

**MAURIZIO FURANI (\*), GIUSEPPE GALASSI (\*) & GABRIELE PULELLI (\*\*)**

## **SISMICA A RIFLESSIONE AD ALTA RISOLUZIONE APPLICATA ALLA RICERCA DI ACQUIFERI PROFONDI IN PIANURA PADANA**

**Abstract** - MAURIZIO FURANI, GIUSEPPE GALASSI & GABRIELE PULELLI –

Application of high resolution seismic reflection for research of deep water bed in Po plain.

Here are illustrated, after a short summary about the analytics and technics of the seismic reflection survey, two investigations for deep water bed, made by Progeo srl in the last years (2003 – 2007) in the South East, portion of the Pianura Padana, near the border of the coastal line of Adriatic Sea, which involved for both an high resolution seismic reflection with the definition of the geostuctural trim until 1000 – 2000 m depth from the surface.

The task and objects reached were to find out, in the first case, both the position and the thickness of the main water bed (Sabbie di Imola) under the great Quaternary Alluvial Bed, in order to exploit mineral waters; in the second case, to discover and determinate the presence and the development of tectonic dislocations and deep fault planes into the Mesozoic Carbonate Serie covered by Marnoso – arenacei Sediments (Pliocene – Paleocene) as a potential way for the rising of hydrominerals water tables, and to positionate some soundings and wells.

**Key words:** High resolution seismic reflection, multichannel survey's technics, deep water bed, tectonic dislocations.

**Riassunto** – MAURIZIO FURANI, GIUSEPPE GALASSI & GABRIELE PULELLI – Sismica a riflessione ad alta risoluzione applicata alla ricerca di acquiferi profondi in pianura padana.

Sono illustrate, dopo una breve sintesi delle tecniche analitiche e di campagna utilizzate nella prospezione sismica a riflessione, due ricerche per acquiferi profondi svolte dalla Progeo S.r.l. negli ultimi anni (2003-2007) nella porzione sud-orientale della Pianura Padana ai confini con la linea di costa del Mare Adriatico nei pressi delle località di Cesenatico (FC) e Misano Adriatico (RN) e che hanno comportato per entrambe un rilievo sismico a riflessione ad alta risoluzione con definizione dell'assetto geostrutturale (litologico, geologico e tettonico) fino a profondità di 1000 e 2000 m dalla superficie.

Lo scopo, e gli obiettivi raggiunti, sono stati essenzialmente quelli di individuare, nel primo caso, sia la posizione sia lo spessore dell'acquifero principale (Sabbie di Imola) al di sotto del potente (alcune centinaia di metri) materasso alluvionale quaternario in vista di una possibile captazione di acque di origine minerale; nel secondo caso, invece, la prospezione sismica a riflessione, mediante correlazione tra i dati sismostratigrafici e quelli litologici desunti da ricerche idrogeologiche è stata predisposta per verificare e determinare l'eventuale presenza ed andamento di dislocazioni tettoniche e piani di faglia profondi all'interno di serie carbonatiche mesozoiche ricoperte da potenti spessori (1400-1700 m) di sedimenti eterogenei prevalentemente marnoso-arenacei di età pliocenico-paleocenica come possibili veicoli di risalita di presunte falde idrominerali anche in funzione di un successivo posizionamento di sondaggi e pozzi di emungimento.

**Parole chiave:** Sismica a riflessione ad alta risoluzione, tecniche di prospezione multicanale, acquiferi profondi, dislocazioni tettoniche.

-----  
(\* ) Dott. Geol., Direttore tecnico (Progeo s.r.l.).

(\*\* ) Dott. Geol., Direttore tecnico, Amministratore Unico (Progeo s.r.l.).

## 1. INTRODUZIONE

Nell'ambito delle attività di ricerca geognostiche allo scopo di valutare le geometrie e le potenzialità degli acquiferi nonché gli sviluppi dei circuiti idraulici negli ammassi sepolti, un ruolo di fondamentale importanza viene rappresentato dalle indagini sismiche che permettono di ricostruire, con significativa continuità vertico-laterale, le caratteristiche stratigrafiche e tettoniche del sottosuolo per profondità di varie centinaia di metri fino ad alcune migliaia.

La tecnica sismica di riflessione è il metodo geofisico più largamente impiegato soprattutto nella ricerca di strutture geologiche e tettoniche, in particolare profonde.

La sua principale applicazione è nel campo dell'esplorazione petrolifera; i grandi mezzi che vengono dedicati a questo problema hanno consentito un affinamento estremo delle tecniche tanto di acquisizione che di elaborazione dei dati.

Essa determina con notevole dettaglio la profondità e la pendenza delle discontinuità geologiche; inoltre è l'unico metodo che permette di ottenere con la stessa precisione gli andamenti di stratificazione sovrapposte a profondità molto diversa e in numero molto grande.

In Italia prima degli anni '70 le indagini a riflessione erano ad esclusivo utilizzo per la ricerca di idrocarburi. I pochi strumenti che erano presenti sul mercato erano ovviamente analogici e non digitali, quindi avevano minime possibilità di regolazione dei segnali registrati e l'output che si realizzava non era necessariamente su nastro magnetico ma spesso veniva acquisito su carta fotosensibile.

In Fig. 1 viene presentata l'immagine di due sismografi a 12 e a 24 canali di registrazione simultanea che si utilizzavano nel periodo 1960-'70 per rilievi sismici a riflessione.



Fig. 1 – Sismografi per rilievi a riflessione degli anni '60-'70.

In Fig. 2 vengono presentati due sismogrammi a 24 tracce che si ottenevano su carta fotosensibile e che venivano utilizzati dai geofisici fino al termine dagli anni '70 per la ricerca manuale dei primi arrivi degli impulsi sismici (first break peak o f.b.p.) necessaria per le cosiddette correzioni statiche, ovvero quelle correzioni che implicano uno slittamento lungo la scala dei tempi dell'intera traccia sismica, tra le quali l'importante "weathering correction" usata per compensare le differenze di velocità di propagazione delle onde sismiche negli strati superficiali (specialmente quelle dello strato "aerato" a bassa velocità a contatto col profilo topografico) e determinanti per la corretta elaborazione preliminare dei rilievi a riflessione.

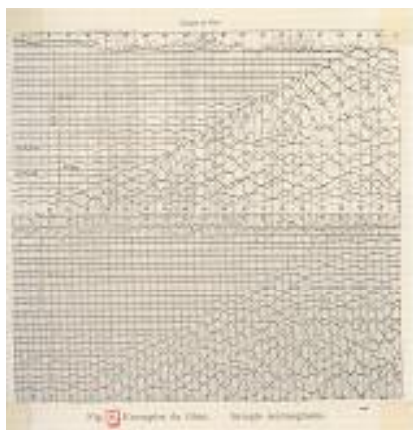


Fig. 2 – Sismogrammi a 24 tracce stampati su carta fotosensibile ed utilizzati per le correzioni statiche dei rilievi a riflessione fino agli anni '70.

Nel periodo successivo ovvero dagli anni '80 in poi con l'arrivo dell'elettronica digitale e del perfezionamento degli apparati ricevitori (geofoni ad alta frequenza) lo standard delle registrazioni è molto migliorato e si sono potute realizzare registrazioni come quella ad esempio di Fig. 3 (datata 1992) dove si evidenziavano, anche su base sismografica, in misura decisamente più marcata, gli arrivi riflessi (in questo caso nell'intorno dei 200 millisecondi); sui sismogrammi sono anche indicati schematicamente i primi arrivi rifratti dell'onda di compressione (subrettilinei), quelli riflessi (andamento ad iperbole dal punto di energizzazione o shot) e, nella finestra temporale posteriore a questi ultimi, il fascio di onde superficiali (ground roll, onde di Rayleigh, ecc.) ad ampia dinamica di segnale che si genera dal punto di shot..

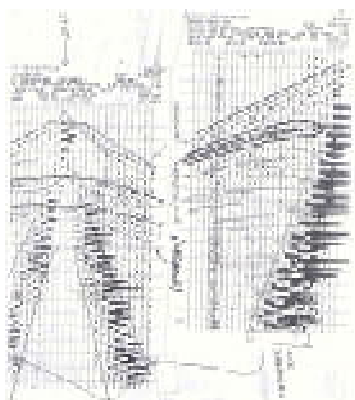


Fig. 3 – Sismogrammi a 24 tracce stampati su carta fotosensibile e realizzati per rilievi a riflessione nei primi anni '90.

Lo sviluppo tecnico degli ultimi vent'anni ha quindi permesso di incrementare notevolmente le potenzialità della prospezione sismica a riflessione la quale, dal campo esclusivamente petrolifero, è stata progressivamente applicata ad altre problematiche geognostiche quali l'ingegneria geotecnica, le indagini ambientali, l'idrogeologia, ecc. grazie sia al miglioramento dei sensori di ricezione (geofoni) con più ampi spettri di segnale acquisibile, sia all'avvento dei sismografi digitali per ottenere rilievi a più alta risoluzione, sia infine alla possibilità di utilizzare sorgenti di energia sismica ad alta frequenza in alternativa agli esplosivi.

Senza entrare troppo nel dettaglio elaborativo, peraltro complesso e che presuppone conoscenza ed esperienza per poter essere svolto al meglio specialmente con le tecniche ed i software più moderni, in questa sede si richiamano solo gli aspetti fondamentali della metodologia d'indagine sismica a riflessione.

La tecnica di prospezione più comune presuppone il cosiddetto rilievo continuo: gli orizzonti riflettenti vengono seguiti cioè in modo continuo lungo il profilo mediante stendimenti simmetrici (split spread) o asimmetrici (end on) rispetto al punto di energizzazione.

Il risultato di un profilo sismico dipende in gran parte dai parametri utilizzati nel corso dell'acquisizione dati, parametri che vengono scelti dopo aver realizzato il cosiddetto profilo walkaway.

Si tratta di un espediente di campagna per saggiare le caratteristiche dell'obiettivo di ricerca e scegliere la migliore configurazione dei parametri di acquisizione; allo scopo viene utilizzato uno stendimento di dimensioni limitate che viene lasciato fisso in una certa posizione, allontanando progressivamente il punto di scoppio lungo il profilo prescelto, ovvero eseguendo una serie di energizzazioni con differenti distanze sorgente-geofoni.

I parametri da definire in questa procedura sono i seguenti:

- 1) lunghezza della registrazione (record length) e intervallo di campionamento (sample rate);
- 2) massima distanza tra sorgente e geofono (maximum offset);
- 3) minima distanza tra sorgente e geofono (minimum offset);
- 4) distanza tra le stazioni geofoniche;
- 5) tipo di stendimento ("end-on" o "split spread");
- 6) controllo automatico di guadagno (AGC);
- 7) filtri digitali.

Per i punti 2) e 3), la distanza tra sorgente e geofono è scelta in campagna in funzione di varie prove di registrazione effettuate allo scopo di attenuare il più possibile il ground roll (onde superficiali).

In via del tutto teorica, si può considerare il maximum offset all'incirca uguale alla profondità del riflettore che si vuole evidenziare; il minimum offset dovrebbe essere il più piccolo possibile (al fine di registrare anche i primi arrivi delle onde rifratte, indispensabili per le correzioni statiche), compatibilmente con l'esigenza di evitare sia la saturazione del segnale ai geofoni, sia la registrazione di disturbi che, in prossimità della sorgente, hanno un'ampiezza tale da obliterare completamente la riflessione.

Un altro punto fondamentale è la scelta della distanza intergeofonica, che è funzione del maximum offset, del minimum offset, del numero di canali disponibili e della risoluzione richiesta.

Una riflessione si verifica sempre in presenza di altri segnali sismici o "rumori" che possono interferire con essa o addirittura oscurarla; da qui la necessità di migliorare il più possibile il rapporto Signal/Noise (S/N) con vari espedienti.

Una delle tecniche più diffuse è quella di operare con la cosiddetta "copertura CDP" (Common Depth Point), ovvero riunire i dati provenienti dallo stesso punto sulla superficie riflettente, apportare le dovute correzioni in tempi legate alla determinazione della velocità media al di sopra del riflettore (percorsi diversi dell'onda riflessa legati a differenti distanze sorgente-geofono) e quindi sommare le tracce in questione (stacking) rafforzando il segnale riflesso.

Con tale metodo, registrando cioè più segnali riflessi da uno stesso punto riflettente (copertura multipla) che abbiano seguito percorsi diversi, è evidente che gli impulsi che giungono in fase (segnali) si sommano e quelli non in fase (disturbi vari) si attenuano.

Le coperture multiple più usate vanno dal 240% al 1200% ordine in funzione del dettaglio e del miglioramento del segnale che si vuole ottenere; nel caso del 1200% ad esempio si usa una copertura (subsurface coverage) ottenuta sommando 120 tracce in ogni "CDP gather", questo per aumentare il segnale a bassa impedenza cioè derivato da materiali a contrasto di velocità e densità (impedenza) molto basso e quindi con indici di riflessione estremamente ridotti.

Può essere opportuno puntualizzare meglio il concetto di copertura multipla.

Consideriamo, come dallo schema di Fig. 4, uno stendimento sismico con 12 canali di registrazione; con un singolo shot di energizzazione viene individuata in profondità la zona indagata (la traccia orizzontale in rosso) con copertura del 100% detta anche copertura 1.

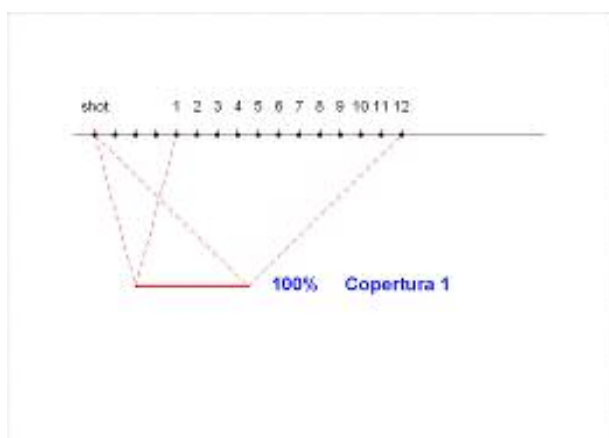


Fig. 4 – Schema di copertura singola per rilievo a riflessione con stendimento da 12 tracce.

Nel caso in cui ci si sposti di una unità modulare di acquisizione (geofono o picchetto) e contemporaneamente si trasli tutta la serie di ricevitori di una altrettanto analoga unità modulare (in gergo "rollare" in avanti o indietro l'apparato di energizzazione e di registrazione di una unità) individuo in profondità la zona indagata (la doppia traccia

orizzontale in rosso) che è traslata di una unità rispetto al precedente schema; in questo caso si dice di avere copertura 200% oppure copertura 2.

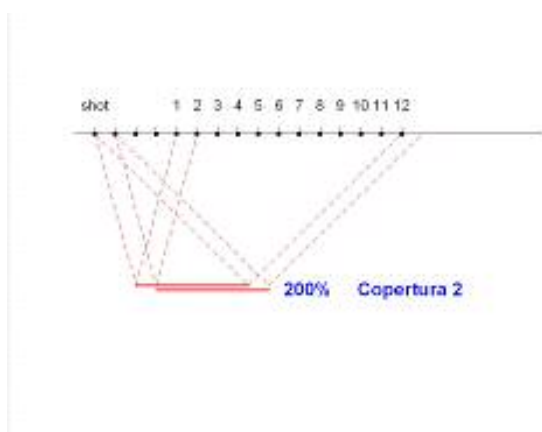


Fig. 5 – Schema di copertura doppia per rilievo a riflessione con stendimento da 12 tracce.

Se si continua ad energizzare ed a “rollare” tutti i dispositivi di una unità ogni shot realizzato si ottiene una copertura che, ad esempio, può essere del tipo schematizzato in Fig. 6 dove è illustrata una copertura del 600% oppure copertura 6.

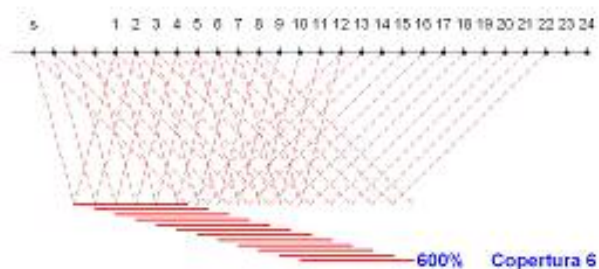


Fig. 6 – Schema di copertura sestupla per rilievo a riflessione.

In definitiva, se si realizza una prospezione sismica a riflessione con l'utilizzo di un certo numero di canali (ad es. 24) e si energizza su tutti i geofoni dello stendimento, si ottiene una copertura che è al massimo del 1200% (o copertura 12) cioè la metà del numero dei sensori di superficie.

In questa breve nota verranno prese in considerazione ed illustrate con gli esempi ritenuti più significativi due ricerche per acquiferi profondi svolte dalla Progeo S.r.l. negli ultimi anni (2003-2007) nella porzione sud-orientale della Pianura Padana ai confini con la linea di costa del Mare Adriatico nei pressi delle località di Cesenatico (FC) e Misano Adriatico (RN) e che hanno comportato per entrambe un rilievo sismico a riflessione ad alta risoluzione con definizione dell'assetto geostrutturale (litologico, geologico e tettonico) fino a profondità di 1000 e 2000 m dalla superficie.

## 2. PROSPEZIONE SISMICA A RIFLESSIONE A CESENATICO (FC) – PRIMAVERA 2003

Per il nuovo centro termale previsto a Valverde di Cesenatico (FC) è stata realizzata una indagine geofisica mediante tecnica sismica a riflessione ad alta risoluzione per definire nel dettaglio l'assetto geostrutturale (litologico, geologico e tettonico) presente nel sottosuolo in vista di una possibile captazione di acque di origine minerale.

Per il raggiungimento dell'obiettivo sono state realizzate n° 2 linee sismiche a riflessione ad alta risoluzione che hanno permesso una adeguata ricostruzione strutturale del sottosuolo.

Le due linee sismiche sono state posizionate planimetricamente in accordo con le geometrie geologiche e la direzione degli assi strutturali profondi ed in particolare una linea (sezione 1) è stata realizzata con asse ovest-est (perpendicolare alla linea di costa) mentre l'altra (sezione 2) è stata eseguita ortogonale alla precedente con asse sud-nord.

L'allineamento 1 è costituito da n° 322 stazioni ogni 5 m per un lunghezza di 1605 m, l'allineamento 2 da n° 202 stazioni con interdistanza sempre di 5 m per una lunghezza di 1005 m, quindi per complessivi 2610 m di rilievo sismico a riflessione.

Lo schema di prospezione è stato quello di una registrazione da 72 canali ed energizzazioni ogni 2 stazioni o picchetti quindi con una copertura del 1800% o di 18 volte.

Vista l'esecuzione del rilievo geofisico entro un centro abitato, è stato categoricamente escluso l'utilizzo di qualsiasi forma di esplosivo, quindi si è dovuto sopperire mediante l'impiego di un sistema energizzante a massa battente di potenza adeguata (Fig. 7); è stato usato il sistema denominato "Thumper" che consiste in un cilindro metallico di 500 kg (vedasi immagine qui di seguito riportata) montato su guide che viene sganciato automaticamente da una altezza di 2.5 m e che con l'impatto (che può essere rapidamente ripetuto) su una piastra in ferro genera l'energia necessaria anche a distanza di vari chilometri. Il sistema è montato su carrello e agganciato a trattore gommato per la necessaria mobilità anche su terreni accidentati o in notevole pendenza.



Fig. 7 – Apparato energizzatore semovente a massa battente da 10.000 kg/m.

Sono stati utilizzati gruppi da 6 geofoni (Fig. 8) da 30 Hz (con asse strumentale verticale per ricezione onde P) posizionati sul terreno ad intervalli regolari di 5 m l'uno dall'altro, collegati tra loro da cavo elettrico e a loro volta, tramite connettori a morsetto, al cavo elettrico dell'allineamento sismico collegato ai sismografi.



Fig. 8 – Gruppi da 6 geofoni da 30 Hz utilizzati come apparati riceventi.

Considerata la lunghezza degli stendimenti ed il numero delle stazioni riceventi, gli impulsi sismici ricevuti dai geofoni posizionati sulla superficie topografica sono stati acquisiti utilizzando più apparecchiature elettroniche EG&G Geometrics Geode a 24 canali di registrazione simultanea collegate in uscita ad un selettore di canali (Rollalong della I/O a 96 uscite) che consente, avendo a disposizione un numero sufficiente di geofoni, di spostare simultaneamente i canali attivi (geofoni collegati al registratore) col procedere degli impatti lungo l'allineamento sismico senza doversi spostare continuamente con l'apparato registratore e quindi con notevole guadagno in tempi esecutivi di campagna; nel caso in esame, sono stati utilizzati 5 sismografi collegati in serie allo scopo di avere un range complessivo di 120 canali, di cui 72 attivi per la registrazione, per poter avere almeno 24 punti di shot prima di realizzare la traslazione di tutti i dispositivi.

Pur con le limitazioni suddette, i dati acquisiti sono da ritenersi sufficientemente validi come dimostra l'immagine del sismogramma di Fig. 9; si tratta della registrazione di walkaway ovvero quella iniziale o di taratura per stabilire il passo di acquisizione di tutte le registrazioni.

Nel sismogramma si vedono bene (allineamenti suborizzontali di impulsi sismici ad ampiezza molto costante) sia le prime riflessioni sia quelle più profonde; sono disposte entro la finestra temporale tra l'arrivo obliquo dell'onda rifratta e gli impulsi sismici ad inclinazione maggiore ( $45^\circ$  o più) posti nella porzione sinistra del sismogramma in prossimità del punto di energizzazione e dovuti all'onda nell'aria generata dallo shot stesso ed a quelle di superficie (onde di Rayleigh, ground roll) queste ultime attenuate mediante l'utilizzo di opportuni filtri in acquisizione.

Si fa notare altresì che la registrazione è stata realizzata con l'interposizione di due strade statali ed una linea ferroviaria quindi con un certo noise ambientale.

Ciò è stato possibile solo con l'utilizzo corretto di stringhe di geofoni (interspazio fra i singoli elementi della stringa pari a 20 m con 6 geofoni per ogni stringa centrata sul picchetto di superficie C.D.P. o Common Depth Point).

In tal modo si è praticamente annullato il disturbo orizzontale del traffico e si è esaltato l'arrivo riflesso proveniente dal fondo.

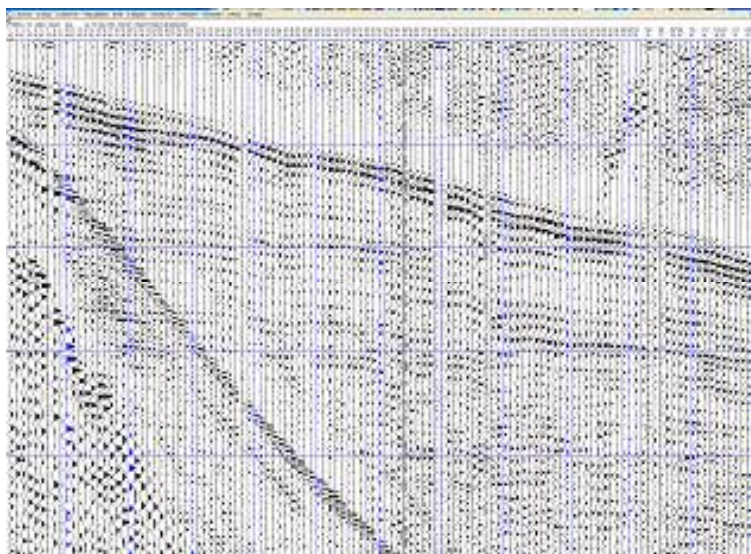


Fig. 9 – Sismogramma di walkaway o di taratura per stabilire il passo di acquisizione di tutte le registrazioni successive per il rilievo a riflessione.

L'elaborazione dei dati è stata effettuata con un software estremamente diffuso fino a qualche anno fa (Visual Surt) che mostra come stack finale una sismosezione come quella rappresentata in Fig. 10.

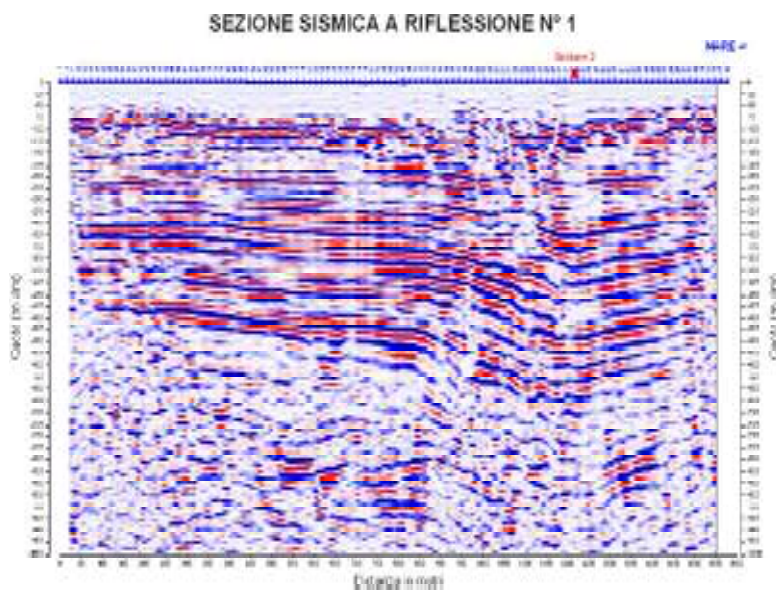


Fig. 10 – Stack finale di sezione sismica a riflessione.

In linea generale, l'interpretazione dei dati si sviluppa dapprima attraverso un'analisi dei pattern sismici mediante correlazione tra i vari orizzonti sulla base della coerenza laterale e tanto maggiore è l'estensione laterale del riflettore e l'intensità del segnale riflesso tanto più elevato sarà il fattore di coerenza.

E' peraltro interessante notare, sempre a livello interpretativo, che spesso sono presenti, come in questo caso, settori "trasparenti" dove cioè non sono evidenti effetti di riflessione e che stanno ad indicare una sostanziale omogeneità dei materiali d'ammasso.

Dopo aver notato la forma dei principali riflettori è stato possibile marcare in modo chiaro (Fig. 11) sia i principali pattern morfologici sia le maggiori superfici di discontinuità fisica corrispondenti ai principali piani di riflessione sia infine le principali anomalie attribuibili a lineazioni tettoniche o fenomeni dislocativi.

Questi ultimi, nel caso in esame, appaiono peraltro di ampiezza molto limitata e localizzati solo in profondità trattandosi per lo più di spesse (centinaia di metri) coperture di terreni recenti (depositi continentali quaternari) che hanno “sigillato” i depositi relativamente più antichi e profondi plio-pleistocenici nei quali si possono rilevare strutture blandamente ondulate (marcate dagli orizzonti riflettenti A e B di Fig. 11) con accenno di una piccola piega profonda prodottasi a seguito del corrugamento dell’avanpaese padano e che ha coinvolto l’ammasso solo fino ai termini più antichi della successione sedimentaria.

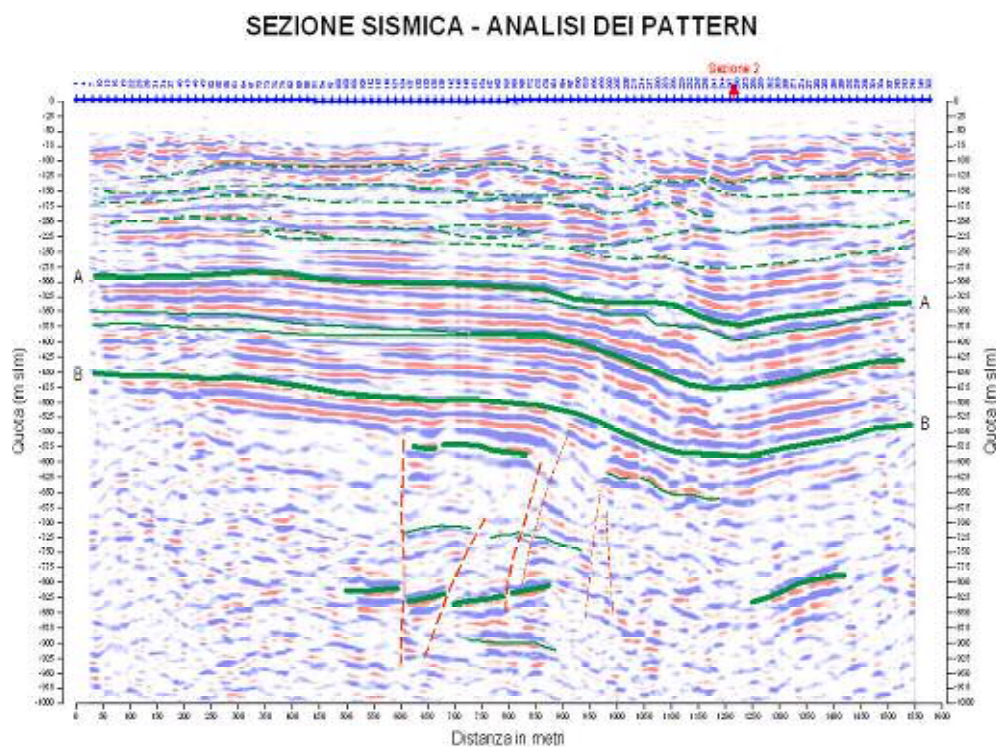


Fig. 11 – Sezione sismica a riflessione: analisi dei pattern.

Sulla base di informazioni geologiche di carattere regionale e locale raccolte è stato poi possibile effettuare una ricostruzione litologico-strutturale delle sezioni sismiche acquisite.

L’importanza di questi dati di natura geologica preliminare risiede infatti nella possibilità di correlare specifici pattern sismici con orizzonti litologici noti o comunque interpretabili in maniera affidabile.

L’interpretazione dei risultati delle indagini geofisiche è stata effettuata utilizzando dati presenti in letteratura avvalendosi di articoli tecnici reperibili presso la biblioteca di Scienze della Terra dell’Università di Bologna, di stratigrafie di pozzi AGIP e di cartografia tematica prodotta dall’Ufficio Cartografico della Regione Emilia-Romagna.

Ciò ha consentito di giungere ad una interpretazione litologico-strutturale come quella mostrata in Fig. 12 nella quale è stato possibile evidenziare quattro orizzonti principali: Quaternario continentale (interdigitazioni di depositi alluvionali a granulometria differenziata corrispondenti a divagazioni fluviali in piana suborizzontale con orizzonti permeabili in comunicazione idraulica tra loro e quindi con acquifero considerabile come un sistema unico multistrato), Sabbie di Imola (depositi di spiaggia), Zona di transizione e Gruppo del Santerno (termini in prevalenza marini pelitici).

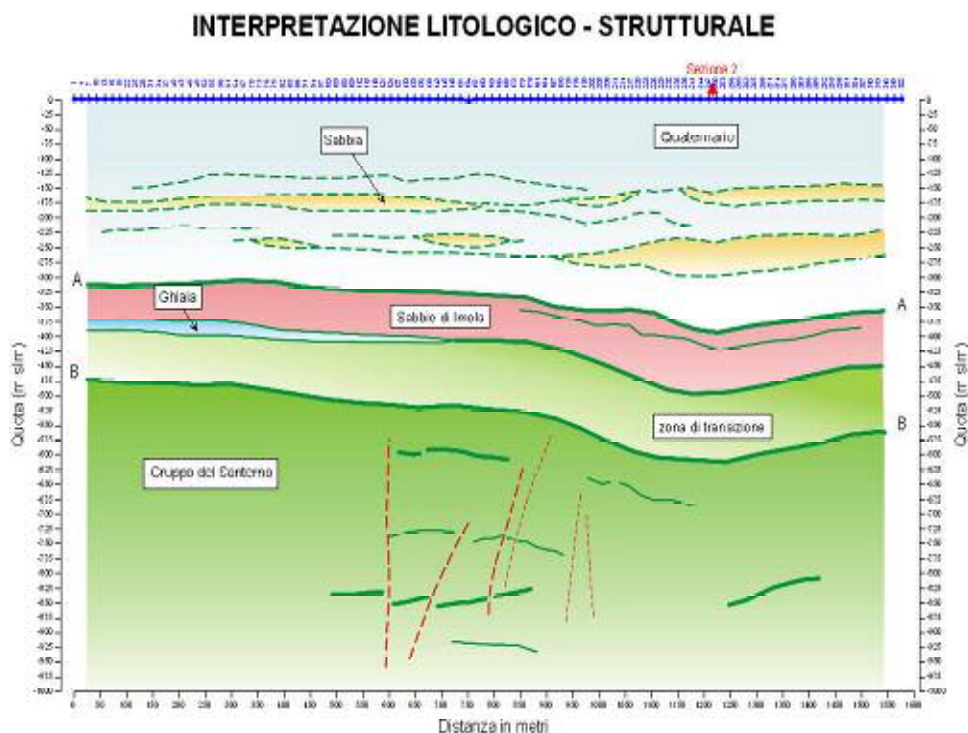


Fig. 12 – Sezione sismica a riflessione: interpretazione litologico-strutturale.

Allo stato attuale il consulente dell'impresa appaltatrice sta facendo realizzare dei sondaggi per la determinazione della qualità delle acque che rimangono intrappolate nell'acquifero più importante (Sabbie di Imola).

### **3. PROSPEZIONE SISMICA A RIFLESSIONE A MISANO ADRIATICO (RN) – ESTATE 2007**

Nell'ambito di uno studio idrogeologico per ricerca di acque profonde termali calde tra Riccione e Cattolica si è realizzata una indagine geofisica mediante tecnica sismica a riflessione per definire l'assetto geostrutturale (litologico, geologico e tettonico) presente nel sottosuolo nei pressi della località di Misano Adriatico (Rimini).

Infatti, manifestazioni di acque sulfuree fredde in superficie sono già note nelle immediate vicinanze dell'area in esame (Riccione).

Tali acque termali derivano da circolazione entro formazioni geologiche ricche in minerali contenenti solfati come la Formazione Gessoso-Solfifera del Messiniano (la quale peraltro affiora ampiamente in corrispondenza dei nuclei anticlinali tra Pesaro e Gabicce e tra Montefiore Conca e Serrauengarina) anche se possono talora venir diluite al contatto con acquiferi più recenti (pliocenico, pleistocenico) lungo le vie preferenziali di risalita derivate dalle discontinuità tettoniche per faglia che hanno scompaginato e "sblocchettato" gli ammassi rocciosi più o meno profondi.

Nella zona in esame sono state realizzate due linee grossomodo ortogonali alla linea di costa per poter verificare la presenza ed eventualmente intercettare strutture dislocative profonde che possano permettere alle acque di arrivare fino alla superficie.

In pratica, per individuare zone di possibile circolazione termale e ricostruire la geometria sotterranea, dopo la realizzazione di uno studio di tipo strutturale (regionale e locale) il quale ha avuto lo scopo di evidenziare eventuali importanti sistemi di discontinuità e lineazioni del sottosuolo (sistemi di faglie a diverso orientamento e loro intersezioni) che possano costituire probabile veicolo per l'acqua profonda ipotermale, per la necessaria verifica in dettaglio del sistema tettonico individuato, oltre che per la ricostruzione della geometria profonda, si è resa indispensabile una campagna geofisica nei settori ritenuti più significativi nell'area tra Riccione, Misano Adriatico e Cattolica.

Considerate le profondità d'indagine (almeno 1000 m dal piano campagna, meglio se spinta fino ai 2000 m circa) si sono definite alcune linee investigative di priorità in funzione soprattutto dei permessi di accessibilità in sito in una zona fortemente urbanizzata e interessata da numerosi sottoservizi e coltivazioni nonché del necessario utilizzo di esplosivo per compulsare adeguatamente il sottosuolo in esame fino alle profondità richieste.

In questa fase pertanto sono state realizzate n° 2 sezioni sismiche a riflessione per complessivi 1490 m con spaziatura dei sensori di 5 m (sezione 1 con n° 168 stazioni per una lunghezza di 835 m e sezione 2 con n° 132 stazioni per una lunghezza di 655 m) che hanno permesso una adeguata ricostruzione strutturale del sottosuolo determinando la stratigrafia e la tettonica locale fino ad una profondità di circa 2000 m dal piano campagna.

Le energizzazioni sono state effettuate mediante esplosivo con cartucce di gelatina posizionate a circa 2.5-3.5 m dal p.c. in modo da garantire (vedasi immagine sottostante di record acquisito) un adeguato potere risolutivo fino alle profondità richieste.

Entrambe le sezioni sono state realizzate mediante lo schema di acquisizione end on con un minimum offset di 50 m (10 stazioni) e 120 canali attivi di registrazione; altri parametri utilizzati sono stati una lunghezza di registrazione (record time) di 2 secondi, un

intervallo di campionamento (sampling rate) di 0.5 millisecondi e l'impiego di filtri "taglia basso" e "taglia alto" in acquisizione (Low Cut da 40 Hz ed High Cut da 1000 Hz).

In Fig. 13 è presentato un sismogramma di walkaway o di taratura per stabilire il passo di acquisizione di tutte le registrazioni successive per il rilievo a riflessione; in tale record sono ben visibili il segnale dell'onda rifratta o primo arrivo (contrassegnato dalla linea gialla), il segnale del rumore dell'esplosione nell'aria (marcato dalla linea rossa) ed infine il fascio di segnali a bassa frequenza delle onde superficiali (individuati dalla linea blu).

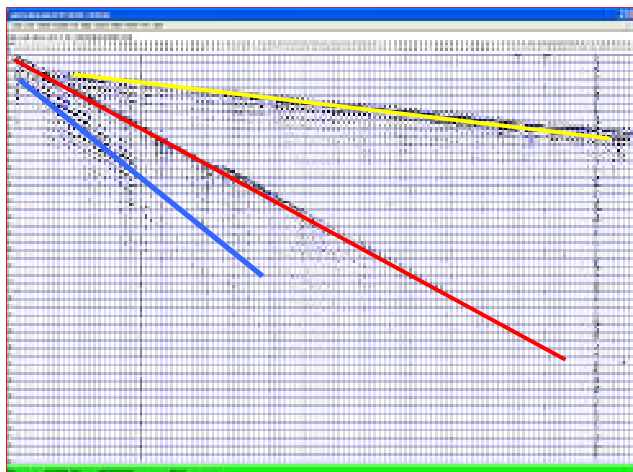


Fig. 13 – Sismogramma di walkaway o di taratura per stabilire il passo di acquisizione di tutte le registrazioni successive per il rilievo a riflessione.

Le riflessioni, affinché possano essere individuate, è necessario che si manifestino soprattutto nella cosiddetta "Optimum window" ovvero nella porzione di spazio compreso fra il primo arrivo dell'onda rifratta (linea gialla) e l'arrivo delle onde superficiali (linea blu).

Il record di Fig. 13, così come appare, non permette di osservare alcuna riflessione; basta però inserire un filtro tipo A.G.C. (Automatic Gain Control) e subito i segnali (allineamenti suborizzontali di "picchi" in variabile area) provenienti dagli orizzonti riflettenti vengono maggiormente evidenziati (Fig. 14).



Fig. 14 – Sismogramma di walkaway con filtro A.G.C. (Automatic Gain Control).

Se poi viene applicato un ulteriore filtro in frequenza si rilevano ancora meglio (Fig. 15) i segnali riflessi (marcati da linea rossa), evidenziabili peraltro anche nella porzione di sismogramma al di sotto degli arrivi (obliqui) delle onde superficiali.

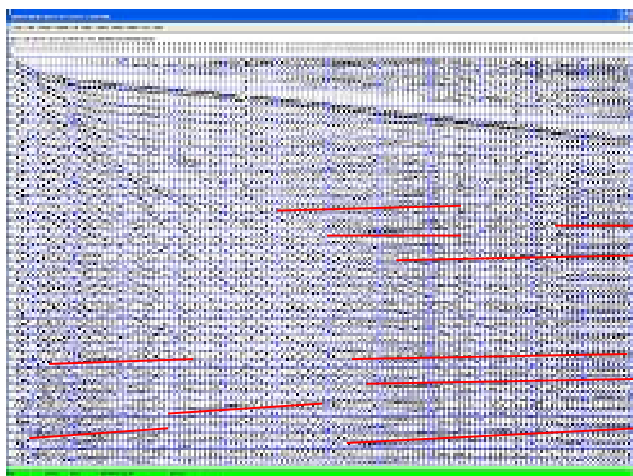


Fig. 15 – Sismogramma con filtri A.G.C. e in frequenza; sono marcati in rosso alcuni dei principali arrivi riflessi.

L'elaborazione computerizzata, con impiego del software S.P.W. - Seismic Processing Workshop - della Parallel Geoscience Corporation (Long Creek, Oregon, U.S.A.) ha consentito di ottenere, dopo le consuete operazioni di post stack e di routine per le quali non si scende nel dettaglio rimandando alle bibliografie specializzate (editing e sorting, correzioni statiche, correzioni dinamiche o geometriche, filtraggio), sezioni sismiche sufficientemente dettagliate nei segnali acquisiti e significativamente caratterizzate dal punto di vista sismostratigrafico e strutturale-tettonico.

In Fig. 16 e in Fig. 17 sono riportate, in sintesi, solo due immagini relative al software di analisi S.P.W.; la prima è relativa alla finestra schematica di flusso, dove cioè sono evidenziati tutti i vari step elaborativi ed in quale fase di elaborazione sono state applicate le singole operazioni, la seconda all'immagine finale della sezione sismica 1 (ottenuta con copertura del 3000% o di 30 volte con 120 canali di registrazione) nella quale, specialmente nella porzione di destra in scala 1:1 (ovvero "migrata" in profondità), si possono vedere meglio gli orizzonti riflettenti alcuni dei quali decisamente evidenti ed abbastanza tettonizzati e dislocati da faglie.

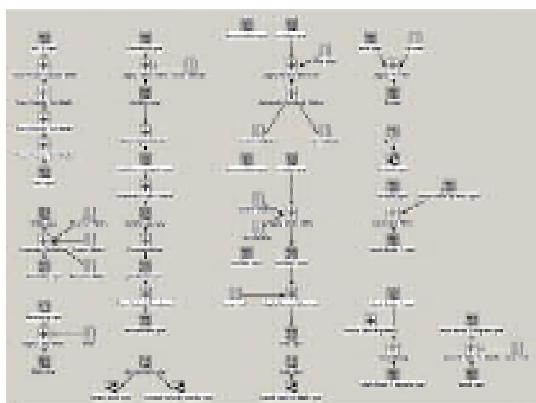


Fig. 16 – Immagine del flusso utilizzato per la sezione sismica a riflessione

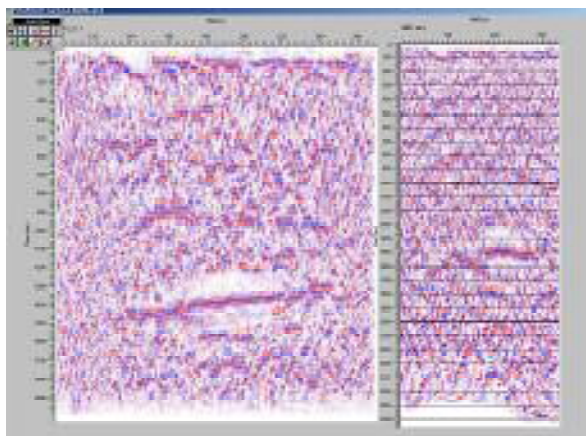


Fig. 17 – Immagine finale della sezione sismica 1.

In Fig. 18 e e in Fig. 19 sono riportate le risultanze della prospezione a riflessione nella zona indagata di Misano Adriatico (RN) con rapporto in scala 1/1 tra distanze e profondità.

Le due linee realizzate (sezioni sismiche 1 e 2) sono disposte ortogonalmente alla linea di costa a distanza di un paio di km da questa e tra loro subparallele e distanti circa 1 km.

Nell'immagine a sinistra è presentato il pattern dei principali riflettori ad elevata impedenza (segnalati con linea gialla), talora accompagnati da altri riflettori, in parte immagini multiple, non eliminabili completamente mediante deconvoluzione per non ridurre il riflettore primario e-in giallo- e delle maggiori discontinuità tettoniche –in rosso e blu- con indicazione dei rigetti di faglia (sezione depth conversion).

Nell'immagine a destra è riportata invece l'interpretazione litologico-strutturale con attribuzione degli orizzonti sismostratigrafici principali alle formazioni geologiche proprie della successione locale; la serie è stata ricostruita sulla base delle conoscenze geologiche locali sia di superficie sia del sottosuolo, queste ultime desunte da materiale pubblicato e relativo a pozzi AGIP perforati in zone limitrofe (come ad esempio la Formazione, definita solo nel sottosuolo dagli studi petroliferi, delle Arenarie di San Donato).

In estrema sintesi, è stato possibile associare delle porzioni di strati alle seguenti formazioni geologiche dall'alto verso il basso: serie pliocenica prevalentemente argilloso-marnosa fino a 300-450 m di profondità, serie miocenica superiore (arenarie e marne della Formazione a Colombacci, Arenarie di San Donato, Gessoso-Solfifera e marne dei Tripoli) fino a 750-950 m, serie miocenico-paleocenica (Formazione Marnoso-Arenacea e formazioni marnoso-calcaree dello Schlier, Bisciario, Scaglia Cinerea e Scaglia Variegata) fino a 1400-1700 m.

Questa serie di formazioni geologiche eterogenee potrebbe, verso le maggiori profondità investigate dell'ordine dei 2 km di profondità, passare verso un orizzonte proporzionalmente più compatto (più calcareo) poiché si evidenzia, appunto tra i precedenti 1400-1700 m di profondità, la presenza di un riflettore (accompagnato da una serie di riflessioni multiple) caratterizzato da una elevata coerenza laterale quindi indicativo di un più significativo incremento di consistenza del materiale, per lo meno al tetto dell'orizzonte; litostratigraficamente si potrebbe trattare del sottostante passaggio alla Formazione della Scaglia Rossa paleocenico-cretacea (differenziata in sezione sismica in verde scuro).

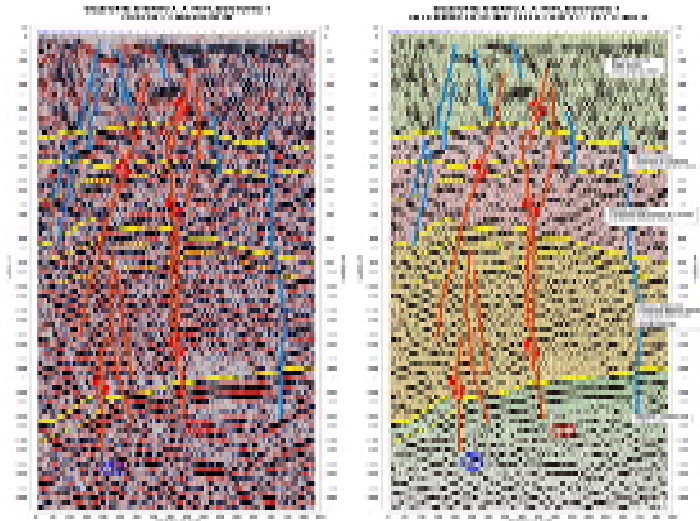


Fig. 18 – Sezione sismica a riflessione 1 (sezione depth conversion ed interpretazione litologico-tettonica).

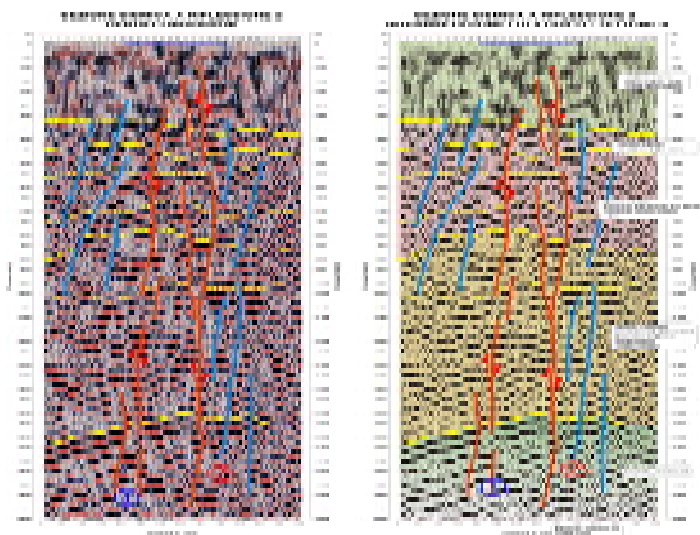


Fig. 19 – Sezione sismica a riflessione 2 (sezione depth conversion ed interpretazione litologico-tettonica).

L'andamento generale di tutti questi riflettori risulta moderatamente ondulato e sostanzialmente suborizzontale; considerata anche la non elevata estensione laterale di entrambe le linee sismiche non è possibile discriminare con precisione particolari motivi plicativi che avrebbero invece necessitato di allineamenti decisamente più lunghi (almeno il doppio) per poter essere rilevati con sufficiente continuità.

Lo scopo principale dell'indagine era comunque la determinazione delle discontinuità subverticali dell'ammasso come possibili veicoli di circolazione e risalita di fluidi sotterranei di origine termale.

Su entrambe le sezioni sono presenti diffusi fasci di faglie (indicati con tratti continui in grassetto ciano e magenta) il cui verso di rigetto ove rilevabile è indicato con simbologia a frecce.

Il fatto che non si tratti di un'unica lineazione continua in profondità ma di vari tratti lungo un asse comune può far ritenere che si tratti di lineazioni tettoniche accompagnate da settori cataclastici all'intorno; infatti, sovente, in questi tratti subverticali di discontinuità tra riflettori appaiono basse frequenze sintomo di attenuazione del segnale sismico attribuibile ad intensa/elevata fratturazione.

I fenomeni dislocativi sono all'incirca verticali e sono presenti diffusamente lungo tutte le sezioni.

È facile ipotizzare che lungo tali fratture possano essere presenti fenomeni di risalita di acqua sulfurea.

Andando ad assemblare le due sezioni è possibile ricostruire una sorta di sezione tridimensionale (Fig. 20) in cui è possibile vedere la proiezione del fenomeno dislocativo principale sulla superficie topografica (piano in arancio); in tale ricostruzione è altresì marcato con un piano di colore verde il tetto della Piattaforma carbonatica della Scaglia Rossa.

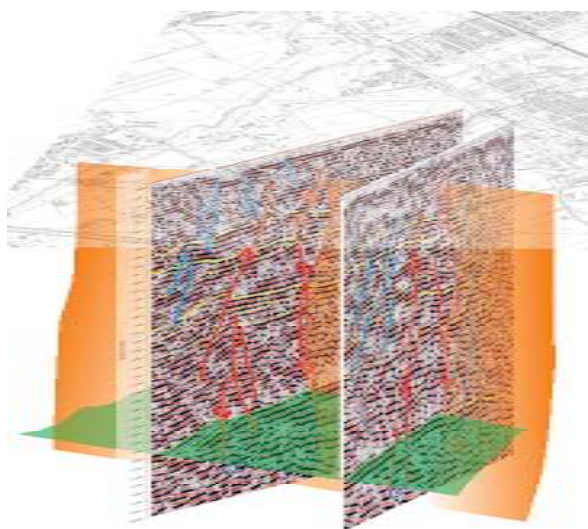


Fig. 20 – Ricostruzione pseudo 3D delle due sezioni sismiche a riflessione.

-----

Indirizzo dell'autore:

Progeo s.r.l. - Via Taletè 10/8, 47100 Forlì - Tel 0543 723580 – Fax 0543 721486

Sito web: [www.progeo.info](http://www.progeo.info) – E mail: [mail.progeo@gmail.com](mailto:mail.progeo@gmail.com)