profondità.



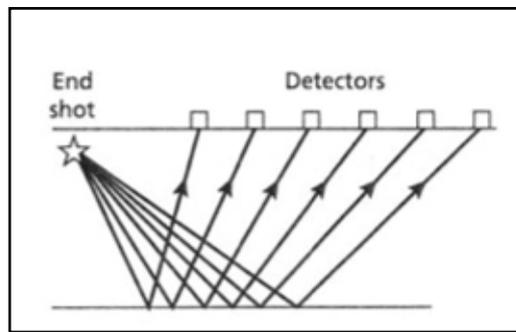
Geometria raggi riflessi da un’interfaccia inclinata (da Reynolds, 1997).

Con il termine “fold of coverage” si indica il numero di volte che viene registrato un impulso proveniente dallo stesso punto.

4.3 Configurazione adottata

Nei profili a riflessione (prospezioni in due dimensioni), i dati vengono campionati lungo una linea che comprende i punti di scoppio e i geofoni. A seconda dell’estensione dell’area da indagare e del range di profondità che si deve indagare, si dispongono i punti di scoppio e i ricevitori in base a diverse configurazioni.

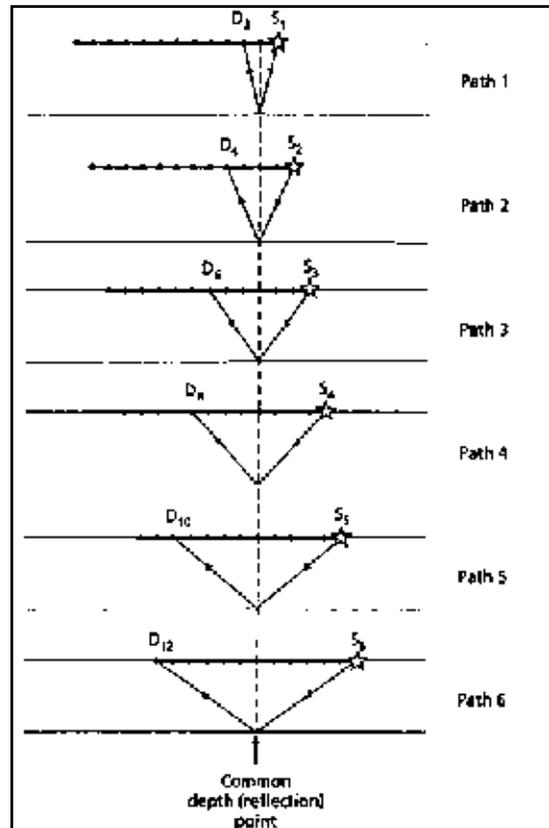
Nella presente indagine i punti di scoppio sono stati collocati secondo la **configurazione single-ended spread** che prevede che il punto di scoppio sia collocato da un solo estremo dello stendimento dei ricevitori.



Single - ended spread (da Kearey, 1991).

E’ stata adottata la tecnica **Common Mid Point (CMP)** che permette per diversi valori di offset, di acquisire tracce che registrano gli impulsi dei raggi riflessi da un punto comune del riflettore posto ad una certa profondità.

Nel nostro caso la “copertura” del riflettore è stata 600%, disponendo un punto sorgente ogni due stazioni geofoniche.



4.4 Attrezzature utilizzate

Per l’acquisizione dei dati sono state utilizzate le seguenti attrezzature:

- Due sismografi DAQ LINK – III a 24 bit della “Seismic Source Co” con intervallo minimo di campionamento di 0.0208 ms e altissima risoluzione (118 db).



- Due cavi con 24 collegamenti per i geofoni;
- Quarantotto geofoni a componente verticale a frequenza di 14 Hz con shunt (filtri passivi);
- Sorgente sismica onde longitudinali ad energia propulsiva (PEG-40);
- Massa battente da 8 Kg;
- Piattello in alluminio.

4.5 Data Processing

Per ottenere delle sezioni sismiche che siano una rappresentazione reale della situazione geologica delle aree di studio, è stato effettuato un processing dei dati consistito in una serie di operazioni volte ad eliminare i disturbi che complicano la lettura e l’interpretazione dei sismogrammi. Per le elaborazioni di calcolo è stato necessario disporre delle informazioni derivanti dalla sismica a rifrazione.

4.5.1 Correzione statica dei Tempi sulle Tracce

La correzione statica dei tempi di riflessione si applica lì dove si riscontrano delle differenze dei travel times introdotte da irregolarità topografiche. Queste irregolarità sono principalmente dovute a differenze di quota tra i punti di

scoppio e i geofoni o alla presenza di uno strato alterato a bassa velocità sismica che determina un ritardo nelle onde che lo attraversano.

Per effettuare il calcolo della correzione è necessario conoscere la velocità e lo spessore dello strato alterato e di quello sottostante, per questo si effettuano misure sismiche a rifrazione.

4.5.2 Analisi Spettrale

Il segnale sismico si può considerare come una funzione variabile nel tempo, per tanto può essere scomposto in un numero caratteristico di funzioni sinusoidali di cui è possibile stabilire il contributo in ampiezza e in frequenza.

Nell’analisi dei dati è molto utile effettuare tale scomposizione per studiare il segnale non solo nel dominio del tempo, ma anche in quello delle frequenze. Per passare in questo dominio si utilizza la trasformata di Fourier che consente quindi di rappresentare tutte le frequenze del segnale sismico con relative ampiezze.

Studiando lo spettro di ampiezza del segnale si stabiliscono i limiti di frequenza entro i quali i geofoni amplificano allo stesso modo tutte le frequenze proprie del segnale in esame.

Questo permette di ottimizzare la successiva scelta del filtro che deve eliminare le altre frequenze che costituiscono disturbo.

4.5.3 Filtraggio di Frequenza

Il filtraggio di frequenza permette di mettere maggiormente in risalto le frequenze proprie del segnale che si sta studiando eliminando quelle che creano disturbo.

Esistono diversi tipi di filtro:

- ✓ filtro passa alta: taglia le basse frequenze e lascia passare quelle al di sopra di un limite scelto;
- ✓ filtro passa bassa: taglia le alte frequenze e fa passare quelle al di sotto di un certo limite;
- ✓ filtro passa banda: è l’unione dei primi due, lascia passare una banda di frequenze comprese tra due limiti scelti;

- ✓ filtro arresta banda: blocca una particolare banda di frequenza (50Hz).

A questi filtri si aggiungono anche i filtri anti-alias che eliminano il disturbo indotto da un cattivo campionamento delle frequenze noto come aliasing temporale.

4.5.4 Muting

è un operazione che consente di eliminare dal sismogramma i primi arrivi, cioè quelli relativi alle onde dirette e rifratte. Di conseguenza tutte le successive elaborazioni non saranno influenzate dalla presenza di questi segnali. Questo limita le eventuali interferenze con il segnale delle onde riflesse e ne migliora la visibilità.

4.5.5 Analisi di Velocità

Per rimuovere la differenza di travel time sugli offset più lunghi, per angoli di incidenza perpendicolari, ovvero l’effetto del normal moveout (NMO), si effettua una correzione che è funzione dell’offset e della velocità e profondità del riflettore numericamente pari proprio al valore del normal move out.

Nelle indagini in common mid-point il valore del NMO si ricava attraverso l’analisi computerizzata di gruppi di tracce relative allo stesso common mid-point. Si elabora uno spettro di velocità stabilendo un valore di semblance che correla le velocità di più tracce in modo da garantirne la coerenza dei valori di velocità computati rispetto ai valori reali. Dal grafico si individuano i picchi di velocità relativi alle riflessioni e si importa il valore del normal moveout da implementare nella correzione.

4.5.6 Filtraggio di Velocità

Il filtraggio di velocità si usa per rimuovere i disturbi in base all’angolo d’inclinazione che li caratterizza. Quest’angolo è determinato dalla velocità apparente con cui i segnali si propagano lungo lo stendimento dei ricevitori. L’impulso sismico infatti che viaggia lungo la direzione dello stendimento con una velocità v e con un angolo α , si propagerà con una velocità apparente $v_a = v / \sin \alpha$. Scomponendo tale impulso nelle sue componenti sinusoidali è possibile considerare tutte le frequenze in funzione del rispettivo numero

d’onda apparente (k_a) : $f = v_a k_a$. Mettendo in grafico questi valori si ottiene una retta la cui inclinazione corrisponde al valore v_a , pertanto per ogni impulso si ha una curva $f - k$ inclinata del valore della velocità apparente con cui è stato registrato l’evento. È così possibile filtrare i dati in base alla velocità apparente. Tramite la trasformata di Fourier si commutano i dati sismici dal dominio del tempo in quello delle frequenze in modo da scegliere il filtro $f - k$ più opportuno per rimuovere gli eventi di disturbo con velocità apparente che complica il segnale ed una volta effettuato il filtraggio si ritorna nel dominio $t - x$. Questo filtro è utile soprattutto per rimuovere il noise dovuto ground roll (effetto delle onde che viaggiano con grande ampiezza e bassa frequenza e mascherano i segnali riflessi e rifratti).

4.5.7 Deconvoluzione

Il segnale sismico man mano che si propaga nel sottosuolo subisce una perdita progressiva delle alte frequenze, poiché il terreno agisce come un filtro passa banda che lascia passare più agevolmente le basse frequenze. Questo fenomeno comporta una riduzione del potere risolutivo del segnale dato dall’allungamento del periodo centrale e quindi dal conseguente aumento della lunghezza d’onda.

Con la deconvoluzione si elabora un filtraggio inverso che cerca di attribuire al segnale le alte frequenze per accorciare il periodo e ottenere un guadagno in termini di risoluzione. In questo modo vengono rimossi anche gli effetti delle multiple (segnali che vengono riflessi da più interfacce generalmente caratterizzati da frequenze più basse rispetto alle riflessioni primarie).