



*Caratterizzazione delle rocce di copertura e completamento dell'analisi della fratturazione nelle rocce del potenziale reservoir.*

*S. Bigi, M.-C. Tartarello, L. Ruggiero  
Centro di ricerca Previsione, Prevenzione e Controllo dei Rischi Geologici - CERl*

*Settembre, 2016*



**SAPIENZA**  
UNIVERSITÀ DI ROMA

## SOMMARIO

1. Introduzione .....	3
2 Metodologia e dati .....	4
2.1 Le rocce di copertura .....	5
3 Analisi in superficie .....	6
3.1 Rioliti e l'area di Matzaccara .....	6
3.2 F.ne Cixerri .....	8
3.3 Andesiti .....	9
4 La deformazione recente: implicazioni per gli esperimenti di iniezione .....	12
6. Analisi della fratturazione .....	15
6.1 Densità di fratturazione, spaziatura delle faglie e saturazione .....	15
6.2 Connettività e apertura .....	16
7. Costruzione dei DFN .....	17
7.1 DFN dalla miniera .....	18
7.2 Modello di sintesi .....	20
8. Modello geologico 3D dell'area di Matzaccara .....	23
Bibliografia .....	29



## 1. INTRODUZIONE

Il presente studio fa parte delle attività di ricerca per la caratterizzazione geologico-strutturale del bacino del Sulcis ai fini dello stoccaggio geologico di CO<sub>2</sub>. Lo studio riguarda la valutazione dello stato di fratturazione delle litologie che costituiscono la stratigrafia dell'area, principalmente mediante analisi della fratturazione dei litotipi affioranti, e, nel caso della miniera, sepolte.

Questo studio è alla base degli studi di caratterizzazione del sito. In particolare, per le successioni di copertura, lo studio in esame consente di valutare la capacità di tenuta di queste, necessario per garantire l'efficienza dello stoccaggio; per le successioni del potenziale *reservoir*, lo studio della fratturazione permette di valutare la capacità di volume disponibile per lo stoccaggio. Questo lavoro è cominciato nel 2014. Nei primi due anni l'attività ha previsto l'analisi delle deformazioni superficiali principalmente nelle rocce di copertura, e l'individuazione dei principali sistemi di fratturazione e la loro distribuzione nelle diverse formazioni. Per il 2015, l'attività si è concentrata sullo studio della fratturazione delle formazioni *reservoir*, approfittando della disponibilità di osservare questa formazione nelle particolari condizioni di confinamento disponibili nella miniera di Nuraxi Figus, gestita dalla Carbosulcis S.p.A.

Nel 2016 sono state completate le osservazioni in superficie in altre aree in modo di rintracciare tutte le formazioni che compongono la successione di copertura, anche quelle non affioranti all'interno del permesso minerario di Sotacarbo S.p.A. e sono state completate anche le misure in miniera, soprattutto sulle rocce del potenziale *reservoir* (Fig. 1 e 2). Inoltre, l'attività in miniera avrebbe previsto anche l'analisi della deformazione nella Formazione del Lignitifero, immediatamente sopra il *reservoir*, ma questo non è stato possibile perché la logistica e le condizioni delle gallerie non lo ha permesso. Tuttavia litologie equivalenti sono state analizzate in superficie.

La parte finale del lavoro consiste in una sintesi dei dati raccolti con una rappresentazione 3D dei DFN delle singole Formazioni organizzati in una successione rappresentativa dell'area, utilizzando un software dedicato.

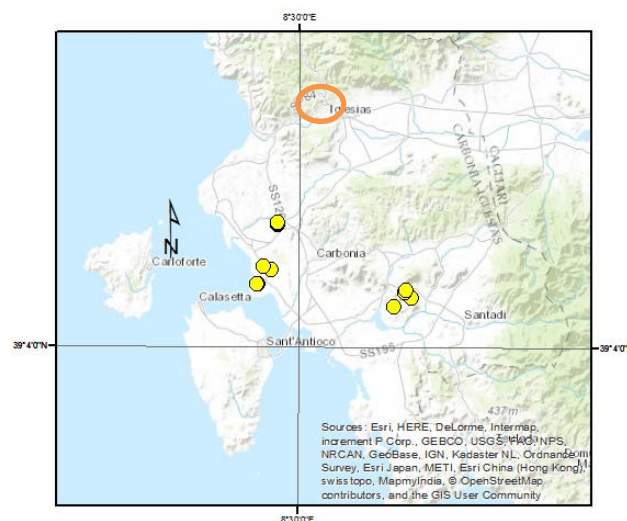


Figura 1– Ubicazione delle stazioni di misura e della miniera Nuraxi Figus.

## 2 METODOLOGIA E DATI

Lo studio in oggetto ha compreso diverse attività. L'analisi qualitativa ha permesso di individuare in zone limitrofe a quella del permesso alcune faglie quaternarie e di descriverne la geometria. Le caratteristiche delle faglie recenti sono importanti perché rappresentano la deformazione più giovane dell'area e come tali interessano tutte le litologie e coinvolgono anche i depositi quaternari. Sono state individuati diversi sistemi di faglie recenti che sono stati analizzati in dettaglio, misurando la giacitura dei piani principali e gli spessori delle zone di faglia (Allegato 1).

L'analisi quantitativa invece ha compreso 6 scanlines in superficie eseguite su diversi litotipi e 2 scanline nella miniera nella Formazione del Miliolitico; queste ultime sono lunghe rispettivamente 10 metri e 300 metri. I valori di lunghezza delle singole scanlines sono riportati nelle tabelle allegate (Allegati 2 e 3). Per le misure in miniera, la differenza tra le due scanlines è un fattore di scala. Infatti, per quella a 10 metri sono state misurate anche le fratture più piccole (con lunghezze di pochi cm) e le aperture, mentre per quella di 300 metri sono state misurate le fratture e le faglie che tagliavano completamente la volta della galleria, quindi con lunghezze superiori ai 4 metri. In questo modo sono state coperti più di 3 ordini di grandezza (dalle decine di metri ai cm) importanti per valutare la distribuzione frattale di queste grandezze. Inoltre nel secondo caso le faglie sono state misurate a partire dalla zona di faglia (armata e non visibile) posta alla fine della galleria di riflusso (Faglia del Sinni Est). In questo modo quindi la Formazione del Miliolitico è completamente descritta tra le due faglie ma anche dalla base al tetto stratigrafico, poiché la base della Formazione affiora nella galleria limitrofa e la giacitura degli strati è suborizzontale.

Il totale delle misure effettuate è di circa 5000 valori, tra fratture e faglie. Tutte le misure effettuate sono riportate nell'Allegato 1 del presente report, così come l'ubicazione dei punti di misura.

La scanline consiste nella misura sistematica lungo una data direzione di una serie di parametri riferibili alle fratture presenti sull'affioramento. Tali parametri sono: la spaziatura, la giacitura del piano (direzione e pendenza), la lunghezza della traccia e la terminazione, l'apertura e l'eventuale riempimento.

Sulla base di questi dati è possibile ricostruire il sistema di fratture presenti all'interno di un corpo roccioso e di valutarne la permeabilità e porosità secondaria (dovuta alle fratture).

I valori ottenuti e le elaborazioni sono inserite nell'Allegato 3.

Per il modello geologico dell'area di Matzaccara è stato utilizzato il software Move 2016, usato anche per generare i DFN dei diversi volumi considerati e il modello di sintesi finale (vedi Allegati 4 e 5).

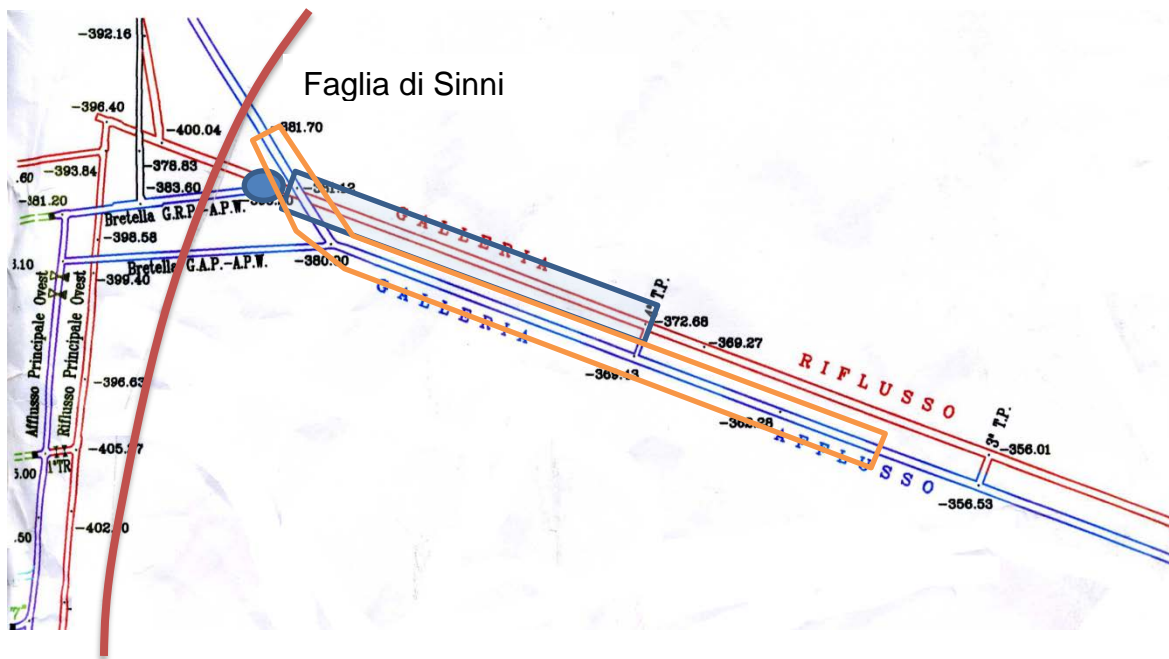


Figura 2 – Mappa della gallerie principale della miniera in cui sono state effettuate le misure. E' inoltre riportata le tracce della faglia di Sinni Est.

## 2.1 Le rocce di copertura

In superficie sono stati individuati diversi affioramenti delle rocce di copertura, appartenenti alle formazioni del Cixerri e delle formazioni vulcaniche acide (indicate come Rioliti) e basiche (indicate come Andesiti).

Per le rocce riolitiche la caratterizzazione è complessa perché questo gruppo di formazioni è molto variabile e comprende litotipi diversi, dalle lave ai depositi piroclastici. In questo lavoro sono stati considerati i litotipi riolitici affioranti nell'area di Matzaccara, che dovrà ospitare l'esperimento di iniezione.

Sono state quindi misurate diverse faglie ed eseguite 2 scanlines, entrambe in litotipi riolitici, corrispondenti alle formazioni ULM e PRU del Foglio geologico Carbonia. Nella cava corrispondente allo stop n. 12 sono state invece individuate diverse faglie delle quali è stata misurata la frequenza e lo spessore. Il secondo gruppo di litologie da investigare è composto dalla sequenza sedimentaria al top della Formazione del Miliolitico, comprendente la formazione del Produttivo (o Lignitifero) e del Cixerri. Queste due formazioni affiorano nella zona del permesso in modo molto limitato, di conseguenza affioramenti adatti alle analisi delle fratture sono stati cercati e individuati nella zona settentrionale, vicino alla miniera di Nuraxi Figus. Nella zona è infatti presente una grande cava dove è stato possibile eseguire diverse misure. Per l'ultimo gruppo di dati in superficie ci si è invece spostati più ad est, al di fuori del permesso in quanto nella zona affiorano estesamente le andesiti, supposte in profondità nella zona di Matzaccara. Anche qui sono state eseguite diverse scanline e i dati raccolti saranno illustrati di seguito.



Figura 3 - Stazioni di misura nell'area di Matzaccara. Le stazioni in turchese corrispondono alle scanline 1 e 2 dell'allegato 1. Nel cerchio rosso l'ubicazione delle foto di Figura 5 (stop 12 della tabella in allegato).

### 3 ANALISI IN SUPERFICIE

#### 3.1 Rioliti e l'area di Matzaccara

Nell'area di Matzaccara affiorano termini riolitici della sequenza vulcanica miocenica. In particolare, appartengono al Gruppo di Monte Sirai (rioliti e daciti) e al Gruppo di Cala Lunga (Rioliti) (SGI, Foglio n. 564 Carbonia).

La zona di Matzaccara è costituita da un largo semigraben in cui la faglia principale normale, localizzata lungo il versante orientale del Monte di Matzaccara, non è affiorante. La zona di faglia risulta essere complessa e costituita da più piani; ha una direzione media NNW-SSE, e ribassa la zona orientale. Il footwall della faglia è tiltato e inclinato verso W, con gli strati che immergono di pochi gradi (5-10) verso ovest. Nella zona più orientale, nel hanging wall della faglia invece, in corrispondenza di un'altra cava abbandonata (stop 12) affiorano i termini delle rioliti più giovani (Rioliti di Paringianu e di Serra Paringianu). Tutti i dati raccolti sono serviti per la ricostruzione del modello 3D della valle, presentato nel presente report.

La fratturazione nel blocco occidentale di footwall è interamente associata alla faglia normale principale. Le fratture tendono a interrompersi in corrispondenza delle laminazioni e degli strati; questo è confermato dalla presenza di strie lungo le laminazioni, che rappresentano una riattivazione di questi piani come zone di taglio e di scollamento locali. Questa osservazione conferma quanto osservato durante il primo anno di indagini, svolte nel settore orientale e intorno alla città di Carbonia. La fratturazione cambia quindi di frequenza in funzione dello spessore degli intervalli litologici e, in particolare, della presenza di intervalli a granulometria ridotta (stop 3-4; Figura 4). Nella zona orientale, dove invece affiorano termini i più litoidi, la fratturazione si sviluppa con elementi più spazati e continui e con fratture molto lunghe (più di 10 metri) (stop 1-2). Nella parte settentrionale della piana in un'altra cava, è possibile osservare la formazione delle Rioliti di Serra Paringianu, che costituiscono il top della successione. Queste sono interessate da

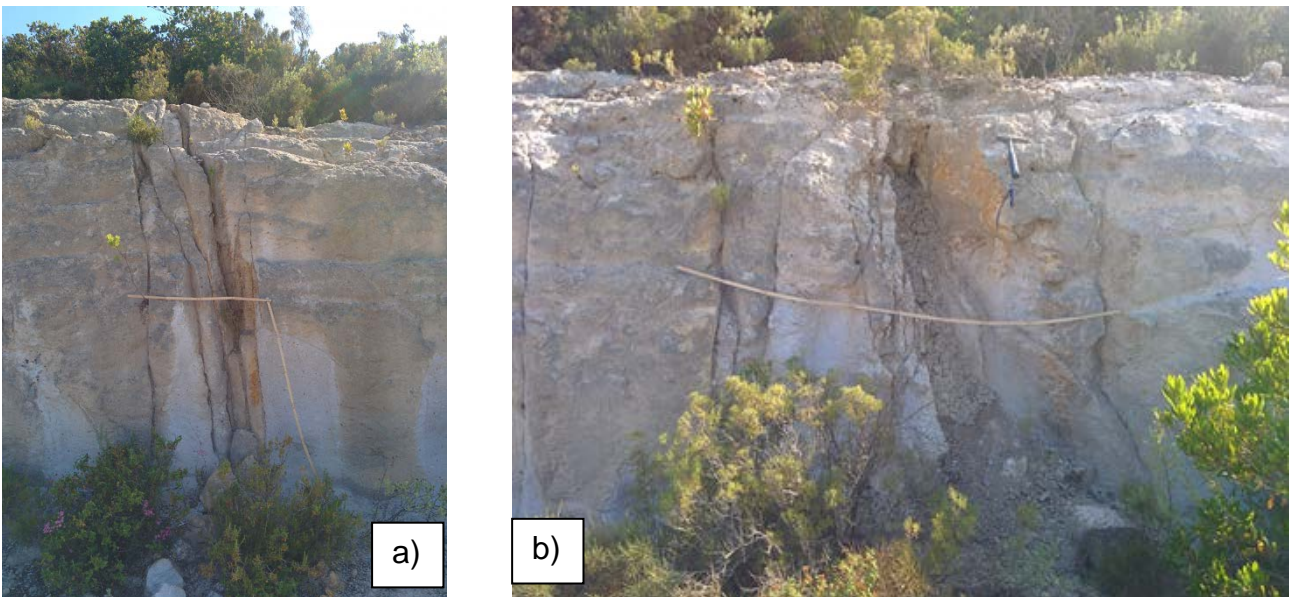


faglie a direzione N-S, con spaziature di qualche metro (Figura 5). Ai fine della descrizione di una struttura di faglia, in questi litotipi questa cava presenta diversi aspetti interessanti. Sono presenti due zone di faglia principali, con spessori variabili.



**Figura 4 - Fratture nella formazione riolitica di Monte Ulmus. Notare le fratture fortemente controllate dalla stratificazione e laminazione**

La prima è composta da 5 piani di taglio molto vicini tra loro (circa 10 cm), subparalleli e subverticali, che si uniscono lungo la direzione. Questi caratteri suggeriscono una componente orizzontale del movimento (cinematica trascorrente). Ciascun piano sviluppa uno spessore di pochi cm di rocce a granulometria ridotta, risultato dell'attività della faglia (Figura 5a). Nella stessa cava, un'altra faglia presenta una zona di deformazione composta da diversi piani e da una zona riempita da un *gouge* cataclastico (Figura 5b). In questo caso la zona di faglia è più ampia e la faglia in esame sviluppa una permeabilità secondaria lungo la direzione della faglia, mentre normalmente ad essa si comporta come una barriera.



**Figura 5 – Cava nelle rioliti di Serra di Paringianu. Notare la struttura della zona di faglia. Soltanto la zona di core della faglia b potrebbe avere caratteristiche di bassa permeabilità, distribuite lungo la direzione della faglia.**

In generale, il rapporto tra lo spessore della zona fratturata che varia tra 20 e 90 cm e quello della zona di taglio (con spessori non superiori a 2-3 cm) è a favore della prima, determinando un generale comportamento di tipo conduit alle strutture. Nel grafico e tabella (Figura 6) infatti i valori corrispondono ad 1 quindi tutta la zona di faglia corrisponde ad una zona fratturata.

Damage zone	Core zone
20	1
30	1,5
90	1
67	1
30	1,5
90	5

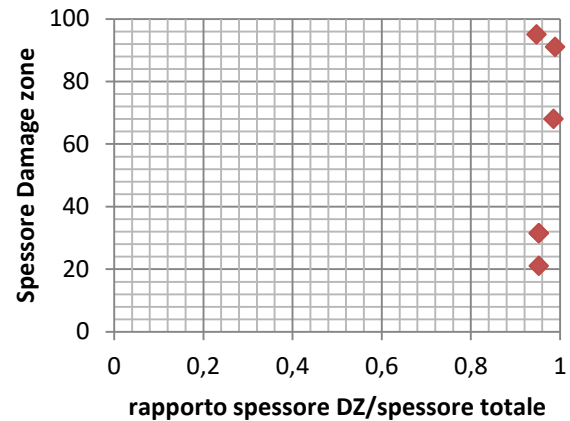


Figura 6 - Analisi dello spessore delle zone di faglia e delle zone fratturate. Il valore prossimo ad 1 del rapporto indica un comportamento di tipo conduit (sensu Caine et al., 1996).

In questa cava sono state misurate 21 faglie e zone di faglia complesse, con una spaziatura media di 1 metro (vedi Allegato 1, stop 12).

### 3.2 F.ne Cixerri

La Formazione del Cixerri è già stata analizzata nella prima campagna dedicata a questo lavoro, dove erano state misurate le fratture in una facies grossolana, composta da una alternanza di conglomerati e arenarie. Data la grande variabilità di questa formazione, e anche la scarsa estensione degli affioramenti considerati, durante questo lavoro sono stati eseguiti altri studi nella zona vicino alla miniera e nell'area orientale. Lo spessore e le facies di questa formazione sono da considerarsi uno degli aspetti meno definiti dell'area, anche se tutti gli studi idrogeologici effettuati nell'area parlano di una sostanziale impermeabilità di questa formazione, dovuta alla sua eterogeneità, spessore ed estensione. Come già accennato, due sono le aree considerate; la prima comprende una grande cava nella zona di Flumentepido (Figura 7). in questa cava affiora una associazione arenaceo pelitica della formazione, composta da orizzonti arenacei di spessore variabile, da qualche metro ad una decina di metri e da altrettanti orizzonti composti da argille. In generale la giacitura è piano parallela, ma sono presenti corpi lenticolari di arenarie. Nel complesso, la formazione sembra indisturbata, ma nelle arenarie sono presenti diversi sistemi di fratture e nella cava affiorano due elementi tettonici principali, costruiti da una faglia ad alto angolo trascorrente distensiva e un piccolo sovrascorrimento. La prima presenta direzione 140°-75° (immersione e pendenza) ed è una delle strutture appartenenti allo stesso sistema NNE-SSW che caratterizza le fasi finali della deformazione nell'area; la seconda è una piccola faglia inversa associata ad



una sinclinale di trascinamento, che, data la scala (pochi metri) e la bassa continuità, è probabilmente legata a processi di scollamento locale, generatosi all'interno della successione torbiditica e favoriti dai contrasti di competenza delle diverse litologie (Figura 7 b e c; Allegato 1, stops 13-17).

Nel caso della faglia principale, la zona di fratturazione associata è di spessore ridotto, anche se la struttura non sviluppa un vero e proprio core e l'intero spessore della zona deformata è di pochi metri (2 m circa). Questo suggerisce che tali elementi nel caso attraversino l'intera formazione potrebbero essere delle vie di migrazione.

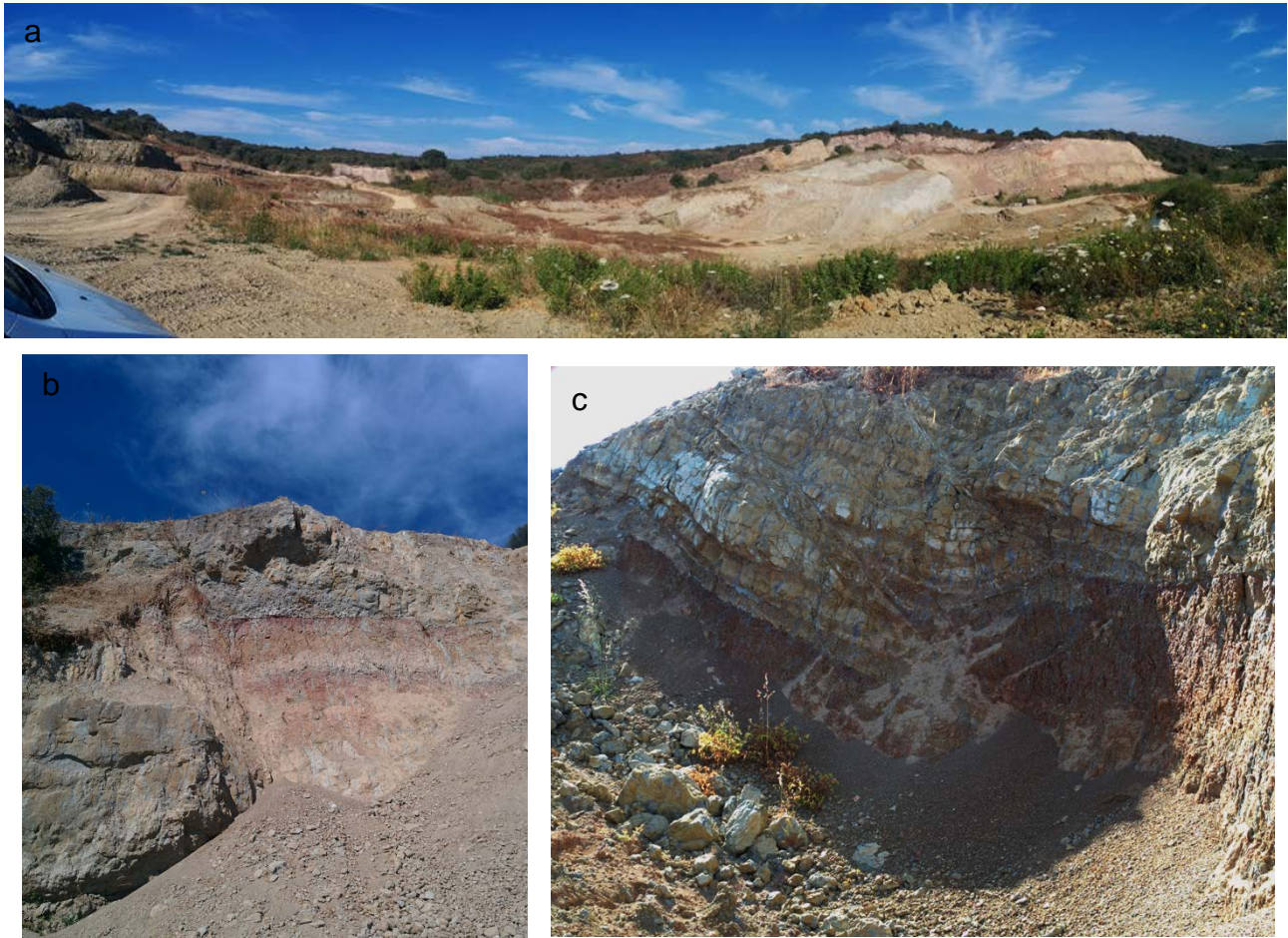


Figura 7 – a) Panoramica della parte settentrionale della cava di Flumentepido (vista da sud est. b) faglia ad alto angolo, con zona di faglia di circa 1 metro di spessore e tre di rigetto verticale; c) faglia inversa associata ad una piega (rigetto di circa mezzo metro).

### 3.3 Andesiti

Il gruppo delle andesiti mioceniche, comprende un certo numero di litologie, messi in posto nel Burdigaliano. Queste rocce sono presenti nel sottosuolo della Piana di Matzaccara, incontrate in sondaggio (sondaggio SR1 report RSE, 2012), ma affiorano solo nel settore orientale dell'area (Gruppo di Carbonia, Figura 8), dove poggiano sulla F.ne del Cixerri. In questa zona sono state effettuate diverse misure, allo scopo di caratterizzare la deformazione. Della intera successione è stata analizzata la porzione basale, poggianti



sulla F.ne del Cixerri. Qui le “Andesiti” sono costituite da depositi piroclastici di flusso e da brecce epiclastiche. Le brecce sono poligeniche ed eterometriche con elementi lavici anche di grandi dimensioni. Questa eterogeneità comporta che faglie e fratture presentano in generale piani fortemente irregolari e caratterizzati da una forte rugosità (Figura 9).

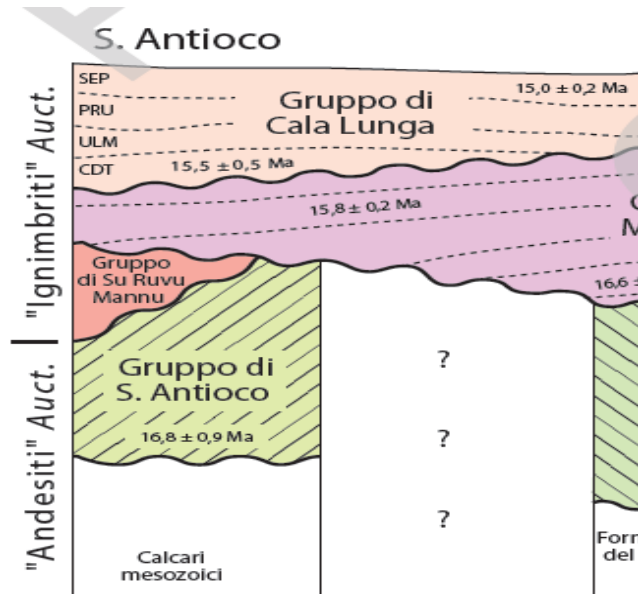


Figura 8 – Schema dei rapporti stratigrafici tra i diversi gruppi del complesso vulcanico terziario del Foglio 564 Carbonia.

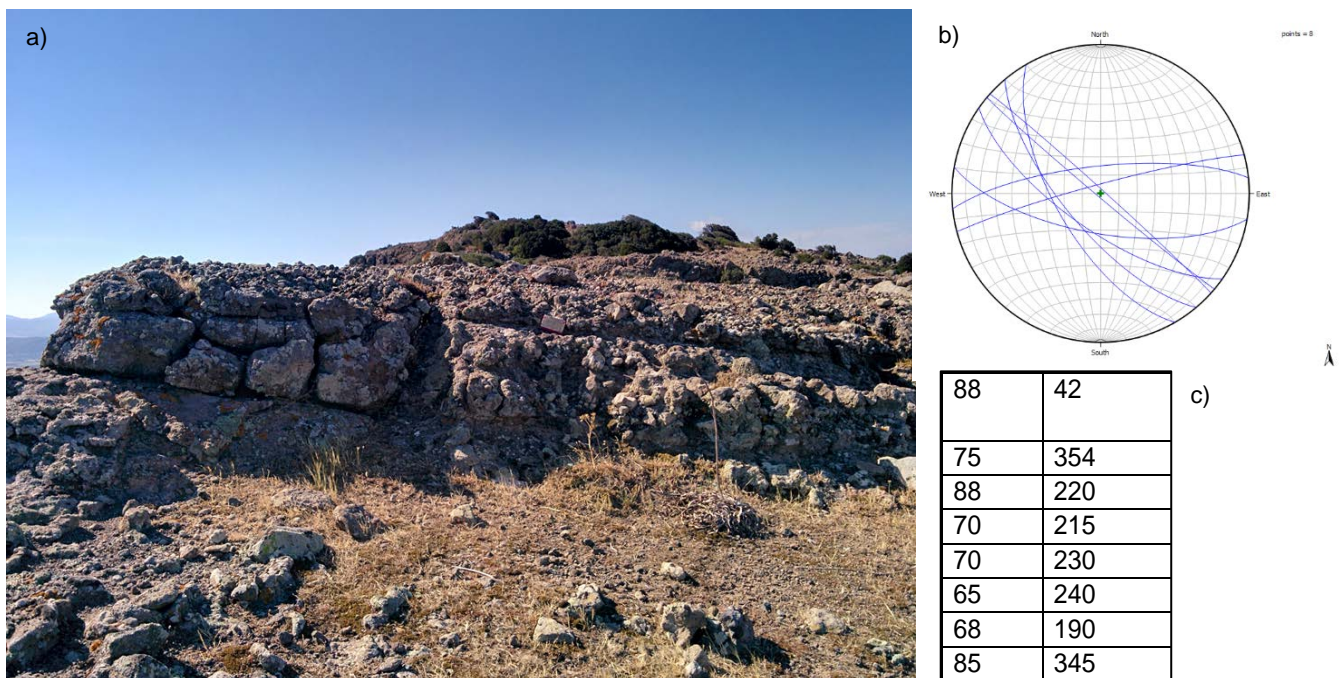


Figura 9 – Cima del rilievo a sud dell’abitato di Is Pintus. A) Livelli di brecce delle Andesiti, tagliate da una faglia e da diverse fratture. Notare la irregolarità dei piani e il ridotto spessore della zona di faglia; b) principali direzioni dei piani di faglia; c) misure delle faglie individuate.



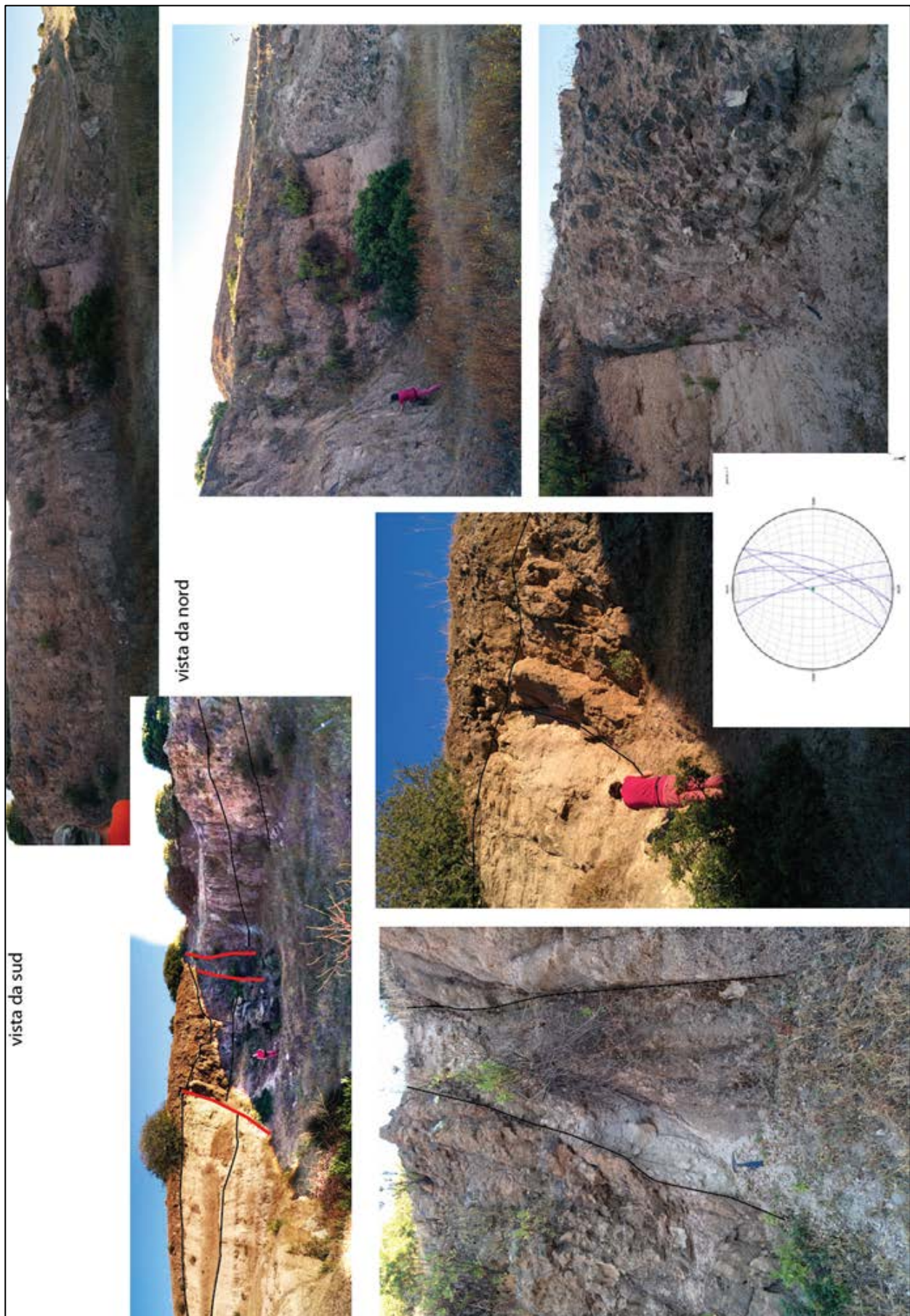


Figure 10 - panoramica e dettaglio della faglia nelle andesiti. Vedi testo per spiegazioni

#### 4 LA DEFORMAZIONE RECENTE: IMPLICAZIONI PER GLI ESPERIMENTI DI INIEZIONE

L'analisi della deformazione nelle andesiti ha coperto anche la zona intorno al lago di Monte Prano, dove questi litotipi affiorano estesamente. In particolare, in località Serra de Mesu, affiora un sistema di faglie normali che coinvolgono sedimenti recenti. Queste due strutture consistono in due faglie normali parallele, a direzione circa N-S (Fig. 10). Esse immergono entrambe verso Est, e ribassano progressivamente le lave andesitiche autoclastiche e i depositi quaternari che immergono dolcemente verso sud. I piani di faglia attraversano diverse litologie e sviluppano differenti tipi di deformazione. Nella Fig. 10 sono riportate due panoramiche della piccola cava. La faglia più orientale coinvolge i depositi continentale di sabbie immergenti verso sud est nell'hanging wall a sud, mentre nel footwall sono visibili depositi piroclastici delle andesiti basculati verso la faglia. Questi sono anche l'unità di tetto della seconda faglia che immerge dalla stessa parte della precedente ma che coinvolge principalmente le andesiti. Infatti il piano taglia in modo obliquo gli strati facendo sì che da una parte affiori il contatto con i livelli clastici, mentre dall'altra il piano attraversa le andesiti autoclastiche. Tra i due piani principali sono stati misurati circa 15 metri, mentre le zone di faglia hanno spessori che variano dai 50 cm al paio di metri. Esaminando la carta geologica del Foglio 356 Carbonia 1:50.000 è possibile notare come queste strutture siano allineate con una faglia normale affiorante più a nord, con la stessa direzione, a partire da M. Omus. In questo caso la faglia considerata potrebbe avere una maggiore importanza, sviluppandosi con maggiore continuità per una lunghezza di qualche chilometro. I rigetti osservati invece sono di pochi metri. La cinematica in generale è di tipo dip slip (normale alla direzione), ma su alcuni piani sono state osservate anche strie oblique ad indicare la presenza di una piccola componente trascorrente.

Le strutture affioranti in questa zona indicano che le faglie post-vulcanismo più recenti nell'area non sono una eccezione, ma costituiscono un sistema piuttosto diffuso e presente, attivo durante il Quaternario. Le principali direzioni indicate nelle note del Foglio geologico sono WNW-ESE e N-S. quest'ultima direzione risulta predominante, sia nella zona di Matzaccara che nella attigua area del lago di Monte Prano.

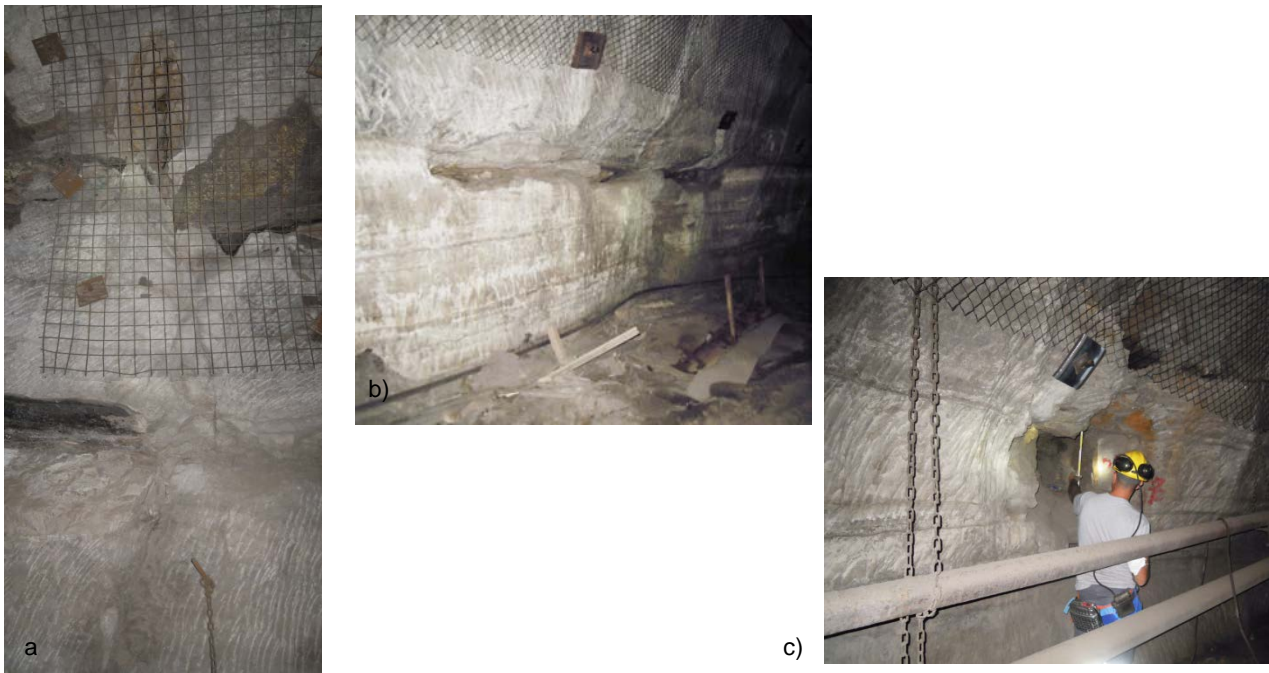
Questo affioramento ha quindi una certa importanza per le future attività nell'area perché mostra le geometrie di una zona di faglia complessa e soprattutto le sue dimensioni (spessore, tipo di litologie, frequenza dei piani) che può essere utilizzata per la modellazione.

#### 5. OSSERVAZIONI NELLA MINIERA NURAXI FIGUS

Nella miniera è stata esaminata la porzione inferiore della formazione del Miliolitico. Questa è poi tagliata dalla Faglia di Sinni est che ribassa la formazione del Lignitifero. Purtroppo in corrispondenza di questa struttura e della Formazione del Lignitifero le pareti della galleria sono quasi completamente rivestite con centine di ferro. Questo non ha permesso l'osservazione della formazione e neanche l'esecuzione delle misure. La formazione del Miliolitico invece è stata esaminata anche in questo intervallo stratigrafico che presenta una notevole zonazione. A partire da circa 10 metri dalla faglia, dove le



pareti della galleria sono di nuovo esposte, la deformazione è costituita da una sequenza di faglie normali e trascorrenti (ad alto angolo) che presentano notevoli valori di apertura e fenomeni di percolazione di acqua. Queste strutture presentano un evidente comportamento di tipo conduit e ad esse è associata anche una discreta attività di tipo carsico. Infatti si osserva come le cavità carsiche sfruttano le discontinuità della faglie per svilupparsi e poi sfruttano la diversa erodibilità degli strati per sviluppare cavità in direzione subparallela alla stratificazione. Queste cavità raggiungono in questa porzione della successione anche le dimensioni di pochi metri e si presentano come piccole grotte carsiche, in cui sono presenti anche concrezioni e cristalli di calcite (Figura 10).



**Figura 10 – a) cavità carsica aperta sul soffitto della galleria lungo il piano di faglia. La maglia della rete è di 7 cm. B) cavità carsiche che si sviluppano lungo la stratificazione. C) cavità carsica con diametro di circa 60 cm sempre lungo una faglia.**

Al di sopra di questa porzione, si incontrano alcuni livelli dolomitici. Dopo questo intervallo e prima dei livelli basaltici subparalleli alla stratificazione, si attraversa una porzione rocciosa in cui abbondano le vene di estensione. Queste presentano riempimento sintassiale multiplo e in alcuni casi sono anche esse localmente beanti (Figura 11).

La variazione del tipo di deformazione indica chiaramente una variazione nelle modalità di circolazione dei fluidi nella formazione. Nella parte più bassa l'acqua ha circolato (e circola tuttora) con una certa facilità (basse pressioni) favorendo la dissoluzione dei carbonati con lo sviluppo di cavità carsiche. Nella parte superiore, la presenza di vene indica invece una modalità di circolazione controllata principalmente dalla pressione che da una parte favorisce la fratturazione e che, nelle fratture aperte favorisce la cristallizzazione mediante locali e temporanei "stress drop" (Sibson, 1996, 2004).



Figura 11 –a, b Vene di calcite nella parte alta della formazione del Miliolitico.

## 6. ANALISI DELLA FRATTURAZIONE

Sia i dati provenienti dalle scanlines di superficie nelle litologie di copertura che i dati provenienti dalla miniera per il *reservoir* sono stati integrati con quelli già raccolti per ottenere i parametri statistici rappresentativi del sistema di fratture analizzato, e che saranno utilizzati per generare il *Discrete fracture network* (DFN) all'interno del volume di roccia considerato e nel modello di sintesi presentato alla fine di questo report.

La rielaborazione e quindi la generazione del DFN è stata eseguita mediante l'utilizzo di software dedicati, con licenze accademiche. Nel caso in esame è stata utilizzata la versione 2016 del programma Move 2015 e 2016, prodotto dalla Midland Valley (UK).

### 6.1 Densità di fratturazione, spaziatura delle faglie e saturazione

La spaziatura e la densità di fratturazione sono state calcolate per ogni set di fratture considerati; i set di fratture, ottenuti dopo la correzione di Terzaghi, sono riportati per ogni scanline nell'allegato 2, dove sono indicate anche la frequenza per ogni set. Nella Tabella 1 sono invece riportate i valori medi per ogni scanline, distinte per tipo litologico.

**Tabella 1 - valori medi di spaziatura e di saturazione di tutte le scanline effettuate.**

scanline	spaziatura (cm)	litologia	saturazione
scanline 1 (20m)	82,24	Rioliti	1,21
scanline 2 (10 m)	18,75	Rioliti	0,68
scanline 3 (7 m)	26,12	Andesiti	1,4
scanline 4 (6,5 m)	24,04	Andesiti	0,74
scanline 5 (6,6 m)	17,83	Cixerri	0,75
scanline 6 (7,5 m)	22,78	Cixerri	0,41
scanline 7 (6,30 m)	18,08	Miliolitico	0,73
scanline 8 (4,45 m)	18,54	Miliolitico	0,65
scanline 9 (120 m)	8 metri	Miliolitico	12
Scanline 10 (40 m)		Miliolitico	
Scanline (300 m)		Miliolitico	

Per quanto riguarda i valori delle scanline in superficie, per tutte e tre le litologie considerate i valori di spaziatura sono piuttosto alti, e corrispondono quindi ad una bassa densità di fratturazione. La densità, infatti, insieme con la connettività costituiscono i due elementi principali che controllano la permeabilità secondaria. Inoltre, confrontando i valori di saturazione con quelli della Tabella 2, si tratta di sistemi poco sviluppati, con spaziature irregolari. I dati ottenuti per la Tabella 1 sono confrontabili con quelli raccolti nel 2014 sulle rocce di copertura (report 2014). In particolare per il Cixerri (spaziatura 19,72 cm e saturazione 0,87), i valori sono molto simili a conferma di una certa omogeneità della distribuzione della fratturazione nella Formazione. Diversi invece sono quelli per le vulcaniti, suggerendo che in questo caso le litologie sono molto influenti sulla distribuzione della fratturazione.

Per quanto riguarda i dati presi in miniera, per le scanline di 6 e 4 metri, i valori della spaziatura sono piuttosto alti (18 cm). Questo valore, che conferma quello ottenuto dalle misure dello scorso anno (12 e 16 cm) è probabilmente da considerare in relazione con la maggiore pressione di confinamento che favorisce la localizzazione della deformazione, per cui in profondità si sviluppa un numero minore di piani a parità di stress applicato. Questo è confermato dal valore della saturazione, anche questo alto. Un valore alto di saturazione corrisponde a un sistema poco sviluppato, dove cioè la spaziatura è disomogenea (Tabella 2).

**Tabella 2 – Classificazione della maturità dei set di fratturazione (Wu&Pollard, 1995).**

<b>Grado di saturazione</b>	<b>Descrizione qualitativa della distribuzione delle fratture</b>
>0,70	poco sviluppato
0,60-0,70	da poco a intermedio
0,50-0,60	Intermedio
0,40-0,50	da intermedia a ben sviluppato
<0,40	ben sviluppato

Tenendo conto del fatto che le misure sono state fatte in continuità lungo la galleria con diversi intervalli di 20 metri l'uno, però, analizzandoli separatamente si può osservare come si passa da una spaziatura di 6 metri a una di 11 metri allontanandosi dalla zona della faglia principale, nella galleria di afflusso. Tuttavia il valore di saturazione che si ottiene è fuori scala. Questo indica che le strutture misurate hanno fortemente localizzato la deformazione (quindi il valore che valuta la variazione della densità indica una forte disomogeneità); sono quindi faglie, e non fratture e rappresentano la deformazione fragile in un ordine di grandezza superiore. I piani di faglia osservati sono distribuiti in piccoli gruppi separati da zone pressoché indeformate. Inoltre spesso i sistemi di fratture e di faglie si intersecavano tra di loro, come risulta dalla osservazione delle terminazioni delle tracce delle fratture e dal riconoscimento di sistemi coniugati di faglie. Nella tabella dell'allegato 2 sono inoltre riportati quali di queste strutture presentano percolazione di fluidi, e, di conseguenza una notevole permeabilità, essendo esse posizionate ad una profondità tra i 350 e i 400 m sotto la superficie.

## 6.2 Connettività e apertura

Nella definizione di un sistema di fratture e di faglie un elemento molto importante è dato dalla connettività e dalla presenza di fratturazione diffusa vicino alla zona di faglia.

La connettività può essere espressa come il rapporto tra il numero di terminazioni in un'altra frattura o nella stratificazione (F e S nelle tabelle) in rapporto con il numero totale di terminazioni misurate. In Tabella 3 sono riportati i valori in percentuale calcolati per tutte le scanline misurate.

Ad eccezione della prima scanline nelle rioliti dove la connettività è piuttosto alta, in generale i valori sono medi e bassi. Nel caso della F.ne del Cixerri, tutte le fratture terminano in corrispondenza del passaggio tra le arenarie e le argille, indicando come questi network di fratturazione sono confinati nella porzione arenacea della successione.



Questo è stato osservato anche in alcune porzioni della F.ne del Miliolitico, dove ci sono passaggi litologici importanti (dolomie-calcari) o in corrispondenza di livelli argillosi o paleosuoli. Per le scanline delle faglie, l'intersezione tra piani di faglia risulta essere molto importante, e in molti casi consiste anche nella zona di circolazione dell'acqua. In particolare, nella porzione inferiore del Miliolitico, oggetto dell'analisi di quest'anno, lungo le zone di faglia si è impostato il processo di dissoluzione per carsismo, creando cavità anche dell'ordine del metro, come già descritto in precedenza (Figura 10).

Tuttavia l'intersezione con le altre faglie è stata annotata nelle note, presenti nell'Allegato 2. Si nota che il numero di faglie che si intersecano tra loro varia da una porzione all'altra della galleria analizzata, che attraversando tutta la formazione del Miliolitico, permette una distinzione in zone a maggiore o minore connettività. Inoltre, nelle scanline a 30 metri è stato misurato lo spessore della zona fratturata associata alla faglia. I valori di connettività e i valori medi della zona fratturata sono riportati nella Tabella 3. Questo valore, che è molto variabile, permette però di valutare il potenziale di connettività delle faglie considerate.

**Tabella 3 – Valori di connettività e spessore medio della zona fratturata.**

scanline	litologia	Connettività (%)	Apertura (media)	spessore media D
scanline 1 (20m)	Rioliti	82	3 mm	
scanline 2 (10 m)	Rioliti	63	0,5 mm	
scanline 3 (7m)	Andesiti	35		
scanline 4 (6,5 m)	Andesiti	62		
scanline 5 (6,6 m)	Cixerri	stratabound		
scanline 6 (7,5 m)	Cixerri	stratabound		
scanline 7 (6,30 m)	Miliolitico	43	1,07 mm	
scanline 8 (4,45 m)	Miliolitico	stratabound	1,27 mm	
scanline 9 (160 m)	Miliolitico			4 cm
Scanline 10 (40 m)	Miliolitico			
Scanline 11 (300 m)	Miliolitico			

## 7. COSTRUZIONE DEI DFN

Utilizzando i dati descritti nei precedenti paragrafi, sono stati ricostruiti dei DFN, cioè dei modelli tridimensionali rappresentativi delle fratture e faglie misurate. Questo lavoro è stato svolto utilizzando il software Move 2016, con licenza accademica.

Per costruire questi modelli è necessario fornire alcuni dati di input, che consistono in parametri statistici rappresentativi della popolazione di faglie e fratture misurate, che andranno a popolare un volume 3D rappresentativo del modello geologico considerato o della porzione rocciosa misurata.

In questo report verranno presentati diversi DFN. Per i DFN relativi alla miniera, come per il report precedente si è scelto di rappresentare il network di fratture riproducendo il volume mancante della galleria. In questo modo non è stato necessario scalare i parametri statistici misurati in quanto il volume considerato è alla stessa scala della componente della fratturazione osservata direttamente. Questi valori verranno discussi qui di seguito.

Inoltre in questo report viene presentato un modello 3D riassuntivo e rappresentativo della successione dell'area (Allegato 4) in cui sono riportati i DFN basati sui valori medi ottenuti dalla rielaborazione di tutti i dati suddivisi per formazioni o principali intervalli.

## 7.1 DFN dalla miniera

Per i valori contenuti nella miniera è stata seguita la stessa procedura proposta lo scorso anno, calcolando valori di permeabilità usando la scala delle scanline a 10 metri e poi usando quella solo per le faglie e unendo poi insieme i due valori ottenuti.

Nel report sono discussi due DFN, uno per la galleria di riflusso e uno per quella di afflusso, costruito solo per le faglie, misurate lungo le scanline a 120 e 300 metri (Tabella 4). Questi valori possono poi essere combinati con quelli ottenuti dalla scanline a 10 metri che rappresenta gli ordini di grandezza minori (dal mm al metro).

**Tabella 4 - Dimensioni dei volumi considerati e delle celle di calcolo nel modello di sintesi e per la miniera**

<b>Galleria</b>	<b>Lunghezza</b>	<b>Larghezza</b>	<b>altezza</b>	<b>Dim celle</b>
Afflusso	500 m	10 m	5 m	1mX1mX1m (h)
Riflusso	70 m	10 m	5 m	1mX1mX2,5m (h)

Per la galleria afflusso sono state utilizzate le scan line con le fratture/faglie principali (scan line 2-3-4-5-6 del 2015 + scan line FRATTURE PRINCIPALI GAP e GAP300m del 2016) per una lunghezza totale di 483 metri. Sono stati quindi calcolati i set e il P32 prendendo come riferimento la lunghezza totale. Il volume usato è indicato in Tabella 4. Nell'allegato 4 sono riportati i risultati ottenuti per due prove con diversa apertura: una con 10 mm di apertura media e una con 50 mm.

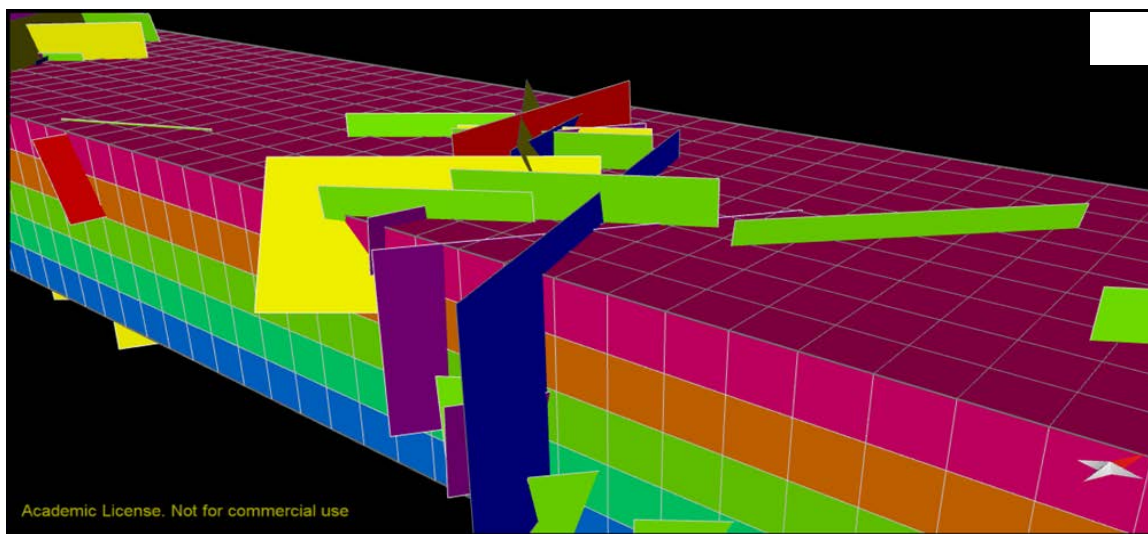
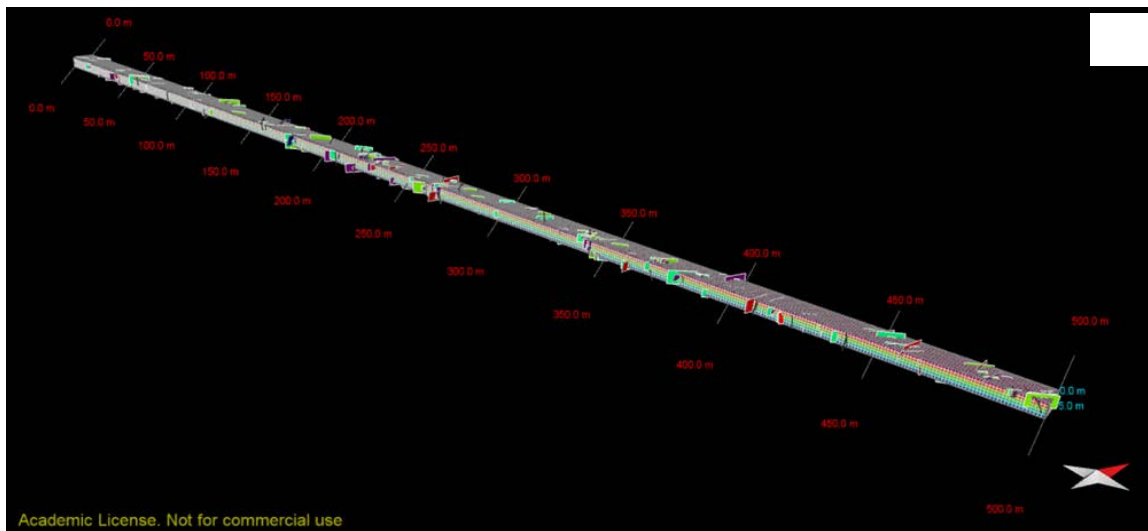


Figura 12 – a) DFN ottenuto per la galleria di afflusso; b) dettaglio delle fratture generate dal software.

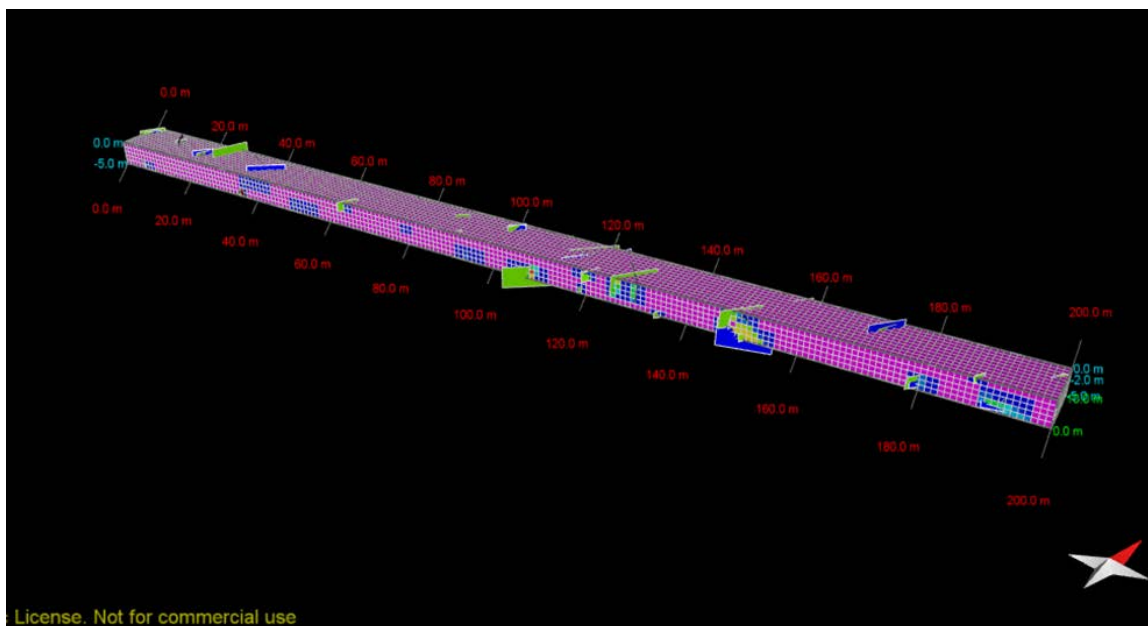


Figura 13 - modello della galleria di riflusso (lunghezza 200 m)

## 7.2 Modello di sintesi

Per la ricostruzione di un modello di sintesi che rappresenti la porosità secondaria distribuita nella successione stratigrafica dell'area, è stata ricostruita una successione rappresentativa.

Innanzitutto, sono stati realizzati dei volumi sulla base della stratigrafia nota in letteratura, dalla quale sono stati desunti gli spessori dei vari gruppi di formazioni e la possibile geometria di sedimentazione. In Figura 14 è riportato lo schema stratigrafico utilizzato. L'area di ciascun volume è 1000 m x 1000 m.

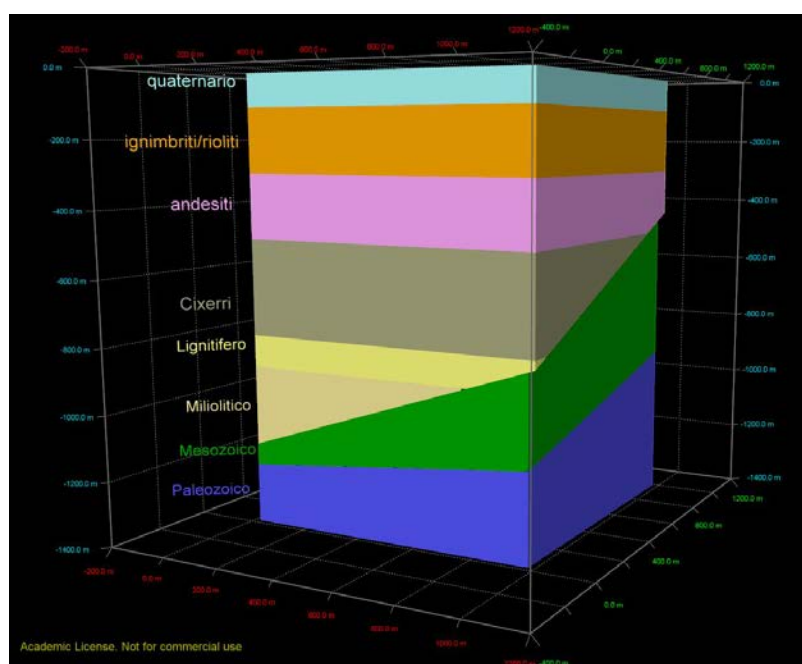


Figura 14 - Volumi delle formazioni (tetravolume) utilizzati per la costruzione dei DFN. I colori corrispondono alla sequenza stratigrafica. Notare la *unconformity* rappresentata dal piano inclinato sulla quale poggiano in discordanza i terreni della sequenza cenozoica.

Per ciascun volume è stata poi creata una griglia avente dimensioni 10 m x 10 m, da cui sono stati ricavati i “geocellular”, cioè volumi costituiti da singole celle con dimensioni 10 m x 10 m x 10 m (Figura 15; Tabella 5).

Tabella 5 – Tabella riassuntiva dei volumi realizzati ed il rispettivo numero di celle calcolato.

Litologia	Volume geocellular (m <sup>3</sup> )	N° celle
<i>Ignimbriti/rioliti</i>	200,000,012	200,000
<i>Andesiti</i>	199,746,607	200,000
<i>Cixerri</i>	230,173,688	285,200
<i>Lignitifero</i>	37,612,096	100,100
<i>Miliolitico</i>	21,453,882	142,560
<i>Mesozoico</i>	280,835,625	494,400
<i>Paleozoico</i>	343,387,032	504,700

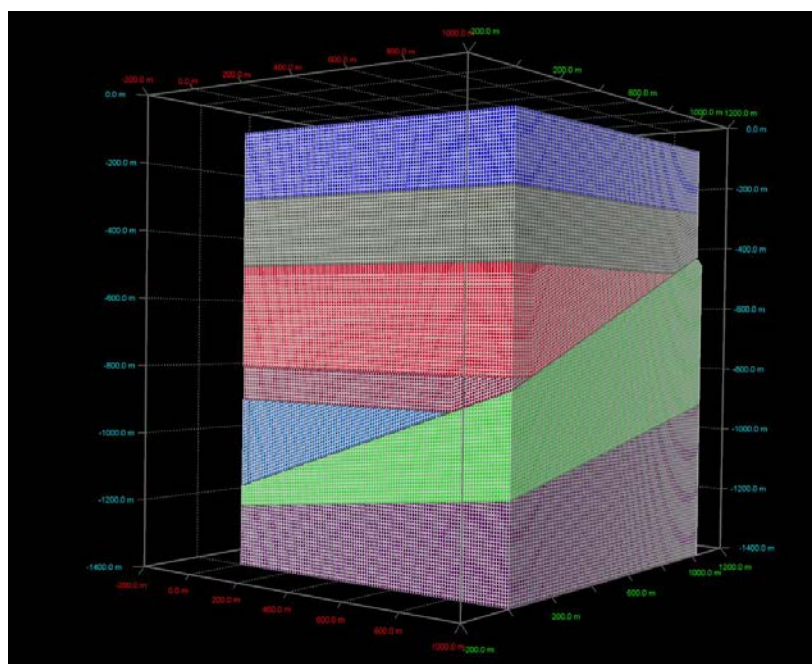


Figura 15 – Geocellular dei volumi.

I parametri di input da inserire nel modulo “Fracture Modelling” di Move sono stati calcolati a partire dalle scan lines misurate in campagna nei due rilevamenti del 2014 e del 2016. In particolare, sono stati ricavati i dati relativi alla densità di fratturazione, distribuzione delle lunghezze ed orientazione dei set di fratture. In Allegato 5 sono riportate le tabelle relative a ciascun set di fratture analizzato ed i parametri calcolati.

Per ciascun volume, sono stati realizzati diversi DFN, variando i parametri di lunghezza ed apertura delle fratture, in modo da ottenere diversi scenari di variazione della porosità e permeabilità. In questo modo è possibile fare delle valutazioni non solo delle potenzialità del reservoir, ma anche della tenuta della copertura. L’acquisizione del dato geofisico e la definizione del modello geologico finale permetterà poi di utilizzare questi dati inserendoli nel modello.

In particolare, per il volume “ignimbriti/rioliti” sono state utilizzati i dati relativi a diversi litotipi misurati in affioramento, in modo da valutare anche le possibili influenze legate alla composizione delle rocce, che potrebbero influenzare lo stile deformativo e la densità di fratturazione.

In Tabella 6 sono riportati i parametri calcolati per ciascun DFN. Dalla lettura dei dati ottenuti, si vede come, a parità di P32 (cioè di densità di fratturazione), il parametro che crea una maggiore variabilità è l’apertura delle fratture; infatti si ha un raddoppio del valore di porosità secondaria quando si aumento l’apertura da 0.5 a 1 mm. La lunghezza, viceversa, influisce relativamente sul volume di fratture generato.

I valori massimi di porosità secondaria si hanno per i calcari del Miliolitico e dell’Urgoniano, che hanno una porosità rispettivamente di 0.02% e 0.05%. Ciò è ancora più evidente in Figura 16, dove si può vedere bene il contrasto di porosità e permeabilità totale tra le formazioni carbonatiche e le sovrastanti unità vulcaniche e silico-clastiche.



**Tabella 6 – Tabella riassuntiva dei parametri ottenuti dalle varie simulazioni di fracture modeling. I DFN sono divisi per litologia. Per i dettagli, si veda l'allegato 5.**

litologia	DFN	volume tot. (m <sup>3</sup> )	n° fratture	volume fratture (m <sup>3</sup> )	porosità secondaria	apertura media	P32 medio (1/m)
CNM	1	200,000,012	5164	7368.06	0.00370%	0.518 mm	0.071
	2	200,000,012	37045	9461.28	0.00470%	0.6 mm	0.074
	3	200,000,012	848890	9259.14	0.00460%	0.5mm	0.077
	4	200,000,012	848890	18518.3	0.00930%	1.1 mm	0.077
	5	200,000,012	3698287	19666.4	0.00980%	1.2 mm	0.077
NUR	6	200,000,012	1048526	11431.7	0.00570%	0.599 mm	0.095
	7	200,000,012	1048526	22863.5	0.01100%	1.19 mm	0.095
	8	200,000,012	4581306	12145.8	0.00600%	0.63 mm	0.095
ULM	9	200,000,012	594190	6436.63	0.00320%	0.59 mm	0.053
	10	200,000,012	594190	12873.3	0.00640%	1.19 mm	0.053
	11	200,000,012	2605578	6857.48	0.00340%	0.6 mm	0.053
PRU	12	200,000,012	242069	3285.19	0.00160%	1.36 mm	0.0119
	13	200,000,012	242069	16425.9	0.00820%	6.8 mm	0.0119
	14	200,000,012	9530	15680	0.00784%	6.8 mm	0.0114
GMN	15	199,746,607	20467	10485.9	0.00520%	1.27 mm	0.041
	16	199,746,607	2041052	10832	0.00540%	1.27 mm	0.041
	17	199,746,607	467904	5090.7	0.00250%	0.59 mm	0.042
CIX	18	230,173,688	3270669	17024.5	0.00730%	0.12 mm	0.057
	19	230,173,688	739922	15858.5	0.00689%	1.2 mm	0.057
MIL	20	21,453,882	262061	2791.01	0.0130%	0,59 mm	0.217
	21	21,453,882	262,061	5582.02	0.0260%	1,19 mm	0.217
	22	21,453,882	991,741	5963.3	0.0270%	1,27 mm	0.219
URG	23	280,835,625	624222657	140901	0.0502%	1.2 mm	0.417
GNN	24	343,387,032	1337937	29347.2	0.00854%	1.19 mm	0.071

Ai fini di un futuro stoccaggio geologico di anidride carbonica, questi risultati sono molto interessanti, in quanto il volume del reservoir utilizzabile potrebbe essere esteso verso il basso nelle formazioni carbonatiche mesozoiche, qualora i dati di geofisica, ma soprattutto nuove perforazioni profonde ne accertassero la presenza effettiva in profondità. Per quanto riguarda la copertura, invece, sia la Formazione del Cixerri, sia le vulcaniti mioceniche (andesiti, rioliti e ignimbriti) hanno una porosità medio-bassa e passa permeabilità, che aumenta localmente soltanto in corrispondenza delle strutture tettoniche principali.

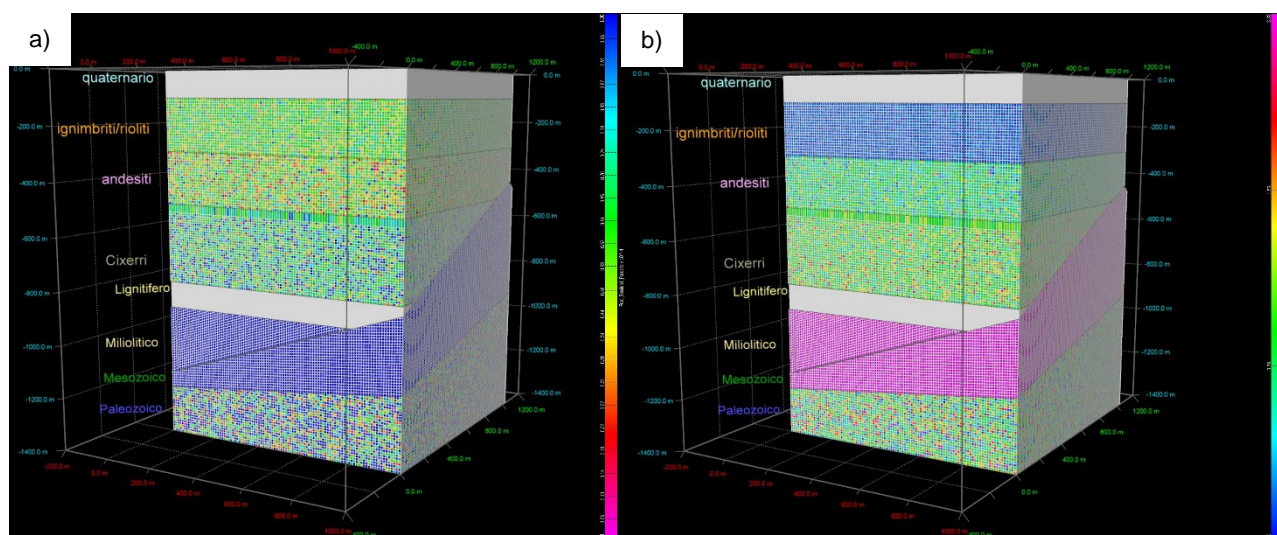


Figura 16 – Risultati del Fracture Modeling delle diverse formazioni: a) porosità secondaria; b) permeabilità totale. Da notare che per il Lignitifero e il Quaternario non sono stati calcolati DFN per mancanza di affioramenti in superficie.

## 8. MODELLO GEOLOGICO 3D DELL'AREA DI MATZACCARA

Per la ricostruzione del modello geologico dell'area di Matzaccara sono stati utilizzati i dati attualmente disponibili e sono stati importati nel software Move 2016 al fine di impostare uno spazio 3D dove inserire anche i successivi dati geofisici in modo da avere una sintesi dell'assetto geologico dell'area.

I dati utilizzati sono:

- carta geologica 1:50.000 F° Carbonia n° 564;
- valori misurati in campagna (giaciture, faglie);
- modello digitale di terreno.

I limiti geologici e le giaciture sono state digitalizzate e riportate nel 3D, proiettandole sulla topografia. Sulla base dei vincoli geologici superficiali, sono stati quindi costruiti 3 profili geologici (Figura 17).

Poiché gli affioramenti sono tutti dei membri vulcanici più recenti e mancano del tutto i logs di pozzo, sono stati ricostruiti soltanto gli orizzonti che sono compresi tra le rioliti di Serra di Paringianu (SEP) alle Rioliti di Monte Crobu (CBU). Gli spessori delle formazioni sono stati in parte calcolati dai dati del F° 564 – Carbonia, e in parte desunti dalle note illustrative dello stesso Foglio geologico. Per quanto riguarda i lineamenti tettonici, le tracce sono state disegnate a partire dalle tracce della Carta geologica fornita da Carbosulcis S.p.A..

Di seguito verranno descritte le sezioni da Sud a Nord.



a)

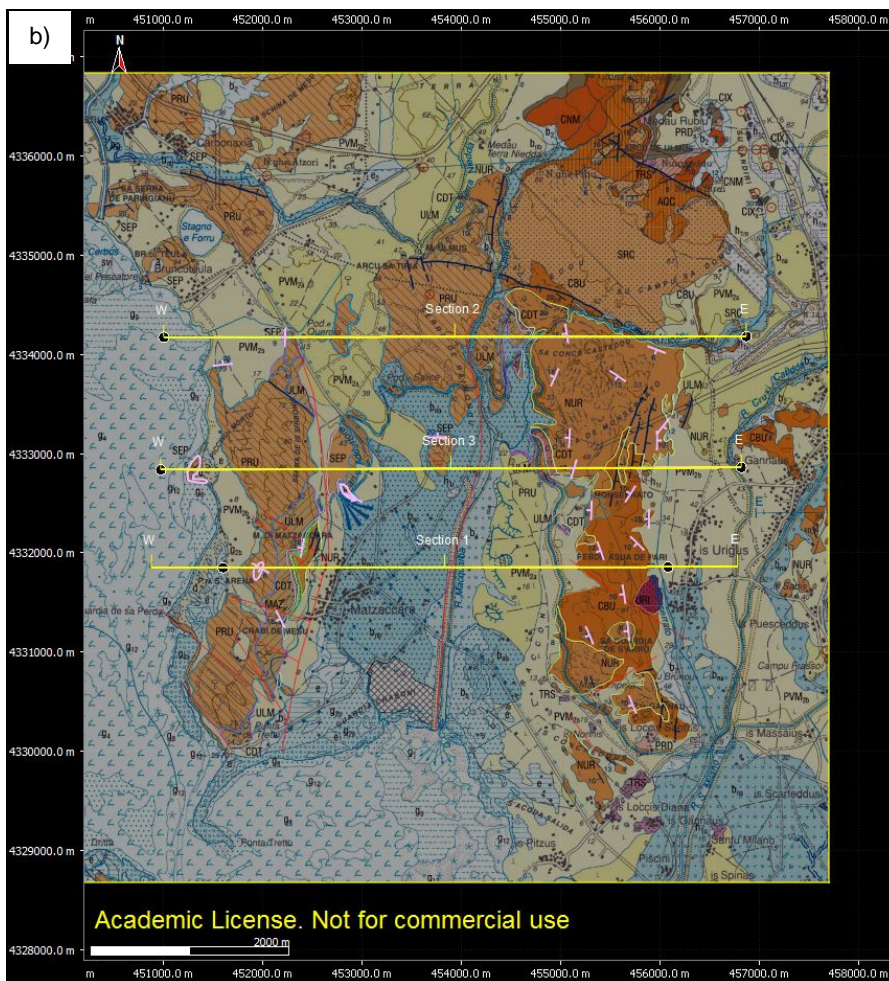
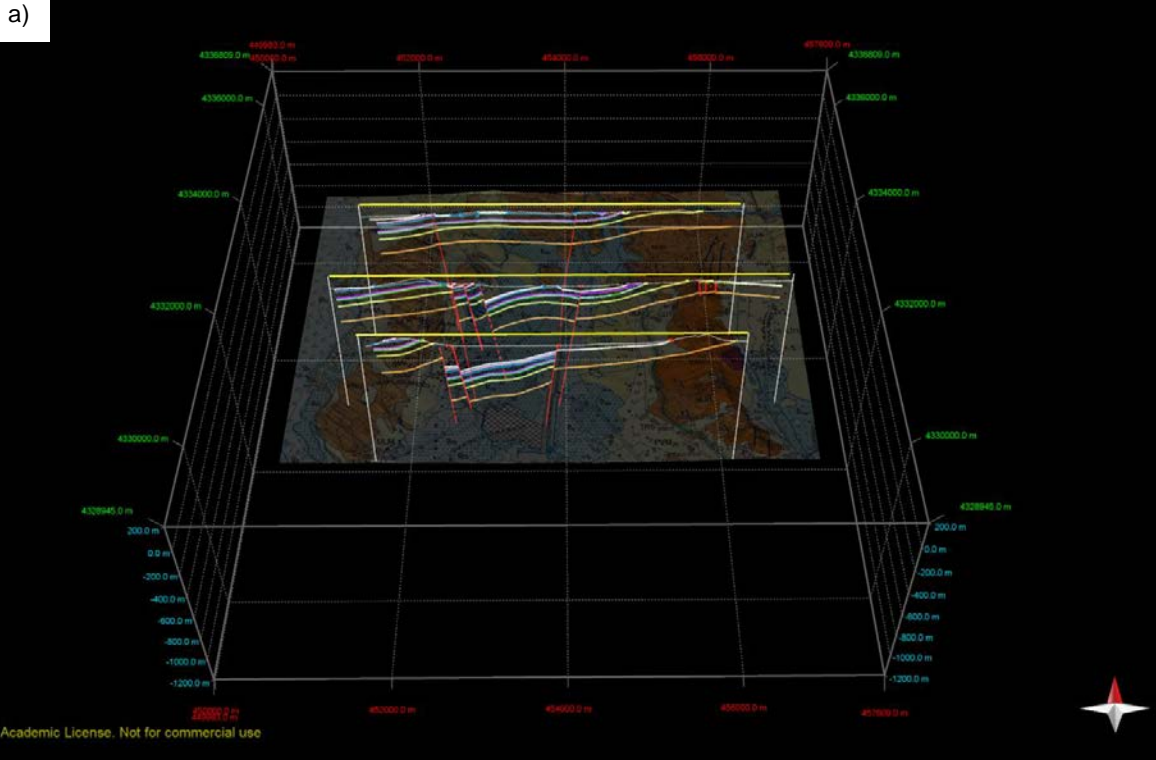


Figura 17 - Modello geologico 3D dell'area di Matzaccara: a) vista in 3D e b) in mappa.

In sezione 1 (Figura 18) è stato possibile ricostruire molto bene i limiti affioranti nella porzione più occidentale della sezione, in quanto sono continui e ben esposti, in questo modo sono stati ricavati anche gli spessori medi. Nella parte centrale, invece, si hanno le due faglie principali del semi-graben che dislocano la successione; a colmare il bacino si hanno i sedimenti pleistocenici e quaternari, con una tipica geometria a ventaglio.

Nella sezione 3, posizionata nel centro della piana, si vede come i rigetti delle faglie tendano a diminuire, mentre l'orizzonte corrispondente alle Daciti di Matzaccara tende a chiudersi via via che si procede verso E; infatti non si rinviene in affioramento nella dorsale di Is Irigus (Figura 19).

Nella sezione geologica 2, la più settentrionale dell'area, i dati in affioramento e le relative giaciture indicano una certa continuità dei limiti, con i rigetti delle faglie che tendono ad annullarsi (Figura 20); ciò potrebbe essere dovuto a variazioni del rigetto lungo lo strike della faglia. Inoltre bisogna considerare che potrebbero essere presenti nella piana anche faglie trasversali con direzione E-W sulle quali si potrebbe trasferire parte del rigetto.

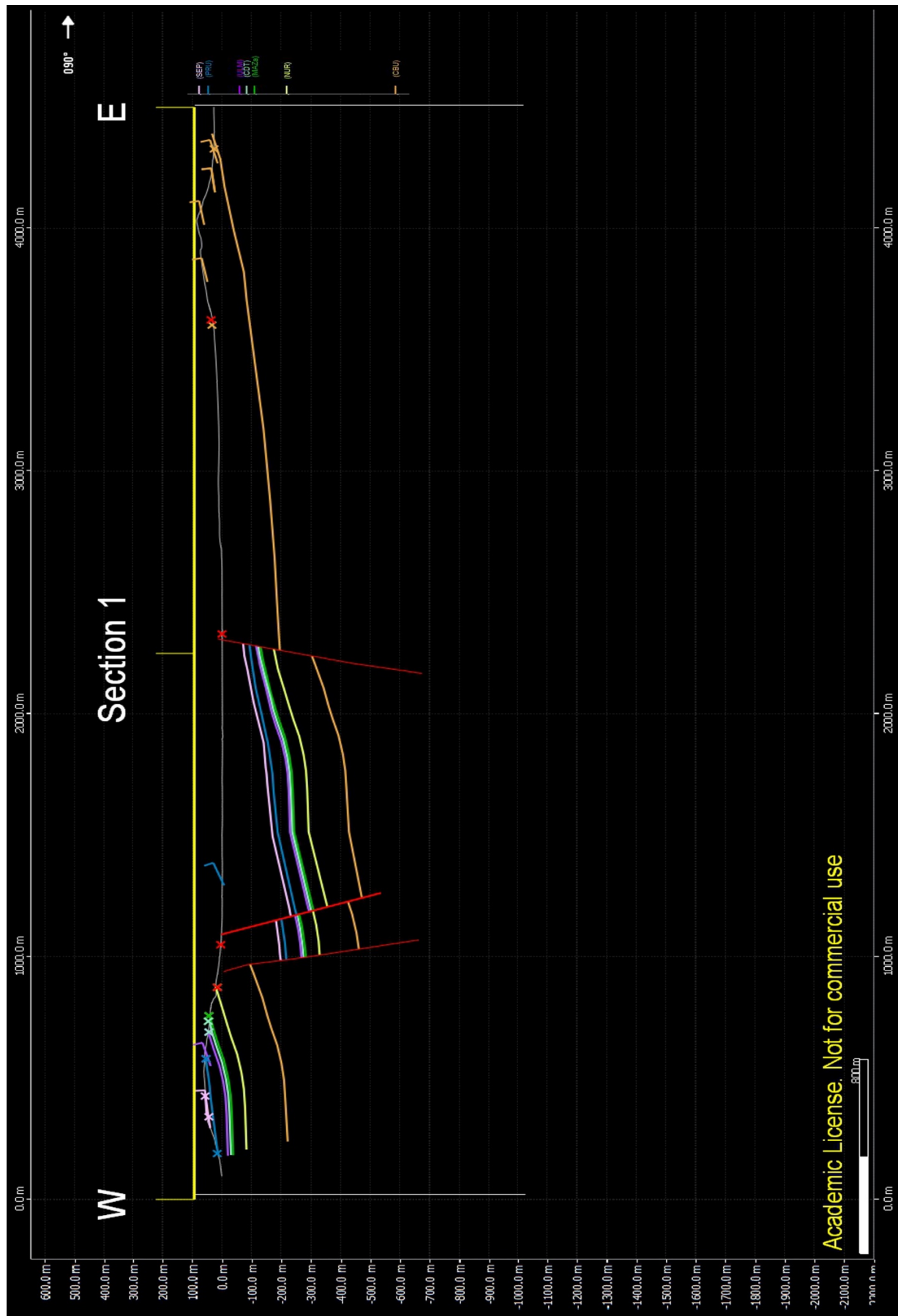


Figura 18 – ricostruzione degli orizzonti in sezione 1.

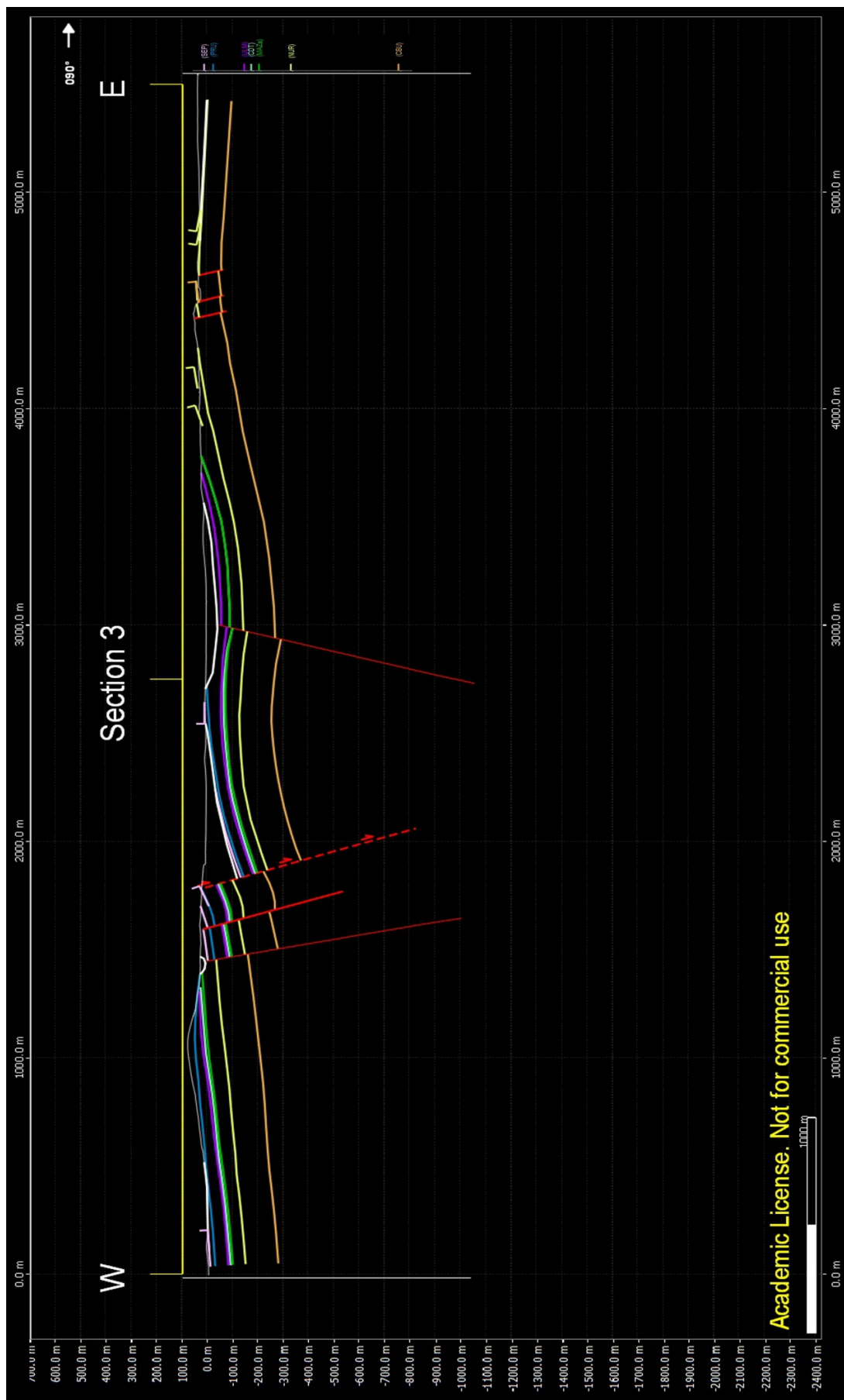


Figura 19 – Sezione geologica 3.



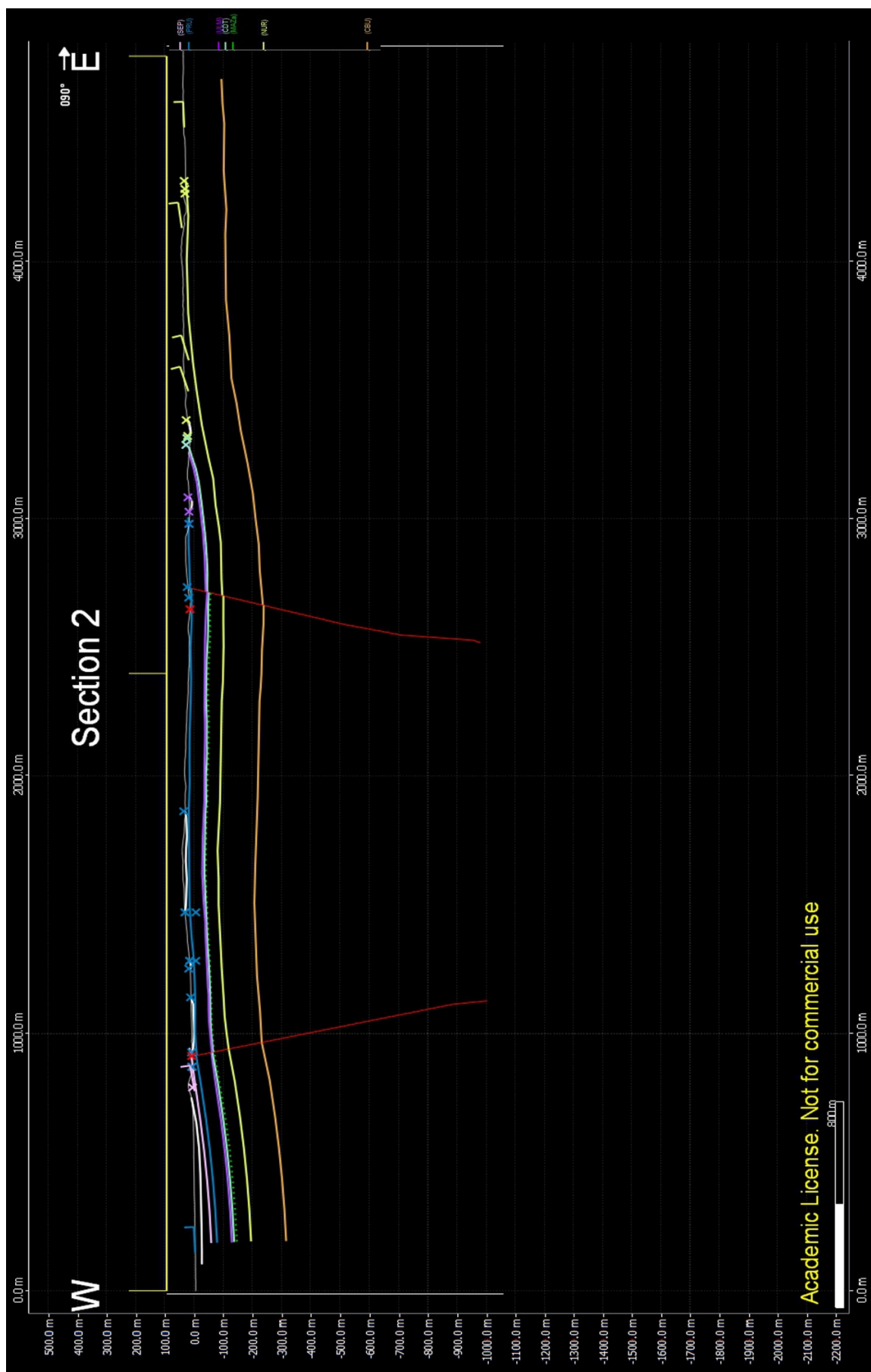


Figura 20 – Sezione geologica 2.

## BIBLIOGRAFIA

- AA. VV. - Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 F°564 – Carbonia. ISPRA – Servizio Geologico d'Italia.
- Caine J.S., Evans J.P., Forster C.B. (1996). Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 18/11, pp. 1025-1028.
- Sibson, R.H. (1996) Structural permeability of fluid-driven fault-fracture meshes *Journal of Structural Geology*, 18 (8), pp. 1031-1042.
- Sibson, R.H. (2004) Controls on maximum fluid overpressure defining conditions for mesozonal mineralisation *Journal of Structural Geology*, 26 (6-7), pp. 1127-1136.
- RSE (2012) Confinamento geologico della CO2 nel Bacino del Sulcis in Sardegna. Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente. Report 2012.