

XXXIV Ph.D. in Earth Sciences
Ilaria Antoncecchi
MATRICOLA: 1816902

TITOLO

Modellazione geologico-strutturale 3D e sismicità indotta: il caso Val d'Agri

TESI DOTTORATO

XXXIV ciclo della Scuola di Dottorato in Scienze della Terra

Università "La Sapienza" di Roma

AUTORE: Ilaria Antoncecchi

Tutor: Carlo Doglioni – Università "La Sapienza" – Dipartimento di Scienze della Terra, Italia

Co-tutor: Eugenio Carminati - Università "La Sapienza" – Dipartimento di Scienze della Terra, Italia

Co-Tutors esterni e collaborazioni:

Giacomo Prosser – Università della Basilicata – Dipartimento di Scienze della Terra, Italia

Luigi Improta – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - Italia

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	5
1.1 Scopo della ricerca	5
1.2 Definizione dell'area di studio	11
1.3 Attività di coltivazione di idrocarburi nella concessione Val d'Agri.....	14
2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO	18
2.1 Inquadramento geodinamico e tettonico.....	18
2.2 Controversie sull'assetto tettonico.....	22
2.3 La sismicità	24
3. DATI UTILIZZATI E METODI	28
3.1 I Dati del progetto.....	28
3.2 La metodologia utilizzata	31
3.3 Schema Stratigrafico dell'area analizzata	31
3.4 Fase 1-sintesi dei dati raccolti durante il rilevamento geologico strutturale	36
3.5 Fase 2 – realizzazione della carta geologico-strutturale dell'area di studio attraverso la costruzione di un progetto 2D con software QGIS.....	55
3.6 Fase 3- analisi delle linee sismiche e dei dati di pozzo (dataset ENI) attraverso la costruzione di un progetto in IHS Kingdom software	56
3.7 Fase 4 - elaborazione delle sezioni geologiche profonde bilanciate dell'area di studio attraverso vincoli superficiali e profondi.....	67
3.8 Fase 6 – importazione nel modello strutturale in Petrel dei dati di sismicità (cataloghi INGV)	72
4 CARTA GEOLOGICO STRUTTURALE.....	74
4.1 Descrizione della carta geologico strutturale e novità rispetto la cartografia esistente	74
5 ANALISI DEI VINCOLI SUPERFICIALI E PROFONDI PER LA COSTRUZIONE DI SEZIONI GEOLOGICHE RAPPRESENTATIVE DELL'AREA DI STUDIO.....	78
5.1 Sezione AA'.....	78
5.2 Sezione BB'	84
5.3 Sezione CC'	90
5.4 Sezione DD'	93
5.5 Sezione EE'	96

XXXIV Ph.D. in Earth Sciences

Ilaria Antoncecchi

MATRICOLA: 1816902

5.6	Sezione FF'	99
5.7	Sezione GG'	102
5.8	Alcune considerazioni sulle sezioni parallele alle strutture appenniniche.....	105
6.	INTERPRETAZIONE E CONFRONTO CON LA LETTERATURA ESISTENTE	110
6.1	Interpretazione strutturale dell'area di studio e confronto con la letteratura	110
6.2	Significato tettonico delle strutture interpretate e confronto con i modelli noti in letteratura 117	
7	REALIZZAZIONE DI UN MODELLO PSEUDO - 3D	126
7.1	Modello strutturale dell'area di studio: faglie e mappe dei top interpretati	126
8.	CONFRONTO CON I DATI DI SISMICITA' RECENTE	135
9	DISCUSSIONE	144
9.1	Thin- vs thick-skinned tectonics	145
9.2	Sismotettonica	146
9.3	Caratterizzazione della sismicità attraverso il modello dei graviquakes	152
10	CONCLUSIONI.....	157
11	BIBLIOGRAFIA.....	161
12	APPENDICE I	169

RIASSUNTO

La presente tesi di dottorato si pone l'obiettivo di caratterizzare la sismicità naturale e indotta della Val d'Agri attraverso la definizione di un nuovo modello geo-strutturale 3D. Tale modello è alternativo e di maggiore dettaglio rispetto a quanto disponibile in letteratura e utilizzato per la caratterizzazione della sismicità nell'area di studio (es. Candela et al. 2015 e Buttinelli et al. 2016). Infatti, il modello realizzato è stato ricostruito attraverso un set di dati innovativo: dati di superficie rilevati, di sottosuolo messi a disposizione dalla società Eni S.p.A. e dataset riprocessato con metodi avanzati relativo alla sismicità registrata reso disponibile da INGV.

L'analisi integrata di tutti questi dati ha permesso di realizzare un modello strutturale ben vincolato con una affidabilità dell'85% che ha fornito numerose evidenze in risposta ai diversi quesiti di carattere geodinamico, tettonico e sismologico, ripercorrendo tappe fondamentali nell'evoluzione della conoscenza di questa complessa area di studio.

Con particolare riguardo alla sismicità strumentale, i risultati di questa tesi mostrano una possibile caratterizzazione della sismicità registrata a ovest e a est del bacino della Val d'Agri attraverso il modello dei *graviquakes* (Doglioni et al., 2014 e 2015) identificando le strutture, le unità coinvolte, le loro proprietà fisiche, e i meccanismi determinanti nella generazione degli eventi sismici.

Infine, questi risultati sono stati adeguatamente supportati attraverso le ulteriori evidenze derivanti dai recenti studi disponibili in letteratura (Balasco et al. 2021; Vadacca et al. 2021).

ABSTRACT

The present Ph. D thesis aims to characterizes natural and induced seismicity in Val d'Agri thanks to definition of a new 3D geo-structural model. This model is alternative and more detailed with respect to those available in litteratures and used to characterize seismicity in the study area (e.g. Candela et al. 2015 and Buttinelli et al. 2016). In fact, the realized structural model is based on an innovative dataset constituted by: field data collected, underground data provided by Eni S.p.A. and a reprocessed dataset with advance techniques on recorded seismic events provides by INGV.

Integrated analysis of these data allows to realize a very well constrained structural model with a reliability of 85%, that supplies several evidences answering many of the open questions on geodynamic, tectonic and seismic field retracing important steps in the knowledge evolution of this complex study area.

Regarding seismicity, the results of this thesis show a possible characterization of recorded events at west and east of the Val d'Agri basin through *graviquakes* model (Doglioni et al., 2014 e 2015) identifying structures, units involved, their physical properties and the most relevant mechanisms in generation of seismic events.

Finally, these results have been properly supported by further evidences of recent results available in the scientific literature (Balasco et al. 2021; Vadacca et al. 2021).

1. INTRODUZIONE

1.1 Scopo della ricerca

Il lavoro presentato in questa tesi di dottorato ha come obiettivo principale la caratterizzazione della sismicità indotta dalla attività di produzione di idrocarburi nella zona della Val d'Agri attraverso l'analisi dei vincoli derivanti dalla modellazione geologico-strutturale 3D e dai dati sismologici.

Dal punto di vista dell'interpretazioni geologico-strutturale, infatti, l'area ha sempre riservato un grande interesse ed è stata a lungo oggetto di dibattito scientifico a cominciare dall'interpretazione delle serie affioranti (quali ad esempio le unità Lagonegresi) per le quali si definirono due visioni prevalenti: quella dell'"autoctonia" (De Lorenzo, 1895; Crema, 1902; Bonarelli, 1932 a,b; D'Argenio, 1973 e relativamente Scandone, 1967, 1972) e dell'"alloctonia" (es. Grandjacquet, 1961, 1962a, b; letto, 1963, 1964, 1965) (cfr. Van Dijk, 2013). Senza entrare nel dettaglio della discussione, alla fine, tra le due scuole prevalse l'idea di un'alloctonia a vasto raggio (Mostardini & Merlini, 1986) che di fatto ha confermato, attraverso la perforazione di due pozzi in Appennino centrale, Contursi 1 (Campania; Valle del Sele, Agip 1963, TD 3480 m.) e Trevi 1 (Abruzzo; Agip 1965, TD 3549 m), grandi scorrimenti, ad esempio delle unità bacinali e di piattaforma appenninica sui depositi di piattaforma carbonatica Apula. Da questo punto in poi nacque l'interpretazione odierna dell'Appennino Meridionale come un prisma accrezionale (*accretionary wedge*) di elementi tettonici sviluppato al di sopra di un avampaese, cioè la Puglia, facente parte della placca adriatica in subduzione sotto la placca tirrenica.

Questa interpretazione lasciò aperto il campo a molte altre considerazioni di carattere geologico-strutturale sull'area quali, ad esempio, l'interpretazione dei carbonati in corrispondenza della struttura di Monte Alpi (De Lorenzo, 1895; Selli, 1957; Grandjacquet, 1963; Ortolani & Torre, 1971; Scandone, 1972) che trovò poi un epilogo abbastanza condiviso nel lavoro di Van Dijk et. al. (2001).

Ulteriori ricerche furono fatte alla fine degli anni '90 per lo studio della sismicità e delle faglie attive al fine di valutare lo stile deformativo dell'area attraverso un modello di tipo "*Thick skinned*" (van Dijk & Okkes, 1988, 1990, 1991; Casero et al., 1988, 1991; Doglioni et al., 1996; Menardi Noguera & Rea, 2000; van Dijk et al., 2000; Butler et al., 2004; Shiner et al., 2004; Bertello et al., 2010) o "*Thin Skinned*" (Mostardini & Merlini, 1986; Cello et al., 1990; Scrocca et al., 2005; Patacca et al. 1988; Patacca & Scandone, 2001, 2007 b) ancora oggi dibattuto. In particolare, l'indecisione per l'uno o l'altro modello è da attribuire prevalentemente ad una generale bassa qualità dei profili sismici commerciali al di sotto della Piattaforma Apula Interna che pertanto non permettono di visualizzare in modo chiaro i piani di faglia responsabili della strutturazione interna della piattaforma stessa e del basamento (Van Dijk, 2013). In generale, quindi questa questione venne poi affrontata attraverso l'analisi di informazioni secondarie, quali appunto la geometria del top della piattaforma rilevata nella mappatura delle linee sismiche, o gli esercizi di retro-deformazione (cfr. Bally et al, 1986; Nicola e Gambini, 2007; Menardi Noguera & Rea, 2000).

Nell'ambito di questo studio, come detto, la realizzazione di un modello geologico-strutturale 3D dell'area sarà una tappa necessaria che in sostanza ripercorrerà anche, con diverso

dettaglio, tutti i temi finora illustrati cercando, soprattutto per le questioni ancora aperte di illustrare i vincoli superficiali e profondi di maggior rilievo, come l'individuazione e la ricostruzione dei piani di faglia e il contestuale confronto con la sismicità registrata.

In questo modo, sarà possibile anche provare a rispondere al principale quesito posto in questa tesi di ricerca ovvero la caratterizzazione della sismicità indotta.

Dal punto di vista sismologico, infatti, l'approccio proposto in questo studio relativo ad un'analisi geologico-strutturale dell'area è più che necessario e intende dare un valore aggiunto ai numerosi studi sismologici effettuati in questi ultimi anni che hanno portato a definire in primo luogo l'Appennino Meridionale come una zona di per sé con una significativa sismicità storica, responsabile ad esempio di eventi importanti quali quello del 1857 di magnitudo 7 (Burrato e Valensise, 2008) e in secondo luogo come zona interessata da una sismicità di tipo antropico connessa, ad esempio, all'invaso e svasso della diga del Pertusillo e alle attività di reiniezione di acqua di strato attraverso il pozzo Costa Molina 2 nella concessione di coltivazione di idrocarburi denominata Val d'Agri (Improta et al., 2017, Valoroso et al., 2009, Stabile et al., 2014a, Stabile et al., 2014b, Improta et al. 2015, Buttinelli et al., 2016 e Braun et al., 2018).

La difficoltà di discriminare chiaramente gli eventi appartenenti a una o all'altra tipologia è legata proprio alla necessità di comprendere la corrispondenza degli stessi con un modello geologico-strutturale completo dell'area (Buttinelli et al. 2016).

A supporto di questa affermazione, ad esempio, Galadini et al. (2000) nella revisione sullo stato delle conoscenze sulle faglie attive in Italia, riportano che le differenti vedute sull'assetto geologico-strutturale e sismologico nella Val d'Agri riguardano aspetti geometrici e cinematici legati alla faglia sismica attiva che ha generato il terremoto del 1857. Questo perché, non è risolto il problema dell'individuazione dell'espressione superficiale della faglia principale che, nonostante i numerosi studi sulle manifestazioni della tettonica attiva (ad esempio Di Niro e Giano, 1995; Benedetti et al., 1998; Giano et al., 2000), non è ancora chiaramente relazionata al bordo sud-ovest o nord-est della valle e di conseguenza se è relazionata alle strutture estensionali che bordano i margini occidentali ed orientali del bacino Quaternario della Val d'Agri ed immergenti verso nord-est e verso sud-ovest, rispettivamente.

Quello che è possibile osservare dagli studi finora svolti è che, mentre le faglie del sistema a sud-ovest hanno evidenze superficiali riconducibili al Pleistocene Sup. – Olocene (ad esempio nella zona di M. Aquila; Maschio et al., 2005; Improta et al., 2010), le faglie del sistema a nord-est non hanno manifestazioni superficiali nella zona tali da giustificare una attività recente con una magnitudo significativa e per questo sono state a lungo oggetto di dibattito tra i ricercatori.

Il lavoro di Romano et al. (2018) ha, inoltre, da poco fornito ulteriori prove a supporto dell'assenza di evidenze di deformazione superficiale nella zona di Montemurro, attraverso l'acquisizione di un profilo di resistività che conferma la presenza di faglie suturate da depositi di frana recenti (ad esempio, la frana della Verdesca), oltre che dalla forte antropizzazione.

Tale incertezza sulla localizzazione della faglia principale, si ripercuote sull'interpretazione dello stile tettonico dell'area, delle diverse fasi deformative e dei rapporti reciproci fra le strutture e quindi anche sulla caratterizzazione della sismicità naturale e conseguentemente della

caratterizzazione degli eventi microsismici indotti dalle attività di coltivazione di idrocarburi nella concessione “Val d’Agri”.

Nel merito, i lavori di Stabile et al. (2014a, b), Improta et al. (2015), e Valoroso (2009) hanno reso nota la presenza di due differenti cluster di sismicità in Val d’Agri, rispettivamente a ovest e a est del bacino: il primo (*Cluster 1*) imputabile a strutture profonde e connesse al sistema del lago del Pertusillo, il secondo imputabile alla microsismicità nell’intorno del pozzo Costa Molina (*Cluster 2*) come meglio evidenziato in seguito.

Nell’ambito del *Cluster 2* di sismicità situato ad est del bacino, e connesso alle attività di reiniezione del pozzo Costa Molina 2, il lavoro di Buttinelli et al. (2016) ha messo in evidenza un allineamento degli eventi registrati lungo una faglia NW-SE, immergente verso nord-est (in accordo con Improta et al. 2015) e, contestualmente, un possibile confinamento degli stessi dovuto ad una struttura trascorrente NNE -SSW. Il ruolo di questa struttura trasversale è stato successivamente confermato dal lavoro di Vadacca et al. (2021) che ha realizzato uno studio con simulazioni numeriche al fine di valutare lo slip tendency e quindi la stabilità delle faglie principali su cui insiste il cluster 2 di sismicità indotta dal pozzo Costa Molina 2 nella zona di studio. Dai risultati del lavoro di Buttinelli et al. (2016) emerge che tali strutture, non affioranti in superficie, e le loro relazioni con le faglie quaternarie presenti devono essere giustificate con studi futuri nel contesto geologico-strutturale dell’area. Inoltre, sono ancora da individuare le modalità sottese alla genesi della sismicità indotta, in relazione alle conoscenze attuali sui meccanismi che possono generarla.

È noto da tempo che la sismicità indotta/innescata (vedi definizione di McGarr et al., 2002) può essere dovuta a numerosi meccanismi riconducibili ad una variazione del campo di stress locale prodotta dall’attività antropica (es. idrofratturazione, shock termico, variazioni di stress associati ad aseismic slip, variazioni di stress poro-elastico associati a variazioni di massa, ecc..) che, per semplicità, si riportano raggruppati in due grandi categorie (cfr. ICHESE Report, 2014):

- rimozione di un supporto fisico, che ad esempio avviene nella coltivazione delle miniere, dove la variazione di stress è comparabile allo stress ambientale o nel processo di estrazione di idrocarburi, dove volumi significativi di fluidi vengono rimossi determinando una riduzione del supporto idraulico alla pressione di poro favorendo il processo di subsidenza e compattazione;
- variazioni idrologiche che includono l’estrazione o la reiniezione di acqua/gas/olio, dove la variazione di stress è minore rispetto allo stress dell’ambiente circostante.

Le attività di iniezione di fluidi, quindi, possono indurre o innescare terremoti, nonostante siano noti pochi casi nel mondo, ponendo seri rischi in particolare nelle zone che sono naturalmente attive dal punto di vista sismico (e.g. Zoback, 2012; Ellsworth, 2013). Questi fluidi possono, infatti, generare un aumento della pressione di poro e, di conseguenza, una riduzione dello sforzo normale efficace determinando il raggiungimento dello stato di sforzo critico in grado di generare la rottura (es.: Keranen et al, 2014).

Tuttavia, è ancora dibattuta la possibilità di avere una metodologia standard per poter discriminare la sismicità indotta da quella naturale. Negli ultimi anni sono stati proposti numerosi approcci per la discriminazione di eventi naturali e indotti. Nel lavoro di Grigoli et al. (2016) parte di questi metodi sono stati riassunti per definire il quadro delle attuali conoscenze sul tema. In

XXXIV Ph.D. in Earth Sciences

Ilaria Antoncecchi

MATRICOLA: 1816902

sostanza, in base a diversi lavori (Dahm et al., 2013, Davis and Frohlich, 1993; Dieterich, 1994; Shapiro et al., 2013; McGarr, 2014) possono essere distinte le seguenti categorie di metodi:

- metodi qualitativi (es. “Yes or No criteria” Davis and Frohlich, 1993 e Frohlich et al., 2016a);
- metodi basati sulla fisica dei processi coinvolti come metodi di modellazione numerica accoppiata es. (Juanes et al., 2016) o modellazione numerica con modelli sismici “Rate-and-State” (Dieterich, 1994; Dieterich et al., 2015);
- metodi statistici come ad esempio quelli basati sul rapporto dei tassi di sismicità di fondo e la sequenza di aftershocks di un evento in base alla legge di Omori (Hainzl and Ogata, 2005 Dahm et al., 2013);
- metodi basati sulla valutazione dei parametri di sorgente (Dahm et al., 2013).

Tra questi, ad esempio, vi sono metodi che consentono di stimare in tempi rapidi parametri caratteristici della sismicità potenzialmente utilizzabili per discriminare la sismicità naturale da quella indotta:

- correlazione spazio-temporale tra sismicità e attività industriali (Opsal and Eisner, 2014);
- distribuzione della sismicità con la profondità;
- variazione del b-value (es., Gupta, 2002);
- distribuzione dei tempi inter-evento (es., Corral, 2006; Pasari and Dikshit, 2015);
- distribuzione della sismicità in relazione alla curva di diffusione delle pressioni di poro (Shapiro et al., 2010);
- indice di produttività del momento sismico (Shapiro et al., 2006);
- indice sismogenico (*Seismogenic Index*) (Shapiro et al., 2010);
- analisi dello stress drop di eventi indotti vs eventi naturali (es. Abercrombie e Leary, 1993; Goertz-Allmann et al., 2011).

Infine, in base a diversi parametri il lavoro di Doglioni, (2018) riconduce le principali tipologie di sismicità indotta a 4 tipologie: I. *graviquakes*, II. *reinjectionquakes*, III. *supralithostatic pore pressure - hydrofracking*, and IV. *loading variation* (Figura 1.1). In accordo con la suddivisione proposta da Doglioni (2018), ciascun contesto geologico e tettonico è caratterizzato da una diversa combinazione di range di porosità, permeabilità, pressione litostatica, pressione di poro e temperatura. Tutti questi parametri hanno capacità differenti di produrre sismicità indotta in termini di tassi e magnitudo e in relazione anche al tipo di attività antropica presente. In base a quanto finora riportato, è ovvia la considerazione che la ricostruzione strutturale dell’area di studio, soprattutto nel caso esaminato relativo ad attività di produzione e reiniezione in Val d’Agri, ha un ruolo essenziale nella caratterizzazione e discriminazione della sismicità sia naturale che indotta.

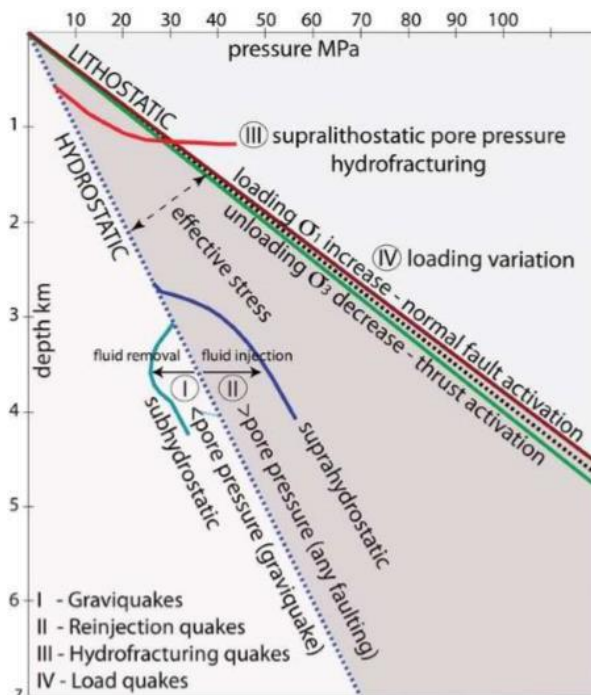


Figura 1.1 Classificazione delle tipologie di sismicità indotta in funzione dei parametri di stress (MPa) e profondità (Doglioni, 2018).

Pertanto, per comprendere a pieno tutte le implicazioni che l'assetto geologico-strutturale occupa nella caratterizzazione della sismicità dell'area in relazione allo stato di conoscenze maturate fino ad oggi sul tema, è stato necessario avviare il presente lavoro di ricerca per definire dei vincoli superficiali e profondi che devono essere considerati nella realizzazione di un modello geostutturale aggiornato e completo dell'area ed effettuare un ulteriore confronto con la sismicità registrata relativa ai due principali cluster riconosciuti.

Il progetto di ricerca si è occupato quindi di verificare la presenza di faglie superficiali e profonde che, in relazione alle diverse fasi tettoniche, al contesto geodinamico ed alla geometria rispetto al campo di stress locale, possono spiegare la sismicità osservata nell'area. Saranno prese in considerazione le conoscenze maturate negli anni con le attività di esplorazione del sottosuolo legate alla concessione Val d'Agri, soprattutto nelle aree in cui sono presenti pozzi petroliferi e quindi nella zona a nord-est del lago del Pertusillo (al contrario della zona ovest dove i dati sono carenti).

La ricerca potrà, dunque, produrre ulteriori elementi conoscitivi per:

- fornire una valutazione sulla sorgente dell'evento sismico della Val d'Agri del 1857;
- migliorare il quadro sismotettonico dell'area e fornire utili vincoli per comprendere meglio la sismicità strumentale naturale della Val d'Agri;
- comprendere i meccanismi che possono aver generato i cluster di microsismicità nell'intorno del Costa Molina 2 (pozzo di reiniezione di acqua di strato in giacimento) e di quello a ovest del lago Pertusillo;
- verificare l'allineamento degli eventi sismici registrati su una struttura immergente verso NE nelle unità apule a circa 1 km sotto la base del pozzo CM2, e l'eventuale presenza di evidenze superficiali;

XXXIV Ph.D. in Earth Sciences

Ilaria Antoncecchi

MATRICOLA: 1816902

- confermare la presenza di una struttura sub-verticale trascorrente orientata NNE-SSW che taglia la piattaforma apula vicino al CM2.

Concludendo, oltre all'aggiornamento delle conoscenze sui temi strutturali e di sismicità nell'area, il carattere innovativo della ricerca risiede soprattutto nell'utilizzo di nuovi dati messi a disposizione da parte della società titolare della concessione Val d'Agri (Eni S.p.A.) e da parte di INGV, grazie ai quali è stato possibile formulare nuove considerazioni dal confronto tra l'interpretazione derivata dai dati di sottosuolo (pozzi e linee sismiche) e dal dataset innovativo (poiché migliorato attraverso tecniche di processamento avanzato) della sismicità registrata.

In sostanza, sono stati realizzati nel corso del lavoro i seguenti prodotti:

- una nuova carta geologico-strutturale dell'area di studio;
- sette sezioni geologiche;
- un modello geo-strutturale pseudo 3D vincolato da dati superficiali e profondi;
- mappe di profondità dei principali orizzonti stratigrafici identificati;
- confronto tra la microsismicità rilevata e il modello realizzato.

1.2 Definizione dell'area di studio

L'area di studio è situata nella regione Basilicata, ha un'estensione di 23x13 km e coincide con il bacino dell'Alta Val d'Agri nell'Appennino Meridionale. Al suo interno l'area racchiude i comuni di Viggiano, Montemurro, Grumento Nova, Moliterno e Sarconi (

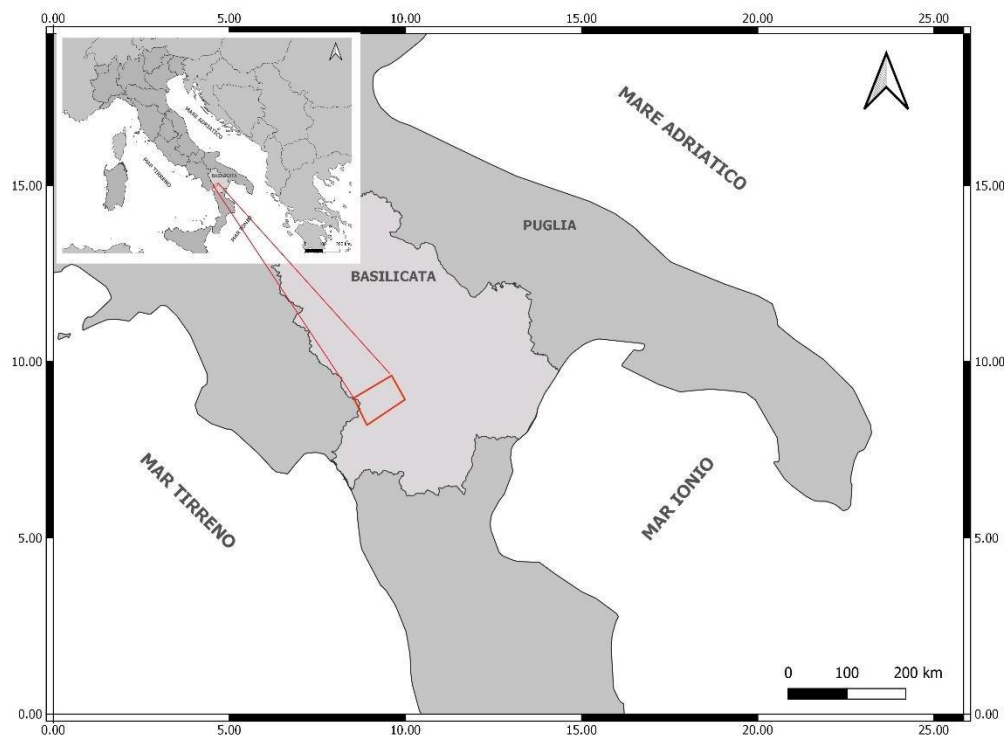


Figura 1.2).

La Val d'Agri è una valle intramontana, orientata all'incirca Nord-Ovest Sud-Est situata ad un'altezza media di 600 m.s.l.m. È delimitata da entrambi i versanti da massicci montuosi parzialmente boscati, con ripide vette che raggiungono l'altezza di 1800 m.

Al centro del Bacino ricade il Lago Pertusillo un lago artificiale situato nel territorio dei comuni di Grumento Nova, Montemurro e Spinoso. Il lago costruito tra il 1957 e il 1962 si trova ad una quota di circa 500 m.s.l.m., occupa una superficie di 7,5 km² e ha una capienza massima di 155 Mm³.

Sul lato Sud Ovest della Lago del Pertusillo si rinvengono, per un'estensione di circa 25-30 km tra Pergola e Moliterno (Maschio et al. 2005, Improta et al., 2010; Stabile et al. 2014a), le strutture del sistema di faglie dei Monti della Maddalena costituite prevalentemente da faglie normali immergenti verso NE (Monti Maddalena Fault System in seguito - "MMFS").

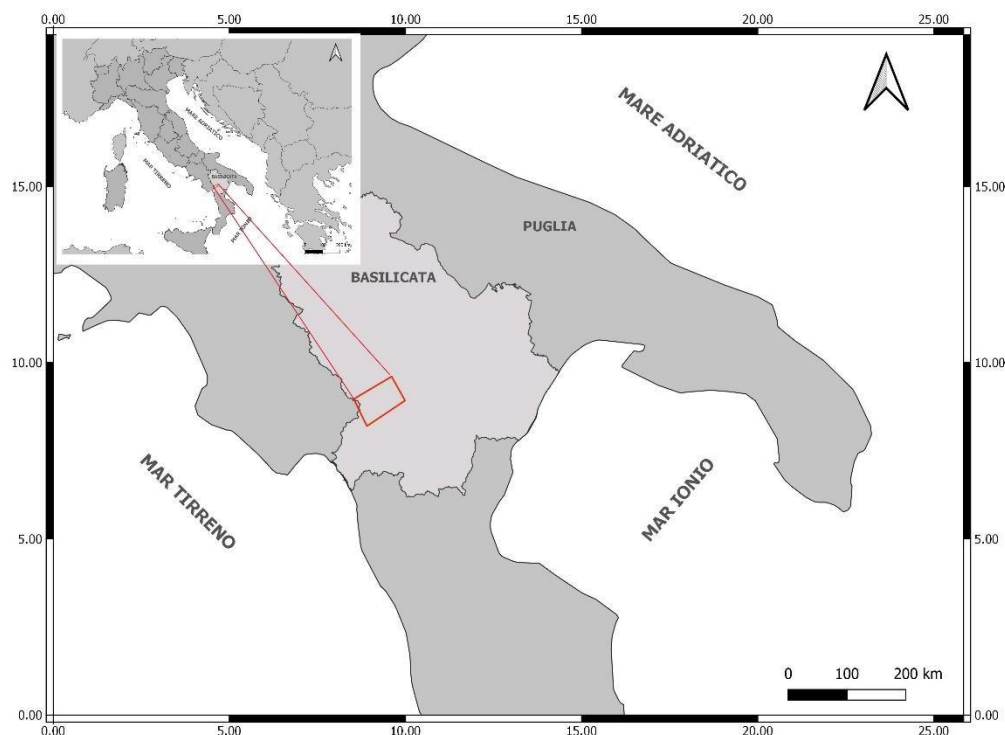


Figura 1.2 Immagine dell'area di studio realizzata in QGIS Software versione, 3.16. Il rettangolo disegnato in rosso rappresenta l'estensione dell'area di studio (circa 23 km di lunghezza x 13 km di larghezza) localizzata in Italia nella Regione Basilicata (rappresentata in grigio chiaro). Le coordinate sono espresse nel sistema di riferimento WGS84 UTM 33 N, coordinate decimali.

A Nord Ovest (al di fuori dall'area di studio) è presente la nota sorgente di Tramutola (Figura 1.3) caratterizzata da manifestazione superficiali di petrolio misto ad acqua sulfurea nel Torrente Fossatello, affluente del Rio Cavolo. Il petrolio e l'acqua sulfurea fuoriescono dal terreno accompagnati da piccole bolle metanifere, e si mischiano con l'acqua del ruscello dando luogo ad un inquinamento naturale, con depositi bituminosi e solfiferi nel terreno boscoso. Questo fenomeno, in relazione alle scoperte esplorative dell'Agip, ha avuto un significato importante sia da un punto di vista storico minerario che per l'interpretazione geologico-strutturale dell'Appennino Meridionale, molto ben descritto nel lavoro di VanDijk et al. (2013).

Il lato Est del lago del Pertusillo è, invece caratterizzato dal sistema di faglie orientali della Val d'Agri (*East Agri Fault System* in seguito – EASF, definite da Cello et al., 2000) che si estende, sulla base della mappatura delle faglie, tra Pergola a Viggiano per circa 30 km (Cello et al., 2003; Maschio et al., 2005; Stabile et al. 2014a).

Ancora più a E (al di fuori dell'area di studio) la concessione "Val d'Agri" è a contatto con la concessione di Gorgoglione.

L'area di studio così come definita in Figura 1.2 coincide per la quasi totalità con il foglio geologico del progetto CARG 505 denominato "Moliterno" (Progetto CARG – Cartografia nuova del territorio italiano alla scala 1:50.000 del Servizio Geologico Italiano, ISPRA). Nell'intorno sono

presenti i fogli n° 489 “Marsiconuovo”, 490 “Stigliano”, 506 “Sant’Arcangelo”, 522 “Senise”, 521 “Lauria” (Figura 1.4).

Tra le motivazioni principali della scelta dell’area di studio così come definita in Figura 1.2 vi è la contestuale presenza di una sismicità naturale storica, la cui origine è ancora discussa come dimostrato dagli studi sulla sismicità nell’area per l’attribuzione dell’evento del 1857 ai sistemi di faglie MMSF (ad es. Maschio et al. 2005) e EAFS (Cello et al., 2003), e di una microsismicità indotta dalle attività di invaso e svaso del Pertusillo e dalle attività di produzione di idrocarburi nella concessione di coltivazione “Val d’Agri” legate alla reiniezione di acqua dal pozzo Costa Molina 2 (Buttinelli et al. 2016).



Figura 1.3 Torrente Fossatello, sorgenti di Tramutola (foto: da Van Dijk et al. 2013).

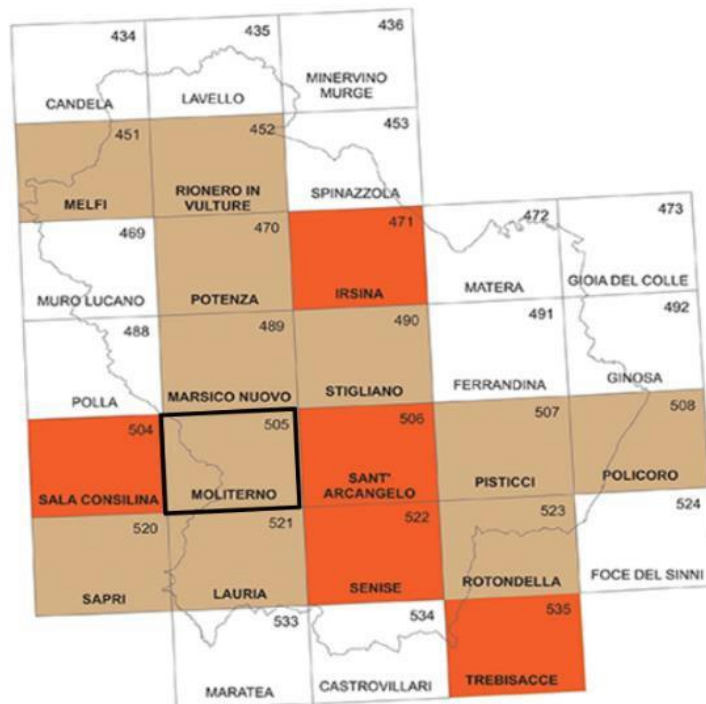


Figura 1.4 Quadro dei Fogli del Progetto CARG ricadenti nella Regione Basilicata. In marrone i fogli in attesa di stampa ma pubblicati sul sito web e in arancione i fogli stampati e pubblicati sul sito ISPRA (scaricabile al seguente link <http://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/>).

1.3 Attività di coltivazione di idrocarburi nella concessione Val d'Agri

Come anticipato e mostrato in Figura 1.2 nella zona di studio, insiste la concessione di coltivazione di idrocarburi denominata “Val d'Agri” intestata a Eni S.p.A. e Shell Italia E&P rispettivamente per il 60,77% e 39,23%, che si estende per 660,15 km² all'interno della provincia di Potenza (circa 20 km a Sud-Est della stessa). Nell'ambito della concessione sono svolte attività di produzione di olio e gas da un giacimento con un'area mineralizzata di circa 300 km² (fonte sito web del MISE DGS-ISSEG) comprendente nella zona sud-occidentale (Trend 1) tre culminazioni principali riconducibili alle strutture di Cerro Falcone, Monte Enoc e Monte Alpi, (oltre il giacimento del Costa Molina) e nella zona nord-occidentale la struttura di Caldarosa (Trend 2) nella zona nord-occidentale (Bertello et al., 2010; Cazzini 2020).

Le caratteristiche del giacimento sono ben descritte in diverse pubblicazioni quali, ad esempio, nei testi di Cazzini (2020) o della Schlumberger (1987).

Il giacimento a olio della Val d'Agri, il più grande d'Europa, scoperto nel 1988, è il più grande accumulo del sistema petrolifero del Cretaceo.

La roccia madre che ha generato idrocarburi quali olio e gas associato (caratterizzata da un Total Organic Carbon - TOC massimo del 4% - 5% e un ottimo Indice di Idrogeno pari a 632 mg HC/g) è di età Albiano-Cenomaniano inferiore. Questa roccia madre si è deposta in graben ristretti all'interno della Piattaforma Carbonatica Apula. Si tratta di una sequenza a carattere calcareo - dolomitico laminato (500 - 600 m di spessore) depositata prevalentemente su una rampa carbonatica a bassa profondità durante episodi di circolazione ristretta e condizioni anossiche. Il cherogene che si è generato è di tipo II (ricco di zolfo) talvolta con comportamento di tipo I. La roccia

madre è entrata nella finestra di generazione dell'olio durante il Pliocene, quando il prisma di accrezione appenninico ha ricoperto la Piattaforma Apula interna.

Il reservoir è di tipo carbonatico costituito da calcari Cretacico-Miocenici della piattaforma Apula interna strutturata in scaglie tettoniche con vergenza nord-orientale. La successione stratigrafica di questa unità è descritta nel lavoro di Bertello et al. (2010) (Figura 1.5).

Le caratteristiche petrofisiche del reservoir della Val d'Agri dipendono fortemente dal tipo di facies deposizionale e dal grado di fratturazione. Ad esempio, la porosità intercristallina varia da bassa nella sequenza Albiano-Cenomaniana a elevata dove sono presenti fratture carsiche (fratture allargate per dissoluzione) o facies a rudiste.

La roccia di copertura è costituita dai depositi argillosi del Pliocene Inferiore, che ricoprono i carbonati della Piattaforma Apula. Inoltre, le chiusure superiori e laterali del Campo Val d'Agri sono dovute localmente alla sequenza marnosa e argillosa miocenica del Complesso alloctono.

La trappola del campo è rappresentata da un pop-up di grandi dimensioni delimitato da faglie ad alto angolo con direzione NW - SE (Bertello et al. 2010). La struttura è il risultato dell'intensa deformazione traspressiva appenninica che ha interessato l'area durante il Pliocene medio - superiore e il Pleistocene Superiore (Van Dijk et al. 2000; Shiner et al. 2004). A sua volta il serbatoio carbonatico appare suddiviso in più compartimenti da faglie trasversali NE-SW di età Mesozoica riattivate con prevalente cinematica trascorrente nel Pliocene medio-superiore (D'Adda et al., 2017).

Caratteristica peculiare del giacimento è la colonna di idrocarburi di spessore elevatissimo che supera abbondantemente i 1000 m. Ciò contribuisce al fenomeno della stratificazione degli idrocarburi con i più leggeri in alto ed i più pesanti in basso (*compositional grading*). È comune trovare grande variabilità verticale di olio, da 12° a 42° API (il giacimento della Val d'Agri presenta prevalentemente oli leggeri). Esiste anche una variabilità laterale della densità dei fluidi (Cazzini 2020).

La produzione totale del campo, riferita agli anni dal 2005 al 2020 (ovvero dall'anno di conferimento della concessione ad oggi), è stimabile in 57869,261 Milioni di kg di olio e in di 18847,20 MSm³ di gas naturale associato (elaborazione dati disponibili sul sito del Ministero Sviluppo Economico, Figura 1.6). In generale si osserva nel profilo di produzione annuale un trend di decremento della produzione dell'olio e un leggero aumento del gas associato che però hanno avuto dei picchi negativi negli anni 2009 e 2016. Inoltre, proprio perché contestualmente alla diminuzione della produzione di olio sono aumentati i quantitativi di acqua, dal 2 giugno 2006, la produzione è avvenuta con la reiniezione di acqua di strato nel pozzo Costa Molina 2 – CM2, senza importanti interruzioni, con volumi e pressioni massimi pari rispettivamente a 2800-3000 m³/giorno e 13-14 MPa (Improta et al. 2015). I volumi di reiniezione variabili tra i 60 -80 km³/mese classificano tali attività come iniezione di acqua con tassi elevati (ovvero, "*high rate injection well*" secondo Frohlich, 2012).

Attualmente, la concessione produce da 21 pozzi produttivi (a cui sono da aggiungere 16 pozzi produttivi non eroganti) e 2 di monitoraggio – (fonte sito MiSE DGISSEG) che convogliano la produzione al Centro Oli di Viggiano.

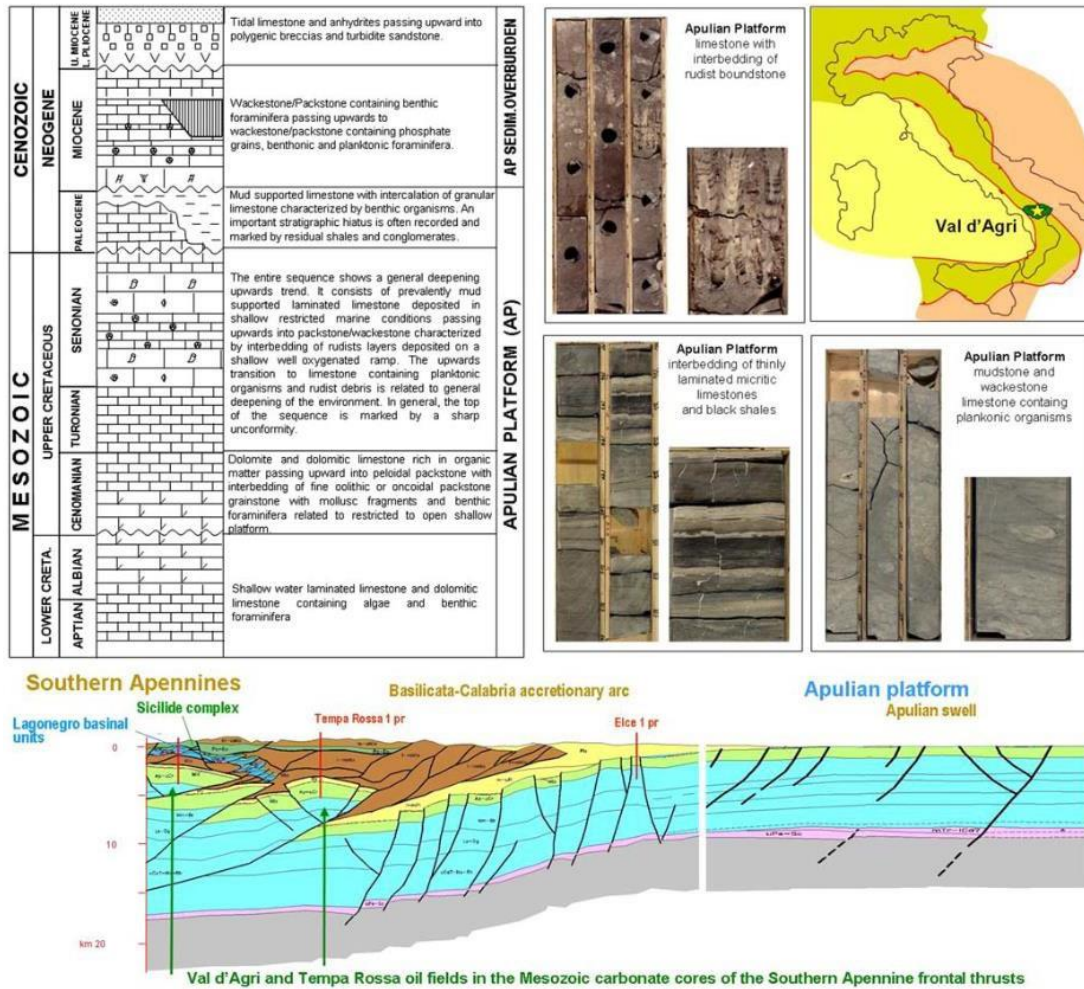


Figura 1.5 Rappresentazione delle rocce costituenti il reservoir carbonatico del campo Val d'Agri (da Bertello et. al. 2010).

Produzione annuale di olio e gas della concessione Val D'Agri (2004-2020)(fonte sito Mise aggiornato a Marzo 2021)

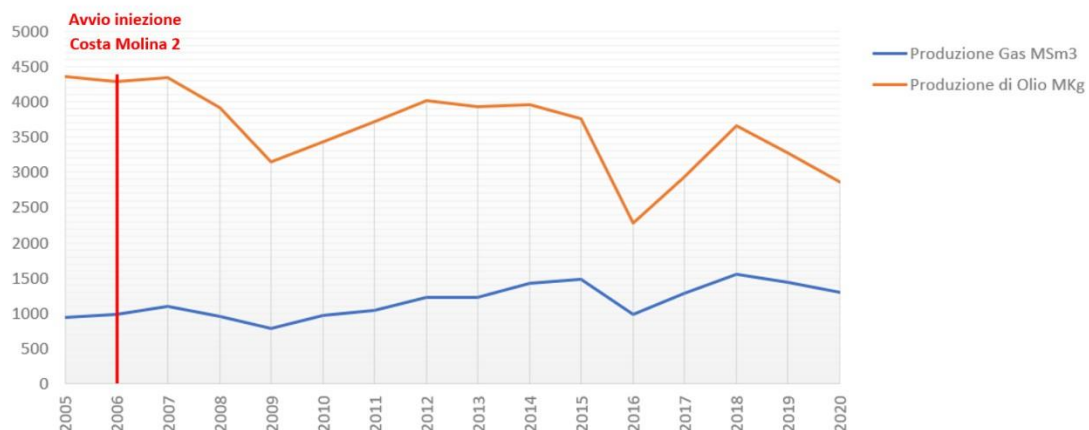


Figura 1.6 Grafico rappresentativo delle produzioni annuali di olio (Mkg) e di gas MSm3 associato (2005-2020) (fonte sito Mise DGISSEG aggiornato al 31 marzo 2021).

A causa della sismicità dell'area, fin dal 2001 la concessione è stata monitorata dalla società Eni S.p.A. attraverso una rete sismica locale che è stata progressivamente infittita. Nella fase finale

di implementazione conclusa nel 2012 la rete includeva 15 stazioni sismiche, ognuna delle quali equipaggiata con geofono triassiale a 1 Hz, un acquirente Lennartz MARS88 e un sistema di alimentazione con pannelli solari (ad esclusione della stazione PADE). Le stazioni erano sincronizzate con il segnale radio DCF77 con registrazione a trigger trasmesso agli uffici di San Donato Milanese attraverso segnale telefonico GSM (fonte: sito Osservatorio Val d'Agri). Nonostante la modalità di acquisizione a trigger, la rete di monitoraggio permetteva di registrare e localizzare la microsismicità all'interno del campo con una magnitudo di completezza di 1.0-1.2 (Improta et al., 2015). Attualmente, con la sperimentazione dei monitoraggi ai sensi degli Indirizzi e Linee Guida per i monitoraggi della microsismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro delle attività antropiche – ILG pubblicate dal MISE, la rete è in fase di ulteriore implementazione.

Ad oggi l'area vanta una densa rete integrata costituita da 40 stazioni che comprende (fonte sito INGV – CMS) (Figura 1.7):

- 15 stazioni della rete di monitoraggio della concessione di Val d'Agri (VA);
- 8 stazioni della rete di monitoraggio dell'alta Val d'Agri (HAVO - High Agri Valley geophysical Observatory, ex INSIEME Seismic Network "INDuced Seismicity in Italy: Estimation, Monitoring, and sEismic risk mitigation", Stabile et al., 2020);
- 3 stazioni della rete di monitoraggio dell'Irpinia (ISNet - Irpinia Seismic NETWORK);
- 11 stazioni della rete nazionale dell'INGV (RSN IV - Rete Sismica Nazionale) localizzate all'interno e nei dintorni della concessione;
- 1 stazione della rete Geofon.

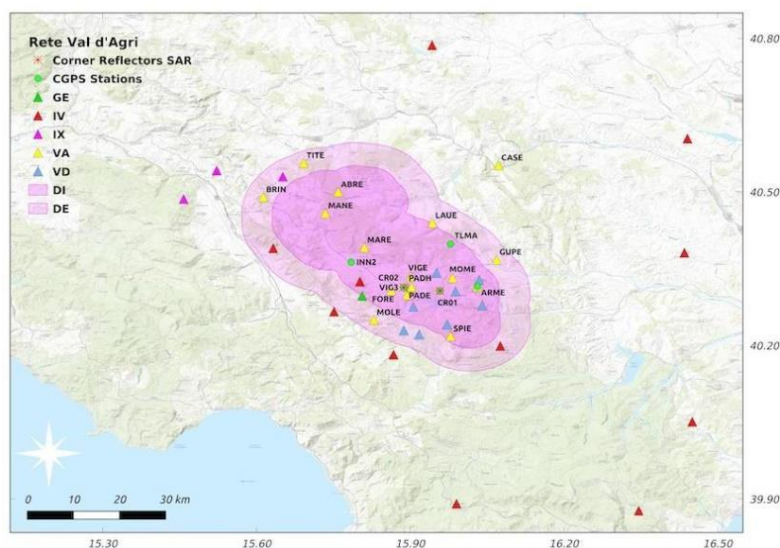


Figura 1.7 Rete di monitoraggio sismico integrata della Val d'Agri (fonte sito INGV-CMS).

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

2.1 Inquadramento geodinamico e tettonico

A livello regionale l'area di studio è situata nel contesto dell'Appennino Meridionale e più precisamente nel settore dell'Appennino Lucano. La genesi della Catena dell'Appennino Meridionale inizia nell'Oligocene Superiore-Miocene Inferiore (Monaco e Tortorici, 1998) deriva dall'evoluzione del margine continentale passivo mesozoico e dalla sua inversione in margine attivo durante la subduzione della placca Adriatica verso ovest (Prosser et al., 1996). La tettonica compressiva è stata quindi la causa dell'impilamento delle diverse unità di differente derivazione (Monaco e Tortorici, 1998; Menardi Noguera e Rea, 2000; Lentini et al., 2002) e della geometria a pieghe e sovrascorrimenti (fold-and-thrust belt) est-vergente che la catena possiede attualmente (Doglioni et al., 1994; Schiattarella et al., 2003).

Secondo alcuni autori (Patacca e Scandone, 2001), in base a dati biostratigrafici, sismologici e di stress, il regime compressivo al fronte della catena nell'Appennino meridionale risulta essere terminato a metà del quaternario (Pleistocene inferiore – medio). Tuttavia, secondo altri autori (Doglioni et al., 1996) in questo settore dell'Appennino meridionale il *roll-back* e la subduzione dello slab apulo, associata all'apertura del bacino di retroarco tirrenico (Malinverno, et al., 1986; Doglioni et al., 1991; Doglioni, 1994) (Figura 2.1), comporta una contemporanea migrazione verso est di tutto il sistema. Ciò determina compressione ad est, in corrispondenza del fronte della catena, mentre a ovest si osservano fenomeni di distensione. A causa di ciò, i sovrascorrimenti e le pieghe preesistenti vengono sistematicamente tagliati da faglie dirette (Prosser et al., 1996; Schiattarella et al., 2003) ad ovest, mentre a est si osservano ancora evidenze di raccorciamento crostale. Il modello geodinamico ipotizzato nel lavoro di Doglioni et al. (1996) è riportato in Figura 2.2.

Secondo, Doglioni et al. (1996), il fenomeno del *roll-back*, insieme ad altre peculiarità geofisiche dell'area, può spiegare molte delle anomalie di questo settore della catena: i) un comportamento di tettonica compressiva thin-skinned al fronte della catena (prisma di accrezione) e un comportamento estensionale di tipo thick-skinned nella catena nel settore a ovest; ii) la bassa elevazione morfologica e strutturale della catena; iii) l'apertura del bacino di retroarco a ovest come risultato della perdita della litosfera subdotta; iv) la migrazione del sistema verso est (fronte compressivo ad est ed estensione ad ovest); v) l'assenza di una crosta inspessita lungo l'asse della catena; (vi) la profonda avanfossa recente, caratterizzata da un elevato tasso di subsidenza; (vii) i pochi affioramenti di rocce metamorfiche varisiche o alpine nella catena.

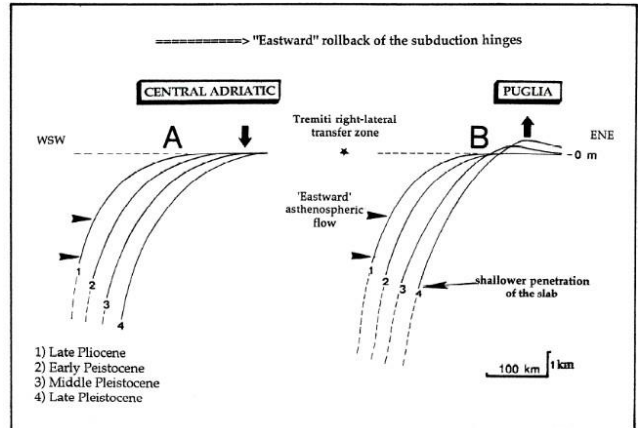
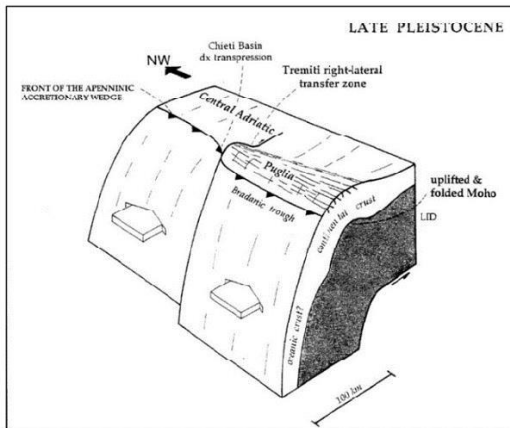


Figura 2.1 a) Differenti comportamento tra l'Appennino Centrale e l'Appennino Meridionale a causa del fenomeno di roll back della litosfera in subduzione (più spesso nell'Appennino Meridionale, circa 110 km di spessore) con conseguente sollevamento della Piattaforma Apula e bassa penetrazione (Dogliani et al., 1994); b) modello schematico della migrazione verso Est del piano di subduzione dovuto al sollevamento della Piattaforma Apula come conseguenza di una bassa penetrazione del piano che è dovuta a sua volta a un maggiore spessore della litosfera continentale; questo viene poi compensato dal piegamento della litosfera (Dogliani et al., 1994).

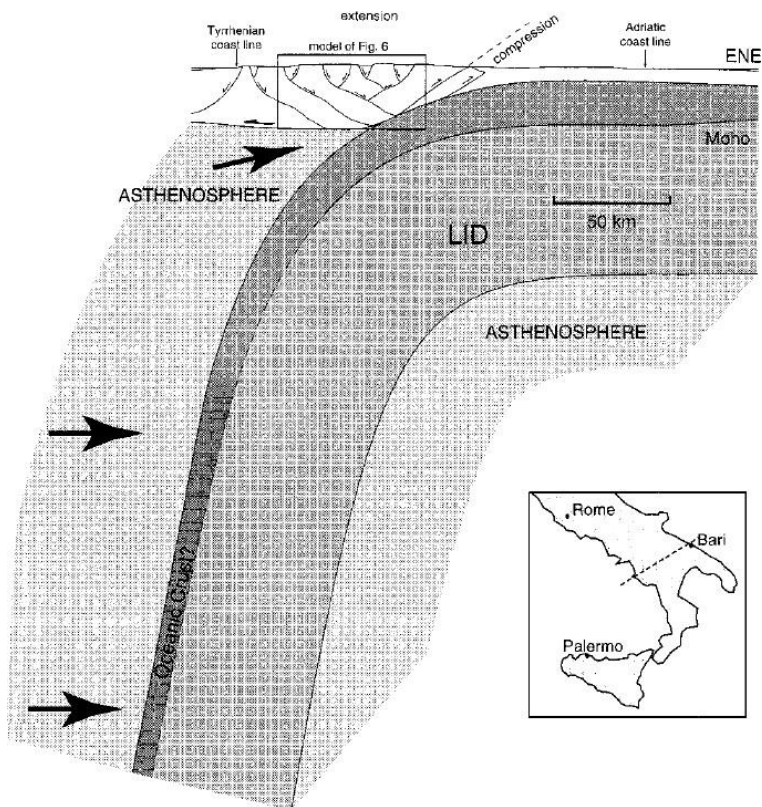


Figura 2.2 Modello a scala litosferica dell'Appennino meridionale da Dogliani et al., 1996. Il modello mostra gli Appennini galleggiare su una nuova astenosfera, avendo perso la maggior parte della loro crosta e del mantello litosferico (LID) a causa della subduzione della placca Adriatica verso ovest. Il flusso dell'astenosfera verso Est determina il roll-back del piano di subduzione.

In base a quanto descritto, in letteratura lo schema delle unità tettonico-stratigrafiche presenti nell'area dell'Appennino Lucano è così rappresentato da ovest verso est:

- le unità interne, identificate da Lentini et al. (2002) come Unità Liguridi/ Sicilidi e che rappresentano un prisma di accrezione oligo-miocenico con blocchi di ofioliti, di provenienza ligure, coperto da depositi sintettonici del Miocene Inferiore;
- la piattaforma Campano-Lucana o piattaforma Appenninica, di età mesozoica-neogenica, che separava il bacino Ligure-Piemontese dal bacino di Lagonegro (Mostardini e Merlini, 1986; Menardi Noguera e Rea, 2000; Van Hinsbergen et al., 2020);
- le unità Lagonegresi (Figura 2.3), derivanti dalla deformazione del bacino omonimo, suddivise nelle Unità della Lagonegro I e della Lagonegro II da Scandone 1967; 1972 e così suddivise, anche nel foglio 489 (Marsico Nuovo) e 505 (Moliterno);
- le unità Iripine, depositatesi in bacini satellite e di avanfossa nel Miocene Medio-Superiore al di sopra delle unità lagonegresi deformate;
- la Piattaforma Apula sepolta sotto la catena appenninica ed affiorante nell'avampaese. La porzione sepolta è anche conosciuta come Catena Apula (Lentini et al., 2002) e costituisce il sistema a sovrascorrimenti esterno (external thrust system) sovrapposto sull'avampaese a sua volta deformato per flessurazione. Quest'ultimo, infatti, risulta sollevato per la formazione del rigonfiamento periferico (*peripheral bulge*) per effetto del *rollback* della subduzione - Doglioni, (1994). Menardi Noguera e Rea (2000), definiscono la piattaforma Apula come costituita dall'Unità della Piattaforma Apula Interna (*Inner Apulian Platform*) che sovrascorre sull'Unità della Piattaforma Apula Esterna (*Outer Apulian Platform*). Ne consegue una geometria a duplex a scala regionale dell'Appennino Meridionale (Lentini et al., 2002).

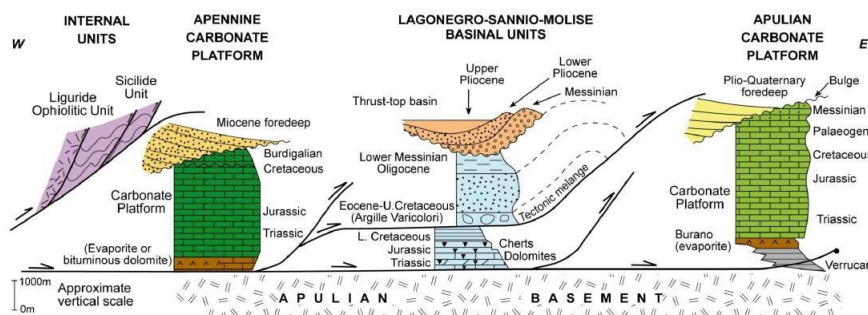


Figura 2.3 Schema delle unità tettonico stratigrafiche caratterizzati l'Appennino Lucano (Scrocca et al., 2010 modificato da Casero et al. 1988).

In dettaglio, la Val d'Agri è nota in letteratura come una depressione tettonica, localizzata nel settore assiale della catena Appenninica, delimitata a W e E dai sistemi di faglie denominate EAFS e MMFS (Maschio, et al., 2005) e riempita da depositi continentali pleistocenici (Giano et al., 2000; Cello et al., 2000). La sua origine è, quindi, principalmente connessa all'attività delle faglie normali e trascorrenti di età pliocenico-quadernaria, orientate in direzione NW-SE, che iniziarono a svilupparsi quando la fase di thrusting era ancora attiva nel settore frontale della catena (Hippolyte, et al., 1994; Ferranti et al. 2005).

A causa delle diverse interpretazioni di tipo geodinamico note in letteratura, sono numerose le interpretazioni di carattere tettonico e strutturale che sono state proposte in zone coincidenti o limitrofe all'area di studio: a titolo di esempio si possono citare gli studi di Prosser et al. (2021), Candela et al. (2015) e Menardi Noguera, & Rea (2000), Mazzotti et al. (2000), riportati rispettivamente in Figura 2.4, Figura 2.5, Figura 2.6, Figura 2.7 oltre a quelli già illustrati, realizzati da Buttinelli et al. (2016) e Bertello et al. (2010). Come si può notare da queste sezioni geologiche, nonostante la Val d'Agri sia un'area molto studiata, continuano a esistere diverse interpretazioni in merito ad alcune importanti strutture, all'assetto in profondità e alle relazioni che legano le strutture profonde a quelle superficiali. In particolare, tra gli elementi che rimangono in discussione al fine dell'attribuzione a uno o all'altro modello, vi sono il coinvolgimento o meno del basamento nella deformazione e i tassi di raccorciamento della Piattaforma Apula sopra cui sovrascorrono le unità alloctone. Entrambi questi elementi devono essere considerati nell'ambito di una ricostruzione geologico-strutturale dell'area che possa tenere effettivamente conto sia delle caratteristiche locali (superficiali e profonde) che del contesto geodinamico regionale, in modo da definire lo stile deformativo e arrivare alla caratterizzazione della sismicità.

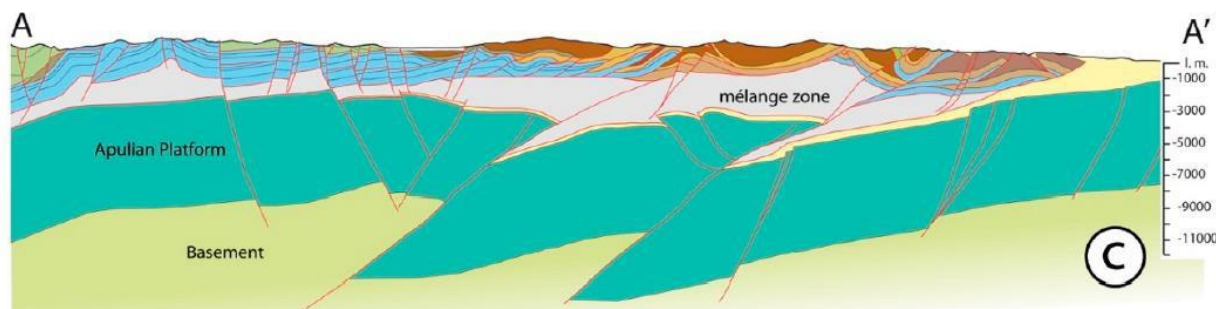


Figura 2.4 Sezione geologica che evidenzia gli alti strutturali della piattaforma apula interna e la geometria delle unità alloctone (da Prosser et al., 2021).

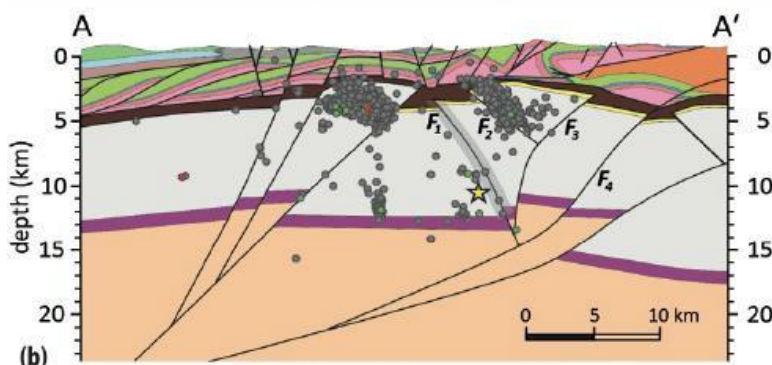


Figura 2.5 Sismicità proiettata sul modello strutturale dell'area di studio interpretato da Candela et al. (2015) (Megna et al., 2017).

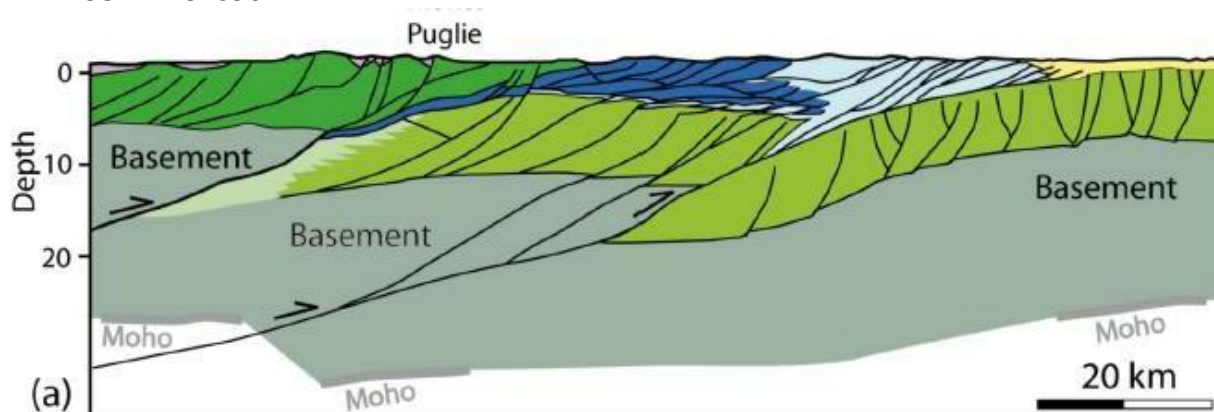


Figura 2.6 Sezione geologica di Menardi Noguera, & Rea (2000) (modificata da Scrocca et al., 2005).

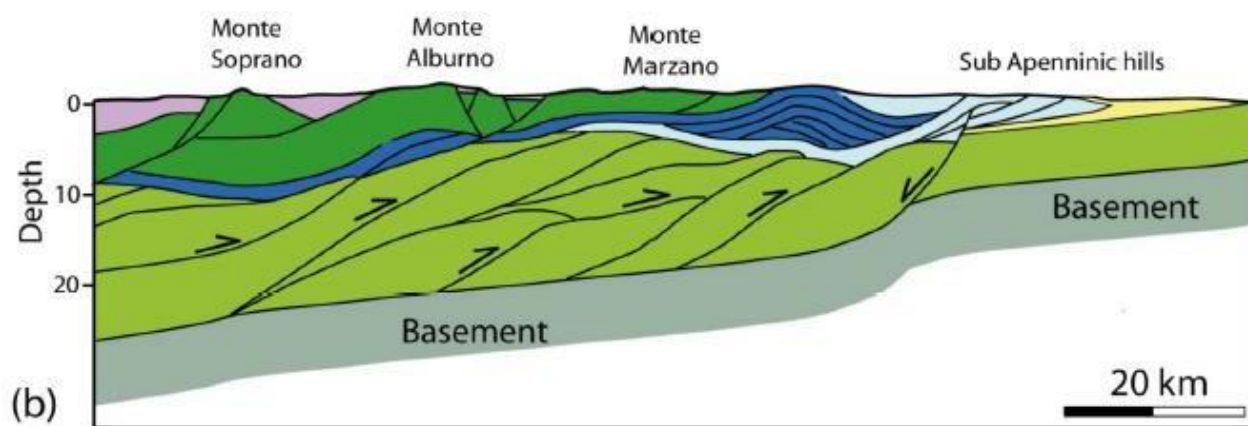


Figura 2.7 Sezione geologica di Mazzotti et al. (2000) (modificata da Scrocca et al., 2005).

2.2 Controversie sull'assetto tettonico

Con riferimento alle diverse interpretazioni dell'area di studio, nei lavori di Scrocca et al. (2005) e Scrocca (2010), le tematiche ancora dubbie nell'ambito dell'interpretazione geologico-strutturale dell'area sono affrontate mediante un'analisi comparativa tra i due principali modelli geodinamici applicabili all'Appennino Meridionale: modello *thick skinned* (come quello riportato in Figura 2.6) e modello *thin skinned* (come quello riportato in Figura 2.7).

L'analisi avviene attraverso l'interpretazione della linea sismica a riflessione CROP-04 acquisita a Nord dell'area di studio nell'ambito del progetto Crosta Profonda – CROP (Figura 2.8).

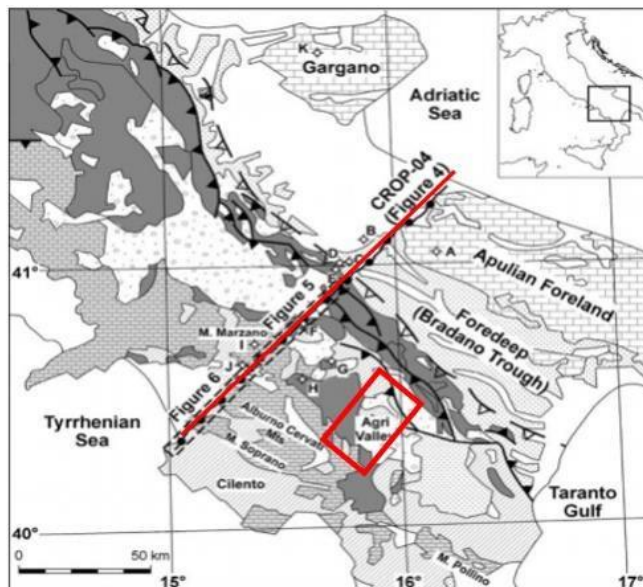


Figura 2.8 Rappresentazione in carta della localizzazione della linea CROP-04 rispetto all'area di studio.

In sintesi, Scrocca et al. (2005) indicano che un modello *thick-skinned* (Figura 2.9) è caratterizzato da un thrust principale ruotato in profondità, un basamento cristallino fortemente deformato che forma un grande cuneo all'interno del prisma di accrezione; un raccorciamento delle 3 porzioni del basamento cristallino apulo di 20 km. Inoltre, per permettere tale deformazione, la posizione attuale del piano di subduzione dovrebbe essere spostata di 50 km verso W.

Per quanto riguarda invece, il modello *thin-skinned* (Figura 2.9), Scrocca et al. (2005) mostrano un thrust principale che prosegue più a ovest e che si orizzontalizza in profondità, mentre il basamento cristallino rimane essenzialmente indeformato e immerge verso ovest sotto il prisma di accrezione. Il raccorciamento delle unità apule in questo caso dovrebbe essere almeno di 90 km, mentre il raccorciamento totale delle unità alloctone può essere stimato a non meno di 280-300 km.

L'analisi delle principali implicazioni del modello *thick-skinned* mostra alcune inconsistenze sia con l'assetto crostale che litosferico, come deducibile dai dati geofisici e dal movimento verticale noto tra il Pliocene e il Pleistocene. Inoltre, tale modello stima un raccorciamento a livello del top apula di circa 20 km, che non coincide con i dati di paleo-temperatura dei carbonati della piattaforma apula, vincolati attraverso dati di riflettanza della vitrinite (Sciamanna et al., 2000).

Contrariamente, il modello *thin-skinned* è generalmente più coerente con i vincoli e i dati geofisici. Una delle principali obiezioni dei sostenitori di uno stile di tipo *thick-skinned tectonics* è costituito dalla considerazione che l'assenza di coinvolgimento del basamento cristallino richiederebbe considerevoli raccorciamenti nei carbonati apuli a partire dal Pliocene inferiore/medio. In assenza di tali raccorciamenti sarebbe impossibile bilanciare con geometrie realistiche sezioni geologiche che attraversano la catena.

Questo punto è stato ampiamente trattato in letteratura, ad esempio, nello studio di Patacca et al. (2007b) nel quale gli autori hanno misurato un raccorciamento minimo della piattaforma apula

di circa 85-95 km attraverso l'interpretazione della linea CROP-04, dato che è sicuramente in contrasto con i modesti raccorciamenti richiesti dal modello *thick-skinned*.

Tutte queste considerazioni di carattere geologico-strutturale e tettonico saranno valutate e tenute in considerazione nell'ambito della ricostruzione del modello geologico-strutturale dell'area di studio vincolato da dati superficiali e profondi per poi essere discussi al fine della caratterizzazione della sismicità dell'area.

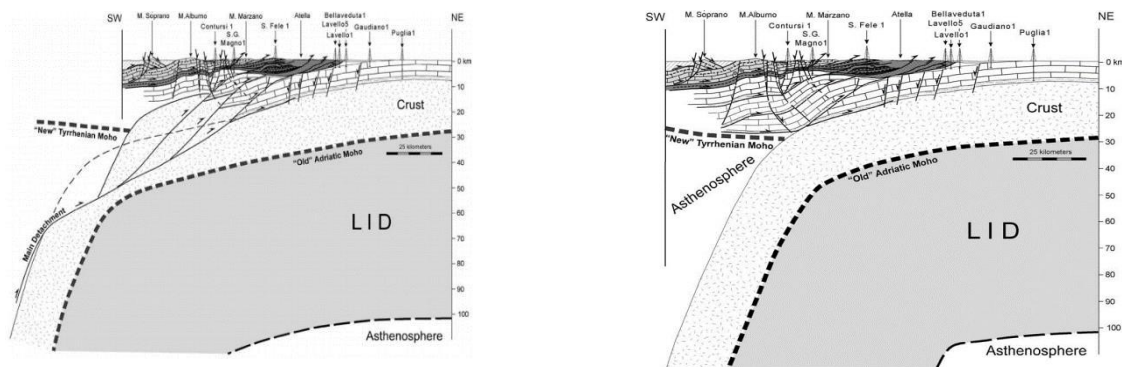


Figura 2.9 Confronto tra i due modelli: *thick skinned* (a sinistra); *thin skinned* (a destra) (Scrocca et al., 2005).

2.3 La sismicità

I primi studi condotti sulla sismicità nell'alta Val d'Agri furono eseguiti al fine di investigare la sorgente del terremoto di magnitudo 7 del 1857, considerato uno dei terremoti più distruttivi in Italia (Benedetti et al., 1998). Infatti, in letteratura (Cello et al., 2003) vi è ancora una viva discussione sulla struttura sismogenica responsabile del terremoto del 1857 Basilicata: per esempio, Pantosti e Valensise (1990) hanno ipotizzato che la sorgente sismica potesse essere una faglia normale con immersione NE sepolta sotto i depositi a grossolani dell'alta Valle dell'Agri, mentre Benedetti et al. (1998) e Cello et al. (2000) hanno suggerito come possibile sorgente una zona di faglia a immersione SW che confina con il bordo settentrionale dell'alta Val dell'Agri (tra la zona di Montemurro fino a Marsico Nuovo). Studi successivi (Burrato e Valensise 2008) hanno portato a ritenere che la correlazione del terremoto con le evidenze di superficie presenti nell'area di Montemurro non fosse del tutto plausibile, poiché l'estensione delle faglie presenti non sembra compatibile con un evento di magnitudo 7. In particolare, Maschio et al. (2005) e Burrato e Valensise. (2008) hanno sostenuto, attraverso l'adozione di un approccio multidisciplinare basato sull'analisi di dati geologici, geomorfologici e sismologici, questo evento possa essere correlato con i segmenti di faglia recenti presenti nell'unità dei Monti della Maddalena (MMSF) in un'area compresa tra Marsico Nuovo e Grumento Nova.

Tuttavia, nel 2013 e 2014, Bucci et al., in accordo con altri autori (e.g., Mazzoli et al. 2001), hanno riconosciuto che parte delle strutture immergenti a NE sono faglie normali a basso angolo (low-angle normal faults – LANF) di età pliocenica, tagliate successivamente dalle faglie ad alto angolo legate all'apertura del bacino dell'Agri. A queste incertezze si aggiungono le considerazioni in merito

ai cluster 1 e 2 individuati a W e a E del bacino ancora chiaramente da vincolare attraverso il modello geologico dell'area (Valoroso et al., 2009, Stabile et al., 2014a,b, Improta et al., 2015).

A quest'ultimo riguardo, infatti, grazie all'attenzione prestata in questi anni, e alla rete di monitoraggio integrata implementata, è stato possibile registrare diversi eventi sismici anche di piccola magnitudo: da giugno 2001 a dicembre 2012, 1786 eventi con $ML \leq 3.2$ chiaramente suddivisi nei due cluster 1 e 2 (Figura 2.10). Il Cluster 1 nella parte ovest del bacino è stato interpretato come indotto dalle variazioni stagionali della diga del Pertusillo (Valoroso et al., 2009, 2011, Stabile et al., 2014a); mentre il Cluster 2 nella parte est comparso dal 2006 è dovuto alla reiniezione del Costa Molina 2 (Improta et al., 2017; Stabile et al., 2014b, Valoroso et al., 2009, Improta et al., 2015, Buttinelli et al., 2016).

Il primo studio di dettaglio della sismicità della Val d'Agri è stato eseguito da Valoroso et al. (2009) analizzando i dati registrati durante un esperimento di sismica passiva dell'INGV da maggio 2005 a giugno 2006. I dati registrati dalla rete locale densa di 23 stazioni che registrava in continuo hanno permesso di produrre un catalogo di 1998 microterremoti localizzati utilizzando tempi di arrivo P ed S letti manualmente ed un modello di velocità 1D dell'area. Valoroso et al. (2009) riconoscono una sismicità naturale di fondo, caratterizzata prevalentemente da eventi sparsi e profondi (8-12 km di profondità), e da due clusters superficiali, il primo principale nel settore W ed il secondo secondario nel settore orientale della Val d'Agri. Il cluster principale è prevalentemente legato alla sismicità del Pertusillo con magnitudo ($0.2 < ML < 2.7$). Il secondo cluster è stato successivamente investigato in dettaglio da Improta et al. (2015) è messo in relazione diretta con i primi tests di iniezione del pozzo Costa Molina 2 in base all'evoluzione spazio-temporale della sismicità ed alla correlazione con i dati di iniezione. La microsismicità organizzata in distinti sciami iniziata a partire dal 2 giugno 2006, è stata osservata per 11 giorni, fino alla rimozione della rete. Da quella data sono stati registrati 69 eventi con $0.3 < ML < 1.8$ da almeno 6 stazioni vicine al pozzo del Costa Molina 2. La stazione più vicina era a 3 km di distanza dal pozzo (AG11). Come riportato anche da Stabile et al. (2014b), che ha analizzato i dati della rete di monitoraggio ENI del periodo 2001-2012, nessun evento sismico era stato registrato prima del 2006 nella stessa area. Le analisi dei dati registrati dalla rete di monitoraggio ENI e dalle stazioni permanenti della Rete Sismica Nazionale INGV eseguite sia da Stabile et al. (2014b) che da Improta et al. (2015; 2017) con tecniche di detezione e localizzazione differenti hanno evidenziato che la sismicità indotta dalle operazioni di iniezione delle acque di strato nel pozzo CM2 è proseguita negli anni successivi (almeno fino al 2014) con distinti sciami che hanno raggiunto una magnitudo massima di 1.95 (Improta et al., 2017) illuminando una faglia di circa 3 km di lunghezza confinata nel serbatoio carbonatico apulo.

Nel lavoro di Improta et al. (2015) agli scopi di una migliore localizzazione degli eventi è stata effettuata una correlazione spazio/temporale con i volumi e le pressioni di iniezione del CM2 dei microsismi ri-localizzati sia attraverso un modello 3D dell'onde V_p e V_s sia attraverso una tecnica relativa ad alta precisione basata sulla cross-correlazione dei sismogrammi. Poi il tasso di sismicità registrato è stato confrontato con l'attività di iniezione e le variazioni nel tempo dei parametri elastici (rapporto V_p/V_s) ed anisotropi da analisi di S-wave splitting con lo scopo di evidenziare variazioni nelle pressioni dei pori nel volume di roccia nell'intorno del pozzo. Con le localizzazioni ipocentrali relative ad alta precisione è stato possibile individuare un allineamento di questi eventi

su una faglia con direzione NE orientata in modo ottimale rispetto al locale campo di stress estensionale. Secondo gli autori, l'elevata permeabilità del settore di serbatoio interessato dalla re-iniezione e rilascio sismico ha permesso la rapida propagazione delle perturbazioni delle pressioni di poro dal fondo pozzo alla faglia riattivata favorendo anche una evidente migrazione della sismicità.

In Buttinelli et al. (2016), quindi, si è provato a confrontare le localizzazioni degli ipocentri con i dati della sismica 3D migrati in tempi nell'intorno del CM2, integrati con linee sismiche 3D stack e dati geofisici e stratigrafici dei log di 20 pozzi. Si è osservato che tutta la sismicità rientra nei 5 km dal pozzo CM2 a profondità (z) comprese tra $2,5 \leq z \leq 5$ km all'interno della Piattaforma Apula, ed è allineata lungo un piano immergente verso NE con una inclinazione di 50° interpretato, in base ad i dati di sottosuolo, come un back-thrust Pliocenico favorevolmente orientato nel campo di stress attuale e riattivato con cinematica normale dalla microsismicità indotta (Buttinelli et al., 2016) (Figura 2.11). Tuttavia, molti dubbi rimangono ancora circa le relazioni tra le diverse fasi deformative, la geometria delle strutture e soprattutto le relazioni con le strutture quaternarie che bordano il bacino.

Le attuali conoscenze sul tema portano quindi a comprendere come la definizione dei vincoli di superficie e profondi sia essenziale al fine di una corretta interpretazione geologico-strutturale dell'area per caratterizzarne la sismicità; infatti, in molti casi le strutture profonde non hanno, nell'area di studio, evidenze superficiali e, come detto, non sempre le strutture profonde sono chiaramente visibili attraverso il dato sismico. Entrambi i dati, dove presenti, devono essere utilizzati per l'interpretazione.

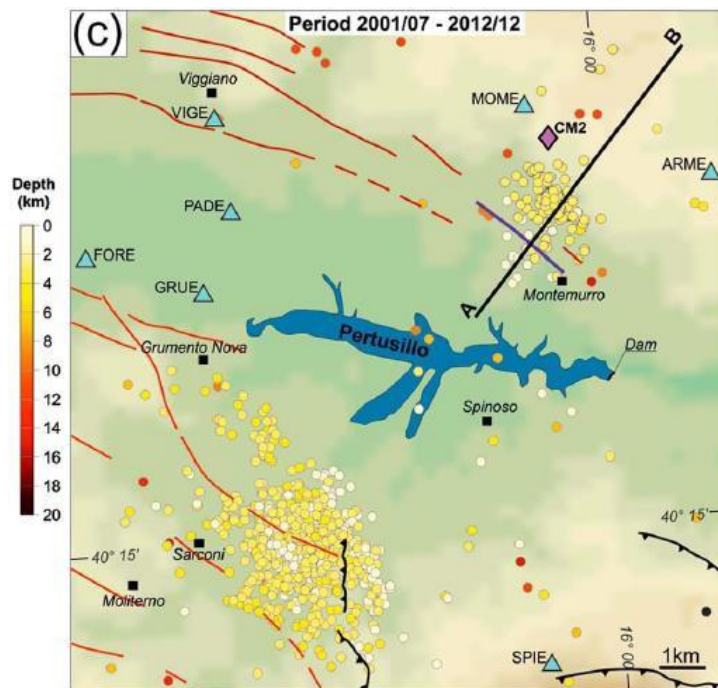


Figura 2.10 Sismicità registrata nel periodo luglio 2001 e dicembre 2021 con indicazione dei due sistemi di faglie EAFS e MMSF. La sismicità vicino al Costa Molina 2 (pozzo rappresentato con il rombo in viola) appare da giugno 2006 (Stabile et al. 2014b). La sismicità a SW del lago del Pertusillo si manifesta prevalentemente durante le fasi di ricarica dell'invaso tra l'inverno e la primavera.

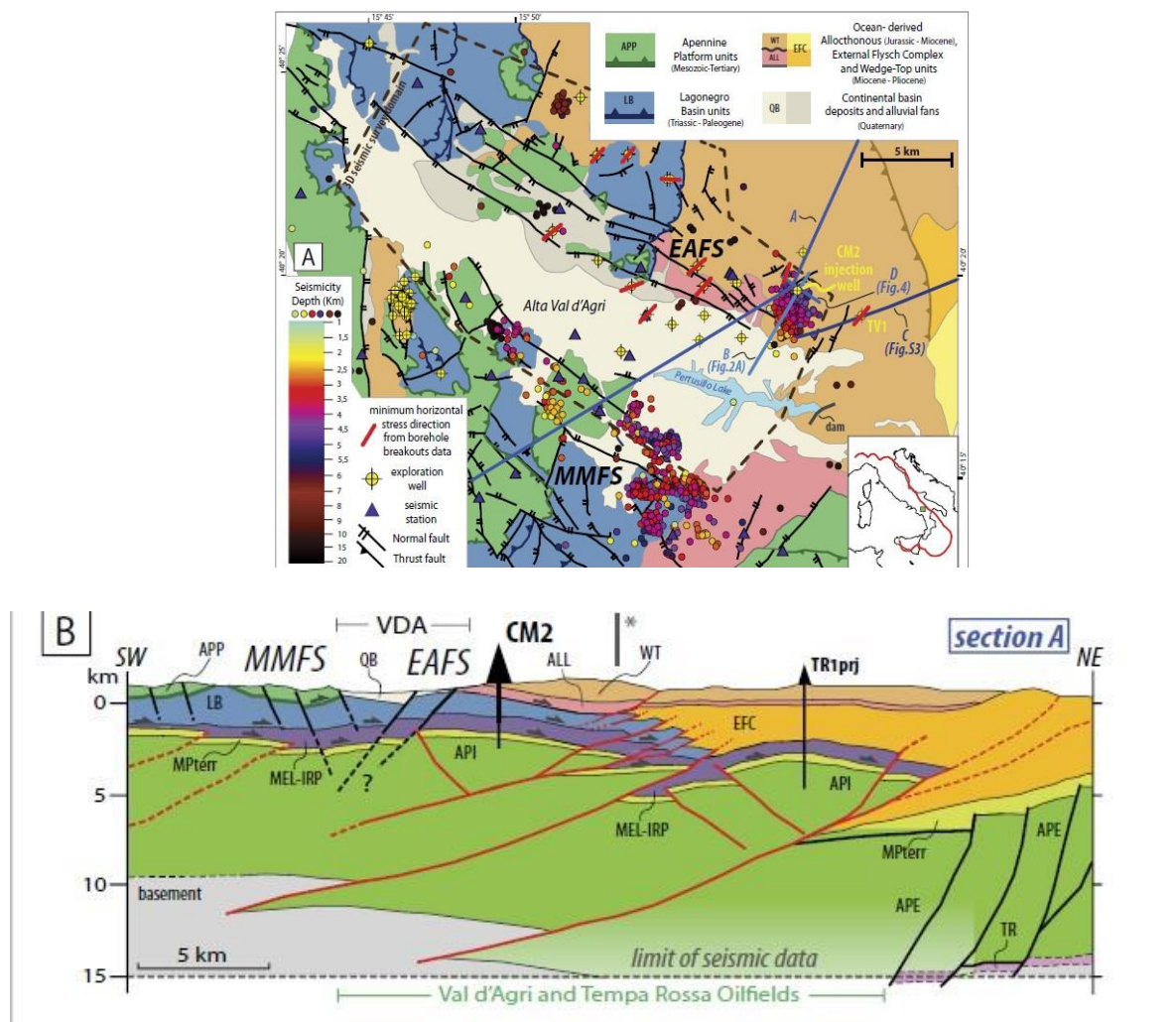


Figura 2.11 (A) Carta geologica della Val d'Agri (Buttinelli et al., 2016 ridisegnata da Improta et al., 2014) che riporta: le stazioni sismiche (triangoli) la sismicità registrata tra il 2001-2014 in funzione delle profondità ipocentrali (cerchietti colorati). La linea rossa sui pozzi indica la direzione di stress orizzontale minima definita dai breakouts dei pozzi. Le linee blu sono le sezioni geologiche. (B) rappresenta la sezione A che illustra il settore assiale e esterno dell'Appennino meridionale (da Buttinelli et al., 2016 modificata dal lavoro di Menardi Noguera e Rea 2000). TR-Sequenza clastica Permo-Triassica, APE – Piattaforma Apula Esterna (Mesozoico-Terziaria), API - Piattaforma Apula Interna (Mesozoico-Terziaria); MPterr - depositi terrigeni di età miocene sup. - pliocene inf., MEL-IRP - mëlange (Miocene superiore – pliocene inferiore) e Flysch miocenico indifferenziato; LB - unità del bacino Lagonegrese (Mesozoico- Paleogene); APP – unità di piattaforma appenninica Interna (Mesozoico -Terziaria); EFC - sequenze marnoso calcaree e depositi di flysch miocenici (complesso di Flysch esterno); ALL-WT -unità alloctone della falda appenninica interna (Formazione di Albidona, Eocene-Miocene) e relativi depositi del top del prisma (Gorgoglione Formation, Miocene medio-superiore); QB-VDA Bacino quaternario; CM2 - pozzo Costa Molina 2; TR1 - pozzo Tempa Rossa 1; TV1 – pozzo Tempa del Vento 1. Il simbolo I* segnala la fine della traccia della sezione A in mappa, mentre la sezione geologica si estende ulteriormente verso NE per illustrare le strutture della porzione esterna della catena.

3. DATI UTILIZZATI E METODI

3.1 I Dati del progetto

In questa sezione sono descritti i dati di partenza, i metodi e i software utilizzati per lo svolgimento delle attività del progetto di ricerca.

In primo luogo, sono stati raccolti dati pubblici utili alla definizione dell'area di studio attraverso la costruzione di un progetto 2D, in QGIS open software versione 3.16, nel sistema di riferimento Monte Mario - Roma 40 Italy 2. Sono stati quindi sovrapposti livelli di file vettoriali in formato shapefile (.shp) o raster vettorializzati (.tiff), come ad esempio (Figura 3.2):

- il database delle faglie sismogeniche (DISS, 2018);
- la traccia del profilo sismico CROP 004 (interpretato da Scrocca et al., 2005);
- profili pubblici a riflessione disponibili dal Progetto ViDEPI (2012) del Ministero dello Sviluppo Economico per la divulgazione dei dati relativi ai titoli minerari scaduti;
- i pozzi nell'area disponibili dal Progetto ViDEPI (2021).

Queste informazioni sono state utili per individuare i dati a disposizione nell'area di studio. In particolare, questi hanno permesso di valutare l'estensione dell'area di studio in riferimento alle caratteristiche di sismicità naturale dell'area legate alla presenza della faglia sismogenetica ITCS034 anche nota come "Irpina-Agri Valley Fault" e alla presenza di attività antropiche della concessione Val d'Agri. Tuttavia, come si evince dalla Figura 3.2, i dati pubblici disponibili nel riquadro in rosso che definisce i limiti dell'area di studio sono pochi e consistono sostanzialmente in:

- 4 pozzi ("GIANO PEPE 001", "TEMPA del VENTO 001", "CASTELLANA 001" e "ROCCA ROSSA 001") tutti ai limiti esterni dell'area di studio;
- 4 linee sismiche del progetto ViDEPI ("PZ-5"; "PZ-350-79"; "PZ-573-86"; "PZ 97-731") per la maggior parte esterne all'area di studio.

Considerata la scarsità di dati in profondità a disposizione del progetto, è stato necessario richiedere alla società Eni S.p.A. la possibilità di organizzare una data room di 5 giorni presso la loro sede a S. Donato Milanese per poter visionare ulteriori dati sismici e informazioni di pozzo.

In particolare, sono state visualizzate numerose linee e selezionate quelle ritenute più significative agli scopi del presente progetto. Le linee sismiche selezionate sono state consegnate in formato raster (.pdf) e sono di seguito dettagliate (Figura 3.1):

- 10 linee sismiche 2D (di cui 6 perpendicolari alle strutture e 3 parallele alle strutture);
- 9 linee sismiche tratte dal volume 3D (di cui 5 in direzione perpendicolare alle strutture, "cross line - XL" nelle sezioni ENI, e 4 parallele alle strutture, "in line - IL" nelle sezioni ENI);

Tutte le linee consegnate fornite in formato raster sono ritenute dati confidenziali e possono essere utilizzate solo in forma anonima e rielaborata per il presente progetto di ricerca.

Per quanto riguarda i pozzi sono stati invece visionati i profili 1:1000 di 15 pozzi localizzati come in Figura 3.1.

Anche i pozzi visionati sono ritenuti dati confidenziali e possono essere utilizzati solo in forma anonima e rielaborati per il presente progetto di ricerca.

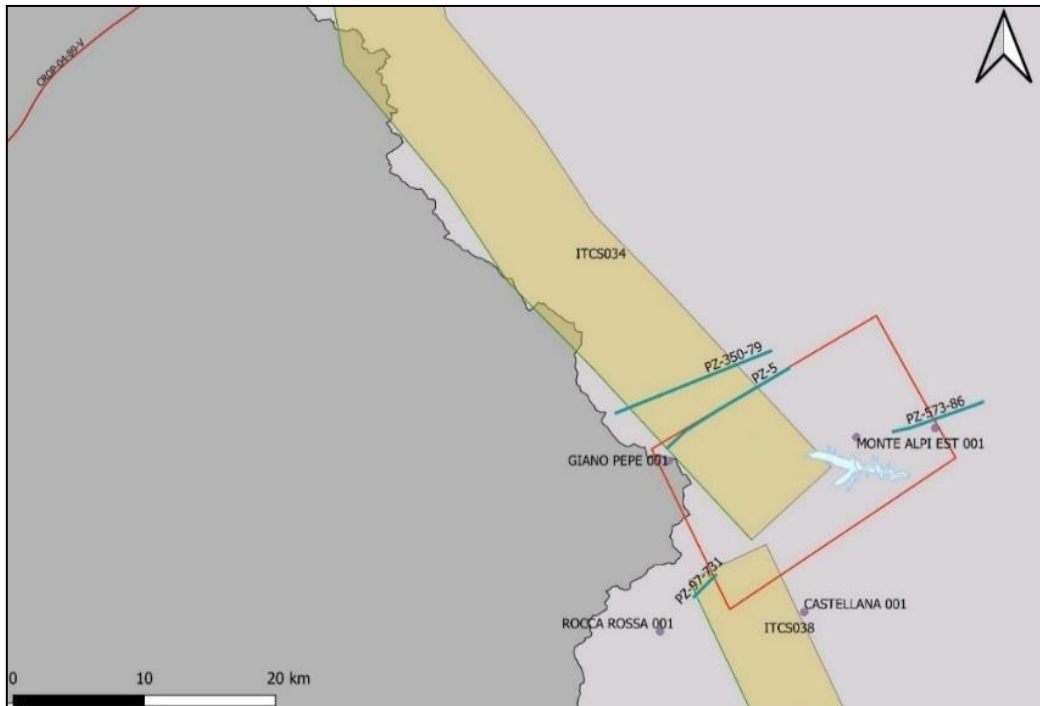


Figura 3.2 Elaborazione in QGIS v. 3.16 dei dati disponibili nell'intorno dell'area di studio delimitata dal riquadro in rosso: in alto a destra è riportata la traccia della linea sismica CROP 04 in rosso (interpretata da Scrocca et al., 2005); il poligono arancione rappresenta la sorgente sismogenetica ITCS034 (DISS, INGV); in azzurro i profili sismici disponibili dal progetto VIDEPI nei pressi dell'area di studio, in viola i pozzi storici disponibili dal progetto VIDEPI nei pressi dell'area di studio).

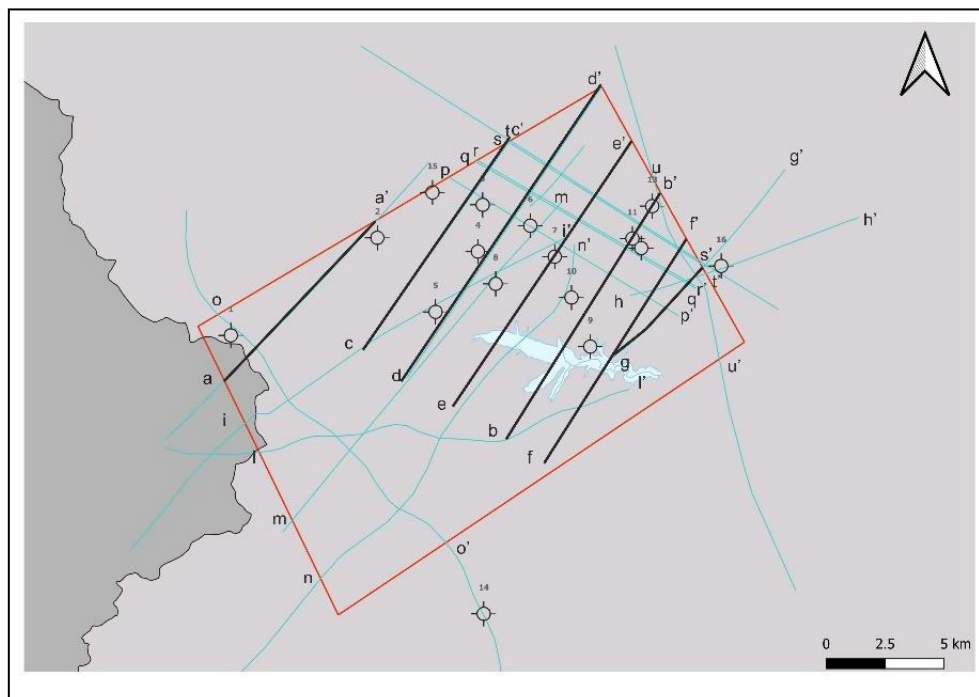


Figura 3.1 Elaborazione in QGIS v. 3.16 del Set di dati reso disponibile da ENI (in azzurro). In nero sono segnate le linee sismiche aa'-gg' che sono state utilizzate per la realizzazione delle sezioni geologiche. Tra queste le lettere da cc'-gg' fanno parte della sismica 3D. Con il simbolo in nero sono riportati tutti i pozzi visionati messi a disposizione da ENI nell'ambito della data room. I pozzi già disponibili dal progetto Videpii corrispondono invece ai numeri 1, 14, 16 ovvero Giano Pene, Castellana e Tempa del Vento.

Per opportunità di utilizzo, considerati i termini di confidenzialità del dato, ai pozzi sono stati attribuiti degli ID numerici da 1 a 16 mentre alle linee sismiche sono stati attribuiti degli ID alfanumerici corsivi da aa' a tt'.

Anche questi dati sono stati in primo luogo importati nel progetto GIS insieme ai precedenti. Inoltre, allo scopo di individuare i vincoli di superficie da abbinare all'informazione del dato di sottosuolo, sono stati raccolti dati attraverso attività di rilevamento in campo in due step successivi: un primo sopralluogo di 2 giorni per un'ispezione del sito e una seconda campagna di rilevamento di 10 giorni per attività di raccolta dati nelle 4 zone ritenute significative per gli scopi del progetto, ovvero: Montemurro, Grumento Nova, Pian di Maglia, Moliterno.

Sono state raccolte:

- informazioni sulle principali unità affioranti;
- misure di strato e misure delle principali strutture quali assi di pieghe, piani di faglia, sistemi di vene;
- materiale fotografico.

Infine, un ulteriore dato utilizzato nel progetto per il confronto finale e la caratterizzazione della sismicità è quello relativo ai tre cataloghi sismici consegnati da INGV:

- "Cataloghi delle localizzazioni 3D assolute" della sismicità della Val d'Agri registrata tra il 2001 e 2014 da stazioni permanenti della rete sismica nazionale (RSN) e della rete ENI e durante esperimenti temporanei che INGV ha condotto tra il 2005-2006 e nel 2015. I dati delle differenti reti sono stati integrati e le fasi P ed S sono stati rilette tutte manualmente. Una volta localizzati gli eventi, sono state rideterminate anche le magnitudo locali M_L .

I file relativi a questo cataloghi sono denominati:

- "Catalogo-LOC3D-eventi-selezionati+errori+ML-new" che include 1045 terremoti, i cui tempi di primo arrivo P ed S, contribuiscono alla tomografia con terremoti locali (Local Earthquake Tomography - LET) della Val D' Agri ad alta risoluzione spaziale (Improta et al., 2017). Gli errori formali di localizzazione di questi eventi (localizzazioni assolute 3D) sono dell'ordine di 200 m e 300 m nelle direzioni orizzontali e verticale, rispettivamente.
- "Catalogo-LOC3D-eventi-non-selezionati+errori+ML-new" include 149 terremoti che non contribuiscono alla tomografia LET della Val d'Agri perché le localizzazioni iniziali nel modello di velocità 1D non soddisfacevano i criteri di selezione piuttosto stringenti adottati per l'inversione tomografica. Questi eventi sono stati successivamente ri-localizzati nel modello di velocità 3D tomografico.
- Sub-Catalogo delle localizzazioni relative alle doppie-differenze ad alta risoluzione degli eventi avvenuti tra il 2006 e 2014 con epicentro entro un raggio di 5 km del pozzo CM2. La procedura di rilocalizzazione prevede quindi che i tempi di percorso (travel time) differenziali siano calcolati con estrema precisione attraverso la correlazione delle forme d'onda in un modello 1D (modello che per coerenza è il modello iniziale dell'inversione tomografica). Il catalogo include 167 eventi selezionati a posteriori in base a $CC > 0.85$ (soglia molto alta e conservativa). Al catalogo sono state aggiunte le M_L , che sono state ricalcolate a partire dalle forme d'onda e dalle nuove localizzazioni (Improta et al., 2017).

Si possono considerare nel catalogo errori relativi di localizzazione minori di 20-30 m (errori formali), errori che sono stati calcolati in modo accurato con tecnica SVD (procedura non standard applicata per verificare la corrispondenza tra le localizzazioni ipocentrali calcolate e le strutture geologiche ed investigare la migrazione della sismicità). Questi dati sono raccolti nel file: "hypoDD_192selezionatiCrossC".

Infine, nel catalogo ad alta risoluzione degli eventi accaduti tra il 2006 e il 2014 non rientra l'evento a maggiore energia associato al pozzo CM2 (26 ottobre 2010, ore 15:54, ML 1.95) perché non soddisfa i criteri di selezione molto stringenti utilizzati (la CC di questo evento è 0.75 mentre sono stati presi tutti gli eventi con una CC > 0.85). Trattandosi dell'evento di maggiore energia, tuttavia, la localizzazione potrebbe essere importata. Per questo è stato consegnato da INGV separatamente in un file denominato: "Eqk_201010261554_hypoDD.reloc_SVD_ML.info".

È importante notare che gli eventi del catalogo delle localizzazioni relative sono inclusi nel catalogo delle localizzazioni assolute nel modello tomografico 3D, quindi non devono essere utilizzati contestualmente per evitare ripetizioni nel numero di terremoti associati al CM2.

3.2 La metodologia utilizzata

Per quanto riguarda il metodo di lavoro utilizzato si descrivono di seguito le principali fasi per poi descriverne in dettaglio i diversi passaggi.

Le attività di analisi ed elaborazione dati hanno riguardato 6 fasi di lavoro:

1. sintesi dei dati raccolti durante il rilevamento geologico-strutturale;
2. realizzazione della carta geologico-strutturale dell'area di studio attraverso la costruzione di un progetto 2D con software QGis versione 3.16 nel sistema di riferimento Monte Mario Roma 40 Italy 2;
3. analisi delle linee sismiche e dei dati di pozzo (dataset ENI) attraverso la costruzione di un progetto con il software IHS Kingdom (con licenza messa a disposizione del Ministero dello sviluppo Economico - DGS UNMIG);
4. elaborazione delle sezioni geologiche profonde dell'area di studio attraverso vincoli superficiali e profondi;
5. realizzazione di un modello strutturale pseudo 3D dell'area tramite la costruzione di un progetto con il software Petrel, versione 2017, della Schlumberger con licenza del Ministero dello sviluppo Economico - DGS UNMIG;
6. confronto del modello strutturale in Petrel con i dati di sismicità dei cataloghi INGV sopra descritti.

3.3 Schema Stratigrafico dell'area analizzata

Per il lavoro è stato utilizzato lo schema stratigrafico proposto in Figura 3.3 che si basa sulle Unità tettoniche già descritte nel paragrafo 2.1, relativo all'inquadramento tettonico dell'area di studio, e quanto riportato nel Foglio 505 "Moliterno", ad eccezione della presenza dell'Unità di Foraporta, compresa tra le Unità della Piattaforma Appenninica e le Unità Lagonegresi. Questa unità risulta costituita, dal basso verso l'alto, dalla formazione di Moliterno "**MOO**" e dalle dolomie e calcari del Monte Foraporta "**FOP**". La formazione di Foraporta, presente nel Foglio 521 "Lauria"

(Bonardi et al., 2016), viene descritta come una successione di calcari e calcari dolomitici grigio nerastri datati al Triassico Superiore – Giurassico Medio“; mentre la Formazione di Moliterno “MOO” è descritta nel foglio 505 Moliterno come una successione di argille grigie verdastre, avana e rosse con intercalazioni di arenarie arcose e calcareniti - datate al Triassico.

Pertanto, dall’alto verso il basso lo schema stratigrafico dell’area di studio è così costituito (cfr. Foglio 505 “Moliterno”):

DEPOSITI ALLUVIONALI (Pleistocene Sup-Attuale) (DEP_ALL): comprende diverse Formazioni del Foglio 505 “Moliterno”. In particolare, nell’area di studio, è rappresentata da pochi affioramenti localizzati nella zona tra Moliterno e Grumento Nova dove sono presenti la formazione di coltre eluvio-colluvionale, caratterizzata da depositi detritici incoerenti in matrice terroso-argillosa (calcilutiti e calcareniti) da alterazione di rocce carbonatiche e la formazione dei Depositi di versante caratterizzata da depositi incoerenti in matrice argilloso-siltosa con grossi blocchi, localizzati in corrispondenza di rotture di pendio. L’età radiometrica del detrito nei pressi di Viaggiano è datata a circa 32ka (Giano et al., 2000). Spessore fino a 5m.

DEPOSITI PLEISTOCENICI (Pleistocene Inf.-Medio) (DEP_PLE): comprende diverse unità stratigrafiche definite nel Foglio 505 “Moliterno”. In particolare, nell’area di studio affiorano prevalentemente i depositi di fondovalle del fiume Agri costituiti dalle seguenti unità: i) Subsidentema di Sarconi definito da depositi di conoide alluvionale, composti da una litofacies a grana grossolana in matrice argilloso-terrosa di colore rosso, e da una litofacies fine con frequenti lenti di silt argillosi; ii) Sintema di Grumento Nova definito da depositi di conoide alluvionale da prossimale a distale, costituiti dal basso verso l’alto da un’alternanza di argille siltose grigie, passanti verso l’alto a conglomerati in assetto massivo o stratoide, in matrice argilloso-siltosa. Si trova in eteropia latero-verticale con depositi di piana alluvionale da prossima a distale.

UNITA’ SINOROGENICHE MIOCENICHE

Comprendono formazioni silicoclastiche di età Miocenica deposte in discordanza angolare su tutte le formazioni più antiche interessate da una deformazione di tipo contrazionale. Questa relazione stratigrafica dimostra che esse si sono deposte in bacini di avanfossa il cui substrato era rappresentato dalle successioni mesozoiche deformate e parzialmente erose (da qui la discordanza angolare basale) ma sono state poi coinvolte nelle fasi finali della deformazione compressiva. Corrispondono a una parte di quelle formazioni tradizionalmente note come "Flysch Miocenici" o come “Flysch Irpini”. In particolare, nell’area di studio sono presenti l’Unità sinorogenica rappresentata dalla Formazione del Flysch di Gorgoglione e dall’Unità tettonica Silentina che comprende il Flysch di Albidona.

Unità sinorogenica

Flysch di Gorgoglione (Miocene Medio) (FGO): depositi di bacino di tipo collisionale controllato dalla tettonica, in cui si sono sviluppati torbiditi da prossimali a distali. È costituita da un membro arenaceo-conglomeratico prossimale in posizione geometrica superiore, e arenaceo-argilloso distale in posizione inferiore (arenarie grigio-giallastre e argille marnoso-siltose grigio-verdi). Localmente sono presenti lenti di arenarie grossolane incoerenti, conglomerati matrice sostenuti, e olistostromi di varia composizione, oltre a blocchi di

Formazioni Sicilidi di Albidona e rocce ignee. Appoggia in discordanza in onlap sul Flysch di Albidona. Spessore fino a 800 m.

Unità tettonica Silentina è costituita da diverse Formazioni. Nell'area di studio è presente la Formazione di Albidona caratterizzata da solo due dei tre membri che la costituiscono.

Flysch di Albidona esterno (Miocene Medio) (ALBe): membro esterno costituito da alternanza di arenarie grigio-occe in strati da sottili a medi e di marne, marne argillose ed argille siltose grigio-brune, cui si intercalano lenti di calcari marnosi e di marne calcaree. Spessore dell'intervallo fino a 250 m.

Flysch di Albidona (Miocene Inf.) (ALB): membro marnoso-calcareo, presente nell'area di studio come arenarie litiche grigio-giallastre, marne, marne argillose e argille siltose, con intercalazioni di megastrati carbonatici spessi fino a 80 m. Spessore dell'intervallo fino a 500 m.

UNITA' DELLA PIATTAFORMA APPENNINICA: costituite da successioni Mesozoiche molto potenti di calcari e dolomie, generalmente micritici, con fossili. Sono successioni di "mare basso". I calcari sono costituiti da dolomie nella parte bassa delle successioni (Carnico e Norico). Nell'area di studio si rinvencono con la denominazione di Unità Tettonica dei Monti della Maddalena.

Unità Tettonica dei Monti della Maddalena al suo interno comprende le seguenti formazioni presenti in affioramento nell'area di studio.

Formazione del Bifurto (Miocene Inf.- Medio) (BIF): depositi di ambiente bacinale con processi torbiditici. La formazione è costituita da una prevalenza di argilliti grigio-brune, avana e giallastre con *intercalazioni* di lenti sottili, di brecciole, calcareniti a macroforamiferi. Appoggiano in discordanza su termini di età differente della successione dei Monti della Maddalena. Spessore fino a 20m.

Calcari a Radiolitidi (Cenomaniano – Santoniano) (RDT): depositi di ambiente di piattaforma aperta. La formazione è costituita da calcari fagosostenuti, calcareniti, calciruditi grigiastre, biancastre e avana, in strati, con fossili quali rudiste e ostracodi e milioliti (nella parte bassa). Questa formazione passa verso il basso in contatto netto a CRQ. Spessore fino a 200 m.

Calcari con Requinie e Gasteropodi (Turonico – Cenomaniano) (CRQ): depositi di ambiente deposizionale tra subtidale- lagunare e peritidale, a luoghi di tipo marginale. La formazione è costituita da tre intervalli che, dall'alto verso il basso, passano da calcareniti e calcilutiti grigiastre a calcareniti e calcilutiti grigio-bianche, oolitiche o con ooidi. Lo spessore complessivo è non meno di 600 m.

Calcari e calcari Dolomitici (Triassico Sup.?- Creteco Sup.?) (CLU): depositi caratteristici di diversi ambienti da piattaforma carbonatica, a subtidale-lagunare sino ad ambienti di scarpata. La formazione è costituita in prevalenza da calcilutiti e calcareniti dolomitici, talora calciruditi di colore grigiastro. I livelli inferiori sono parzialmente dolomitizzati al passaggio con l'unità delle Dolomie indifferenziate (DOC). Lo spessore potrebbe superare i 1000-1100 m.

Dolomie Indifferenziate (Triassico Sup.- Paleocene) (DOC): dolomie, a grana fine e calcari dolomitici grigio chiaro, privi di strutture sedimentarie primarie o irregolarmente stratificate,

di frequente allo stato cataclastico. La facies a calcari è caratterizzata da un fitto reticolo di vene calcitiche ed è molto fratturata. L'unità è limitata a letto da contatti tettonici. Derivano in buona parte dalla dolomitizzazione tardiva di termini differenti di età triassico superiore-paleocenica dell'Unità tettonica dei Monti della Maddalena al di sopra del piano di sovrascorrimento basale. Spessore molto variabile, fino ad alcune centinaia di metri.

UNITA' TETTONICA LAGONEGRO II: le Unità Lagonegresi sono costituite da una successione prevalentemente bacinale. Di seguito si descrivono le Formazioni rinvenute nell'area di studio in affioramento o in profondità:

Argilliti del Serrapotamo (*Oligocene Sup.*) (SRP): presente in profondità (vedi Capitoli successivi). Depositi di ambiente bacinale caratterizzati da argilliti brune, con rare sottili intercalazioni di arenarie e olistoliti carbonati mesozoi. In generale possono essere in contatto di scollamento sul Flysch di Galestrino e sono ricoperte meccanicamente dal Flysch di Albidona, dalle argille varicolori Sicilidi e dalle Dolomie indifferenziate. Spessore fino a 100.

Flysch Galestrino (*Cretacico*) (FGY2): depositi di bacino prossimale, con sporadici processi torbiditici. La formazione è costituita da una litofacies *marnoso silicea* e una *calcareo-marnosa*. Spessore da 0 a 300 m.

Scisti Silicei (*Retico - Cretacico*) (STS2): depositi di bacino da distale a prossimale. La formazione è costituita da diaspri e argilliti silicifere policrome (*litofacies Armizzone*), cui si intercalano sottili strati di calcilutiti grigie. Segue una fitta alternanza di argilliti, di calcari fini avana con liste di selce grigia, di calcilutiti rosse e calcari cristallini grigi, di argilliti varicolori. Tetto e base della formazione diacroni. Spessore fino a 170 m.

Calcari con Selce (*Triassico Sup.*) (SLC2): depositi di ambienti di bacino da distale a prossimale. La formazione è costituita da diverse litofacies. Nell'area di studio affiora la litofacies Armizzone costituita prevalentemente da calcilutiti grigie e calcareniti con sottili interstrati argillosi verdastri, intensamente fratturate e calcari dolomitici e dolomie giallastre con liste e noduli di selce. La formazione passa inferiormente alla Formazione di Monte Facito con passaggio graduale per alternanza di calcilutiti silicifere nodulari e di argilliti verdi o vinaccia. Mentre, verso l'alto la transizione a STS2 è graduale per l'infittirsi della frazione silicea. Spessore 250 - 300 m.

Formazione di Monte Facito (*Triassico Inf.*) (FAC2): la formazione nell'area di studio è caratterizzata da argilliti silicifere rossastre in lamine e strati molto sottili, radiolariti rosse e diaspri verdastri alternati a siltiti rosse e verdi in strati sottili e medi. Verso l'alto l'unità passa ai Calcari con Selce con marcata eteropia, oppure tramite un intervallo a marne di color crema con selce, alternate ad argillite policrome. Spessore massimo affiorante 200m circa.

UNITA' TETTONICA LAGONEGRO I parte bassa scollata tettonicamente dell'Unità di Lagonegro II.

Flysch Galestrino (*Cretacico Inf.*) (FGY1): depositi di ambiente bacinale. La formazione è caratterizzata da argilliti nere laminate e scagliettate, con rari sottili livelli diasprigni e di calcilutiti silicifere grigio-brune, in strati da sottili a 2 m. L'assetto è caotico. Nella parte alta la successione è troncata tettonicamente. Spessore fino a 150 m.

Scisti Silicei (*Retico- Giurassico Sup.*) (**STS1**): depositi di ambiente pelagico profondo. La formazione è costituita da alternanza di diaspri verdi, bruni e nerastri in strati sottili paralleli di argilliti silicifere rosse e verdi (litofacies Lagonegro-Sasso di Castalda). Il passaggio al Flysch Galestrino è graduale per alternanza di diaspri manganeseiferi, argilliti plumbee e calcari siliciferi. Spessore fino a 300 m.

Calcari con Selce (*Carnico - Norico*) (**SLC1**): depositi di ambiente marino profondo. La formazione è costituita da calcilutiti grigie con liste e noduli di selce, in strati da sottili a spessi (litofacies Lagonegro-Sasso di Castalda). Nella parte alta sono presenti calcilutiti con liste e noduli di selce con intercalazioni di marne, argilliti silicee policrome che passano gradualmente agli Scisti Silicei (STS1). Spessore fino a 400 m.

UNITA' TETTONICA IRPINE

Unità Irpine (*Miocene*) (**IR**): non affiorante ma presente in profondità (vedi Capitoli successivi).

UNITA' TETTONICA DELLA PIATTAFORMA APULA INTERNA

Piattaforma Apula Interna (*Triassico – Cretacico*) (**API**): non affiorante ma presente in profondità (vedi Capitoli successivi).

Depositi clastici (*Permo-Triassici*) (**TR**): non affioranti, ma presenti in profondità (vedi Capitoli successivi). Riconosciuta in una perforazione (Pozzo Puglia 1) eseguita dall'AGIP nelle Murge nord occidentali (Mostardini & Merlini, 1986): tra i 5000-6000 m di profondità si rinviene un'alternanza di anidriti e dolomiti di età Triassica (Carnico-Retico inferiore; cfr. Ciarapica, 1994) analoga alla Formazione delle Anidriti di Burano che poggiano a 6000 m in contatto erosivo su depositi Permo-Triassici di facies terrigena prevalentemente continentale (stratigraficamente analoga al Verrucano) costituiti da arenarie sublitiche formate da clasti metamorfici e sedimentari, in alternanza a brecce poligeniche, siltiti e argilliti. La differenza di impedenza acustica delle due formazioni Triassica e Permo-Triassica nelle sezioni sismiche dà origine a un segnale di riflessione molto forte (Ricchetti et al., 1988; Roure et al. 1991, Mazzoli et al., 2000; Patacca and Scandone 2007a, Scrocca et al., 2010, Shiner et al., 2004) che generalmente è subparallelo al top dei carbonati della piattaforma Apula.

BASAMENTO: corrisponde alla piastra Apula formata dalla propaggine settentrionale della zolla continentale africana; le relative conoscenze derivano da interpretazioni di dati geofisici (Agip Mineraria, 1968; Agocs & Terry, 1959; Calcagnile et al., 1980, Cassinis et al., 1979; Morelli et al., 1979).

LEGENDA



Figura 3.3 Schema delle unità tettonico-stratigrafiche utilizzate per la costruzione della carta strutturale dell'area di studio.

3.4 Fase 1-sintesi dei dati raccolti durante il rilevamento geologico strutturale

Per l'attività di rilevamento sono state utilizzate come base le carte tecniche regionali del Servizio cartografico della Basilicata a scala 1:25000 (disponibili sul sito www.rsdiregione.basilicata.it/dbgt-ctr/) relative ai fogli di seguito elencati (Figura 3.4):

- ARPA 25K – 505 IDF;
- ARPA 25K – 505 II DF;

- ARPA 25K – 505 III DF;
- ARPA 25K – 505 IV DF;
- ARPA 25K -506 III DF;
- ARPA 25K – 521 IDF;
- ARPA 25K – 521 IV DF.

Le zone rilevate ricadono prevalentemente nei fogli ARPA 25K – 505 IDF e II DF e sono riportate in Figura 3.4 come Z.1; Z.2; Z.3; Z.4:

- zona 1 (Z.1) – “Montemurro” a est del bacino è stata scelta per verificare l’eventuale presenza di faglie quaternarie in superficie e verificare le caratteristiche delle unità mioceniche nell’area;
- zona 2 (Z.2) – “Grumento Nova”, sul bordo ovest del bacino è stata scelta per verificare i rapporti tra le strutture estensionali e trascorrenti eventualmente affioranti nell’area;
- zona 3 (Z.3) – “Pian di Maglia”, a sud ovest del bacino è stata scelta per verificare la presenza e i rapporti delle unità riferite alle unità della Lagonegro I e Lagonegro II affioranti;
- zona 4 (Z.4) – “Moliterno”, a nord ovest del bacino è stata scelta per studiare le relazioni e i rapporti tra le varie successioni costituenti le unità Lagonegresi.

Tutte le misure raccolte durante il rilevamento sono riportate nel capitolo 13 in Appendice I.

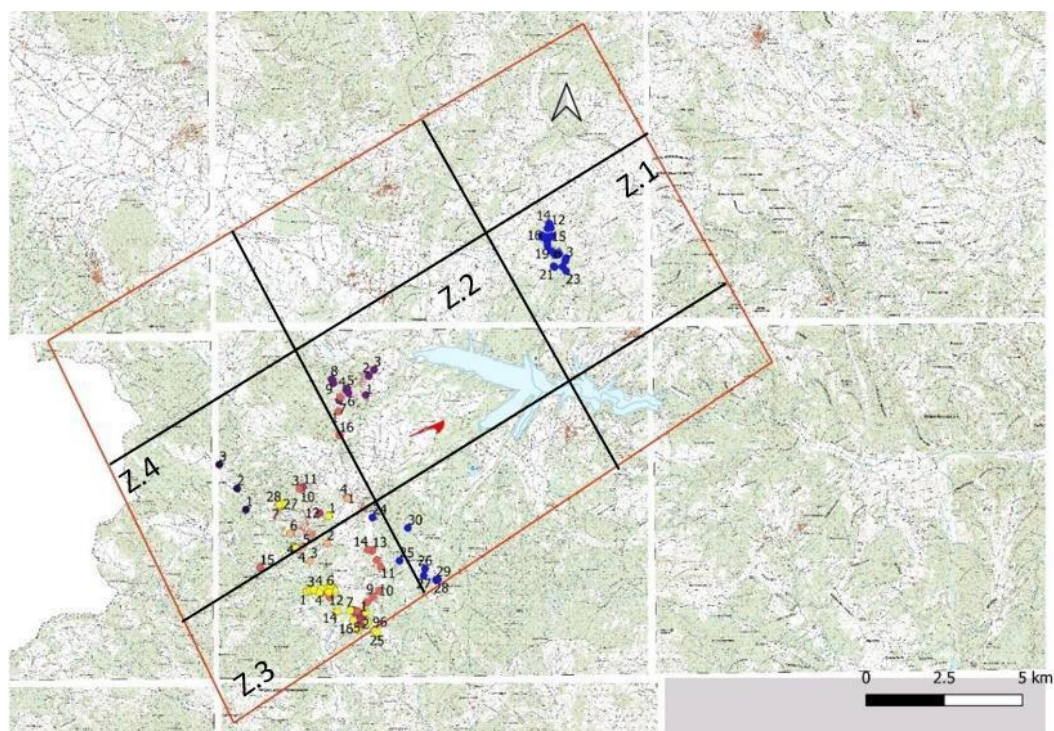


Figura 3.4 Riepilogo delle attività di rilevamento effettuate nelle 4 zone individuate (elaborazione in QGIS v. 3.16) Z.1 – Montemurro; Z.2 – Grumento Nova; Z.3 – Pian di Maglia; Z.4 Moliterno. I simboli in figura indicano gli stop effettuati e i colori corrispondono ai giorni in cui è stato svolto il rilevamento.

Zona 1 – Montemurro

In Z.1 l'obiettivo principale è stato quello di verificare l'eventuale presenza di faglie normali in superficie (definizione giacitura e rigetto) e riconoscere le caratteristiche di unità età miocenica affioranti .

Lungo il versante di Montemurro, orientato NW-SE (Figura 3.6), è visibile nella parte basale un intervallo potente diverse decine di metri di composizione calcareo-marnosa e colore prevalentemente grigio chiaro, caratterizzato da alternanze di calcareniti riconducibili all'unità del Flysch di Albidona "**ALB**" (Figura 3.6 a). La stessa formazione si rinviene nella parte sommitale del versante più deformata con pieghe anche di ordine chilometrico che si esauriscono verso ovest.

L'orientazione dell'asse delle pieghe è circa NW – SE come tra l'altro verificabile andando a misurare il piano di intersezione tra le principali giaciture degli strati S0 nell'area (Figura 3.5 a; Trend e plunge calcolati dell'asse della piega: 281; 4°).

L'assenza del Flysch di Gorgoglione "**FGO**" nella parte alta del versante potrebbe indicare la presenza di una faglia normale che disloca il Flysch di Albidona con scarso rigetto (100 metri circa). Tale faglia potrebbe essere la prosecuzione della faglia normale segnata più a nord nella carta geologica del foglio 505 Moliterno del progetto CARG (ISPRA, 2014) e la sua prosecuzione potrebbe ricadere nella valle a ovest "F. di Concetta", completamente ricoperta dalla vegetazione, in una faglia che disloca il fianco sud-occidentale di una anticlinale a scala chilometrica.

Tuttavia, come viene di seguito descritto, non sono state trovate evidenze in superficie di un piano di faglia diretta, ma sono presenti indicatori cinematici con caratteristiche coerenti con questa ipotesi.

Tutte le misure raccolte durante la fase di rilevamento in questa zona sono riportate in Appendice I Tabella 12.1, mentre i risultati appena descritti sono rappresentati in Figura 3.5 e di seguito dettagliati.

Sono presenti elementi tettonici quali sistemi di vene di calcite piano parallele con orientazione NE – SW misurate nella parte più a sud (Figura 3.5 b e Figura 3.6 b), e WNW-ESE misurate nella parte più a nord (Figura 3.5 b). Tali orientazioni delle vene, sono coerenti con la presenza di un possibile piano di faglia normale orientato NW-SE ed immergente a SW (Figura 3.5 b e Figura 3.6 b). Lo spessore delle vene è variabile da 10mm a qualche cm e sono distanziate fra loro anche di diverse decine di cm.

Nella zona, sono, inoltre, presenti fibre (misura 12 in Tabella 12.1 in Appendice I) di calcite a gradini con giacitura 160/33, riferibili a un piano di faglia orientato NW – SE a cinematica transpressiva sinistra (Figura 3.6 c e linea tratteggiata in rosso in Figura 3.5).

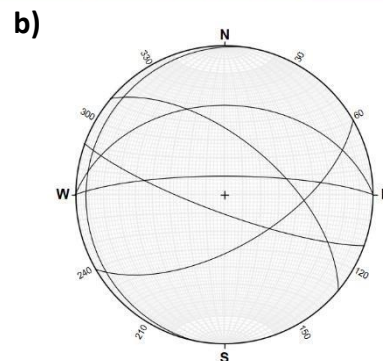
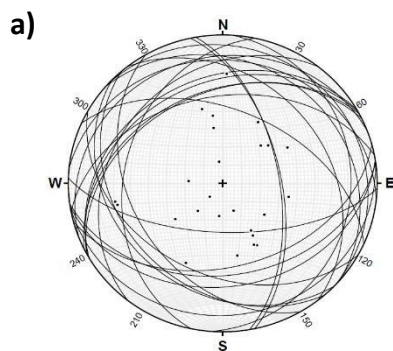
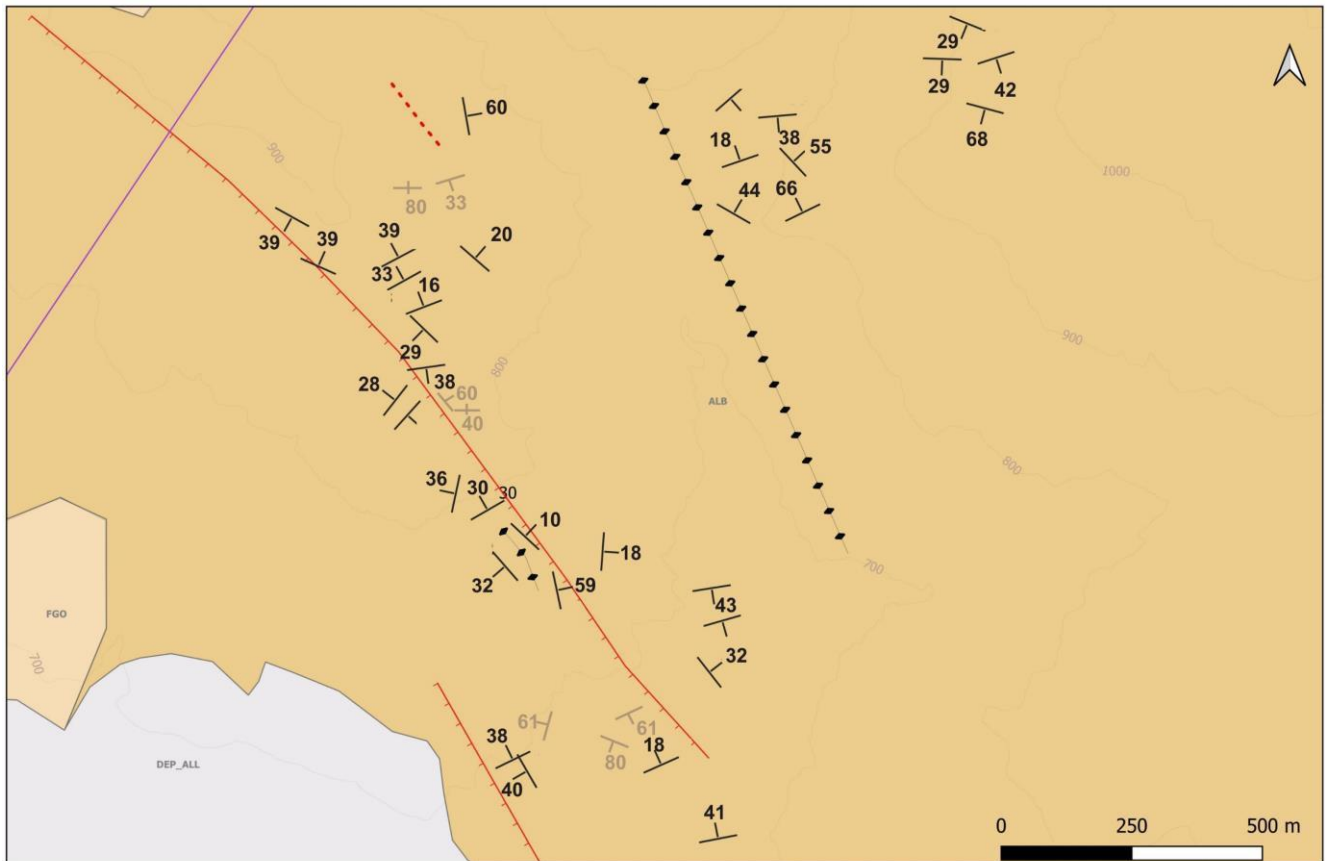


Figura 3.5 Dettaglio della carta geologico-strutturale in Allegato I relativo alla Z.1 – Montemurro, ricostruita attraverso i dati di rilevamento. La carta mostra le giaciture degli strati (simbolo in nero) e le giaciture delle vene di calcite (simbolo in grigio). I diagrammi rappresentano le misure nel reticolo di Schmidt realizzato attraverso l'utilizzo del programma Stereonet v.11.3 2011-2020 (Allmendinger, et al. 2013). Il diagramma a) rappresenta le misure di strato S0 del Flysch di Albidona; il diagramma b) rappresenta le direzioni relative al sistema di vene di calcite presente all'interno del Flysch di Albidona, ed individuato nell'area.

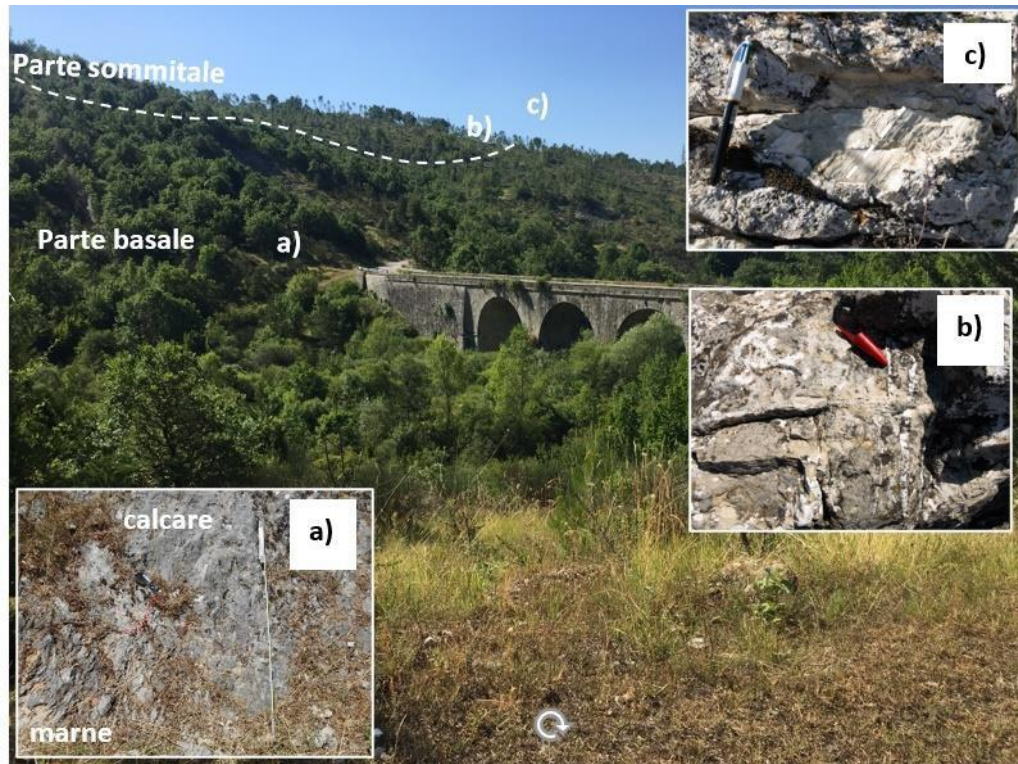


Figura 3.6 Z.1. Fotografie degli affioramenti presenti sul versante orientato NW -SE nella zona di Montemurro. Nella parte basale l'affioramento è coperto da intensa vegetazione che arriva fino alla valle del fiume; nella parte sommitale sono presenti zone di frana recente. Nel riquadro a) è mostrato un dettaglio di uno strato calcareo marnoso alternato a calcareniti; nel riquadro b) è riportato un dettaglio del sistema di vene di calcite piano-parallele presenti nelle marne; nel riquadro c) si osservano i gradini di calcite sintettonici relativi a una faglia con cinematica transpressiva.

Zona 2 - Grumento Nova

In Z.2 l'obiettivo principale del rilevamento è stato quello di comprendere i rapporti strutturali tra tettonica estensionale e trascorrente nelle unità presenti. Quello che si evince in sintesi è la presenza di una struttura trascorrente sinistra nell'unità della Piattaforma Appenninca.

Tutte le misure raccolte durante la fase di rilevamento in questa zona sono riportate in Appendice I Tabella 12.2, mentre i risultati sono rappresentati in Figura 3.7 e di seguito dettagliati.

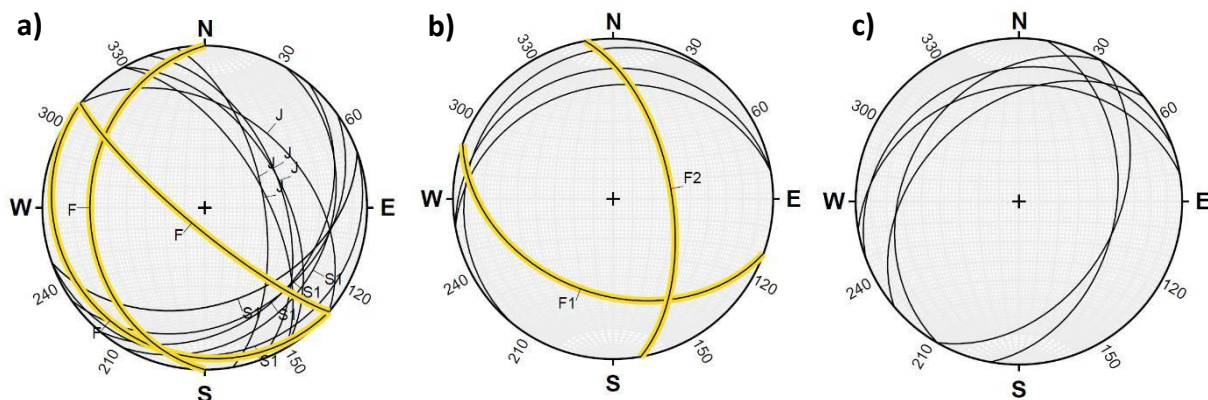
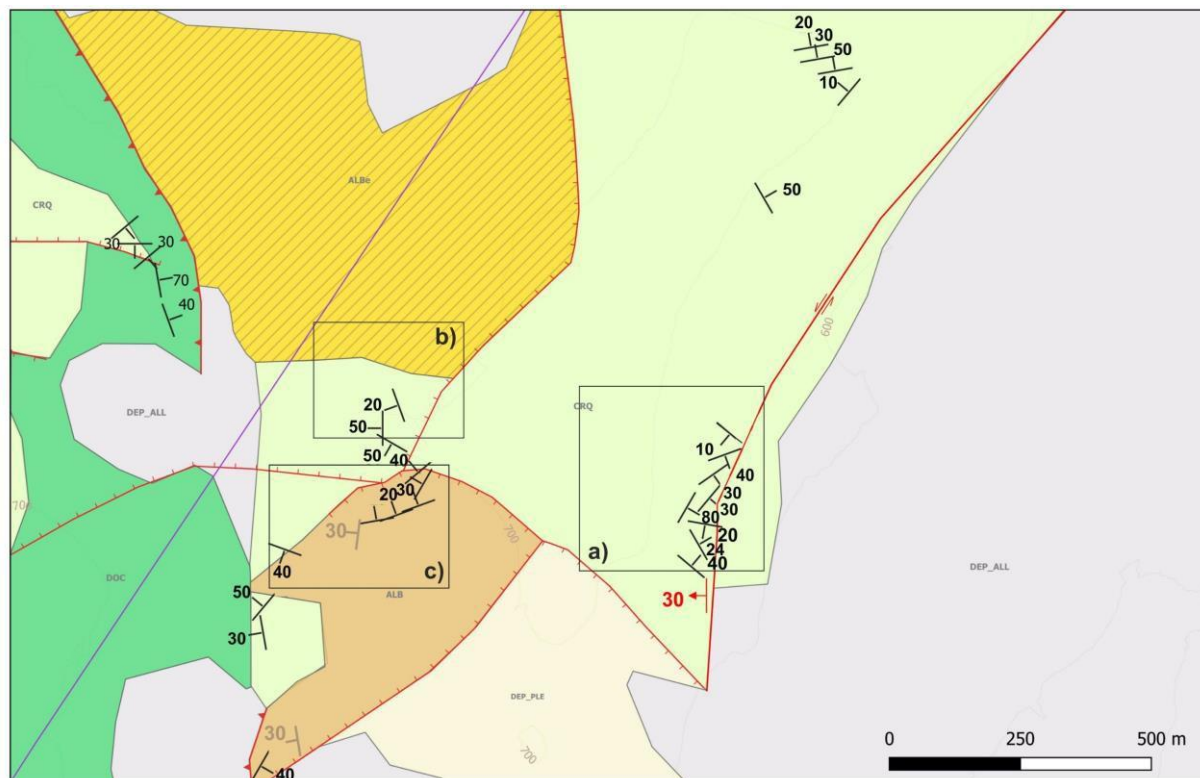


Figura 3.7 Dettaglio della carta geologico-strutturale in Allegato I relativo alla Z.2 – Grumento Nova, ricostruita attraverso i dati di rilevamento. La carta mostra le aree in cui sono state raccolte le misure (area a, b e c). Le giaciture di strato S0 sono rappresentate con il simbolo in nero, le giaciture delle vene di calcite in grigio e le giaciture dei piani di faglia in rosso. I diagrammi rappresentano le misure nel reticolo di Schmidt realizzato attraverso l'utilizzo del programma Stereonet v.11.3 2011-2020 (Allmendinger, et al. 2013). Il diagramma in basso relativo all'area a) riporta le misure di strato S0 nella formazione dei Calcari con Requiene e Gasteropodi - CRQ; le misure del piano di faglia rappresentate in colore giallo e le giaciture dei Joint "J" associati; Il diagramma in basso relativo all'area b) rappresenta le giaciture di strato nella formazione CRQ e le giaciture dei sistemi di fratture presenti "F1" e "F2" evidenziate in giallo; il diagramma in basso relativo all'area c) rappresenta invece le giaciture di strato nella formazione del Flysch di Albidona - ALB.

L'attività di rilevamento è partita dallo stop 1 (simbolo in viola in Figura 3.4) ovvero dall'analisi di un affioramento sul tratto di strada per salire da Sarconi a Grumento Nova orientato WSW – ENE (Figura 3.8 e lettera a) in Figura 3.7). Nella parte alta dell'affioramento sono presenti calcari con alterazioni giallastre e strati con spessori centimetrici lievemente piegati e fratturati

attribuibili alla formazione dei Calcari con Requiene e Gasteropodi - "CRQ" riconducibili alle Unità della Piattaforma Appenninca.

L'immersione degli strati S0 è verso SE e ad essi sono associati dei piani di frattura (Joint "J" Figura 3.8) immergenti a NE accompagnati dalla presenza di vene di calcite apparentemente prive di un'orientazione preferenziale. I due piani sono tagliati da un contatto tettonico ad orientazione appenninica (immergente a WSW), che nel tetto presenta strie orientate 270/30, (lettera a) in Figura 3.7). Nell'intorno del piano di faglia è presente una zona di danneggiamento con spessore di circa 50 cm. Proseguendo sulla strada sia verso WSW che ENE la vegetazione ricopre gran parte degli affioramenti e per questo non sono visibili prosecuzioni del contatto tettonico segnalato né di altre eventuali faglie dirette che delimitano a E l'horst di Grumento Nova.

Dalle analisi delle misure e degli indicatori cinematici presenti il contatto può definirsi come un piano di faglia a componente trascorrente sinistra (Figura 3.7, Figura 3.8).

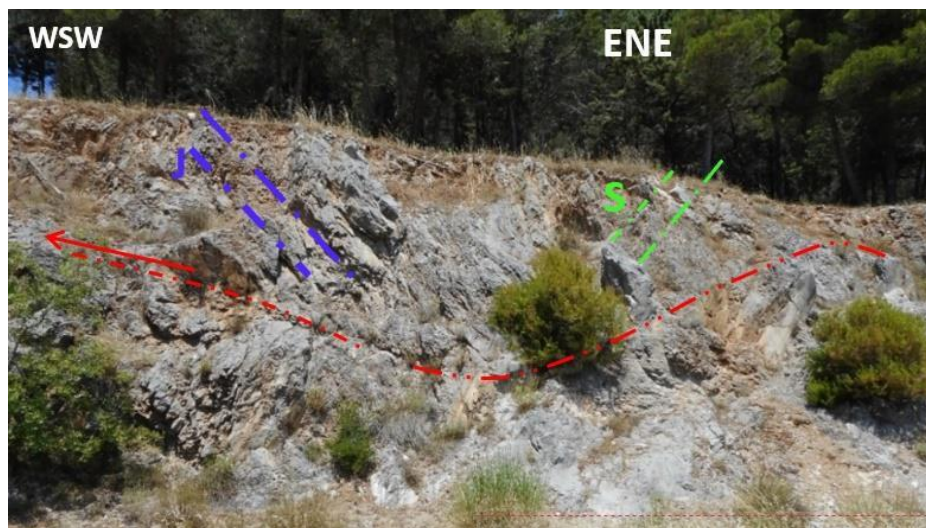


Figura 3.8 Affioramento della Z.2 (stop 1 in viola in Figura 3.4) dove è presente un contatto tettonico con strutture associate di joints estensionali caratterizzanti una faglia trascorrente sinistra.

I Calcari con Requiene e Gasteropodi – "CRQ" affiorano lungo tutta la strada situata a NW di Grumento Nova, dove sono state raccolte altre giaciture sempre rappresentate nel diagramma a) della Figura 3.7 e riferite agli stop 2 e 3, Tabella 12.2.

Lungo la strada, nel settore settentrionale dell'horst di Grumento Nova è presente un importante affioramento, composto da calcari grigi della formazione CRQ in strati con spessori metrici, a cui segue in contatto tettonico un affioramento del Flysch di Albidona – ALB. Sono presenti fibre di calcite associate a un piano di faglia estensionale orientato NW-SE (Figura 3.10). All'interno dei Calcari con Requiene e Gasteropodi – "CRQ", come visibile dalle misure riportate agli stop 5 e 6 in Tabella 12.2, si distinguono, due set di fratture "F1" e "F2" di tipo estensionale con giaciture rispettivamente 200/40 e 80/60 e angolo fra i due sistemi di circa 84-96° (lettera b) in Figura 3.7 e Figura 3.9).

Scendendo dalla strada sullo stesso versante si trovano poi gli stessi calcari in contatto con un affioramento di 20 cm di marne gialle e rosse in matrice arenaceo-argillosa del Flysch di Albidona

- “ALB”, a tratti piegate, all’interno delle quali sono evidenti vene di calcite di spessore millimetrico con spaziatura di 10 mm perpendicolari allo strato immergente a NW lettera c) in Figura 3.7 (direzione di immersione delle vene 260/30) (Tabella 12.2). Le fibre di calcite sono orientate SW -NE (Figura 3.10) coerentemente con l’orientazione NW-SE e l’immersione a SW della faglia estensionale segnata in carta.

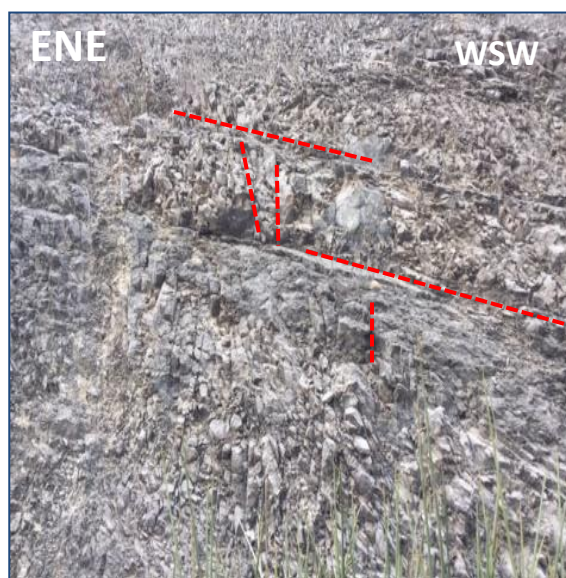


Figura 3.9 Calcari grigi (CRQ) sul lato N della Z.2 Grumento Nova, intensamente fratturati da due sistemi di strutture immergenti rispettivamente a circa 200/40 e 80/60.



Figura 3.10 Dettaglio delle fibre di calcite orientate SW – NE all’interno di calcari intercalati nei depositi argilloso -sabbiosi della formazione dei Flysch di Albidona nella zona situata a N di Grumento Nova.

La Formazione dei Calcari con Requinie e Gasteropodi continua ad affiorare sulla strada che collega Grumento Nova a Chianedda verso il fiume Agri. In particolare, in corrispondenza degli stop 7 e 8 (in viola in Figura 3.4) si rinvergono calcari lungo tutto il tratto di strada con le giaciture riportate in Tabella 12.2. Negli stop 9 e 10 vi sono poi affioramenti che permettono di osservare elevati spessori dell’Unità della Piattaforma Appenninica, evidenziando il contatto tra calcari “CRQ” e dolomie “DOC”.

L'obiettivo dell'attività di rilevamento per la Z.3 di Pian di Maglia ha riguardato la verifica dei rapporti tra le Unità Lagonegro I e della Lagonegro II.

Il rilevamento ha permesso di distinguere le caratteristiche e l'estensione di queste due unità e i loro rapporti nella zona investigata. In sostanza, si rinviene una finestra tettonica che mostra le formazioni costituenti l'Unità Lagonegro I in posizione di alto strutturale rispetto alla Lagonegro II, sovrascorsa sulla precedente.

Tutte le misure raccolte durante la fase di rilevamento in questa zona sono riportate in Appendice I Tabella 12.3, mentre i risultati sono rappresentati in Figura 3.11 e di seguito dettagliati.

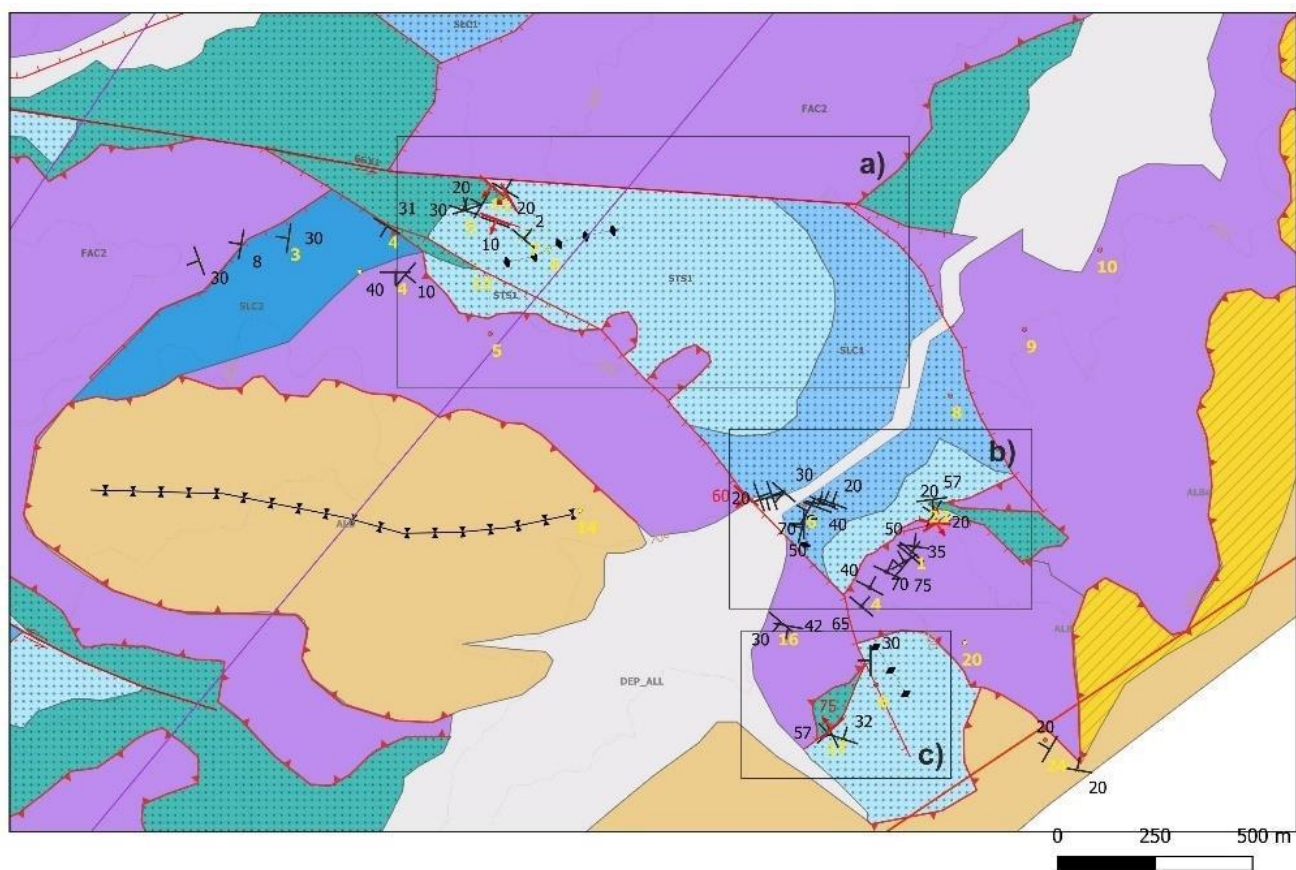


Figura 3.11 Dettaglio della carta geologico-strutturale in Allegato I relativo alla Z.3 – Pian di Maglia, ricostruita attraverso i dati di rilevamento. La carta mostra le aree in cui sono state raccolte le misure (aree a, b e c) i cui ingrandimenti sono riportati nelle successive figure Figura 3.12, Figura 3.16, Figura 3.17. Le giaciture degli strati sono rappresentate con il simbolo in nero, le giaciture delle vene di calcite in grigio e le giaciture dei piani di faglia in rosso.

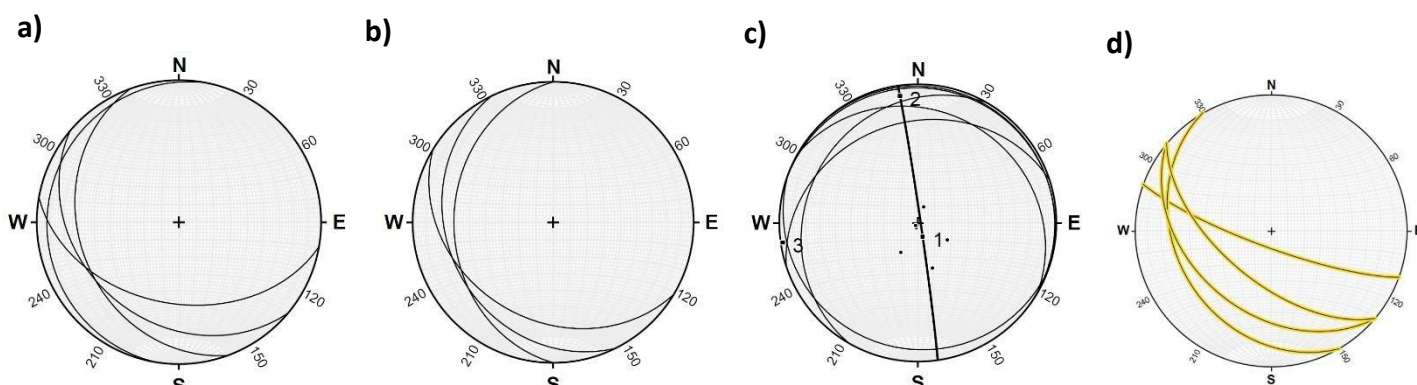
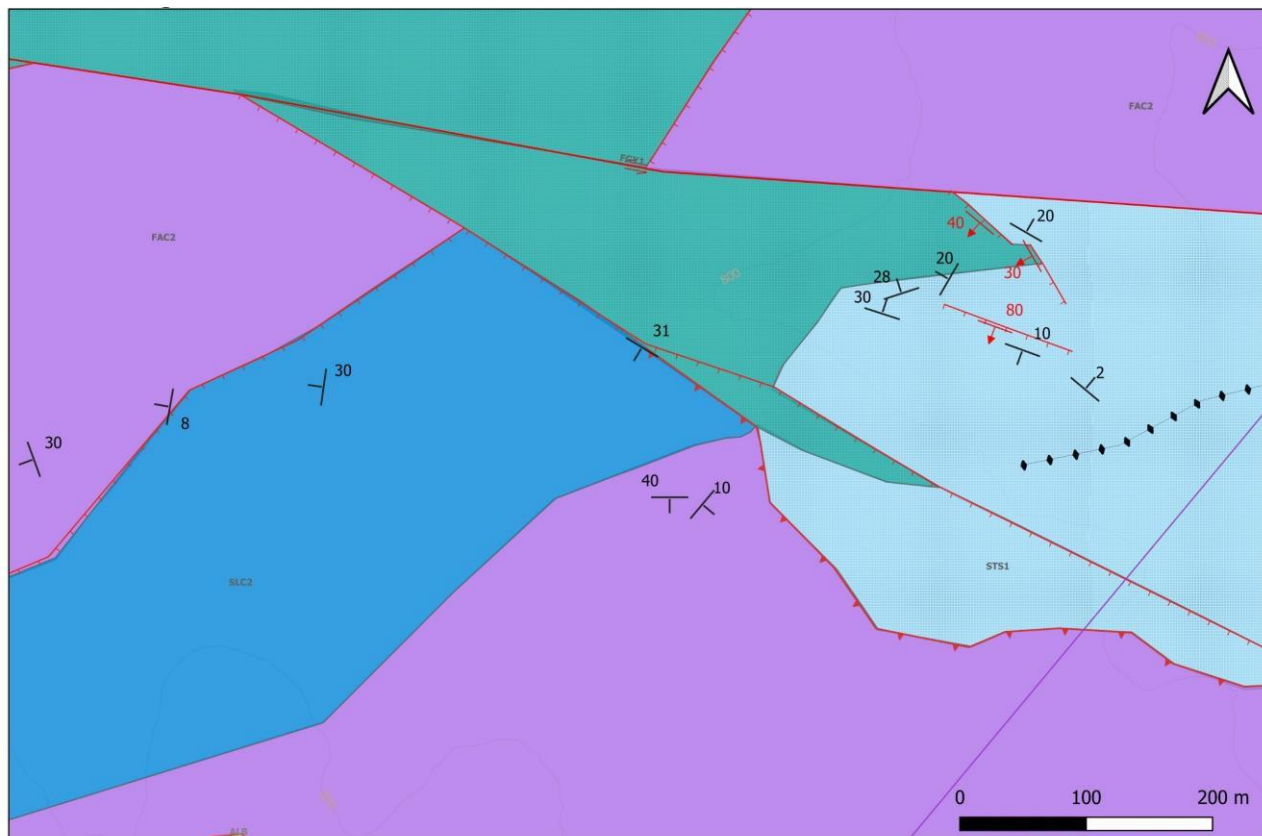


Figura 3.12 . Dettaglio della carta geologico-strutturale in Allegato I relativo alla Z.3 – Pian di Maglia. Area a) di Figura 3.11 relativa alla zona di fronte alla Chiesa di Santa Maria del Rito. Le giaciture degli strati sono rappresentate con il simbolo in nero, le giaciture delle vene di calcite in grigio e le giaciture dei piani di faglia in rosso. I diagrammi rappresentano le misure nel reticolo di Schmidt realizzato attraverso l'utilizzo del programma Stereonet v.11.3 2011-2020 (Allmendinger, et al. 2013). I diagrammi in basso, lettere a-c, rappresentano le misure di strato rispettivamente delle formazioni di Monte Facito – “FAC”, dei Calcari con Selce - “SLC2” e degli Scisti Silicei – “STS1” quest’ultimi riportano anche come n. 3 la direzione dell’asse della piega calcolata come terzo vettore del cylindrical best fit (cfr. Axial plane finder Stereonet v. 11.3 2011-2020); il diagramma lettera d) rappresenta invece le misure dei piani di faglia evidenziate in giallo rinvenute nell’area.

Il primo stop (stop 1 in giallo in Figura 3.4 e area a in Figura 3.11 e Figura 3.12) è relativo a un affioramento di calcareniti con matrice gialla della formazione di Monte Facito - "FAC".

Gli strati immergono tutti a SW (diagramma lettera a in Figura 3.12), e si rinviene il contatto con i calcari con selce - "SLC2", attribuibili alle Unità della Lagonegro II. I Calcari con Selce sono caratterizzati da vene di calcite apparentemente prive di un'orientazione preferenziale, dello spessore di 20 cm e spaziatura di 4 cm, anche queste immergenti prevalentemente a SW (diagramma lettera b in Figura 3.12). Di fronte alla chiesa di Santa Maria del Rito, procedendo verso E allo stop 4 di Pian di Maglia, i Calcari con Selce - SLC2 presentano superfici di strato orientate da 280/8 a 278/30 e sono a contatto con argilliti nere con sottili livelli diasprigni e calcilutitici, molto tettonizzate (statificazione 211/31) appartenenti alla formazione del Flysch di Galestrino - "FGY1" dell' Unità della Lagonegro I. Il contatto è di tipo tettonico ma il piano di faglia non è affiorante. Oltre alla formazione del Flysch di Galestrino - "FGY1" è presente con contatto stratigrafico, anche la formazione degli Scisti Silicei - "STS1". Questa formazione è interessata da una piega anticlinale con lunghezza d'onda di 0,3 km e un asse orientato WSW-ENE in Figura 3.12 (trend e plunge calcolato dell'asse della piega 261/2°; immersione e inclinazione calcolato del piano assiale 172/81° S; angolo apicale: 144° lettera c Figura 3.12;) e giaciture dei fianchi circa S1 18/30; S1 342/28 (diagramma lettera c Figura 3.12 e Figura 3.13). Gli scisti continuano per tutta la parte alta vicino alla chiesa di Santa Maria del Rito, in alcuni casi interessati da sistemi di vene perpendicolari alla giacitura di strato con spaziatura di qualche cm e pieghe. In questa zona sono evidenti numerosi piani di faglia (diagramma lettera d Figura 3.12).



Figura 3.13 Stop 4-6 Z.3 Pian di Maglia (simbolo in giallo in Figura 3.4). In foto sono visibili gli scisti verdi piegati con asse in direzione antiappenninica, vicino a questa piega sono presenti anche diversi piano di faglia interni agli Scisti con giacitura circa 240/30.

In particolare, si osservano faglie di modesta lunghezza (non più di 0,5 km; stop 5- 12 Tabella 12.3 Appendice I). Non poco lontano dallo stop 6 si rinviene, inoltre, una faglia che disloca gli Scisti Silicei - STS1 e la formazione del Flysch di Galestrino - FGY1 con giacitura 200/80 e orientazione N110.

Altre evidenze di piani di faglia normali a basso angolo sono presenti negli stop 11 e 12:

- nel primo è presente un piano di faglia normale a basso angolo con strie che mette a contatto gli Scisti Silicei - STS1 con la formazione del Flysch di Galestrino - FGY1 con giacitura 220/40.

L'orientazione delle strie varia da 215/40 a 220/30. La giacitura degli Scisti Silicei - STS1 misurata a letto della faglia è 240/30.

- nel secondo la formazione dei Galestri viene dislocata da una faglia parallela alla precedente, orientata secondo una direzione N130.

Quindi, in corrispondenza del rilievo a N del fiume Maglia si rinviene tutta la successione dell'Unità della Lagonegro I, costituita dall'alto verso il basso, dalla formazione di Galestri "FGY1", dagli Scisti Silicei "STS1" e nella parte basale dai Calcari con Selce "SLC1". I Calcari con Selce della Lagonegro I sono visibili nel Versante a N dell'Hotel vecchio Ponte, e sono caratterizzati da un sistema di vene a tratti parallele e perpendicolari ai piani di strato, dello spessore di circa 5 mm e spaziatura di circa 10 cm (Figura 3.14).



Figura 3.14 Sistema di vene all'interno dei calcari con Selce nella Z.3 di Pian di Maglia.

Traguardando il fiume Maglia, dall'altro lato dell' Hotel Vecchio Ponte, si rinviene ancora la formazione dei Calcari con Selce (SLC1) piegati con asse della piega orientata a NW-SE con direzione di immersione misurata sul terreno di 40/58 (Figura 3.15): trend e plunge calcolato dell'asse della piega: 297/9°; immersione e inclinazione calcolate del piano assiale 211/69° S angolo apicale: 82° e Figura 3.16 lettera b).

La formazione dei Calcari con Selce – (SLC1) è presente anche lungo tutto il tratto a est sulla strada che collega il Fiume Maglia al comune di Sarconi (simbolo rosa in Z.3 Figura 3.4).

Proseguendo verso sud-ovest la SLC1 è ricoperta in contatto tettonico dalla formazione di Monte Facito – (FAC) dell'Unità della Lagonegro II, costituita da argilliti e arenarie stratificate, con spessore di qualche metro, immergenti prevalentemente a SW (area b Figura 3.11 e

Figura 3.16 lettera a). La Formazione di Monte Facito è bene affiorante lungo la strada provinciale dove si osservano strati da 5 a 10 cm di spessore, interessati da pieghe con assi orientate a NW-SE



Figura 3.15 Stop 1 Z.3 Pian di Maglia (simbolo giallo in Figura 3.4). Si rinviene la formazione dei Calcari con Selce SLC 1 piegata con assi di piano a giacitura 40/58).

(trend e plunge calcolato dell'asse della piega 330/25 ; immersione e inclinazione del piano assiale 324/77° E, angolo apicale 89,6°.

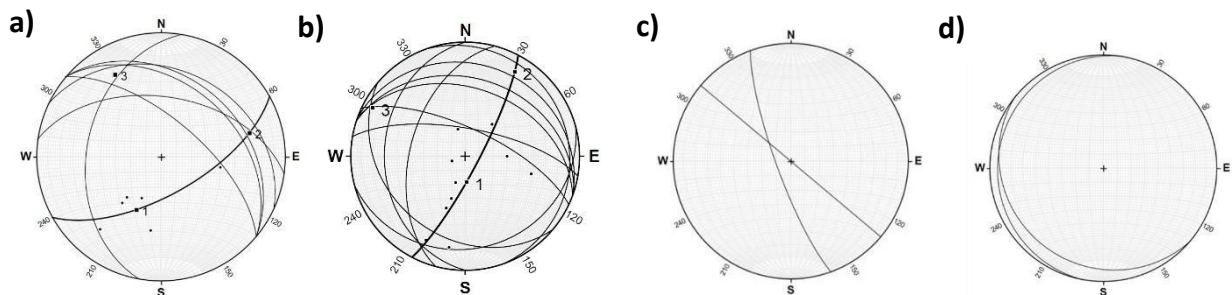
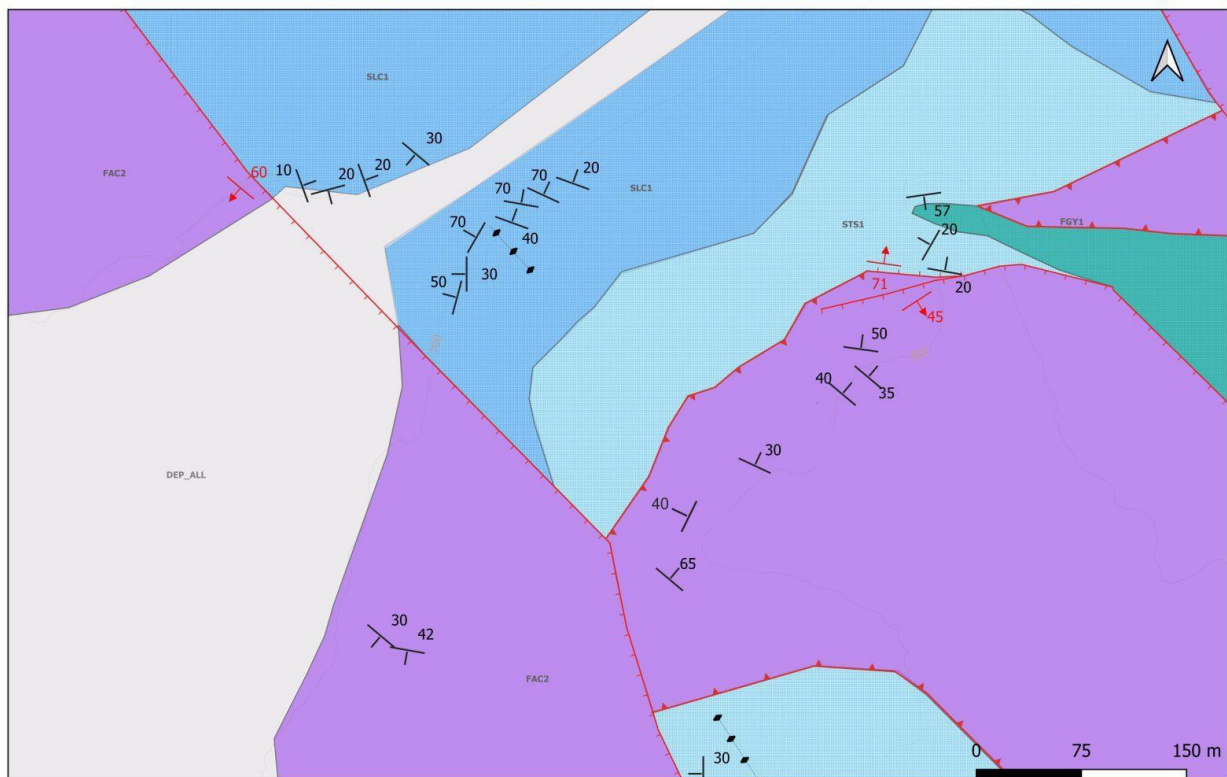


Figura 3.16 Dettaglio della carta geologico-strutturale riportata in Allegato I relativo alla Z.3 – Pian di Maglia area b) di Figura 3.11 relativa alla zona della valle del Fiume Maglia vicino Hotel vecchio Ponte. Le giaciture degli strati SO sono rappresentate con il simbolo in nero, le giaciture delle vene di calcite in grigio e le giaciture dei piani di faglia in rosso. I diagrammi rappresentano le misure nel reticolo di Schmidt realizzato attraverso l'utilizzo del programma Stereonet v.11.3 2011-2020 (Allmendinger, et al. 2013). I diagrammi in basso relativi alle lettere a) e b) rappresentano le giaciture di strato rispettivamente della formazione di Monte Facito – FAC della Lagonegro II e dei Calcari con Selce della Lagonegro I – SLC1; con il numero 3. è rappresentata anche la direzione dell'asse della piega calcolata come terzo vettore del cylindrical best fit (cfr. Axial plane finder Stereonet v. 11.3 2011-2020); i diagrammi in basso relativi alle lettere c) e d) mostrano rispettivamente le vene di calcite perpendicolari agli strati nella formazione di Monte Facito – FAC e dei Calcari con Selce della Lagonegro I – SLC1. I valori rappresentati sono tutti riportati in Tabella 12.3 in Appendice I.

Relativamente all'area c riportata in Figura 3.11 e

Figura 3.17, si è riconosciuto che gli Scisti Silicei (STS1) sono interessati da pieghe con asse orientato NW-SE (

Figura 3.17): Trend e plunge calcolato dell'asse della piega 307/11°; immersione e inclinazione del piano assiale 218/86°; angolo apicale: 128°

Figura 3.17 lettera a) e da una faglia normale, con giacitura del piano di faglia 318/75, che mette a contatto gli Scisti Silicei -STS1 con i Flysch Galestrino – FYG1 .

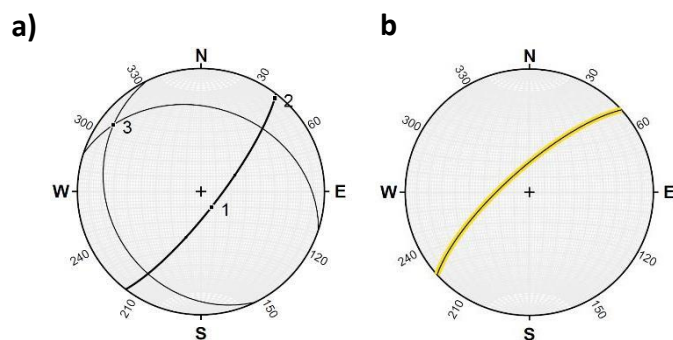
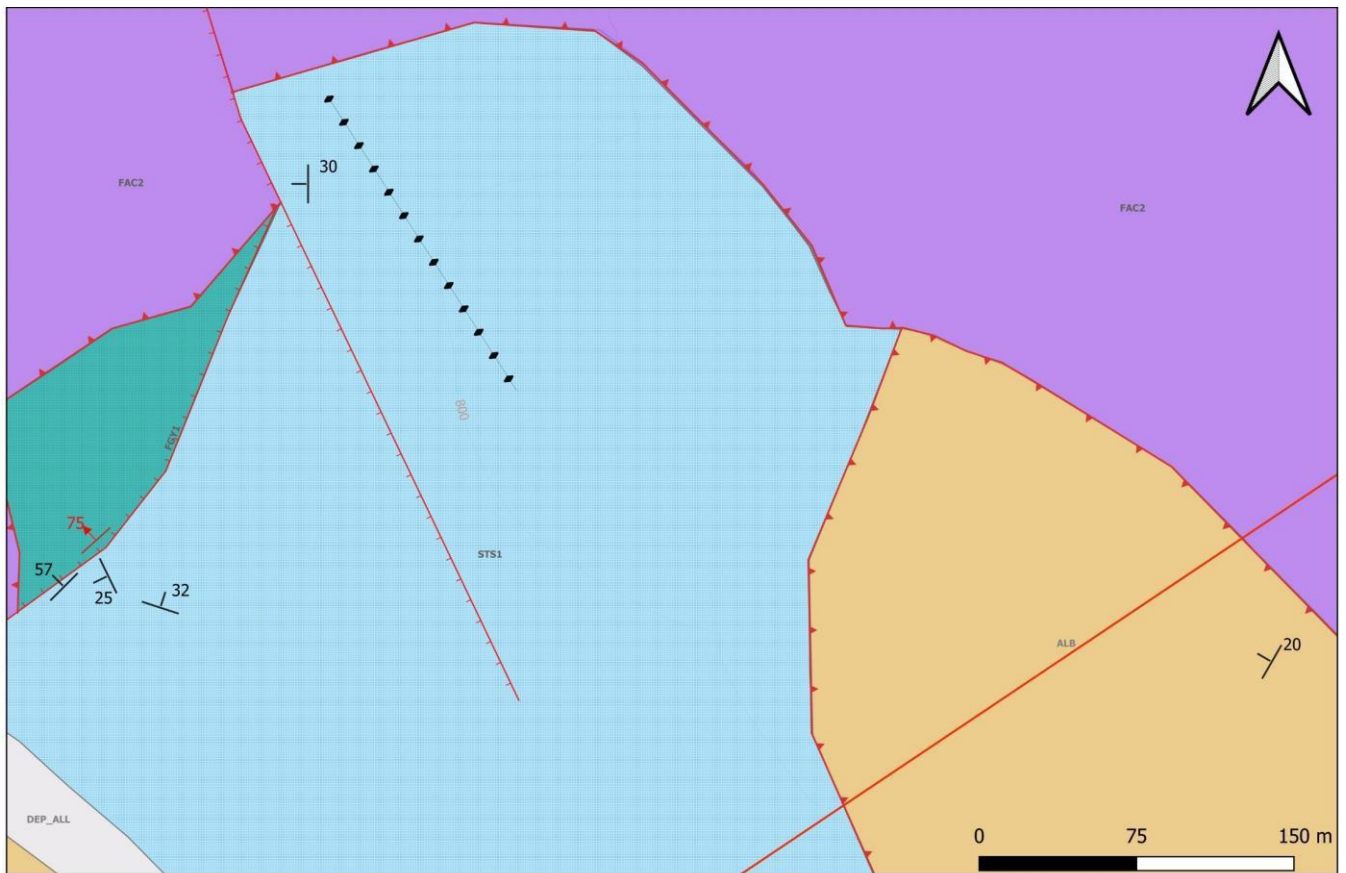


Figura 3.17 Dettaglio della carta geologico-strutturale in Allegato I relativo alla Z.3 – Pian di Maglia area c) di Figura 3.11. Le giaciture degli strati S0 sono rappresentate con il simbolo in nero, le giaciture delle vene di calcite in grigio e le giaciture dei piani di faglia in rosso. I diagrammi rappresentano le misure nel reticolo di Schmidt realizzato attraverso l'utilizzo del programma Stereonet v.11.3 2011-2020 (Allmendinger, et al. 2013). Il diagramma in basso relativo all'area a) rappresenta le misure di strato degli Scisti Silicei – STS1; con il numero 3. è rappresentata anche la direzione dell'asse della piega calcolata come del terzo vettore del cylindrical best fit (cfr. Axial plane finder Stereonet v. 11.3 2011-2020); il diagramma in basso relativo all'area b) rappresenta la giacitura del piano di faglia evidenziata in giallo che separa i Calcari con Selce – STS1 con il Flysch di Galestrino – FGY1 I valori rappresentati sono tutti riportati in Tabella 12.3 in Appendice I.

Zona 4 – Z.4 Moliterno

Il rilevamento in Z.4 ha riguardato la verifica dei rapporti tra le formazioni dell'Unità Lagonegro II composta dal basso verso l'alto da:

- Formazione di Monte Facito "FAC";
- Calcari con Selce "SLC2";
- Scisti Silicei "STS2";
- Flysch Galestrino "FGY2"

Sono state visionate le caratteristiche e i rapporti esistenti tra le diverse formazioni della Lagonegro II, che sono spesso separate da contatti stratigrafici. In altri casi sono però evidenti contatti tettonici costituiti da faglie normali ad alto angolo immergenti a SW o a NE.

Tutte le misure raccolte durante la fase di rilevamento in questa zona sono riportate in Appendice I Tabella 12.4, mentre i risultati sono rappresentati in Figura 3.18 e di seguito dettagliati.

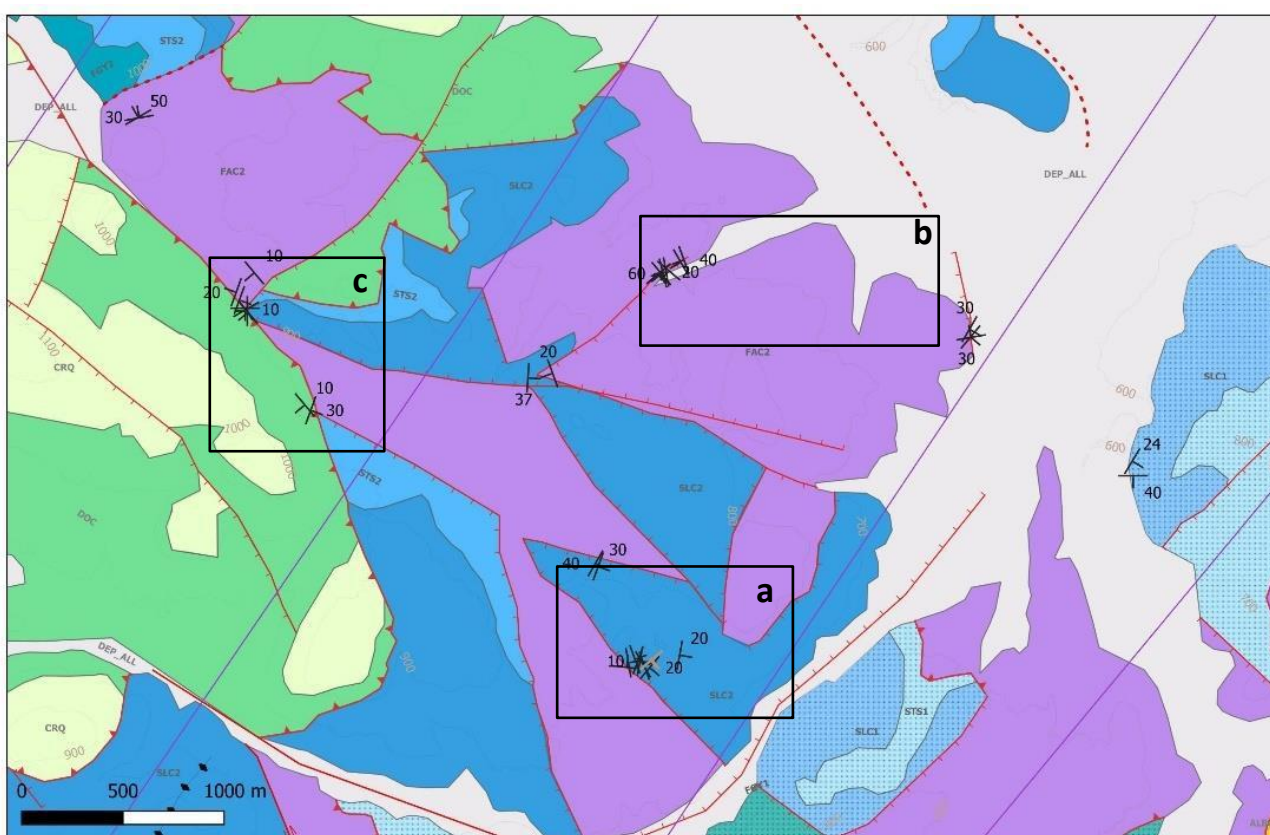


Figura 3.18 Dettaglio della carta geologico-strutturale in Allegato I relativo alla Z.4 – Moliterno, ricostruita attraverso i dati di rilevamento. La carta mostra le aree in cui sono state raccolte le misure (aree a, b e c) i cui ingrandimenti sono riportati nelle successive figure Figura 3.20, Figura 3.23,

Figura 3.24. Le giaciture degli strati sono rappresentate con il simbolo in nero, le giaciture delle vene di calcite in grigio e le giaciture dei piani di faglia in rosso. I valori rappresentati sono tutti riportati in Tabella 12.4 in Appendice I.

Nella zona di Moliterno sul lato meridionale che affaccia verso Pian di Maglia si rinviene lungo la strada in un affioramento di circa 2 m la formazione dei Calcari con Selce – "SLC2" con fratture parallele e perpendicolari alla stratificazione (Figura 3.19) formata da calcari di colore grigio intercalati ad argilliti gialle immergenti da NE a SE (Figura 3.20). Questi calcari si trovano in contatto con la formazione di Monte Facito - "FAC" caratterizzata da superfici di strato orientate da 70/40 a

06/18. Il contatto, probabilmente tettonico, è tuttavia coperto dalla vegetazione. Nei calcari è stata osservata la presenza di vene di calcite con giacitura 140/70.



Figura 3.19 Affioramento Z.4 "Moliterno" costituito dalla formazione - SLC2 costituito da strati di micrite grigia fratturata con livelli centimetrici di giallastre. Le linee rosse rappresentano i sistemi di fratture parallele e perpendicolari alla stratificazione S0.

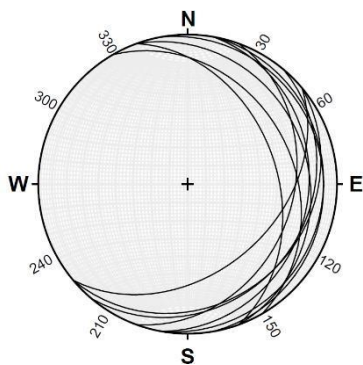


Figura 3.20 Dettaglio della carta geologico-strutturale in Allegato I relativo alla Z.4 – Moliterno. Area a) di Figura 3.18. . Le giaciture degli strati sono rappresentate con il simbolo in nero, le giaciture delle vene di calcite in grigio e le giaciture dei piani di faglia in rosso. I diagrammi rappresentano le misure nel reticolo di Schmidt realizzato attraverso l'utilizzo del programma Stereonet v.11.3 2011-2020 (Allmendinger, et al. 2013). Il diagramma rappresenta le misure di strato S0 della formazione dei Calcari con Selce della Lagonegro II – SLC2. I valori rappresentati sono tutti riportati in Tabella 12.4 in Appendice I.

Nel settore nord-orientale dell'area di Moliterno la formazione "FAC" è costituita da calcareniti grigie intercalate in siltiti rossastre piegate in strati millimetrici che passano, con contatto stratigrafico ai Calcari con Selce – SLC2 (Figura 3.21). Nella zona di Toppa Seggio (Stop 27 in giallo in Figura 3.4), la Formazione di Monte Facito presenta una giacitura orientata circa 250/20 deformata e presenta strutture sigmoidali S-C con i piani S orientati circa 230/60 e piani C orientati circa 80/40.

In generale in Z.4, la Formazione di Monte Facito è caratterizzata da siltiti rossastre, non presenta vene o fibre di calcite ed è caratterizzata da deformazioni duttili con pieghe a grande scala.

Un affioramento a composizione differente dai precedenti si rinviene nello stop 6 (in rosa in Figura 3.4), nei pressi dell'istituto tecnico commerciale. Si tratta di calcari scuri quasi bluastri compatti e con strati di decine di centimetri senza vene o altre strutture (Figura 3.22) con giacitura orientata da 110/30 a 120/40. L'attribuzione di questa formazione è quasi sicuramente riferibile ai Calcari con Selce.



Figura 3.21 Affioramento Z.4 Moliterno. Nel settore settentrionale di Moliterno è visibile la facies a siltiti rosse della formazione di Monte Facito.



Figura 3.22 Affioramento in Z.4 Moliterno, possibile parte affiorante della parte bassa dei Calcari con Selce della Lagonegro Il presente nella sola zona dell'Istituto tecnico Commerciale di Moliterno.

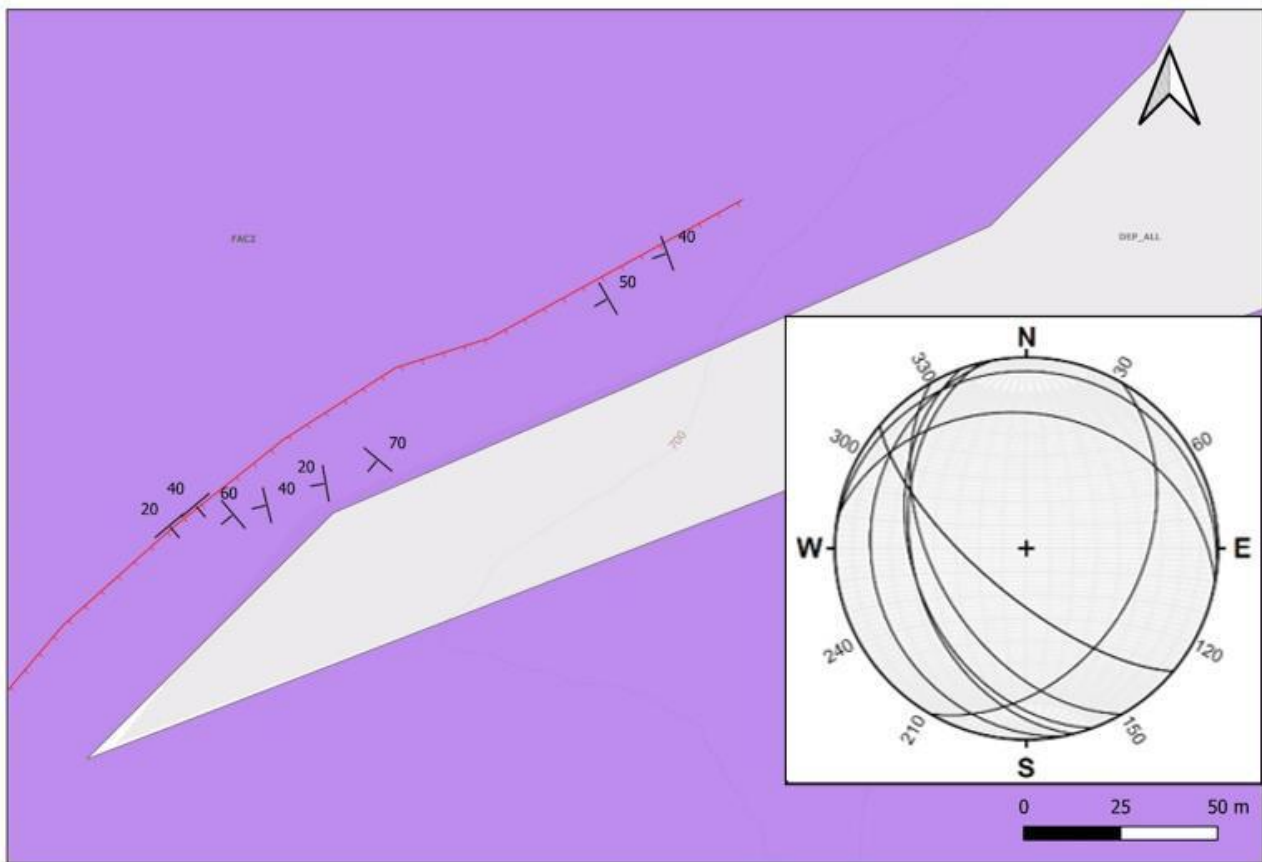


Figura 3.23 Dettaglio della carta geologico-strutturale in Allegato I relativo alla Z.4 – Moliterno, Area b) di Figura 3.18. Le giaciture degli strati sono rappresentate con il simbolo in nero, le giaciture delle vene di calcite in grigio e le giaciture dei piani di faglia in rosso. Il diagramma rappresenta le misure di strato della formazione di Monte Facito - FAC nel reticolo di Schmidt realizzato attraverso l'utilizzo del programma Stereonet v.11.3 2011-2020 (Allmendinger, et al. 2013) i valori rappresentati sono tutti riportati in Tabella 12.4 in Appendice I.

In gran parte della Z.4 la formazione di Monte Facito è costituita da prevalenti siltiti e argilliti rossastre spesso a contatto con i Calcari con Selce -SLC2 della Lagonegro II.

Tuttavia, nella zona di “Napedda”, a NW di Moliterno, è possibile verificare il contatto tettonico tra la successione della formazione di Monte Facito e le Dolomie “DOC” delle unità Appenniniche, in piccoli affioramenti presenti nell’area valliva coperta da sedimenti alluvionali (Figura 3.24).

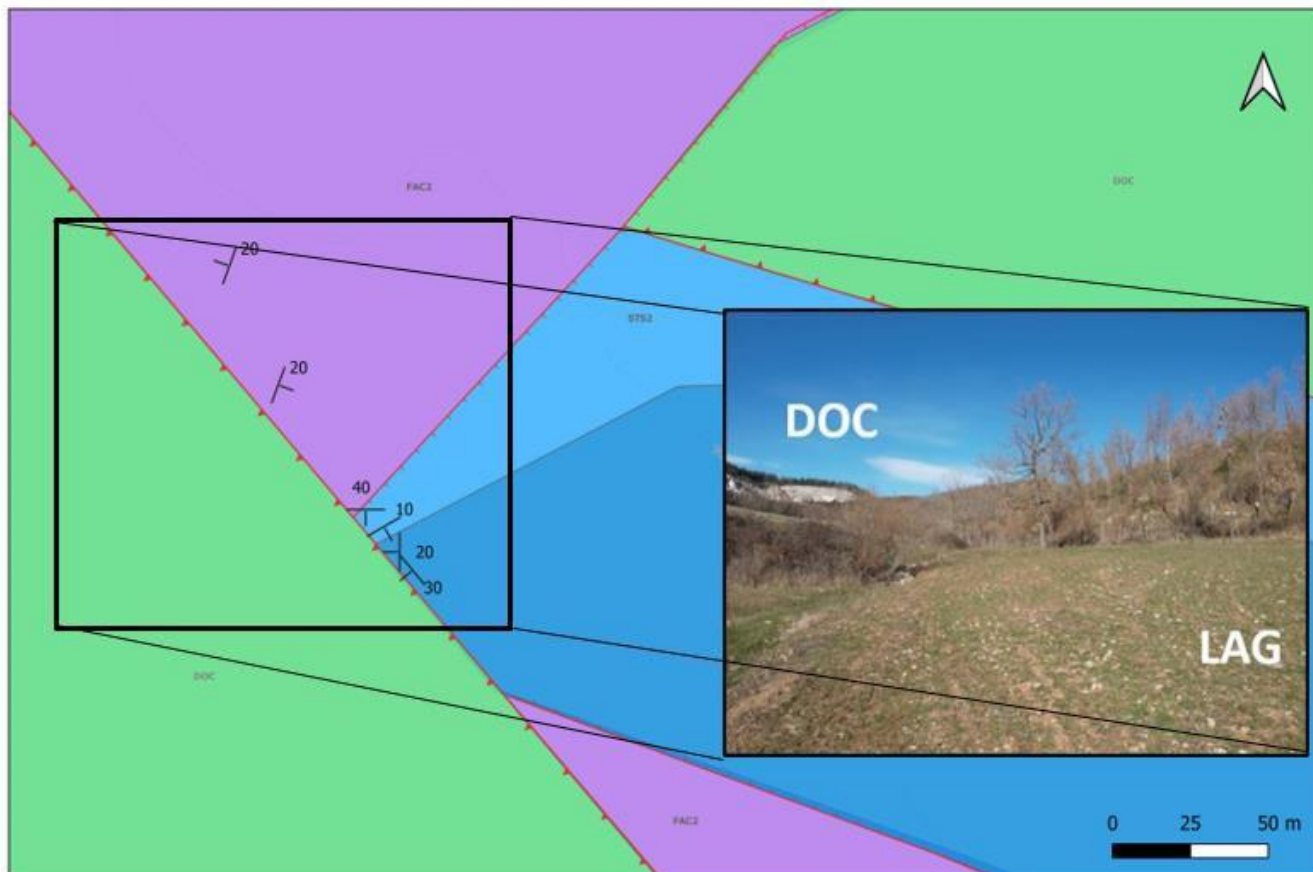


Figura 3.24 Z.4 Moliterno vicino “Nepedda” sono presenti unità della Lagonegresi II (Monte Facito, Calcari con Selce – SLC2 e Scisti Silicei- STS2) in primo piano e in lontananza le Dolomie Indifferenziate – DOC delle unità Appenniniche. Il contatto è coperto da sedimenti di riempimento della valle.

3.5 Fase 2 – realizzazione della carta geologico-strutturale dell’area di studio attraverso la costruzione di un progetto 2D con software QGIS

Nel progetto QGis (versione 3.16) sono stati integrati tutti i dati raccolti; in particolare, oltre a quelli disponibili dal progetto VIDEPI e la cartografia tecnica regionale utilizzata per il rilevamento, sono stati inseriti tutti i dati raccolti in campagna (in particolare, le misure delle superfici di strato e delle strutture osservate sul terreno) che sono stati confrontati e integrati con quanto riportato nella carta geologica 1:50.000 Foglio 505 “Moliterno” del progetto CARG (ISPRA, 2014).

Alla luce di quanto rinvenuto durante il rilevamento è possibile confermare quanto sostenuto nella definizione dello schema stratigrafico utilizzato (paragrafo 3.3) ed in particolare che l’inserimento nel Foglio 505 “Moliterno” delle due Unità di Moliterno “MOO” e di Foraporta FOP non è del tutto appropriato per diverse ragioni:

- la Formazione di Foraporta, oggetto di numerosi studi (vedi nota illustrativa foglio 521 “Lauria”, Bonardi et al., 2016) è stata collocata paleogeograficamente da Boni et al. (1974) in un solco intrapiattaforma, parzialmente euxinico, individuatosi tra il Triassico superiore e il Giurassico medio nella piattaforma campano-lucana e pertanto si dovrebbe rinvenire più a ovest della zona di studio;
- l’unità di Foraporta nel foglio 505 (nella zona di contatto con il Foglio 521 “Lauria”; ISPRA, 2014) è cartografata all’interno della formazione Moliterno, attribuibile per posizione

strutturale all'Unità dei Monti della Maddalena" (note illustrative del foglio sottostante 521 "Lauria", Bonardi et al., 2016);

- dai rilevamenti effettuati nell'area di studio la formazione di Moliterno descritta nel foglio 505 caratterizzata da argille grigio-verdastre non è mai presente e come visto dalla descrizione degli affioramenti presenti in Z.3 "Pian di Maglia" e Z.4 "Moliterno" l'area è per la maggior parte caratterizzata da depositi di siltiti rossastre o calcareniti in matrice gialla.

Soprattutto per quest'ultima ragione si rileva nuovamente che l'unico punto in cui sono presenti potenti strati di calcari neri – bluastri alternati a livello sottili argillosi è la zona sottostante l'istituto tecnico nel comune dove potrebbe essere presente o una parte dell'unità di Foraporta o un litotipo particolare dell'unità definita di Moliterno (MOO).

Infine, a controprova del fatto che l'utilizzo dell'Unità tettonica di Foraporta costituita dalla formazione di dolomie e calcari di Foraporta e Formazione di Moliterno sia inappropriato nell'area di studio, vi è anche il fatto che tale unità non è presente in nessuno dei Fogli CARG limitrofi al Foglio 505 fatta eccezione per il foglio "Lauria" (ISPRA, 2014 foglio 521) in cui compare la sola formazione di Foraporta senza la formazione di Moliterno.

Sulla base di queste considerazioni, nella costruzione della carta geologica si è tenuto conto dello schema delle unità tettonico-stratigrafiche rielaborato e riportato in Figura 3.3.

Quindi, utilizzando come base il foglio CARG 505, tenendo conto delle differenze appena sottolineate nell'attribuzione delle unità affioranti come anche supportate dalle evidenze del rilevamento, è stato possibile procedere alla realizzazione della carta geologico-strutturale attraverso l'utilizzo del software QGis versione 3.16.

3.6 Fase 3- analisi delle linee sismiche e dei dati di pozzo (dataset ENI) attraverso la costruzione di un progetto in IHS Kingdom software

Caricamento dati

Una volta realizzata la carta in QGis, tutti i dati in formato .shp delle unità e delle strutture sono stati esportati da QGis e importati in IHS Kingdom software (licenza messa del Ministero dello Sviluppo Economico DGS UNMIG), per iniziare a lavorare sull'interpretazione del dato in profondità tenendo conto dell'informazione di superficie.

In particolare, le unità della carta sono state importate come file "culture" in formato .shp, mentre le tracce delle linee sismiche in QGis e la localizzazione dei pozzi è servita per importare le informazioni del dato acquisto da ENI in formato vettoriale con le modalità di seguito descritte.

Le immagini .pdf delle linee sismiche consegnate da ENI sono state prima ritagliate e trasformate in SEG-Y attraverso l'open software denominato "Kogeo seismic toolkit", poi verificate attraverso la lettura in open software Seisee. Poiché il .pdf di partenza presentava una scarsa risoluzione nella conversione in SEG-Y vi è stata una ulteriore perdita di qualità.

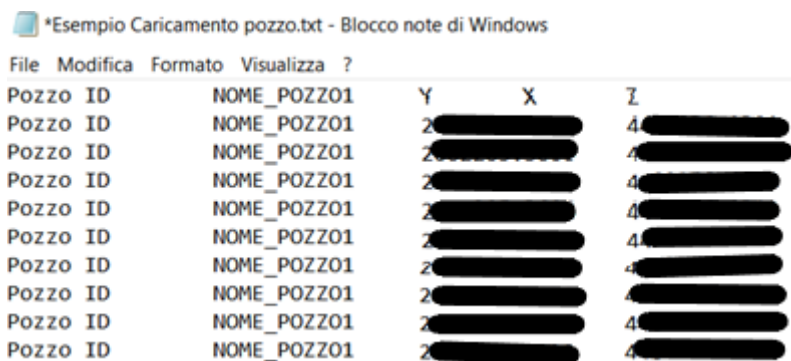
Ai fini della corretta importazione e localizzazione delle linee nel progetto Kingdom è stato costruito un file in formato .txt (es. Figura 3.25) riportante come campi "id linea", "numero degli shotpoint" individuati dalla base map di navigazione precedentemente importata nel progetto QGIS, e i valori di "latitudine" e "longitudine". Una volta Importate le tracce delle linee sismiche è possibile agganciare il SEG-Y indicando le coordinate e i relativi shotpoint con le profondità.



line_name	2050	2592567.3	4460012.7
line_name	2100	2593131.9	4460816.3
line_name	2200	2594328.2	4462555.6
line_name	2300	2595382.0	4464064.9
line_name	2400	2596578.4	4465781.2
line_name	2500	2597650.5	4467311.2
line_name	2600	2598784.4	4468924.3

Figura 3.25 Esempio di file .txt costruito per il caricamento delle linee in Kingdom.

Per quanto riguarda i pozzi è stata costruita, nello stesso modo, una tabella in formato .txt per caricare la localizzazione del pozzo in termini di coordinate di “latitudine” e “longitudine” e “profondità” (Figura 3.26); successivamente le informazioni importate sono state arricchite tramite il comando “edit well” aggiungendo le informazioni ad esempio dei “top dei pozzi”, procedendo alla costruzione della “Time-Depth Chart” per la conversione dei top dei pozzi da profondità (*m*) a tempi (*msec*) e i dettagli sulle formazioni. Un procedimento differente è stato eseguito per il pozzo 9 ritenuto determinante ai fini dell’interpretazione di una struttura in profondità. Poiché, infatti, il pozzo risultava deviato, è stata richiesta la possibilità di visionare nuovamente il profilo 1:1000 al fine di acquisire tutte le informazioni necessarie alla corretta localizzazione in profondità. Pertanto, nel .txt del pozzo 9 sono riportati tutti i 180 dati di registrazione con il dettaglio di coordinate X e Y, Tavola Rotary, profondità Z, angolo e azimut. Non è stato possibile ripetere la stessa operazione per tutti i pozzi devianti per mancanza di dati, ma per quanto riguarda gli altri casi la profondità delle unità registrate si trovava comunque lungo la verticale del pozzo per questo si è ritenuto possibile procedere con un errore minimo.



Pozzo ID	NOME_POZZO1	Y	X	Z
Pozzo ID	NOME_POZZO1	2	[REDACTED]	4
Pozzo ID	NOME_POZZO1	2	[REDACTED]	4
Pozzo ID	NOME_POZZO1	2	[REDACTED]	4
Pozzo ID	NOME_POZZO1	2	[REDACTED]	4
Pozzo ID	NOME_POZZO1	2	[REDACTED]	4
Pozzo ID	NOME_POZZO1	2	[REDACTED]	4
Pozzo ID	NOME_POZZO1	2	[REDACTED]	4
Pozzo ID	NOME_POZZO1	2	[REDACTED]	4
Pozzo ID	NOME_POZZO1	2	[REDACTED]	4
Pozzo ID	NOME_POZZO1	2	[REDACTED]	4
Pozzo ID	NOME_POZZO1	2	[REDACTED]	4
Pozzo ID	NOME_POZZO1	2	[REDACTED]	4

Figura 3.26 Esempio di file .txt costruito per il caricamento dei pozzi in Kingodm.

X	Y	TR	Z	Angolo	Azimut
██████████	██████████	609.50	0	0	0.0
██████████	██████████	609.50	72.0	0.18	0.0
██████████	██████████	609.50	100	0.20	0.0
██████████	██████████	609.50	107	0.18	0.0
██████████	██████████	609.50	127	0.04	0.0
██████████	██████████	609.50	154	0.04	0.0
██████████	██████████	609.50	172	0.14	0.0
██████████	██████████	609.50	200	0.12	0.0
██████████	██████████	609.50	227	0.15	0.30
██████████	██████████	609.50	256	0.30	0.0

Figura 3.27 Esempio di caricamento dati del pozzo 9 deviato in Kingdom.

Attraverso queste operazioni è stata quindi realizzata la mappa di base del progetto riportata in Figura 3.28.

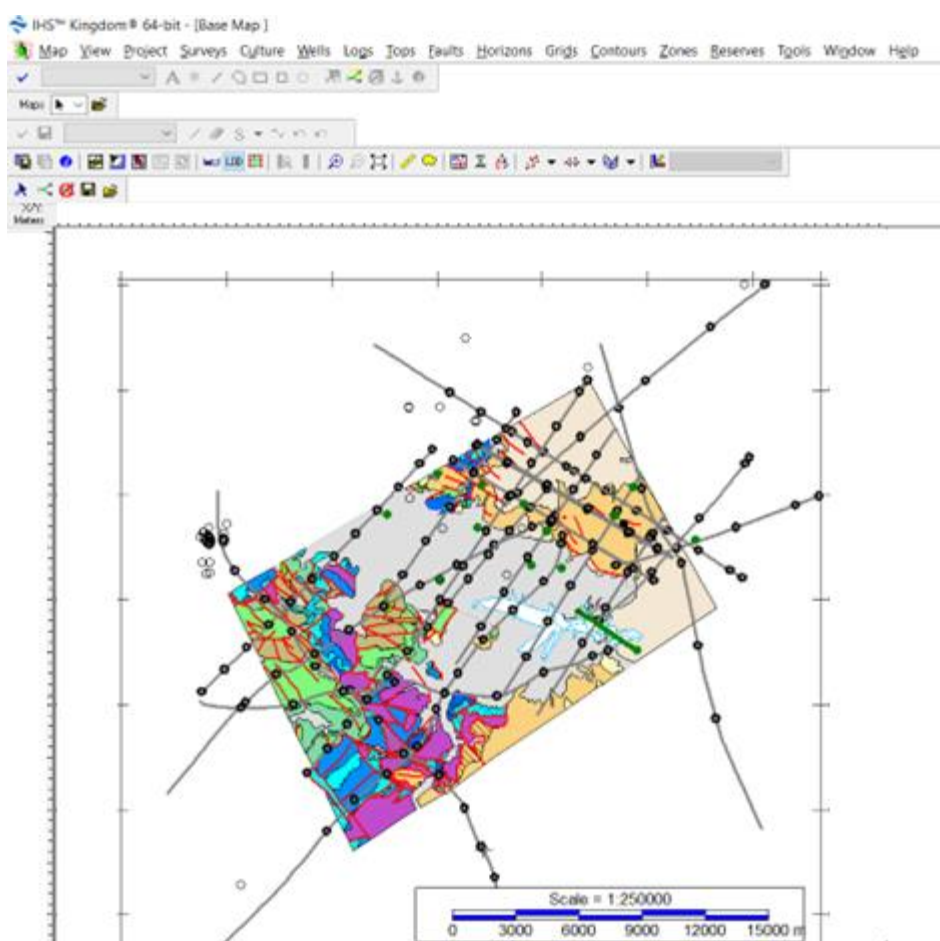


Figura 3.28 Rappresentazione della mappa realizzata in Kingdom software attraverso i dati ricavati dal modello strutturale realizzato in QGis e le sezioni sismiche e i pozzi Eni messi a disposizione del progetto.

Successivamente, attraverso il comando “well edit” per ciascun pozzo sono state inserite in primo luogo le informazioni generali del pozzo (es. nome , tavola rotary, anno di perforazione, ecc.) e poi sono state man mano immesse informazioni di dettaglio in particolare quelle relative ai top delle unità verificate dai profili 1:1000 visualizzati nell’ambito della data room. Le informazioni delle profondità dei top associate alle velocità sono essenziali per la conversione in tempi dei pozzi e delle unità. Pertanto, si è proceduto, dopo l’inserimento delle informazioni citate,

alla definizione delle velocità da applicare per ciascuna unità in modo da ricostruire la time-depth chart “T-D Chart” necessaria alla conversione.

Per questo lavoro, non avendo a disposizione i log sonici da cui ricavare le velocità reali, si è deciso di utilizzare il modello di velocità delle onde P ottenuto da Improta et al. (2017) mediante inversione tomografica 3D dei tempi di percorso P ed S di terremoti locali (Figura 3.29). E' ben noto che la tomografia sismica con terremoti locali è una tecnica d'indagine che può presentare importanti limiti legati alla non linearità del problema inverso tomografico, alla dipendenza del modello di velocità finale 3D dal modello di riferimento iniziale 1D (problema tipico delle tecniche di inversione linearizzate, iterative e perturbative), dalla forte dipendenza della risoluzione del modello di velocità dal numero e distribuzione dei terremoti nel volume investigato e delle stazioni sismiche. Tuttavia, la tomografia sismica con terremoti locali si è dimostrata efficace in diversi contesti quali ad esempio campi geotermici e di coltivazione di idrocarburi quando applicata per indagini alla scala del *reservoir* e con il supporto di dati di sottosuolo per la verifica dell'accuratezza dei modelli di velocità ottenuti (Calò & Dorbath, 2013; Julian et al., 1996; Tselentis et al., 2011; Vanorio et al., 2005; Zhang & Lin, 2014; Zhang et al., 2009). In particolare, la sua applicazione in combinazione con altre tecniche di indagine diretta o indiretta (pozzi profondi, sismica a riflessione, magnetotellurica etc..) si è dimostrata utile per ottenere importanti informazioni complementari, in particolare nell'esplorazione di strutture fortemente eterogenee, quando la sismica a riflessione multicanale presenta limiti di applicabilità.

Il modello di velocità 3D della Val d'Agri di Improta et al. (2017) ha una risoluzione spaziale molto elevata per una indagine di tomografia sismica passiva (2 km in orizzontale ed 1 km in profondità), ma che naturalmente non è confrontabile con la risoluzione dei profili di sismica a riflessione di buona qualità (i.e., risoluzione di decine di metri) che sono in grado di fornire dettagliate immagini strutturali delle strutture sepolte. Tuttavia, come dimostrato dagli Autori attraverso un confronto con vincoli di sottosuolo (pozzi, profili sismici a riflessione e geometria del top della Piattaforma Apula Interna), la struttura di velocità del modello tomografico 3D della Val d'Agri è coerente con la geometria delle principali strutture compressive della crosta superiore e fornisce informazioni cruciali sulla struttura del sottosuolo nei settori del serbatoio carbonatico dove l'imaging sismico a riflessione soffre per la bassa densità e/o qualità dei profili sismici.

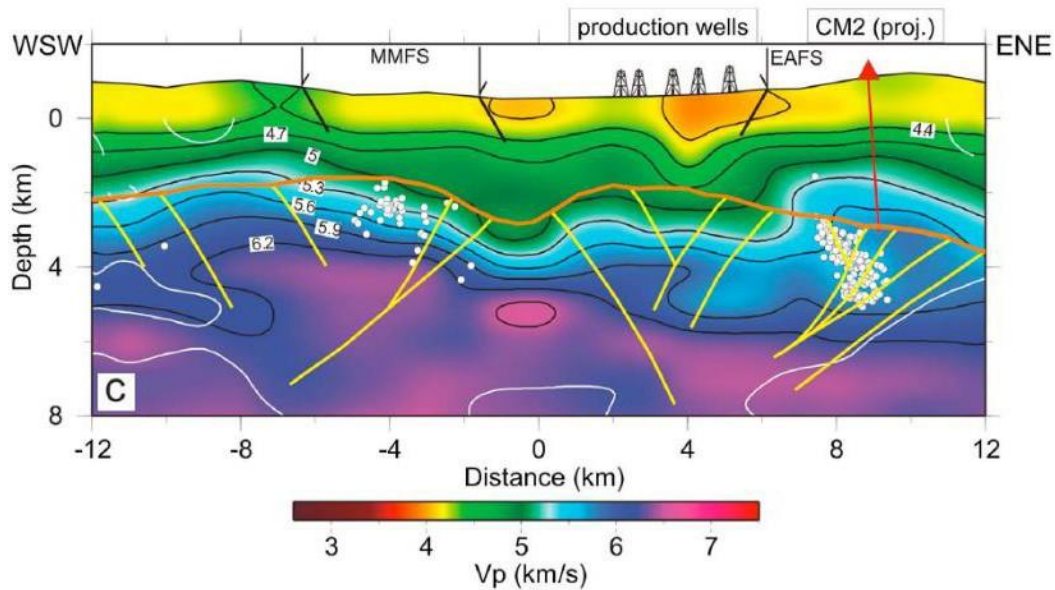


Figura 3.29 Sezione rappresentativa dei valori di velocità delle onde P ottenuta attraverso la tecnica di tomografia 3D con terremoti locali (da Improta et al., 2017). Il pozzo di re-iniezione Costa Molina 2 (CM2) è evidenziato in sezione.

Di seguito si riportano, quindi, i valori di velocità associati a ciascuno dei top delle diverse unità interpretate, in base al modello di Improta et al., 2017 (Figura 3.29) ed attraverso il confronto con la posizione dei principali marker sismici dei riflettori presenti nei dati resi disponibili da ENI:

- Top Unità mioceniche dei Flysch di Albidona “ALB” e Gorgoglione “FGO”; $3.7 < v < 3.9$ km/s;
- Top delle Unità Lagonegresi I e II indifferenziate (costituite dalle formazioni di Galestri “FGY2” degli scisti silicei “STS2”, dei calcari con selce “SLC2”, della Monte Facito “FAC” e dalle formazioni di Galestri “FGY1”, scisti verdi “STS1”, calcari con selce “SLC1”); $4.0 < v < 4.5$ km/s;
- Top delle Unità Iripine “IR” più mélangé $4.5 < v < 4.8$ km/s, range definito in base ai valori compresi tra il limite superiore del range di velocità delle Unità Lagonegresi e il limite inferiore del range di velocità dell’API; tale valore infatti è ricavato e non può essere risolto tramite la local earthquake tomography in quanto la risoluzione risulta essere troppo bassa.
- Top della piattaforma Apula “API”; $4.9 < v < 5.8$ km/s.

La definizione di range di velocità si è resa necessaria ai fini di una compatibilità con le regole stabilite dal software che prevede di applicare sempre velocità crescenti con l’aumento della profondità.

Di seguito si riporta un esempio della T-D chart calcolata in Kingdom, in base ai valori immessi sopra descritti (Figura 3.30).

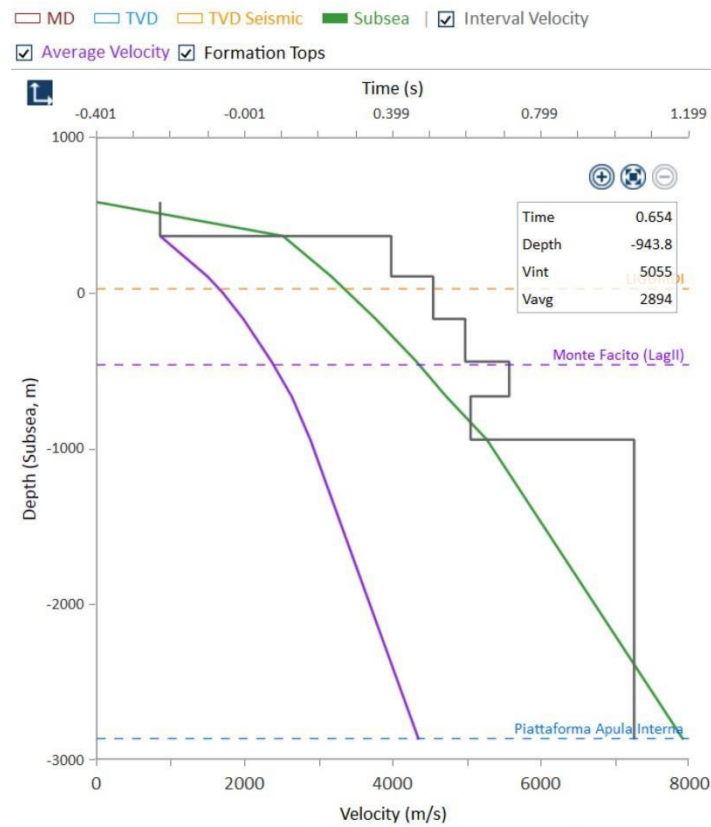


Figura 3.30 Esempio di Time – Depth Chart calcolata dal software Kingdom in base ai valori immessi di velocità per ciascun top estrapolati da Improta et al. 2017. Vengono riportate le curve delle velocità in profondità, delle velocità intervallari e della velocità media calcolata. La parte superiore a profondità comprese da $0 > z > 1000$ m (in superficie) è una approssimazione del software.

Attraverso le profondità dei principali top in metri e la velocità con la T-D chart, Kingdom calcola automaticamente le velocità intervallari e le velocità medie costruendo un profilo di velocità tipo quello riportato in Figura 3.30 e permettendo quindi di tarare le linee sismiche con il dato di pozzo come mostrato in Figura 3.31.

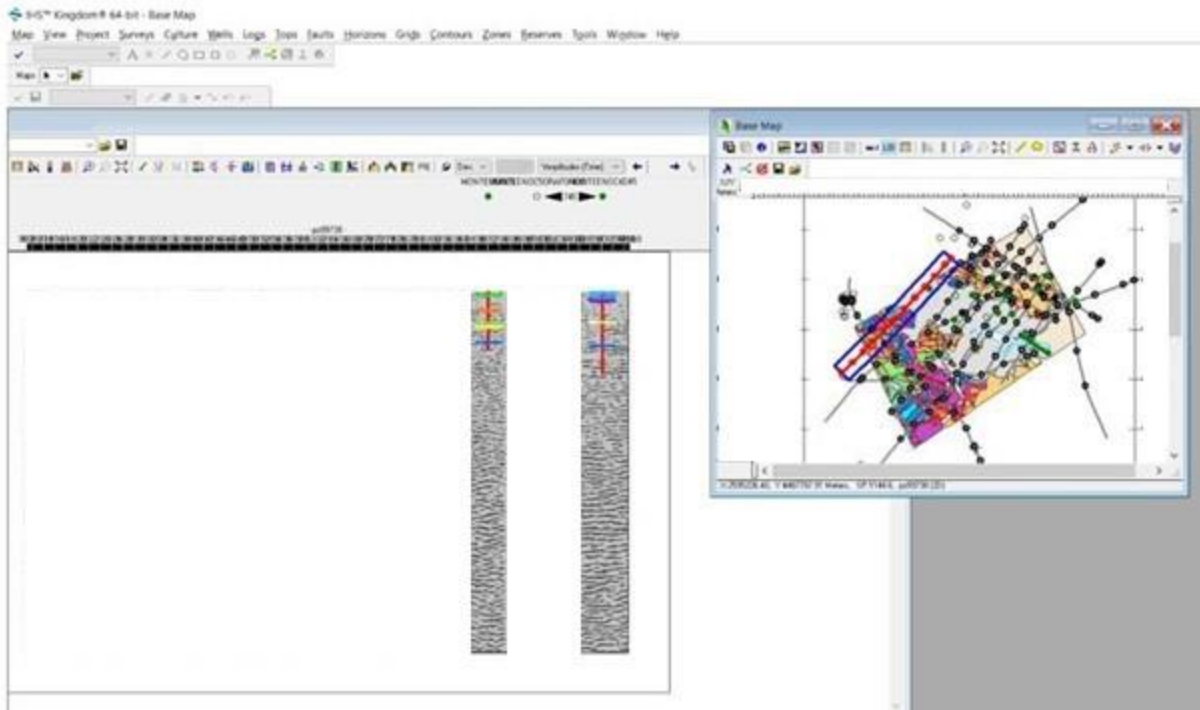


Figura 3.31 Esempio della localizzazione dei pozzi e i relativi top per tarare la sezione sismica di riferimento. API Top Blu; IR Top giallo; UNITA' LAG II costituita dal basso verso l'alto dalla "FAC" top Viola; "SLC" azzurro scuro; "STS" azzurro chiaro e "FGY2" top verde petrolio; "SRP" top arancione, "DOC" in verde chiaro.

Analisi delle linee sismiche

Successivamente al caricamento dati è stato possibile procedere con l'interpretazione delle linee sismiche in accordo con le metodologie più note (e.s. Badley, 1985; Veeken, 2007; Veeken e van Moerkerken, 2013). Il principio alla base dell'acquisizione sismica è che le rocce rispondono alle onde acustiche immesse con dei segnali riflessi che sono funzione delle loro proprietà fisiche (impedenza acustica funzione della velocità dell'onda acustica e della densità del mezzo $I1 = \rho V1$). È da sottolineare che convenzionalmente in Europa la polarità normale del segnale corrisponde a una ampiezza negativa mentre quella inversa a un'ampiezza positiva (Simm & White, 2002)(Figura 3.32).

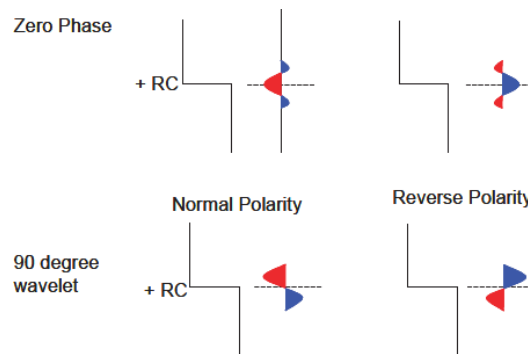


Figura 3.32 Convenzione Europea di polarità del segnale (modificato dopo Badley 1985).

L'insieme di questi segnali, a polarità negativa o positiva, a seconda della convenzione utilizzata, delinea un riflettore sismico Figura 3.33.

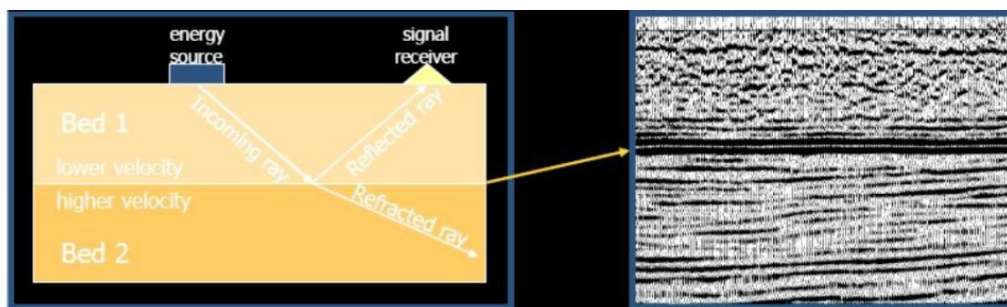


Figura 3.33 A sinistra schema del principio di funzionamento dell'acquisizione di una linea sismica; a destra risultato rappresentato all'interno di una linea sismica tramite riflettori.

Anche i riflettori sismici presentano caratteristiche differenti in funzione del tempo, dell'ampiezza, della frequenza e dell'attenuazione e ognuna di queste caratteristiche sismiche può essere utilizzata (tramite opportuni processamenti del segnale) per analizzare aspetti specifici (Brown, 1996).

Pacchi di riflettori sismici con caratteristiche sismiche differenti definiscono le facies sismiche. In genere le facies sismiche si raggruppano in 4 categorie:

- *riflettori sedimentari*; questo tipo di riflettori rispecchiano la geometria degli strati risultante da diversi processi deposizionali. In questa tipologia di riflettori le caratteristiche sismiche possono dare informazioni importanti quali ad esempio la presenza di contrasti litologici o la stratificazione e il contenuto in fluido (date dalla continuità o meno del riflettore e dall'ampiezza), lo spessore degli strati (ad esempio dalla frequenza del segnale);
- *unconformity o discontinuità*; questa tipologia di riflettori fornisce informazioni circa l'epressione di successioni stratigrafiche interrotte da discontinuità importanti.
- *riflettori non sedimentari* ovvero espressioni di faglia; le faglie sono zone strette o volumi di forte eterogeneità, con proprietà fisiche differenti dalla roccia ospitante. Dalla sismica è possibile mappare zone di faglia anche a grande scala attraverso la definizione delle terminazioni dei riflettori, dalle curve di diffrazione, dai cambiamenti in profondità.
- *artefatti*; gli artefatti sismici possono essere di diverso tipo e legati a diverse origini, tra questi si trovano ad esempio le "curve di diffrazione" che si formano come effetto di diffusione di energia sismica intorno a un punto sorgente in profondità (presente soprattutto nelle sezioni stack rappresentata da una curva convessa). Altro tipo di artefatto può essere una "multipla" ovvero un riflettore creato dalle onde acustiche che viaggiano più volte attraverso 2 riflettori a diverso contrasto prima di essere intercettato dal geofono (ad. es. questo accade molto spesso con il livello di fondo mare).

L'interpretazione di una linea sismica può essere più o meno semplice a seconda anche dei limiti di risoluzione verticale (σ_z). Infatti, è da considerare che poiché la capacità di risoluzione verticale (σ_z) è maggiore dove la lunghezza d'onda (λ) è inferiore e quindi dove si riescono a distinguere le interferenze geologiche, l'aumento delle lunghezze d'onda (λ) in profondità per effetto della diminuzione in frequenza (f) si concretizza in una diminuzione della risoluzione in profondità (Figura 3.34).

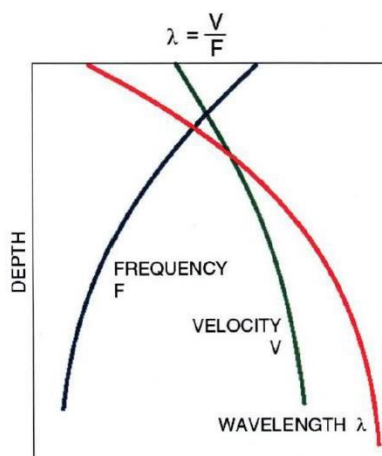


Figura 3.34 Andamento in profondità dei parametri di velocità (V), lunghezza d'onda (λ) e frequenza (F) che incidono sulla risoluzione.

La risoluzione verticale (σ_z) è data quindi dalla seguente espressione:

$$\sigma_z = (\lambda/4) \text{ dove } \lambda = V/f$$

In alcuni casi quindi nella stessa linea sismica in profondità, a causa anche di limiti di risoluzione, si può assistere a diverse interpretazioni di uno stesso evento, ritenendo comunque tutte le interpretazioni ugualmente valide.

In Figura 3.35 sono riportate le caratteristiche delle facies sismiche individuate su una sezione sismica 3D acquisita da ENI e posizionata in dip rispetto alle strutture appenniniche (sezione bb'). Le facies individuate sono state poi interpretate, sulla base dei dati del pozzo 12 tarato sulla sismica in base al metodo descritto in precedenza, come rappresentative di una specifica unità tettonico-stratigrafica dell'area di studio.

Sono stati quindi individuati, dall'alto in profondità, i seguenti orizzonti sismici:

- La base dell'unità del Flysch di Gorgoglione "FGO" (non sempre visibile in sezione poiché affiorante in superficie o erosa);
- La base dell'unità del Flysch di Albidona "ALB" (non sempre visibile in sezione poiché affiorante in superficie o erosa);
- il top delle Unità Appenniniche in colore verde chiaro denominato "APP";
- il top dell'unità di Serrapotamo in colore arancione denominato "SRP" unità miocenica dell'Unità della Lagonegro II (presente nella zona a E delle sezioni sismiche ovvero del lago del Pertusillo);
- il top del Flysch di Galestri della Lagonegro II in verde-blu scuro denominato "FGY2" (presente prevalentemente nella zona W delle sezioni sismiche ovvero del lago del Pertusillo);
- il top degli Scisti silicei della Lagonegro II in azzurro chiaro denominato "STS2";
- il top dei Calcari con Selce della Lagonegro II in verde petrolio denominato SLC2;
- il top delle unità irpine comprensive dello spessore di mélange sopra la piattaforma apula, in colore giallo, denominato "IR";
- il top della "piattaforma Apula" in colore blu scuro denominato "API";

- il top dei depositi Permo-Triassici, denominato "TR", in colore rosa chiaro definito da un forte riflettore sismico al di sopra del basamento;
- il top del basamento di colore viola scuro denominato "BASAMENTO".

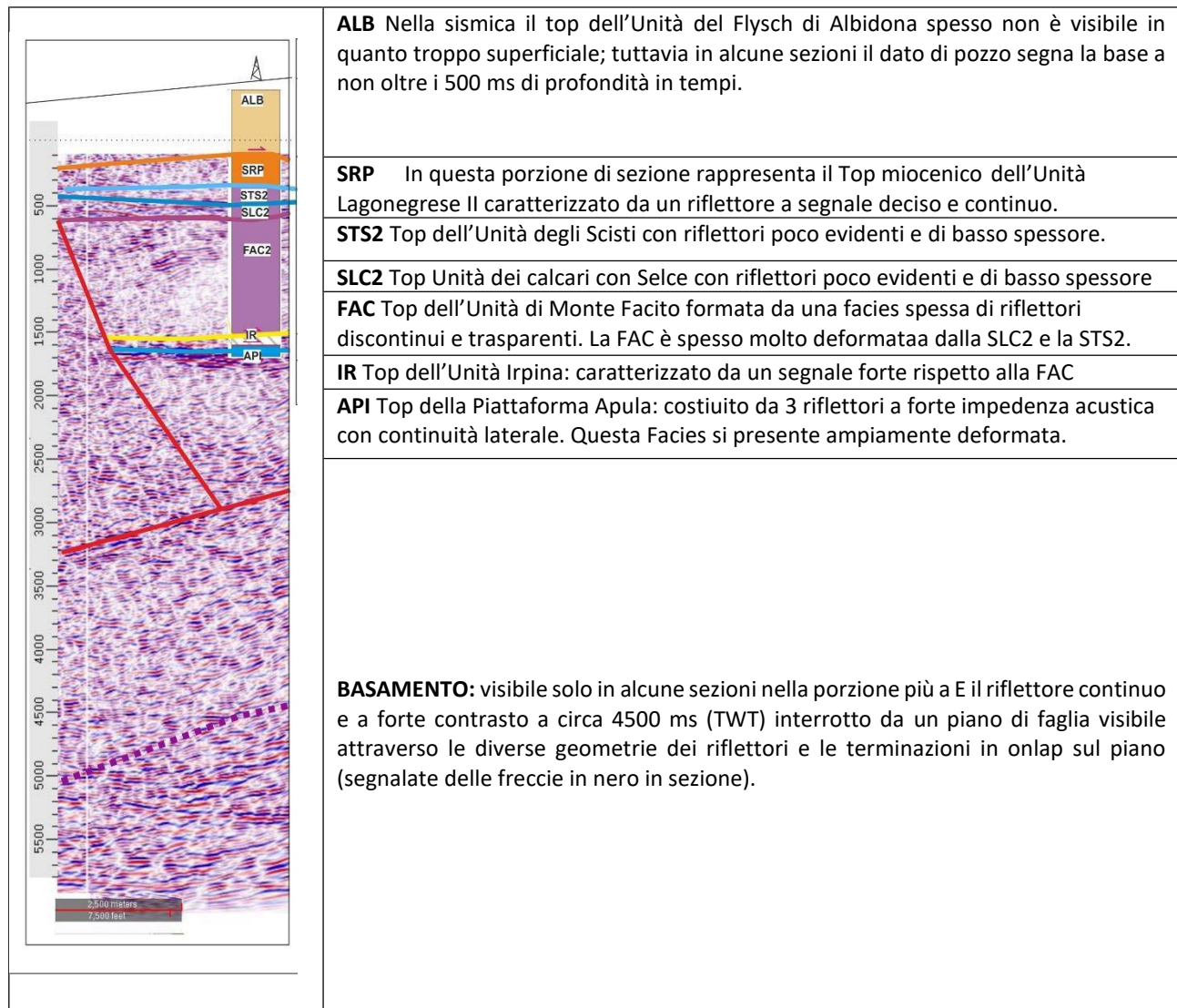


Figura 3.35 Rappresentazione delle principali facies sismiche individuate all'interno della linea 3D ENI denominata bb' e tarata dal Pozzo 12. In figura sono rappresentate inoltre in rosso le discontinuità dei riflettori più evidenti che sono state interpretate con piani di faglia. Ad esempio, è molto evidente la terminazione dei riflettori sismici relativi al top API e IR (segnali a forte contrasto) nella parte più a sinistra della sezione come sono molto evidenti le differenze nella geometria dei riflettori a 3000 ms (TWT) tra i quali appunto è stato evidenziato il segnale di piano di faglia. Infine, a 4500 ms (TWT) si rinviene un segnale molto evidente a forte contrasto e prevalentemente continuo solo sul lato E delle sezioni. Tale segnale è stato interpretato come il Top del Basamento (in viola) interrotto da un piano di faglia riconoscibile attraverso terminazioni di riflettori in cutoff sullo stesso (frecce in nero in figura).

Oltre alle facies sismiche e ai relativi top, sono stati utilizzati per l'interpretazione sismica anche i principali accorgimenti per definire i piani di discontinuità ovvero i piani di faglia.

Questi sono visibili attraverso 3 principali elementi (Shaw et al., 2004) (Figura 3.36):

1. i cutoff ovvero le terminazioni degli attributi (ampiezza, polarità ecc..) caratteristici di un pacco di riflettori che terminano in modo brusco sulla superficie di faglia;
2. terminazione dei fianchi di piega o kink bands;

3. identificazione diretta del piano di faglia, prodotto dalla variazione in velocità o di densità all'interno della zona di faglia.

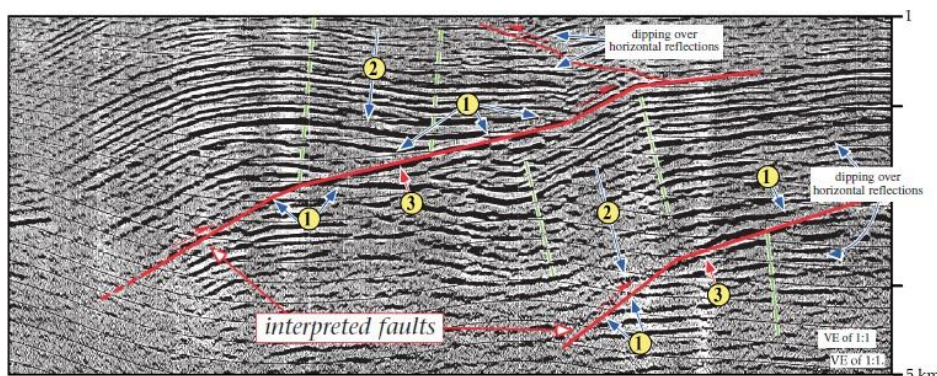


Figura 3.36 Sezione sismica dove sono riportati gli elementi per l'interpretazione di una faglia: 1) indica esempi di cutoff dei riflettori sopra un piano di faglia; 2) indica kink bands e 3) indica il piano di faglia (da Shaw et al., 2004).

In Figura 3.35 è riportato un esempio di come questi principi sono stati applicati per interpretare i piani di faglia all'interno della sezione bb' considerata.

Anche gli strati di crescita sono un modo per poter individuare discontinuità come ad esempio la presenza di thrust. Sono intervalli stratigrafici (pre, sin o post tettonici) che rispondono in modo diverso alla deformazione. Per questo sono molto utili anche alla datazione della deformazione.

Negli ambienti compressivi, tipicamente gli strati di crescita sintettonici aumentano sul fianco della piega fino a chiudersi verso la parte di alto strutturale. Le geometrie delle strutture di crescita sono controllate principalmente da un meccanismo di piegamento e dal relativo tasso di sedimentazione e sollevamento e possono costituire un importante elemento diagnostico di questi meccanismi (Shaw et al., 2004).

Nell'ambito della Fase 3 di analisi delle linee sismiche sono state individuate in tutti i dati di sismica profonda disponibili, con una risoluzione adeguata, secondo i metodi illustrati, le principali facies sismiche, i piani di faglia, le terminazioni, gli strati di crescita, le pieghe, e tutti gli elementi utili a definire l'interpretazione delle principali caratteristiche strutturali dell'area di studio che sarà presentata in dettaglio nel capitolo 5.

3.7 Fase 4 - elaborazione delle sezioni geologiche profonde bilanciate dell'area di studio attraverso vincoli superficiali e profondi

Nella Fase 4, raccolti tutti i dati e le elaborazioni necessarie per l'interpretazione strutturale (Fase 1 e 2 rilevamento e carta strutturale dell'area per definire i vincoli di superficie e Fase 3 analisi delle linee sismiche e dei dati di pozzo per i vincoli di profondità), si è proceduto a utilizzare le informazioni ottenute dalle precedenti fasi per avere un quadro completo e coerente dell'interpretazione strutturale dell'area.

In primo luogo, dalla carta geologica, in base alla posizione delle strutture e la localizzazione dei dati sismici, sono state individuate 7 tracce per la realizzazione delle sezioni geologiche in superficie (Allegato 1 Lettere AA'-GG') (Figura 3.37). Tali tracce ricalcano o prolungano su tutta l'area di studio le linee sismiche 3D di ENI chiamate come detto **aa'-gg'** le cui tracce sono riportate in Figura 3.1.

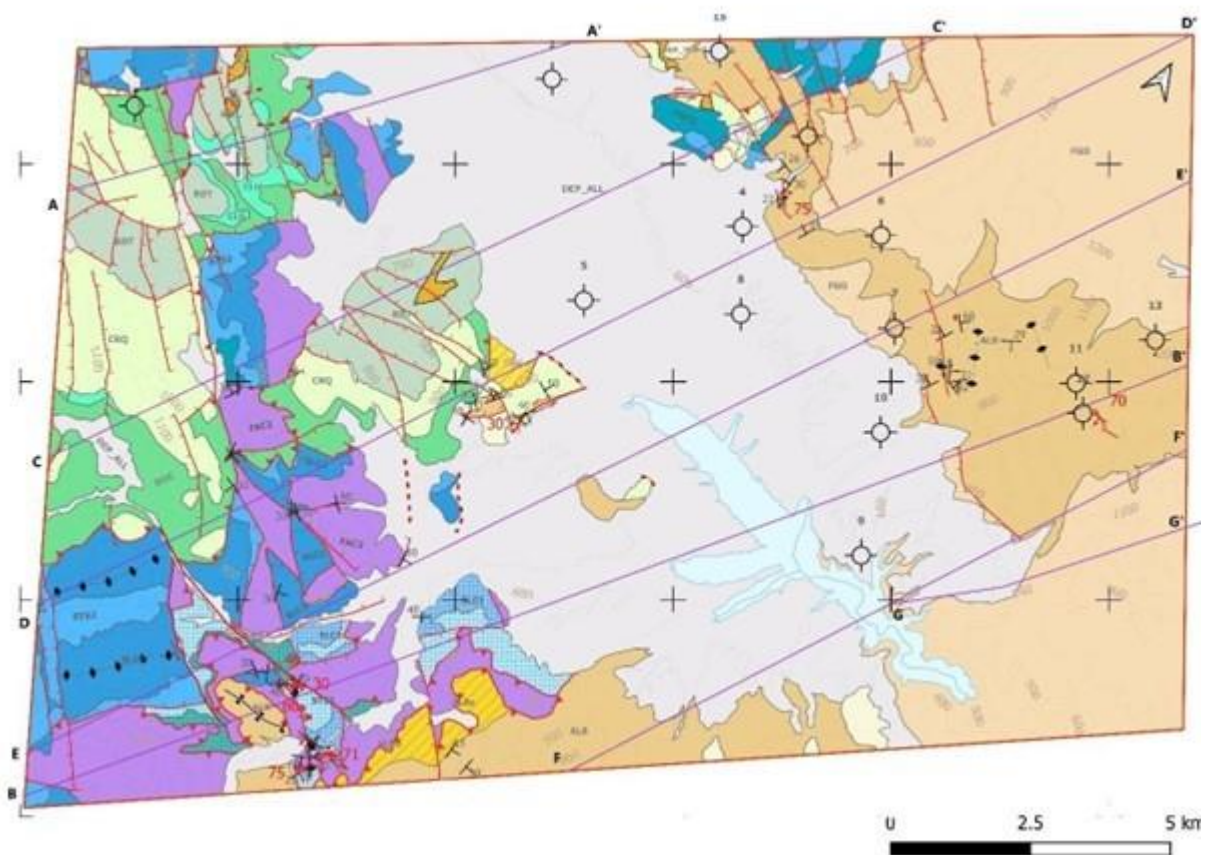


Figura 3.37 Realizzazione in QGis v. 3.16 della carta strutturale dell'area con il posizionamento delle tracce delle sezioni geologiche realizzate (AA' – GG'). Coordinate espresse in sistema di riferimento WGS84 UTM 33N, coordinate decimali.

Per quanto riguarda la realizzazione delle sezioni è stato possibile partire dal dato di superficie riprodotto sulla carta geologico – strutturale per produrre a mano delle sezioni geologiche geometricamente corrette e il più possibile bilanciate a cui sono state agganciate di volta in volta le informazioni ottenute dall'analisi sismica attraverso la conversione del dato interpretato da tempi

in profondità utilizzando il modello di velocità come riportato in capitolo 3.5 da Improta et al. (2017) e la relativa elaborazione delle T-D chart in Kingdom per ciascun pozzo analizzato (es. Figura 3.30). Questa operazione è stata effettuata in Kingdom attraverso il comando “Convert time to depth” dopo aver ricostruito una mappa di velocità media o dal dato di pozzo o dal riflettore sismico interpretato.

Nella interpretazione della sezione geologica si è tenuto conto, inoltre, dei principi di costruzione sottesi al metodo del bilanciamento: una sezione geologica si dice “bilanciata” se retrodeformando le masse sovrascorse non si creano aree di vuoto o di sovrapposizione (Doglioni, 1994). In una sezione bilanciata, a meno di movimenti fuori dal piano della sezione, l’area totale della sezione deve essere uguale a quella della sezione retrodeformata, vi deve cioè essere una conservazione dell’area prima e dopo la deformazione.

È da ricordare che una sezione bilanciata rappresenta una delle possibili interpretazioni accettabili e cioè una sezione geometricamente corretta, che può non essere l’unica sezione geometricamente accettabile. In base ad una convenzione internazionale si costruiscono sezioni bilanciate con il minimo raccorciamento possibile. Questo permette di fare delle stime sicure del raccorciamento minimo, che può essere anche inferiore a quello reale, ma che è comunque un dato scientificamente accettabile.

Le sezioni bilanciate, essendo costruite in due dimensioni e prevedendo una conservazione dell’area prima e dopo la deformazione, perdono di significato se sono attraversate da faglie trascorrenti che possono modificare l’originale area creando modificazioni nella terza dimensione.

Esistono due metodi differenti di costruzione (Figura 3.38):

- il metodo degli archi di cerchio o Metodo di Busk – viene assunto che le pieghe siano parallele e concentriche;
- il metodo delle bisettrici - si assume che le pieghe abbiano una geometria a kink.

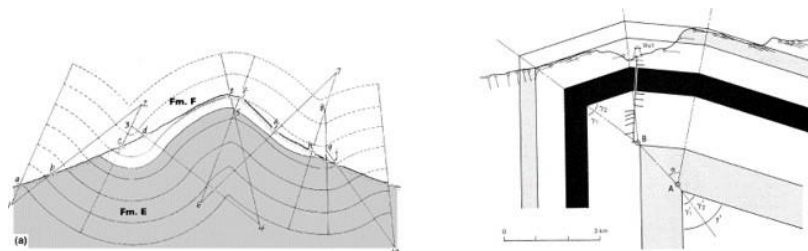


Figura 3.38 Esempio dei due metodi utilizzati per il bilanciamento. A destra rappresentazione dell’applicazione del Metodo degli archi di cerchio, a sinistra rappresentazione dell’applicazione del Metodo delle bisettrici (Doglioni, 1994).

Per la realizzazione delle sezioni geologiche in questa tesi si è scelto di procedere con il metodo degli archi di cerchi. Si è tenuto conto di tutti i dati stratigrafici (in particolare degli spessori delle diverse unità che nell’intorno di discontinuità importanti in linea di principio devono mantenersi costanti), strutturali e geofisici.

Le sezioni geologiche sono state ricostruite dalla carta geologico strutturale realizzata, seguendo la sequenza di lavoro di cui alle lettere a-d (Cremonini, 1994) (Figura 3.39):

- a) ricostruzione del profilo topografico in sezione ottenuto attraverso le quote principali riportate in carta e disponibili come .shp file dal sito dell'ARPA Basilicata come file della Carta Tecnica Regionale (www.rsdi.regione.basilicata.it/dbgt-ctr/);
- b) inserimento dei contatti stratigrafici e strutturali principali lungo la sezione; dove presenti sono stati proiettati anche i dati relativi alle giaciture riportate in sezione e in base alle relazioni dei contatti con le isoipse sono state definite le inclinazioni a reggipoggio, a franapoggio più inclinato del pendio o meno inclinato del pendio;
- c) inserimento in sezione delle informazioni sulle unità affioranti mappate in carta;
- d) inserimento delle informazioni delle unità presenti in profondità attraverso il confronto con l'analisi sismica e i dati di pozzo.

A questo punto si è applicato il metodo di costruzione ad archi di cerchio unendo le diverse informazioni dei vincoli profondi derivate dall'analisi sismica.

Per il metodo degli archi di cerchio utilizzato si inizia tracciando l'andamento degli strati tra due giaciture adiacenti lungo la traccia della sezione geologica. Per fare questo si devono tracciare le due normali alle misure, che si incontreranno nel punto O. Dal punto O si tracciano con il compasso degli archi di cerchio che passando anche dalle misure 1 e 2 descriveranno l'andamento degli strati al di sotto e al di sopra della superficie topografica. Questo procedimento sarà esteso a tutte le misure presenti lungo la traccia della sezione geologica, tenendo sempre presente che tra due misure adiacenti il centro del cerchio che descrive l'andamento degli strati viene determinato sempre nel modo appena visto. In questo modo l'andamento degli strati può essere disegnato da una giacitura all'altra. È importante notare che il centro dei cerchi che descrivono l'andamento degli strati in alcuni casi è al di sotto della superficie topografica, mentre in altri casi è al di sopra.

Infine, in base a quanto esposto, a seguito dell'interpretazione delle sezioni geologiche con il metodo di costruzione considerato, al fine di definire le stesse sezioni come "bilanciate" è necessario procedere alla retrodeformazione sottendono due principi differenti: la conservazione delle aree e la conservazione delle lunghezze. Inoltre, è da precisare che la storia geologica di un'area non dipende solo dalla storia di deformazione ma anche da processi di erosione, sedimentazione e compattazione e pressur solution, e per questo per un accurato studio del modello è necessario accompagnare il bilanciamento ad altre tecniche quali la restorazione, la decompattazione e un'ulteriore tecnica che prende il nome di backstripping.

Il bilanciamento delle sezioni tramite metodo di conservazione delle aree e retrodeformazione e le altre tecniche citate sono in genere condotte attraverso l'uso di software specialistici che non è stato possibile utilizzare per il lavoro effettuato in questa tesi. Pertanto, si è proceduto a considerare i suddetti principi di conservazione delle aree e delle lunghezze, nonché la retrodeformazione, nella costruzione manuale delle sezioni effettuata.

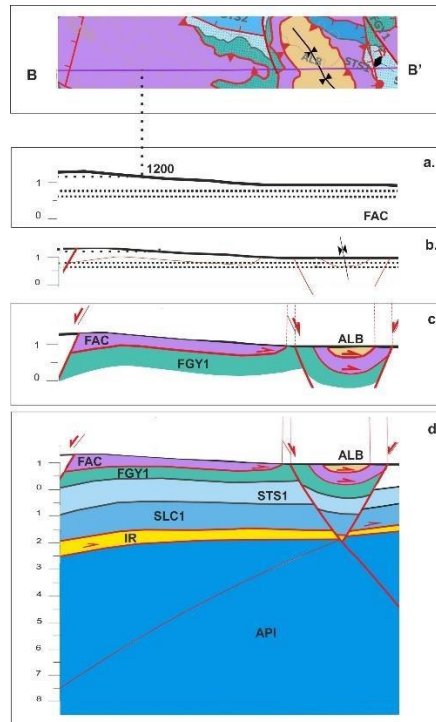


Figura 3.39 Rappresentazione schematica del flusso di lavoro seguito per la realizzazione delle sezioni geologiche tenendo conto dei vincoli superficiali e profondi. a) Ricostruzione in sezione del profilo topografico riportando le quote principali segnate dalle isoipse (curve di livello disponibili scaricabili da Carta tecnica Regionale - sito ARPAB www.rsdi.regione.basilicata.it/dbqt-ctr/); b) sul profilo topografico sono riportate tutte le informazioni presenti in carta relativamente a contatti stratigrafici e strutturali c) si segnano in sezione le principali unità affioranti come ad es. in questo caso l'Unità di Monte Facito "FAC" e l'Unità dei Flysch di Galestri della Lagonegro I "FGY1"; d) si iniziano a ricostruire le informazioni in profondità attraverso un confronto con i dati di pozzo e di sismica tenuto conto delle relazioni tra le unità e gli spessori.

Fase 5 – realizzazione di un modello strutturale pseudo 3D dell'area tramite la costruzione di un Progetto in Petrel software della Schlumberger (versione 1.7)

Una volta ricostruite le sezioni geologiche bilanciate, terminata l'interpretazione delle linee sismiche in Kingdom, si è proceduto alla realizzazione del progetto 3D in Petrel 1.7 della Schlumberger. In primo luogo, è stato creato il progetto in Petrel sempre in sistema di riferimento Monte Mario, Roma 40 Italy 2 ed è stata importata la carta strutturale dell'area realizzata e il modello digitale del terreno – DTM scaricabile dal sito Arpa Basilicata (Figura 3.40).

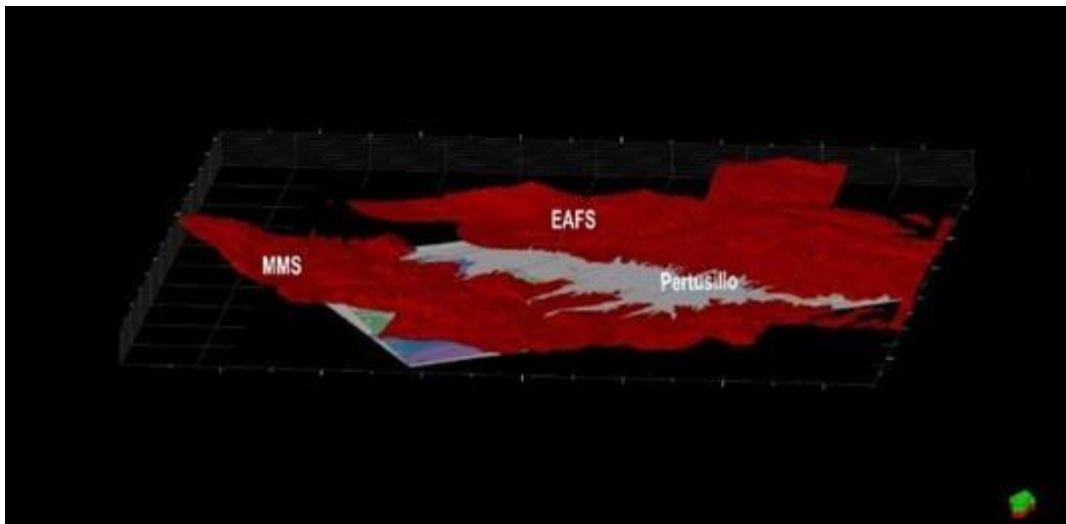


Figura 3.40 Elaborazione in Petrel software, versione 1.7 del modello digitale del Terreno (DTM disponibile presso il sito dell'ARPAB <http://rsdi.regione.basilicata.it/viewGis/?project=5FD93CF9-0B57-627F-F874-72D4F6676B10>) della zona di studio e confronto con la carta strutturale realizzata. Si nota come la quota più bassa coincide con la piana del fiume del Pertusillo a circa 500 m.s.l.m; Mentre ai due lati del lago si trovano i due sistemi dei Monti della Maddalena -MMS a ovest e dell'East Agri Fault – EAF a Est.

Successivamente, sono state georeferite le sezioni geologiche AA'- GG' (Figura 3.41) realizzate inserendo le coordinate X, Y e Z rispetto la quota riportata nel DTM e nella carta geologica.

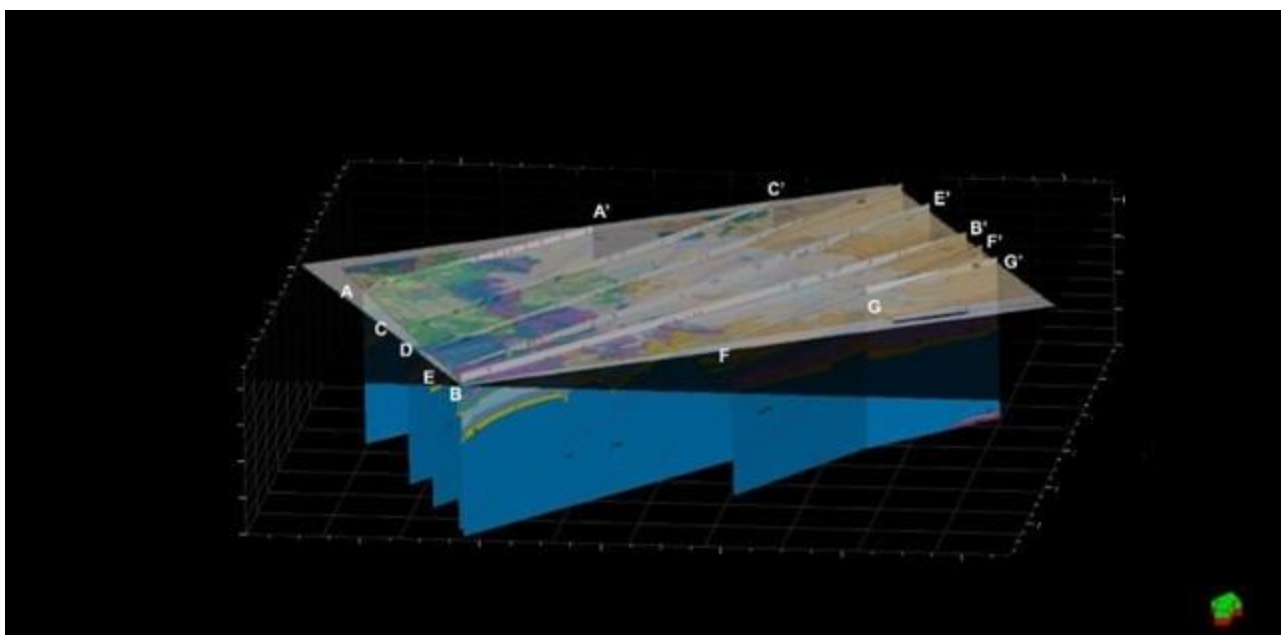


Figura 3.41 Elaborazione in Petrel software versione 1.7 del posizionamento delle sezioni geologiche realizzate (AA'-GG') in ambiente 3D rispetto alla carta strutturale.

Una volta fatto questo passaggio, sono state importate le mappe in profondità degli orizzonti sismici interpretati create attraverso gridding in Kingdom. Per questa operazione, poiché le profondità dei pozzi sono tali da vincolare in z le sezioni sismiche solo fino ai primi 3000-4000 m, è stato possibile utilizzare i top dei pozzi esclusivamente per la realizzazione delle mappe di velocità degli orizzonti entro i primi 3000-4000 m. Tali mappe di velocità sono necessarie ad effettuare poi la conversione del grid in tempi in profondità. Per quanto riguarda, invece, gli orizzonti più profondi,

quali il "BASAMENTO" e il "PERMO-TRASSICO", sono state realizzate le mappe di velocità attraverso la stessa interpretazione dell'orizzonte sismico e grazie all'inserimento di alcuni punti di controllo necessari ad evitare eventuali estrapolazioni e artefatti con l'aumentare della profondità. L'algoritmo utilizzato per il gridding è quello "Flex Gridding".

Una volta realizzato il grid degli orizzonti in profondità in Kingdom è possibile esportarlo e importarlo in Petrel nel formato compatibile. I grid creati per ciascun top sono tanti quanti sono le zone dislocate dalle diverse faglie principali individuate. In Figura 3.42 viene mostrata una delle carte realizzate in Petrel relativa al top delle unità Irpine interpretata in sismica.

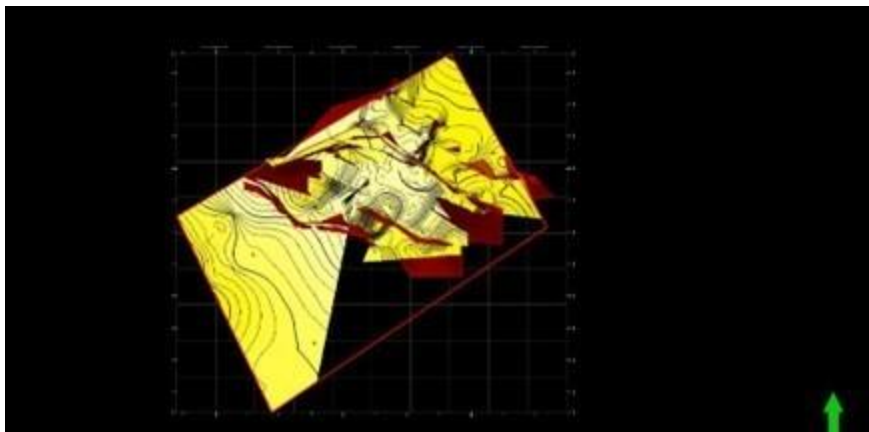


Figura 3.42 Elaborazione in Petrel software, versione 1.7 del top delle unità Irpine (raffigurate con gradazione da giallo scuro a chiaro in funzione della diminuzione della profondità). Il top delle unità è ricostruito attraverso le diverse superfici interpretate in Kingdom sulla sismica in tempi poi convertite in profondità e importate in Petrel. Le diverse superfici che compongono il top delle unità irpine sono fra loro dislocate delle principali strutture interpretate. Le aree non sono continue dove per mancanza di dati non è stato possibile estrapolare correttamente la superficie.

Anche per la realizzazione delle superfici di faglia è stato seguito indicativamente lo stesso percorso. Per ciascuna delle faglie principali individuate è stato creato, tramite le leggi di velocità applicate, un grid della faglia in profondità. Le superfici di faglia elaborate sono state poi esportate e importate in Petrel nel formato compatibile.

Una volta in Petrel le superfici sono state convertite in poligoni per poter editare e migliorare le superfici in modo da eliminare eventuali artefatti.

3.8 Fase 6 – importazione nel modello strutturale in Petrel dei dati di sismicità (cataloghi INGV)

L'ultima fase del lavoro ha riguardato il caricamento dei cataloghi sismici. Gli eventi sismici sono stati prima caricati sulla carta strutturale realizzata in QGIS per verificare la loro localizzazione rispetto al sistema di riferimento utilizzato.

Quindi, sono state convertite tutte le coordinate da geografiche a piane nel sistema di riferimento Monte Mario Roma 40 Italy 2 (Figura 3.43).

Una volta ricostruito il modello strutturale in Petrel attraverso il match tra le sezioni geologiche realizzate e i grid delle superfici in profondità elaborate in Kingdom, si è proceduto con l'importazione dei 4 cataloghi sismici inviati da INGV descritti nel capitolo 3.1.

È stato necessario creare un formato .txt compatibile con l'importazione in Petrel con le indicazioni dell' "id dell'evento"; coordinate "X" e "Y" nel sistema di riferimento del progetto e "data e ora" di riferimento riportate nel formato idoneo (Figura 3.44). Lo stesso procedimento è stato ripetuto per tutti e 4 i cataloghi.

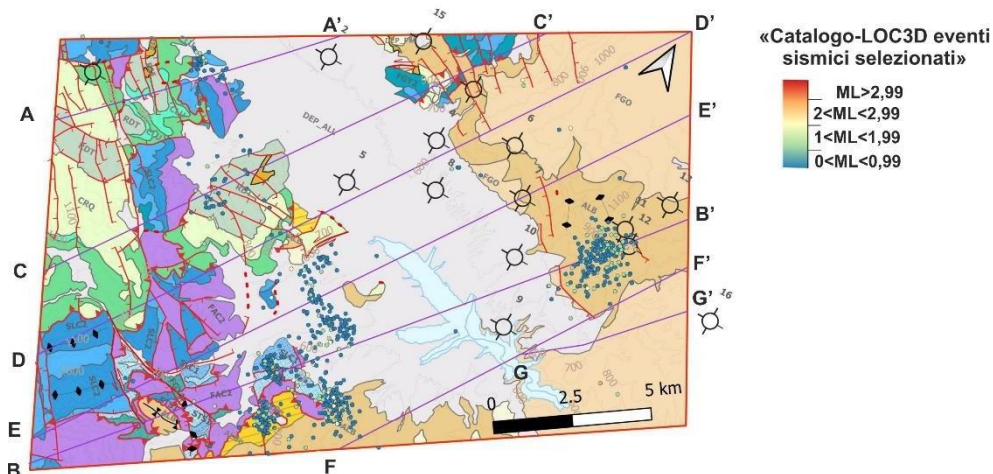


Figura 3.43 Carta della sismicità realizzata attraverso l'inserimento nella carta strutturale realizzata in QGis degli eventi sismici del catalogo INGV (set di dati relativo a "Catalogo - LOC 3D eventi sismici selezionati" come descritto nel paragrafo 3.1) categorizzati in funzione della Magnitudo locale. È possibile osservare che si tratta per la maggior parte di eventi a $ML < 2$ (cori blue verde).

Catalogo-LOC3D-eventi-non-selezionati+errori+ML-newGIUSTO.txt - Blocco note di Windows

File Modifica Formato Visualizza ?

Lon °	Lat °	Depth (km)	ML	ML	Err (x) km	Err (y) km	Err (z) km	Date-Time ymd-hhmmss
2568813	4473745	0.41	2.54	0.397	0.171	0.513	10820 60140	
2610834	4452709	9.01	2.14	0.163	0.187	0.187	10930 234458	
2615421	4475481	24.40	3.08	0.236	0.300	0.482	11104 102811	
2589485	4446910	7.71	2.55	0.232	0.216	0.291	20317 45310	
2596026	4450214	3.16	1.34	0.930	1.993	2.159	20317 45615	
2597748	4453296	4.13	2.65	0.112	0.930	1.248	20531 163140	
2572418	4482350	15.33	2.76	0.354	0.277	0.303	20611 200258	
2582280	4485900	8.61	2.11	0.284	0.188	0.253	20618 233141	
2597467	4451650	2.69	2.45	0.084	0.233	0.349	21130 11932	
2598862	4451753	6.81	2.42	0.221	0.360	0.589	21130 173352	
2597366	4452393	7.09	2.22	0.254	0.176	0.764	21231 224148	

Figura 3.44 Esempio del caricamento dati del "CATALOGO LOC3D – eventi non selezionati+ errori" in Petrel.

4 CARTA GEOLOGICO STRUTTURALE

4.1 Descrizione della carta geologico strutturale e novità rispetto la cartografia esistente

I risultati delle attività di rilevamento (descritti nel precedente capitolo) hanno permesso di individuare alcuni elementi chiave per la costruzione della carta geologica dell'area di studio che si ripetono brevemente di seguito:

- non è stata riscontrata la presenza dell'Unità di Foraporta; pertanto, è stato necessario rielaborare rispetto al Foglio 505 Moliterno CARG (ISPRA, 2014) lo schema delle unità tettonico-stratigrafiche come riportato in Figura 3.3;
- in Z.1 (Montemurro) non sono state riscontrate evidenze di faglie normali con rigetto significativo, ma è stata desunta dalle analisi dei dati rilevati la probabile prosecuzione del piano di faglia normale individuato più a nord con rigetto di non più di 100 m che disloca le stesse unità del Flysch di Albidona;
- in Z.1 (Montemurro) sono state trovate evidenze anche di pieghe a scala chilometrica, riconducibile alla tettonica contrazionale appenninica;
- in Z.2 (Grumento Nova) è stata appurata la presenza del Flysch di Albidona a contatto con la formazione dei Calcari a Requiene e Gasteropodi – CRQ delle Unità Appenniniche. In CRQ si è riscontrata la presenza di una faglia trascorrente sinistra orientata WSW-ENE;
- in Z.3 (Pian di Maglia) si è riscontrata la presenza di una finestra tettonica che ha portato in esposizione le unità della Lagonegro I (significativamente presente nella zona) ricoperta in sovrascorrimento dall'unità della Lagonegro II. Sono presenti tutte le formazioni caratteristiche dell'unità Lagonegro I, dove è stato possibile misurare anche assi di piega con orientate prevalentemente NW-SE e WSW-ENE e faglie normali orientate NW- SE immergenti a SW. Per quanto riguarda l'unità Lagonegro II, è presente con la formazione di Monte Facito – FAC e del Calcari con Selce – SLC2, anche queste formazioni entrambe piegate con assi di piega orientate NW-SE. Tali orientazioni sono compatibili con un trasporto tettonico verso NE.
 - In Z.4 (Moliterno) sono presenti esclusivamente le formazioni dell'unità Lagonegro II (Formazione di Monte Facito - FAC, Calcari con Selce - SLC2 e Scisti Silicei - STS2) intensamente deformate con pieghe e strutture duttili (quali strutture S-C). In generale tali successioni presentano fra loro un rapporto di continuità stratigrafica; tuttavia le unità lagonegresi sono interessate nella zona da faglie normali orientate NW-SE.

Si procede, dunque, a descrivere la carta geologico-strutturale per settori.

Nel settore nordoccidentale è possibile confermare la presenza delle unità della Piattaforma Appenninica sovrascorse sulle unità della Lagonegro II. Nella zona di Moliterno quest'ultima è rappresentata prevalentemente dalle formazioni della Monte Facito – FAC, dei Calcari con Selce – SLC2 e degli Scisti Silicei – STS2 in continuità stratigrafica tra loro. Al contrario di quanto riportato

nella carta geologica del Foglio 505 Moliterno (ISPRA, 2014), come ampiamente dibattuto nei precedenti capitoli, non è presente l'unità di Foraporta (costituita dalla formazione di Foraporta – FOP e la formazione di Moliterno – MOO in Figura 4.1) interposta nello schema delle unità tettonico-stratigrafiche del Foglio 505, tra le due unità appena citate. In sostanza, si è osservato che, dove in carta è riportata la formazione di Foraporta o la Formazione di Moliterno, è presente la formazione della Monte Facito - FAC. Si è proceduto, quindi, a reinterpretare questo settore della carta sostituendo la formazione della Monte Facito – FAC all'unità di Foraporta (Figura 4.1).

Si è rilevato inoltre sul terreno che le strutture presenti in questo settore della carta hanno una cinematica prevalentemente estensionale ed appartengono quindi al Sistema di faglie dei Monti della Maddalena - MMFS, composto da faglie immergenti a NE e a SW. Considerate le differenze nello schema delle unità tettono-stratigrafiche utilizzato nella carta geologica, le faglie estensionali presenti nel Foglio 505 CARG (ISPRA, 2014) sono state reinterpretate come riportato in Figura 4.1.

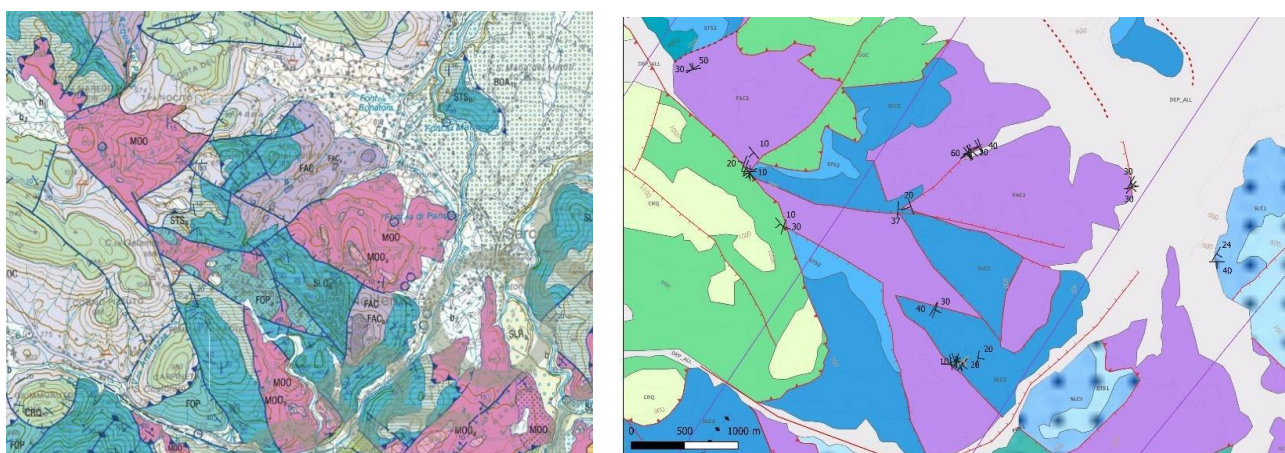


Figura 4.1 Settore nordoccidentale. A Destra è riportato uno stralcio del Foglio 505 del CARG (ISPRA, 2014) che riporta le Unità di Foraporta costituite dalla formazione di Moliterno – MOO (in rosa) e dalla formazione di Foraporta – FOP (in blu); a sinistra la carta strutturale elaborata che sostituisce all'Unità di Foraporta la formazione di Monte Facito – FAC in Viola. A causa della revisione dello schema delle unità tettonico-stratigrafiche e grazie alle evidenze del rilevamento anche i rapporti strutturali sono stati revisionati. In particolare, sono anche riportate le strutture di sovrascorrimento che mettono a contatto la formazione delle Dolomie Indifferenziate delle Unità Appenniniche con le formazioni della Lagonegro II.

Nel settore sudoccidentale, svincolato da quello precedente da una faglia transtensiva sinistra coperta dai depositi alluvionali della piana di Sarconi, si trovano in affioramento, nella citata finestra tettonica, le unità della Lagonegro I costituite dalle formazioni dei Galestri I, i calcari con Selce SLC1 e gli Scisti Silicei STS1 con assi di piega orientate prevalentemente NW-SE, dislocate da faglie estensionali di minore entità prevalentemente immergenti verso SW. Queste successioni sono presenti solo in questo settore della carta nell'area di studio. Inoltre, queste formazioni si rinvenivano a contatto con l'unità Lagonegro II, in particolare con la formazione di Monte Facito – FAC e dei Calcari con Selce – SLC2 che mostrano entrambe strutture e pieghe orientate NW-SE a conferma di un trasporto verso NE.

Rispetto alla carta del Foglio 505 Moliterno, in questo settore si ritrovano significative differenze nell'attribuzione delle formazioni alla Lagonegro I piuttosto che alla Lagonegro II e quindi anche dei rapporti tettonici che mettono a contatto le due unità (Figura 4.2).

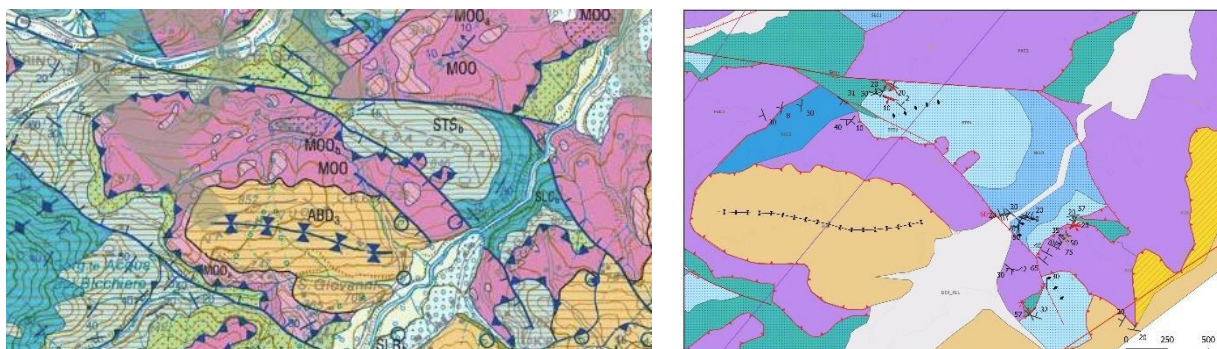


Figura 4.2 Zona Sudoccidentale. A destra uno stralcio del Foglio 505 del CARG (ISPRA, 2014) che mostra la zona di Pian di Maglia caratterizzata da formazioni attribuite alle Unità di Foraporta (MOO) e formazioni delle Unità della Lagonegro II (STSB, SLCb, FGYb); a sinistra la carta strutturale elaborata che individua le Unità della Lagonegro I STS1 (celestino), SLC1 (azzurro) e FGY 1 (verde) al posto della Lagonegro II e sostituisce, come nel caso precedente, la formazione di Moliterno – MOO (in rosa) con la formazione di Monte Facito – Fac (in viola). È riportato inoltre, rispetto al Foglio 505 (ISPRA, 2014) che l'unità del Flysch di Albidona sovrascorre sulle unità della Lagonegro II.

Nel settore nordorientale, separato dal quello nordoccidentale dai depositi alluvionali della valle del fiume Agri, ritroviamo ancora in affioramento in parte le Unità della Piattaforma Appenninica e in parte le Unità della Lagonegro II a dimostrazione del significativo scollamento di queste unità verso NE al di sopra delle unità della Piattaforma Apula e delle unità Irpine. Non è invece presente l'unità Lagonegro I (Figura 4.3). In questo settore le unità della Piattaforma Appenninica e le unità lagonegresi (II) sono interessate da strutture trascorrenti sinistre. Le unità della Lagonegro II si trovano, inoltre, a diretto contatto tettonico con i più recenti depositi delle unità del Flysch di Albidona e del Flysch di Gorgoglione entrambe caratterizzate da un trasporto verso NE evidenziato dalla presenza di pieghe chilometriche orientate NW e SE e piani di faglia normale orientati NW-SE ed immergente a SW. Anche in questo caso sono riportati in carta i contatti di sovrascorrimento delle unità del Flysch di Albidona sulle unità Lagonegresi riportati invece come contatti incerti nella cartografia del Foglio 505 CARG (ISPRA, 2014).

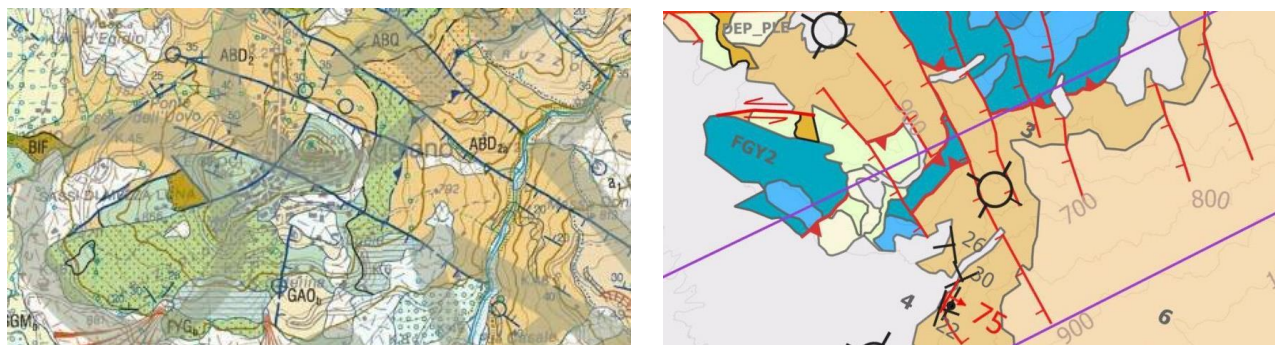


Figura 4.3 Zona nordorientale. A destra è riportato uno stralcio del Foglio 505 CARG che mostra la presenza delle unità della Lagonegro II (Flysch di Galestrino FGYb e Scisti Silicei STSB) a contatto con le unità mioceniche del Flysch di Albidona; a sinistra la carta strutturale elaborata che riporta le medesime unità affioranti e inserisce le strutture di sovrascorrimento del Flysch di Albidona al di sopra delle unità lagonegresi.

Nel settore sudorientale le unità dei Flysch, piegate, presentano strutture estensionali di scarso rigetto orientate, come in precedenza NW-SE e immergenti a SW, attribuibili al sistema di Faglie Est della Val d’Agri – EAFS. Rispetto al Foglio 505 Moliterno non ci sono grandi differenze da segnalare, se non la diversa estensione e distribuzione del Flysch di Albidona e del Flysch di Gorgoglione, quest’ultimo più ridimensionato nella carta strutturale elaborata (Figura 4.4).

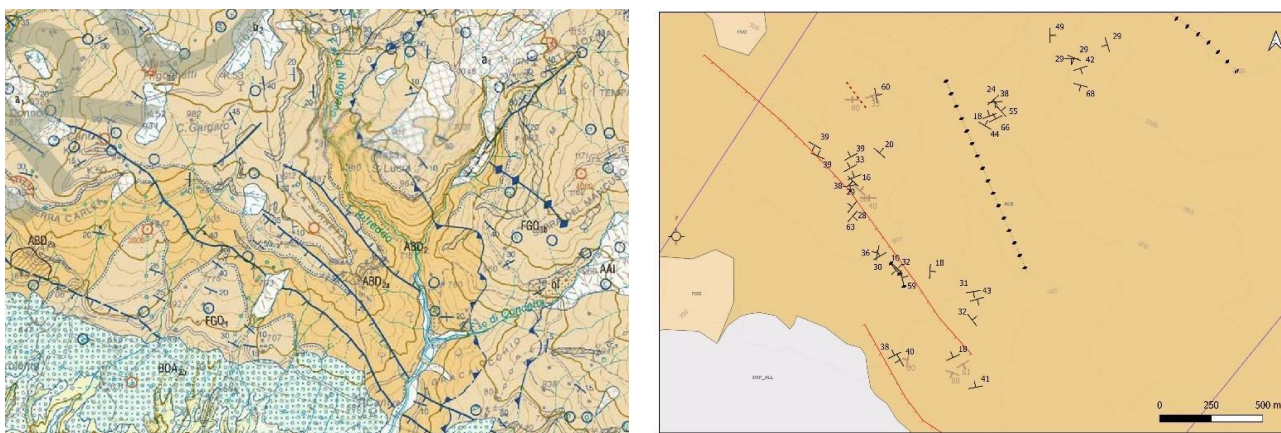


Figura 4.4 Zona sudorientale. A destra stralcio del Foglio 505 Moliterno che riporta le Unità Mioceniche del Flysch di Albidona ABD e del Flysch di Gorgoglione – FGO; a sinistra la carta strutturale elaborata che riporta le unità del Flysch di Albidona ALB molto più estese rispetto a quelle presenti in Foglio 505 a scapito del Flysch di Gorgoglione che risulta molto più ridimensionato. Sono riportate inoltre, le principali strutture estensionali riportate in Foglio 505 ma a queste si attribuisce una minore estensione.

La zona di Grumento Nova rappresenta un altro punto di lieve scostamento da quanto rappresentato in Foglio 505 CARG (ISPRA, 2014); infatti, sebbene la presenza delle unità affioranti sia effettivamente confermata, risulta differente l’interpretazione della faglia trascorrente WSW-ENE presente ad est dell’abitato. Nel foglio 505 viene rappresentata come una faglia trascorrente

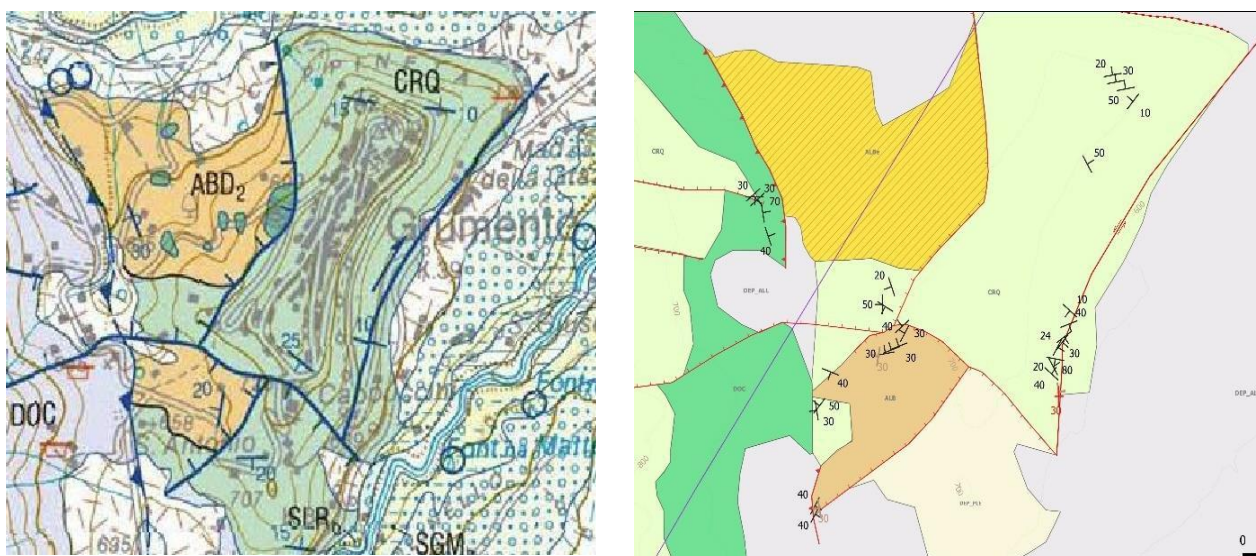


Figura 4.5 Zona di Grumento Nova. A destra stralcio del Foglio CARG 505 riportante nella formazione dei Calcari a Requieni e Gasteropodi – CRQ la presenza di una faglia trascorrente destra; ; a sinistra la carta strutturale elaborata che riporta invece la stessa struttura come una trascorrente sinistra. Nella carta elaborata è stato utilizzato un colore giallo con campitura a righe oblique per indicare il membro esterno dell’unità del Flysch di Albidona (coincidente in Foglio 505 con ABD2) caratterizzato dalla presenza di blocchi calcarei.

destra, mentre le analisi effettuate sul terreno documentano la presenza di una faglia una trascorrente sinistra (Figura 4.5).

5 ANALISI DEI VINCOLI SUPERFICIALI E PROFONDI PER LA COSTRUZIONE DI SEZIONI GEOLOGICHE RAPPRESENTATIVE DELL'AREA DI STUDIO

Al fine di realizzare delle sezioni geologiche rappresentative dell'area di studio vincolate sia in superficie che in profondità, si è proceduto ad analizzare in dettaglio tutti i dati disponibili per ogni singola sezione geologica prodotta come localizzate in Allegato 1 e in Figura 3.37: dati dei pozzi riportati nei profili 1:1000 visionati e interpretati e linee sismiche rese disponibili da Eni in formato pdf (rappresentate in Figura 3.1 denominate aa'-tt').

I profili stratigrafici dei pozzi riportati sono rappresentati tutti a quota ($z=0$) coincidente per ogni singolo pozzo alla quota di elevazione e al piano della tavola rotary – T.R. riportata in alto a destra della colonna. Le quote effettive (z_r) segnate nella scala verticale (z) devono essere, quindi, riportate alla quota della T.R.: ad esempio se un pozzo ha T.R. a 500 m s.l.m. e un top stratigrafico è segnato sulla scala verticale a quota $z=-1000$ m, la quota effettiva del top, riferita al livello del mare, è da intendersi $z_r = (z + T.R.) = -1000 \text{ m} + 500 = -500 \text{ m}$.

È importante premettere che le stratigrafie di pozzo interpretate nei profili 1:1000, in particolare l'attribuzione alle unità geologiche presenti nell'area è stata revisionata alla luce delle conoscenze attuali sull'area (Capitolo 3.4) e in relazione allo schema geologico – strutturale utilizzato (Figura 3.3 e Allegato 1); mentre gli elementi strutturali riportati nello schema stratigrafico dei pozzi sono quelli effettivamente presenti nei profili visionati. Si procederà per questo a spiegare, per singolo pozzo, le principali reinterpretazioni effettuate e le motivazioni che hanno portato ad una rivisitazione del dato.

Come già detto in precedenza la bassa qualità delle linee sismiche consegnate da Eni ha determinato in alcuni casi la bassa risoluzione del SEG-Y della linea sismica generato dalla conversione. Ad ogni modo è bene sottolineare che i dati di sismica e di pozzo sono molto ben tarati soprattutto nella parte orientale del bacino dove l'acquisizione 3D ha favorito una elevata qualità del segnale acquisto, al contrario del lato occidentale dove, sono presenti linee sismiche 2D e in molti casi il dato sismico è scarso o assente.

5.1 Sezione AA'

Vincoli superficiali e profondi

Per la costruzione della sezione geologica AA' (Figura 3.37) sono stati utilizzati i vincoli superficiali presenti nella carta geologico – strutturale realizzata (Allegato 1), considerato anche che la traccia della sezione in oggetto non ricade in area rilevata e che le revisioni proposte nella carta geologica non determinano significativi scostamenti in base a quanto riportato nel foglio 505. Le informazioni presenti nell'area, con particolare riguardo alle unità e alle strutture riportate in carta, sono state utilizzate per la correlazione del dato strutturale in profondità riportando tutte le informazioni di superficie nel software Kingdom.

I vincoli profondi utilizzati, per la costruzione della sezione geologica AA' consistono principalmente in dati di pozzo allineati sulla linea sismica aa', ovvero relativi alle stratigrafie dei pozzi 1, 2 e 15 (Figura 5.1).

Le stratigrafie dei pozzi ed in particolare i top definiti delle unità geologiche principali sono state proiettate sulla linea sismica aa' attraverso il software Kingdom (come descritto nei paragrafi precedenti) al fine di poter procedere all'interpretazione. Il risultato è riportato in Figura 5.2.

Nel profilo 1:1000 del Pozzo 1 sono riconosciute solo in parte alcune delle formazioni dell'Unità Lagonegrese. In particolare, non è riconosciuta e distinta la Lagonegro I dalla Lagonegro II e non è definita la presenza della formazione di Monte Facito (FAC) appartenente alla Lagonegro II. Inoltre, sempre in relazione a questa unità, è da far presente l'attribuzione nella parte alta del pozzo di una sequenza rovesciata delle formazioni (dal basso verso l'alto) degli Scisti Silicei (STS2) e dei Calcari con Selce (SLC2) che poggiano al di sopra di un thrust (riconosciuto a circa $z=-350$ m) sulla formazione del Flysch di Albidona (ALB). Un altro thrust riconosciuto a circa $z=-520$ m mette, inoltre, in contatto ALB sulla formazione del Flysch di Galestrino (FGY2) delle unità lagonegresi II. Nella parte bassa del Pozzo 1 sono invece riconosciute e ben distinte: l'unità Irpina (IR) e l'unità della piattaforma Apula – API.

Anche nel Pozzo 2 non è stata riconosciuta la formazione di Monte Facito (FAC) e non è presente l'unità di Lagonegro I. All'interno del profilo di pozzo è stata interpretata l'unità delle Sicilidi (in arancione in Figura 5.1, Pozzo 2). Altro importante dato di pozzo da mettere in evidenza è lo spessore dell'unità Irpina interpretata, poiché in questa sezione aumenta fino a circa 830 m di spessore. È stato considerato unitamente allo spessore delle unità Irpine interpretate nel pozzo 2 un ulteriore spessore di circa 400 m di olistoliti posto a contatto con le unità Irpine (IR) sovrastanti attraverso un thrust a $z=-2044$ m di profondità (tali olistoliti pertanto non sono distinti nel pozzo 2 di Figura 5.1). Le unità IR poggiano in sovrascorimento, nel profilo del Pozzo 2, sul top della piattaforma Apula – API riportato a quota $z=-2700$ m.

Il Pozzo 15 è caratterizzato nella parte alta dalla presenza delle formazioni dell'Unità di Lagonegro II (ad eccezione del Flysch di Galestrino - FGY2 assente). La Formazione di Monte Facito – FAC poggia in sovrascorimento sull'Unità Irpina che conferma in questo punto lo spessore riportato nel Pozzo 2 (sebbene il top sia più alto). Il top della piattaforma Apula si rinviene a circa $z=-2500$ m.



Figura 5.1 Rappresentazione della stratigrafia dei profili 1:1000 cartacei consultati durante la dataroom ENI. In figura i pozzi 1,2,15 sono rappresentati da SW a NE come allineati sulla linea sismica aa'. La scala verticale (z) è in metri di profondità (m); le quote della scala verticale (z) sono da riferire alla tavola rotary (T.R. espressa in metri) riportata in alto a destra del pozzo; sotto la denominazione del pozzo è riportata la proiezione sulla linea sismica aa' in km (calcolata con il software Kingdom).

Interpretazione della sezione sismica aa'

In base ai vincoli descritti e alla sovrapposizione del dato di superficie, nonché alla proiezione del dato di pozzo in sezione, sono state verificate le corrispondenze dei top delle unità segnate con i principali riflettori sismici individuati e successivamente la presenza in profondità delle faglie riportate in superficie e i principali thrust.

Per quanto riguarda l'interpretazione del dato di pozzo per la definizione dei top delle unità geologiche principali e la loro individuazione in sezione sismica in coincidenza con i principali riflettori, è necessario fare alcune considerazioni:

- le formazioni riconosciute nel Pozzo 1 (STS, SLC e FGY) sono state attribuite, data la presenza in affioramento in tutta la zona in cui ricade la linea sismica aa' delle unità di Lagonegro II, all'unità della Lagonegro II piuttosto che alla Lagonegro I, di cui al contrario non si hanno evidenze nell'area;
- la presenza della sequenza rovesciata nella parte alta del Pozzo 1, rappresentata da STS2 e SLC2, è stata interpretata come parte di una piega NE vergente il cui nucleo è costituito dalla formazione del Flysch di Galestrino (FGY2);
- la posizione inusuale nel Pozzo 1 della formazione del Flysch di Albidona all'interno delle unità Lagonegresi, dato anche il riconoscimento del thrust nel pozzo, è stata interpretata come un sovrascorrimento fuori sequenza (rappresentato anche nell'interpretazione della sezione sismica in Figura 5.2);
- nel Pozzo 2 le unità attribuite alle Sicilidi, alla luce dello schema geologico-strutturale adattato e alle conoscenze sull'area di studio, sono state reinterpretate per l'analisi del dato sismico come formazione di Serrapotamo – SRP, membro oligocenico dell'Unità di Lagonegro

Il al di sopra del Flysch di Galestrino (FGY2) di età cretacea, e quindi corrispondente nella parte W della carta al top dell'Unità della Lagonegro II;

- le Unità olistolitiche del Pozzo 2 sono state inglobate nell'unità Irpina e il thrust che le separa è stato interpretato come un thrust interno alla stessa unità.

Per quanto riguarda l'interpretazione delle strutture, l'analisi della sezione sismica aa' ha portato ad individuare 4 thrust principali denominati T1 (rigetto circa 1000 msec), T5, T3 e T4, un retroscorrimento R1 (rigetto circa 600 msec) che determina l'ispessimento delle Unità Lagonegresi e delle Unità Irpine nella parte NE; due faglie normali "maggiori", ovvero che si riescono a seguire per un tratto significativo ai fini dell'interpretazione strutturale dell'area di studio in tutte le sezioni analizzate, denominate F11 e F12 in Figura 5.2, con rigetti significativi rispettivamente di circa 500 msec e circa 200 msec.

Le altre faglie interpretate sono presenti in carta e riscontrabili in sezione anche alla luce del dato di pozzo, ma non sembrano proseguire nelle altre linee sismiche analizzate.

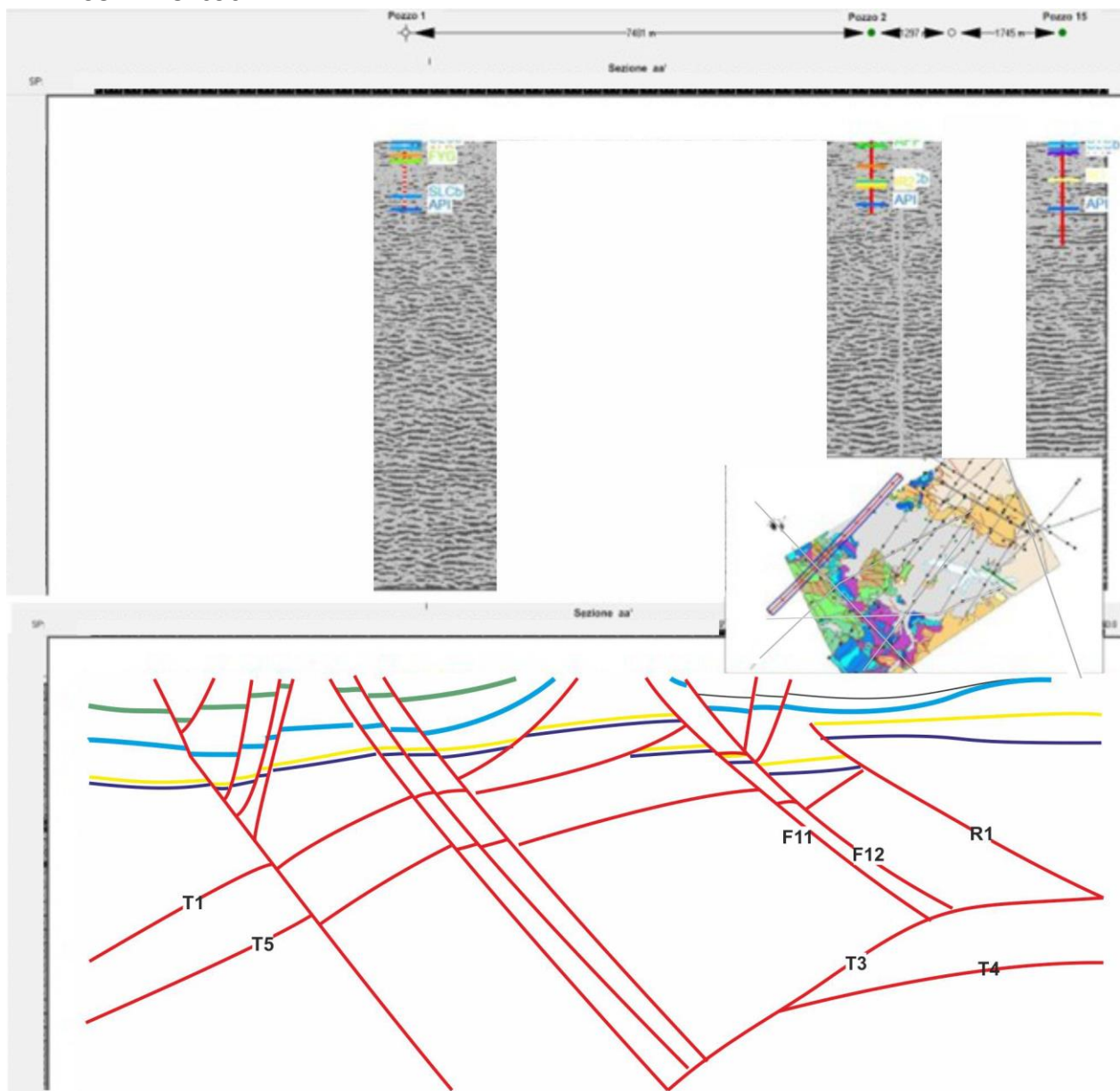


Figura 5.2 Confronto tra la linea sismica aa' non interpretata (in alto) in cui sono stati proiettati i dati dei pozzi 1, 2 e 15 e la linea sismica interpretata (in basso) nella quale sono riportate le denominazioni delle strutture maggiori individuate (Elaborazione in Kingdom software).

Sezione AA'

Il risultato dell'interpretazione sismica attraverso i dati di pozzo e di superficie ha portato alla realizzazione della sezione AA' in Figura 5.3.

La parte alta (sopra lo 0) a SW della sezione è stata interpretata, coerentemente con i dati di superficie, attraverso l'impilamento delle formazioni delle Unità Appenniniche (in verde). Al di sotto di queste unità si sussegue l'Unità della Lagonegro II, caratterizzata in questo punto, dal coinvolgimento delle Unità lagonegresi e delle Irpine in una piega per propagazione di faglia (*fault propagation fold*), erosa nella parte sommitale, NE vergente al di sopra del duplex della piattaforma Apula generato dalla propagazione del thrust T1 (rigetto di circa 2000 metri).

Tra le unità della Lagonegro II e l'Unità Irpina è stato necessario interpretare (in base alla carta geologico-strutturale dell'area e allo schema geologico-strutturale utilizzato) l'Unità della Lagonegro I caratterizzata dalle formazioni dal basso verso l'alto dai Calcari con Selce (SLC 1) alla base, gli Scisti Silicei (STS1), e i Flysch di Galestri (FGY1) al top dell'unità. Pertanto, fra il top della Lagonegro II e quello dell'Unità Irpina è stato individuato un possibile posizionamento del top delle Unità della Lagonegro I a cui è stato associato uno spessore di circa 500 m, compatibile con lo spessore delle formazioni che lo caratterizzano riscontrate in superficie e riportate nella legenda della carta geologico strutturale del Foglio CARG 505 (es. SLC1 ha uno spessore di 400 m in affioramento; STS1 300 m; FLY1 150 m).

La Lagonegro I, non essendo stata riscontrata nella maggior parte dei pozzi nell'area di studio e non essendo presente in carta, è stata interpretata come parte delle unità deformate dalla *fault propagation fold* sopra il thrust T1 con chiusura al di sopra dell'alto strutturale dell'API (a circa 1000 m di profondità).

Proseguendo da SW verso NE, i depositi rappresentati in Sezione AA' rappresentano il riempimento del bacino oligocenico (presenza della formazione del Flysch di Albidona). In questo settore, sotto il bacino, la geologia profonda è influenzata dalla prosecuzione in profondità di due faglie normali principali (F11 e F12) con rigetti di 800 m e 400 m che ribassano tutte le unità.

Quindi, si rinvencono a profondità maggiori la prosecuzione delle unità della Piattaforma Appenninica e delle unità della Lagonegro II, fatta eccezione per il Flysch di Galestrino. La parte superiore dell'unità lagonegrese in questo settore è rappresentata dall'intervallo oligocenico dell'unità Lagonegro II ovvero la formazione di Serrapotamo. Queste unità proseguono poi verso l'estremità NE della sezione.

Al contrario le unità Irpine sottostanti da SW a NE aumentano di spessore fino a raddoppiare a causa della presenza di un retroscorrimento R1 che innalza nuovamente tutte le unità al di sopra della struttura. Il retroscorrimento R1 è associato a un ulteriore thrust T3 nella parte profonda della sezione. Infine, è stato identificato il thrust T4 a circa 9 km che separa le unità dell'API e i sottostanti depositi Permo-Triassici (TR) dal Basamento (BAS), ben identificato da un segnale sismico forte e continuo nella sezione a circa 9 km.

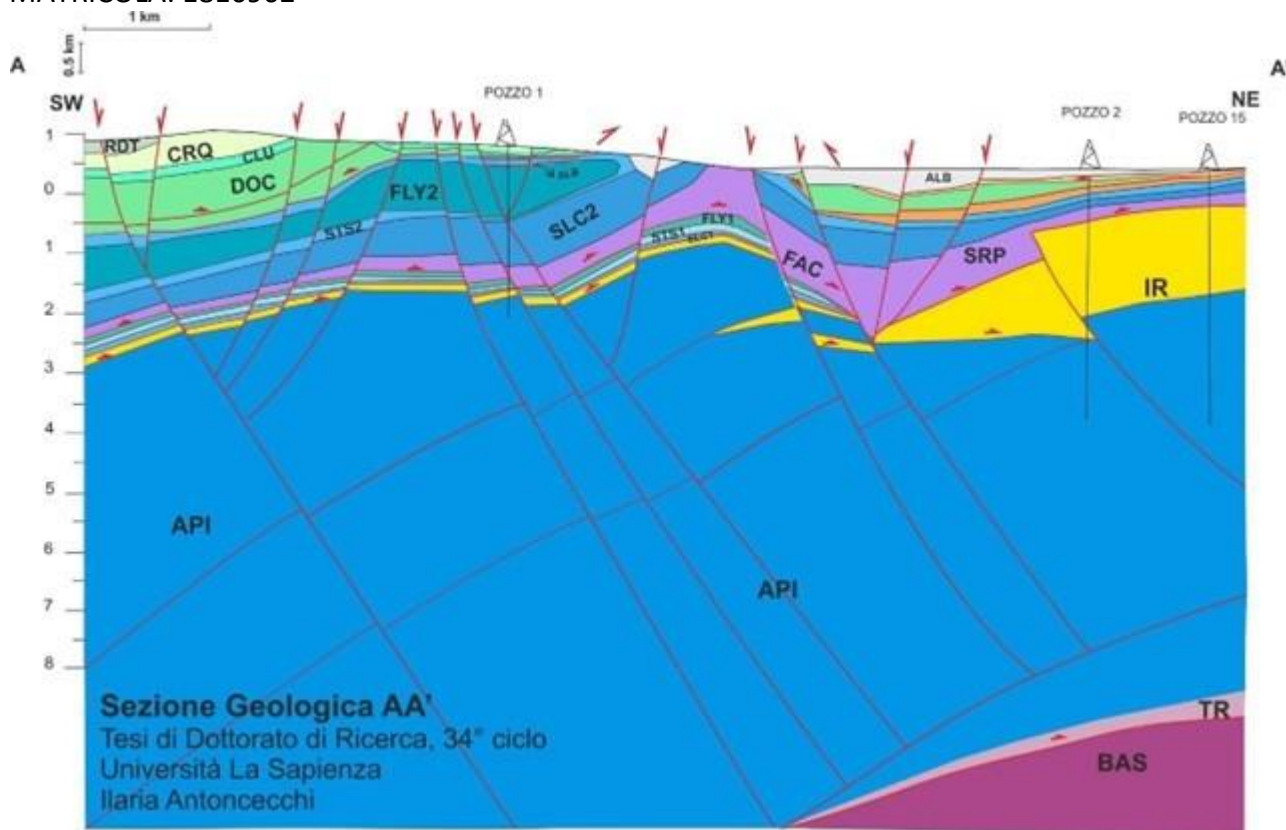


Figura 5.3 Sezione geologica AA' realizzata dall'analisi dei vincoli superficiali e profondi relativi all'area in cui ricade la sezione sismica aa'. I colori e la denominazione delle unità coincidono con quelle riportate nello schema delle unità geologico strutturali utilizzate (Figura 3.3). Le scale verticale e orizzontale sono in km e riportate in alto a sinistra.

5.2 Sezione BB'

Vincoli superficiali e profondi

Per la costruzione della sezione geologica BB' (Figura 3.37) sono stati utilizzati i vincoli superficiali presenti nella carta geologico – strutturale realizzata (Allegato 1), considerato anche che la sezione ricade in area rilevata descritta nel capitolo 4 e che le revisioni proposte rispetto alla carta geologica del foglio 505 determinano significativi scostamenti, in particolare riguardo la presenza in affioramento dell'Unità di Lagonegro I, i suoi rapporti con la Lagonegro II (Figura 4.2) e quindi delle strutture interpretate in superficie. Le informazioni presenti nell'area, con particolare riguardo alle unità e alle strutture della carta geologico-strutturale realizzata, sono state utilizzate per la correlazione del dato strutturale in profondità riportando tutte le informazioni di superficie nel software Kingdom.

I vincoli profondi utilizzati, per la costruzione della sezione geologica BB' consistono principalmente nelle stratigrafie dei pozzi 9, 10, 7, 12, 11, 13 (Figura 5.4), allineati sulla linea sismica bb', presenti nel lato E del bacino fino a circa metà del fiume Agri. Per la parte SW della sezione sismica sono stati utilizzati dati relativi ad altre sezioni sismiche vicine (sezioni nn' e oo' in Figura 3.1 dove sono presenti i dati di pozzo a N del pozzo 1 e a sud – fuori dalla carta – il pozzo pubblico Castellana 1) ed è stato fatto anche un confronto con le altre sezioni 3D parallele.

Le stratigrafie dei pozzi ed in particolare i top definiti delle unità geologiche principali sono state proiettate sulla linea sismica bb' attraverso il software Kingdom (come descritto nei paragrafi precedenti) al fine di poter procedere all'interpretazione. Il risultato è riportato in Figura 5.5.

STRATIGRAFIA DEI POZZI DELL'AREA DI STUDIO
ALLINEAMENTO DEI POZZI IN SEZIONE BB' - DIREZIONE SW - NE

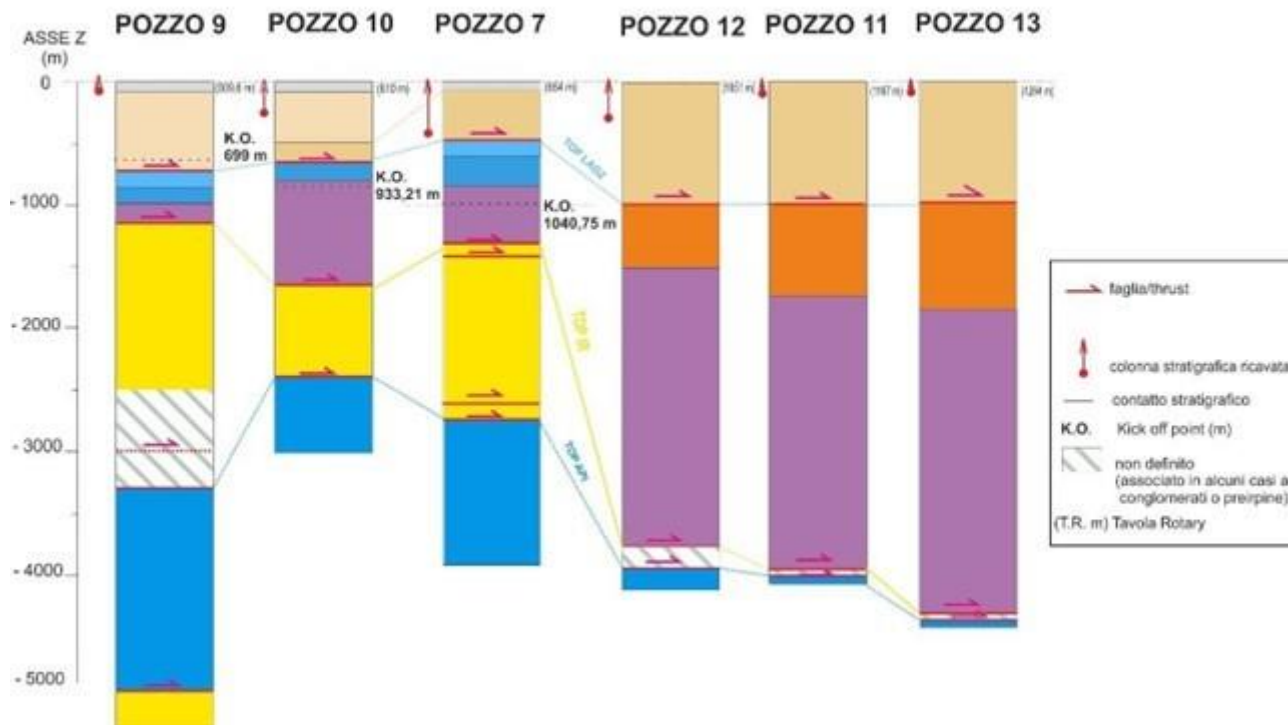


Figura 5.4 Rappresentazione della stratigrafia dei profili 1:1000 cartacei consultati durante la dataroom ENI. In figura i pozzi 9, 10, 7, 12, 11, 13 sono rappresentati da SW a NE come allineati sulla linea sismica bb'. La scala verticale (z) è in metri di profondità (m); le quote della scala verticale (z) sono da riferire alla tavola rotaria (T.R. espressa in metri) riportata in alto a destra del pozzo; sotto la denominazione del pozzo è riportata la proiezione sulla linea sismica bb' in km (calcolata con il software Kingdom).

Il pozzo 9 è distante 2,4 km dalla sezione bb'; è un pozzo deviato con una *true vertical depth* – TVD a $z = -5300$ m e un *kick off point* (K.O.) (punto di scostamento della verticale) a $z = -699$ m di profondità. Di questo pozzo è stata ricostruita la traiettoria esatta. Il profilo 1:1000 del pozzo interpreta al top l'unità del Flysch di Gorgoglione – FGO (stratigraficamente più alto rispetto al Flysch di Albidona - ALB assente nel pozzo). FGO arriva al di sotto del punto di *kick off* del pozzo e sovrascorre sull'unità di Lagonegro Il caratterizzata dalle tre formazioni FAC, SLC2, STS2 con uno spessore di circa 500 m (non è presente la formazione del Flysch di Galestrino – FGY2). Non è riconosciuta neanche l'unità di Lagonegro I.

L'unità Irpina è interpretata da $z = -1174$ fino a $z = -2500$ m, dove comincia uno spessore di materiale indefinito descritto in questo caso come conglomeratico e passante all'unità della piattaforma Apula – API a circa $z = -3400$ m. Il passaggio tra l'unità Irpina e la piattaforma è quindi incerto e potrebbe essere localizzato tra $z = -2500$ m e $z = -3359$ m. In questo caso, confrontando il dato di pozzo con il segnale sismico, il passaggio è stato inserito a circa $z = -3000$ m (dove peraltro a $z = -3028$ m nel profilo di pozzo è indicata anche la presenza di un sovrascorrimento).

Dato fondamentale acquisito dal pozzo 9 è la ripetizione dell'Unità Irpina al di sotto della piattaforma Apula segnata a $z = -5000$ m di profondità.

Anche il pozzo 10 è un pozzo leggermente deviato di cui non sono stati acquisiti i dati esatti di traiettoria. È noto che il punto di kick off (K.O.) è a $z = -933,5$ m. Nella parte alta del profilo del Pozzo 10 è interpretata l'Unità de Flysch di Gorgoglione - FGO. Al di sotto, in contatto erosivo, è presente l'Unità denominata "Sicilide" che, considerato lo schema stratigrafico strutturale utilizzato e il dato di superficie presente in carta, è stata reinterpretata in questo caso come Unità del Flysch di Albidona. Inoltre, relativamente agli spessori di queste due unità l'interpretazione del pozzo riporta circa 120 m di spessore di FGO e solo 45 m di spessore di ALB. Considerati i dati degli altri pozzi ed anche gli spessori affioranti delle due unità è stato attribuito uno spessore maggiore a ALB rispetto a FGO che in questo punto sembrerebbe assestarsi al di sotto della copertura dei sedimenti alluvionali attuali del bacino.

Il Flysch di Albidona - ALB poggia in sovrascorrimento sulle formazioni dell'Unità della Lagonegro II. Tuttavia, anche in questo caso nel pozzo 10 non è stata riconosciuta e interpretata la formazione del Flysch Galestrino - FGY2 e in realtà risulta non essere presente neanche la formazione degli Scisti Silicei STS2. La Lagonegro II in questo pozzo è formata, quindi, direttamente da SLC2 al top e dalla Monte Facito alla base con uno spessore complessivo di circa 900 m. La Lagonegro II poggia direttamente sulla Unità Irpina (non è presente la Lagonegro I come nel pozzo 9) che ha uno spessore di circa 700 m e poggia a circa $z = -2500$ m sull'Unità della piattaforma Apula - API.

Anche il Pozzo 7 è distante dalla sezione 2,4 km ed è leggermente deviato, sebbene sia quasi verticale, la profondità totale $z = -4007$ m e il punto di kick off (K.O.) è a $z = -1040$ m. Nell'ambito del dato stratigrafico del profilo di pozzo si riporta la presenza del Flysch di Gorgoglione - FGO (non indicativa per la posizione della sezione sismica bb' e la geologia rappresentata in carta) che è stato infatti reinterpretato come unità del Flysch di Albidona -ALB. Anche in questo caso è assente la formazione del Flysch di Galestrino -FGY2 della Lagonegro II ed è assente la Lagonegro I.

In questo pozzo è registrato un ispessimento delle Unità Irpine al cui interno sono segnati 2 sovrascorrimenti a $z = -1460$ m e $z = -2710$ m.

I profili dei Pozzi 12, 11 e 13 riportano la medesima interpretazione. In particolare, segnalano un'"Unità Irpina" nella parte superiore del pozzo che probabilmente si riferisce ai depositi del bacino irpino ed in particolare alle unità di riempimento oligoceniche del Flysch di Albidona. Per questa ragione sono state così reinterpretate.

Al di sotto delle unità Irpine, l'interpretazione stratigrafica del pozzo 12 riporta l'"Unità Liguride" che in questo caso, considerato lo schema geologico strutturale utilizzato e la geologia dell'area è stata reinterpretata come formazione di Serrapotamo - SRP, formazione di età oligocenica dell'unità di Lagonegro II. All'interno dei pozzi 12, 11, 13 nei profili l'Unità Lagonegrese è riportata in modo indistinto e indifferenziato sia nelle formazioni costituenti l'unità della Lagonegro II che della Lagonegro I. In particolare, nel pozzo 12 si riporta di una generica Unità lagonegrese tra $z = -1515$ m e $z = -3790$ m, nel pozzo 11 tra $z = -1720$ e $z = -3963$ m e nel pozzo 13 tra $z = -1800$ m e $z = -4200$ m.

In tutti e tre i pozzi al di sotto dell'Unità della Lagonegro indifferenziata non è interpretata l'Unità Irpina ma viene riportato uno livello indefinito di circa 200-300 m di spessore al di sopra

dell'unità di piattaforma Apula (il top dell'unità della piattaforma Apula non è chiaramente distinta nel pozzo 11 poiché indifferenziata rispetto a una breccia calcarea).

Quindi, considerati i dati dei pozzi vicini e la geologia di superficie, per questi 3 pozzi:

- l'Unità Lagonegrese indifferenziata è stata attribuita all'unità di Lagonegro II potente circa 1500 m, al cui interno gli spessori delle diverse formazioni sono stati attribuiti in base a quanto riportato nei pozzi vicini;
- il top dell'Unità non definita, al di sotto dell'unità di Lagonegro II e sopra la piattaforma Apula è stata attribuita all'unità Irpina che in questa area ha spessori molto piccoli o nulli.

Interpretazione della sezione sismica bb'

In base ai vincoli descritti e alla sovrapposizione del dato di superficie nonché alla proiezione del dato di pozzo in sezione bb' sono state verificate le corrispondenze dei top delle unità segnate con i principali riflettori sismici individuati e la presenza in profondità delle faglie riportate in superficie e i principali thrust.

Per quanto riguarda l'interpretazione del dato di pozzo per la definizione dei top delle unità geologiche principali e la loro individuazione in sezione sismica in coincidenza con i principali riflettori, è necessario fare alcune considerazioni:

- il top della Lagonegro II corrisponde a E del bacino al top della Formazione del Flysch di Galestrino FGY2 e a W al top della formazione di Serrapotamo - SRP interpretata al posto delle unità Liguridi nei pozzi 11, 12, 13. In corrispondenza dei pozzi 10 e 7 sulla sezione bb' (vedi Figura 5.4) il top della Lagonegro II corrisponde rispettivamente al top della formazione degli Scisti Silice STS2 e al top dei Calcari con Selce – SLC2.
- nei dati di pozzo esaminati non è interpretata l'Unità della Lagonegro I. Tale unità come ampiamente descritto nei capitoli precedenti è presente prevalentemente in affioramento nella parte sudoccidentale dell'area di studio, mentre sembra essere assente nella parte orientale;
- il top delle Unità Irpine è correlato nella parte W con i pozzi 12,11, 13 in corrispondenza delle unità non definite riportate nelle stratigrafie dei pozzi;
- le Unità Irpine riportano un ispessimento in corrispondenza dei pozzi 9 e 7 e 10) e un assottigliamento verso E (pozzi 12, 11, 13).

Da queste considerazioni si è proceduto all'interpretazione della linea sismica bb' le cui strutture sono principalmente cieche in quanto coperte dai depositi alluvionali del bacino dell'Agri. I dati di pozzo correlati al dato sismico hanno permesso di individuare, anche in raffronto con altre sezioni sismiche interpretate (vedi sezione ee'), i due retroscorrimenti R3 e R2 e le faglie normali F11 e F12 definendo una struttura pop-up con un alto strutturale in corrispondenza del pozzo 10, confermato soprattutto dal rinvenimento dell'Unità Irpina al di sotto della piattaforma Apula in corrispondenza di R2. Un dato ulteriormente certo è la presenza del thrust principale T5 all'altezza del pozzo 7 che appunto determina l'ispessimento dell'Irpina in quel punto. Tutte le strutture identificate e appena citate si raccordano in profondità al thrust T5 (che ha un rigetto di almeno 1000 msec). Il Thrust T5 è tagliato in questa zona dalle due faglie normali maggiori denominate F11 (immergente a NE e già riconosciuta in AA') e F15 (immergente a SW con rigetto di circa 200 msec) che bordano il bacino del fiume Agri. A NE del bacino i pozzi 12, 11, 13 e il segnale sismico portano a identificare una

ulteriore struttura legata al retroscorrimento R1 con rigetto di 100 msec in questo punto (già rinvenuto nella sezione AA' con rigetto maggiore) che taglia le unità fino al top della Lagonegro II. La struttura R1 si ricollega in profondità al thrust individuato anche in precedenza come T3. Mentre il thrust T4, come nel caso della sezione AA' si rinviene a circa 4500 msec, al di sotto dei riflettori sismici identificati come il top delle Anidriti e del Basamento.

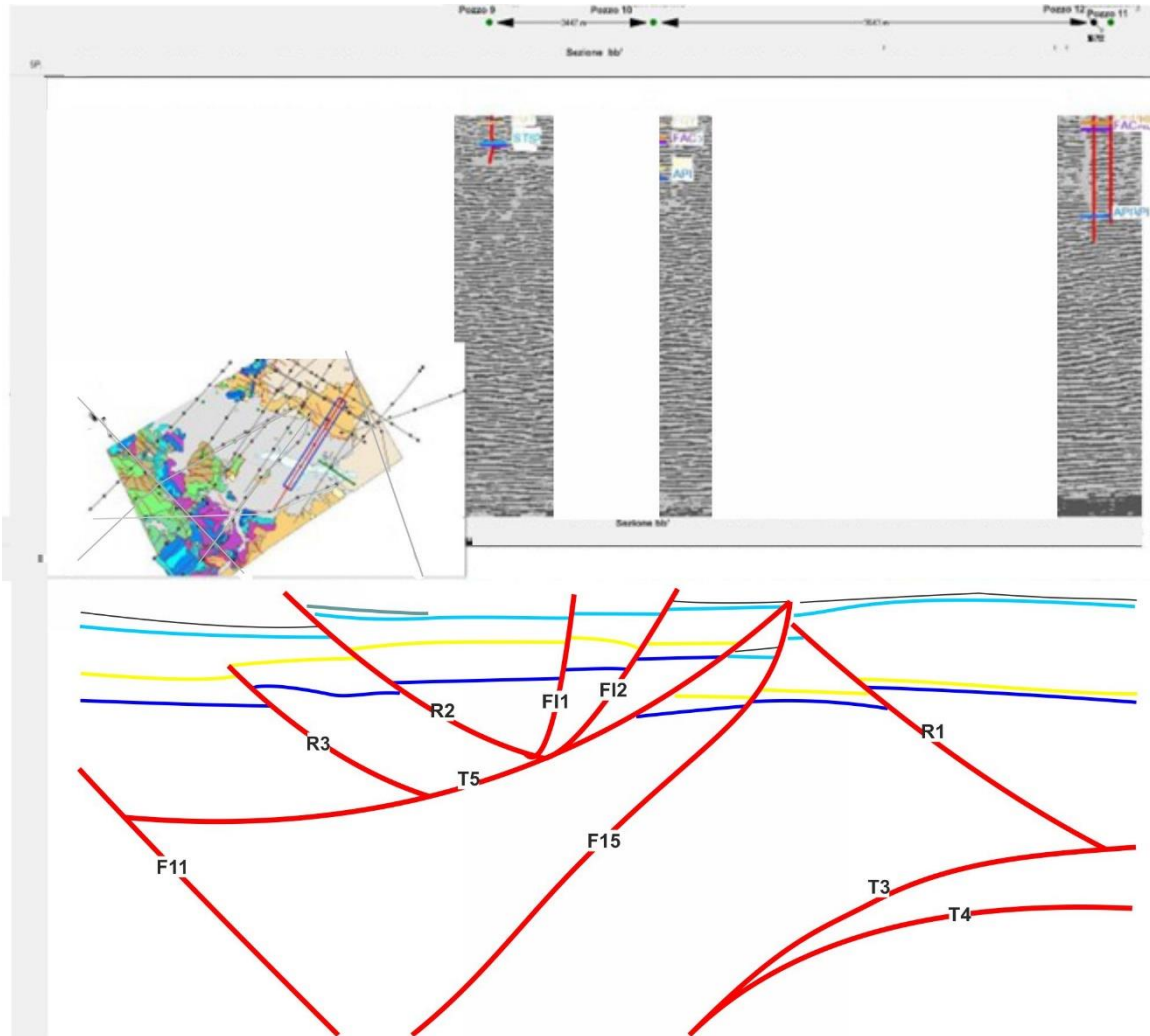


Figura 5.5 Confronto tra la linea sismica bb' non-interpretata (in alto) in cui sono proiettati i dati dei pozzi 9, 10, 12, 11 e la linea sismica interpretata (in basso) nella quale sono riportate le denominazioni delle strutture maggiori individuate (Elaborazione in Kingdom software).

Sezione BB'

Il risultato dell'interpretazione sismica attraverso i dati di pozzo e in superficie ha portato alla realizzazione della sezione BB' in Figura 5.6.

A SW del bacino l'interpretazione si è avvalsa dei dati presenti nelle sezioni sismiche nn', oo', dei dati di pozzo 1 e del pozzo Castellana (pozzo pubblico e fuori dall'area di studio) e in particolar modo

dei dati di superficie che in questo punto, si ricorda, riportano in particolar modo la presenza di una finestra tettonica sull'unità di Lagonegro I nella zona di Pian di Maglia.

Pertanto, questa parte della sezione riporta in sintesi la struttura di fault propagation fold già interpretata nella sezione AA' sul thrust T1 conseguente alla struttura duplex nella piattaforma Apula -API che nella parte più alta (corrispondente a una zona a S del horst di Grumento Nova) arriva anche a toccare i 1000 m di profondità (dato compatibile con la carta del top della piattaforma Apula di Nicolai e Gambini, 2007). Le unità più alte della piega relative alla Lagonegro II e Lagonegro I affioranti risultano prevalentemente erose.

A E del bacino, rispetto alla Sezione AA', si osserva l'apertura del bacino dell'Agri attraverso la presenza delle due faglie estensionali F11 (interpretabile solo in parte in BB') e F15 (assente nella sezione AA'). In questo caso è possibile quindi stabilire il solo rigetto della faglia F15 a circa 200 m.

All'interno del bacino individuato, è stato riconosciuto un pop-up generato dalle strutture interpretate, coerentemente con i dati di pozzo, come due retroscorrimenti R2 e R3, due faglie estensionali F11, F12 con piccolissimi rigetti e il thrust denominato T5 che nella parte sommitale sembra tagliare il top della formazione del Serrapotamo (oligocenica) della Lagonegro II.

Considerata l'assenza nei pozzi esaminati in questa linea dell'Unità di Lagonegro I, nella sezione interpretata BB' passando da SW a NE, la Lagonegro I sembra esaurirsi sull'alto strutturale determinato dal T1 e tagliato dalla F11.

Per quanto riguarda invece la Lagonegro II, la mancanza nei pozzi esaminati del FGY2 in corrispondenza dei pozzi 9, 10 e 7 e la contestuale presenza della formazione del Serrapotamo - SRP nei pozzi 12,11, 13 fa presumere che le formazioni del Flysch Galestrino FGY2 e del Serrapotamo - SRP si esauriscano sull'alto della struttura di M. Alpi tagliati dalle strutture FL1 e FL2.

A E della faglia F15 si ritrova invece la struttura R1 (già interpretata in AA') che determina la struttura rialzata dei pozzi 11 e 12 (NE vergente e con rigetto di circa 200 m). Il retroscorrimento R1 è associato a un ulteriore thrust T3 nella parte profonda della sezione. Infine, è stato identificato il thrust T4 a circa 9 km che separa le unità dell'API e i sottostanti depositi Permo Triassico (TR) dal Basamento (BAS), ben identificato da un segnale sismico forte e continuo nella sezione.

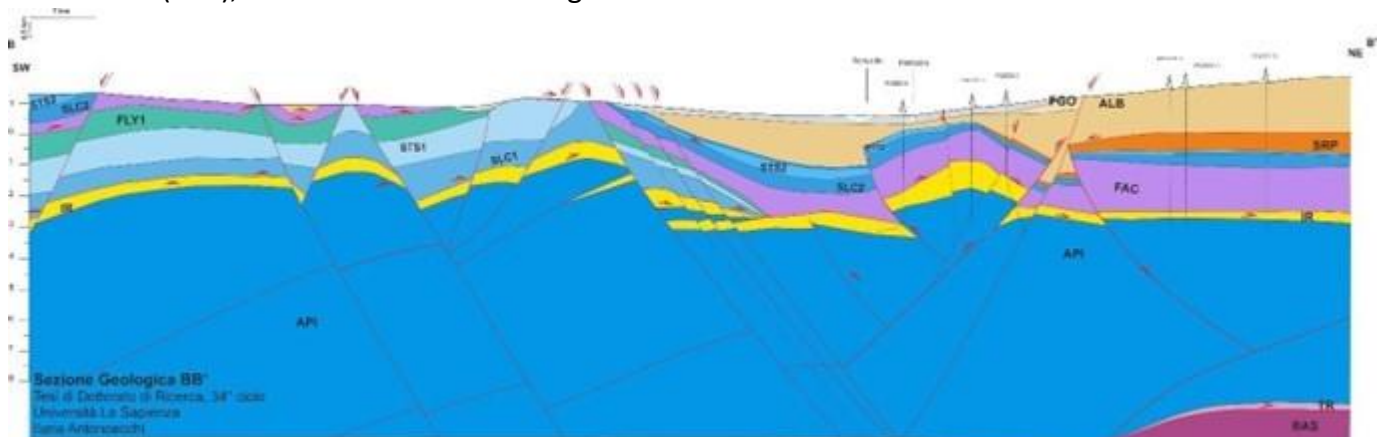


Figura 5.6 Sezione geologica BB' realizzata dall'analisi dei vincoli superficiali e profondi relativi all'area in cui ricade la sezione sismica bb'. I colori e la denominazione delle unità coincidono con quelle riportate nello schema delle unità geologico strutturali utilizzate (Figura 3.3). Le scale verticale e orizzontale sono in km e riportate in alto a sinistra.

5.3 Sezione CC'

Vincoli superficiali e profondi

Per la costruzione della sezione geologica CC' (Figura 3.37) sono stati utilizzati i vincoli superficiali presenti nella carta geologico – strutturale realizzata (Allegato 1), considerato anche che la sezione ricade in area del settore nord-occidentale descritto nel capitolo 4 e che le revisioni proposte rispetto alla carta geologica del foglio 505 determinano significativi scostamenti. Le differenze riguardano in particolare la presenza in affioramento dell'Unità di Lagonegro II rappresentata dalla Formazione del Flysch Galestrino – FGY2 e dagli Scisti Silicei -STS2 in superficie a contatto con le Unità Appenniniche (da una parte) e dall'altra con le Unità del Flysch di Albidona e del Flysch di Gorgoglione.

Le informazioni presenti nell'area, con particolare riguardo alle unità e alle strutture della carta geologico-strutturale realizzata, sono state utilizzate per la correlazione del dato strutturale in profondità riportando tutte le informazioni di superficie nel software Kingdom.

I vincoli profondi utilizzati, per la costruzione della Sezione geologica CC' consistono principalmente nella stratigrafia del pozzo 3 (Figura 5.7). Anche la sezione sismica cc', come bb', copre solo la parte E del Bacino, fino a circa metà del fiume Agri. Per la parte SW della sezione sono stati visionati prevalentemente dati di superficie e realizzato un confronto con quanto interpretato nella sezione AA' tarata dal pozzo 1.

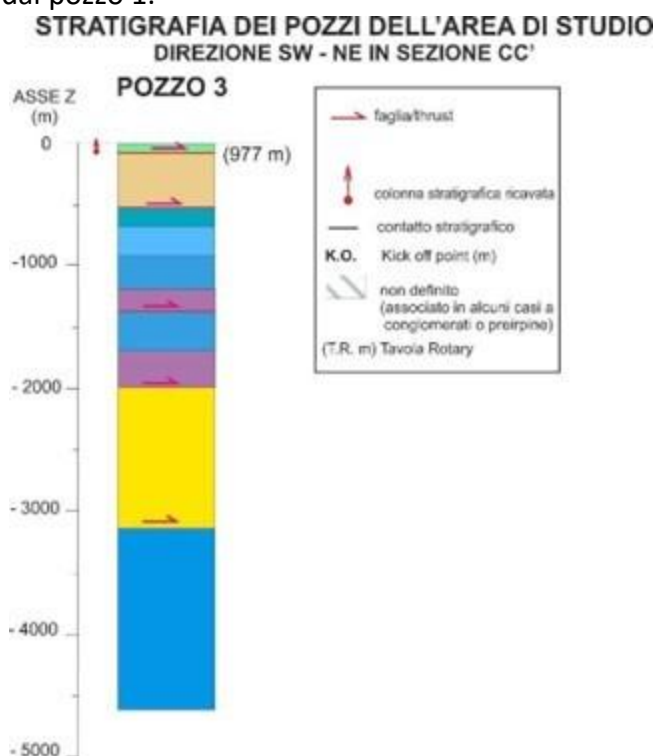


Figura 5.7 Rappresentazione della stratigrafia dei profili 1:1000 cartacei consultati durante la dataroom ENI. In figura il pozzo 3 proiettato sulla linea sismica cc'. La scala verticale (z) è in metri di profondità (m); le quote della scala verticale (z) sono da riferire alla tavola rotary (T.R. espressa in metri) riportata in alto a destra del pozzo.

La stratigrafia del Pozzo 3 ed in particolare i top definiti delle unità geologiche principali è stata proiettata sulla linea sismica cc' attraverso il software Kingdom al fine di poter procedere all'interpretazione. Il risultato è riportato in Figura 5.8.

Dalla stratigrafia del Pozzo 3 emerge la presenza del Flysch di Gorgoglione - FGO nella parte alta del pozzo, interpretata, in base alla posizione reale nella carta geologico-strutturale realizzata, come Flysch di Albidona - ALB.

Sotto FGO è presente l'unità di Lagonegro II con una ripetizione delle formazioni STS2, SLC2 e FAC per uno spessore complessivo di 1460 m. Al suo interno a circa $z=-970$ m è segnalata la presenza di una faglia. Il top dell'Unità Irpina - IR si trova a $z=-2040$ m, lo spessore di IR è di circa 1000 m mentre il top dell'unità della piattaforma Apula si trova a $z=-3180$ m.

Interpretazione della sezione sismica cc'

Anche nella sezione cc' sono state riconosciute le strutture del pop-up generatosi lungo i thrust del sistema T5 ovvero R1, R2, F11, F12. Anche in questo le faglie F11 e F12 si comportano come faglie normali (Figura 5.8). T5 ha un rigetto di almeno 400 msec e taglia al di sotto del pozzo 3 la piattaforma apula – API fino ad arrivare al top del Flysch di Albidona ALB.

Sulla base del dato di pozzo e considerate le strutture in carta, nella parte NE della struttura ovvero a E della FL2, il Pozzo 3 è interessato da piccole faglie estensionali di probabile carattere superficiale immergenti a SW. Infatti, tali faglie non hanno un rigetto significativo e non sembrano proseguire sulle altre sezioni.

Ancora a NE del T5 è stata identificata la faglia F15 avente un rigetto di 200 msec. Purtroppo, nonostante sia stata localizzata la faglia F11 in questa sezione non è possibile misurarne il rigetto che invece è ricavato dalla costruzione della sezione geologica tramite tecnica di bilanciamento. È stato poi riconosciuto il retroscorrimento R1 (con rigetto di 250 msec) che si raccorda sul thrust T3. La struttura T4 in questa sezione è più alta essendo più alto il segnale del riflettore delle Anidriti e del Basamento a circa 4500 msec.

È da notare che rispetto al dato sismico sembrerebbe eccessivo lo spessore di IR interpretato in pozzo che dovrebbe arrivare a circa 1000 m di spessore. Questo non sembra rispecchiare né il dato sismico né il dato relativo alle sezioni vicine AA' e DD' dove lo spessore di IR raggiunge 1000 m solo in corrispondenza della struttura R1 (in AA') e tende a rimanere al di sotto dei 1000 m nella sezione DD'.

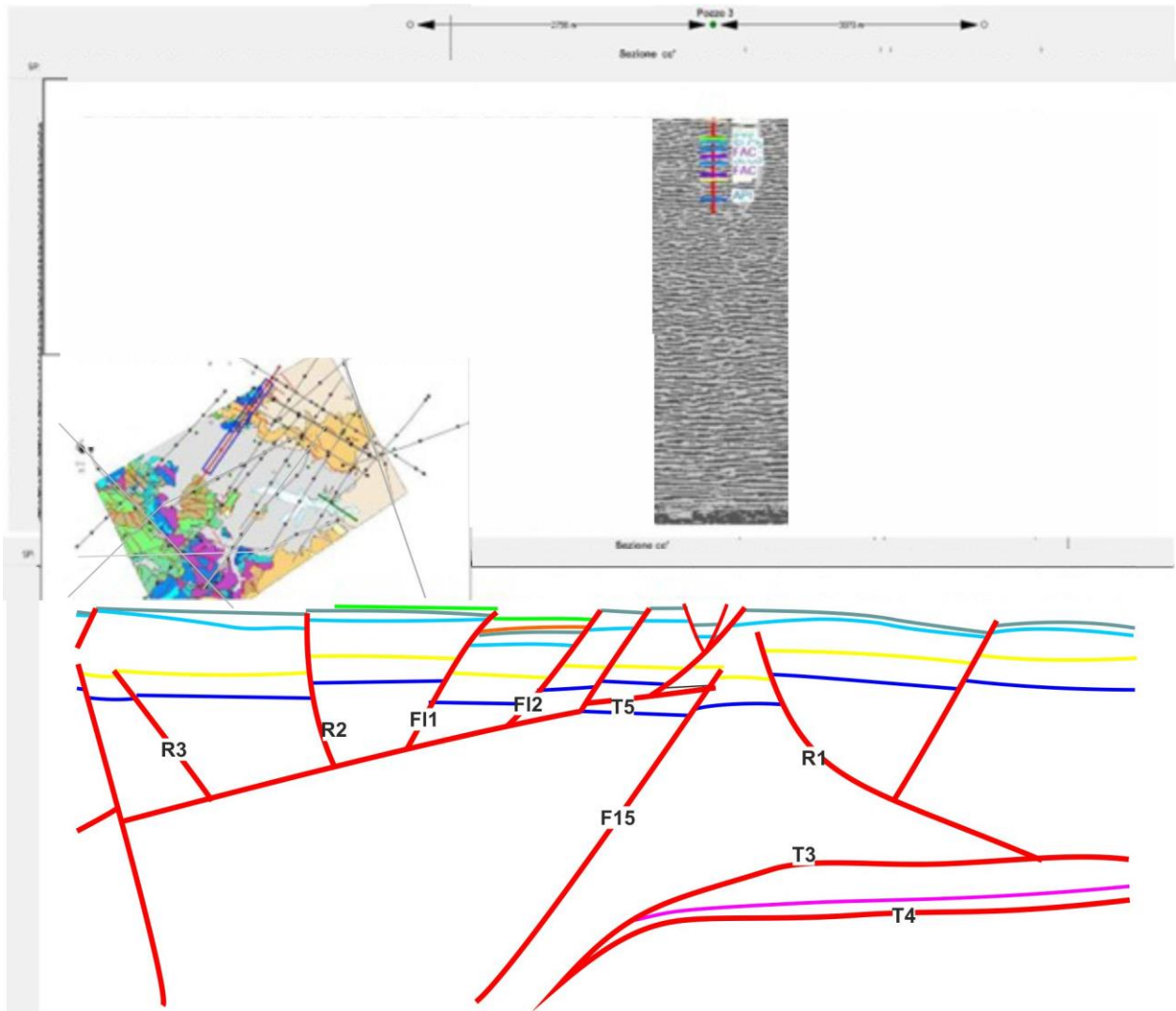


Figura 5.8 Confronto tra la linea sismica cc' non-interpretata (in alto) in cui sono proiettati i dati del pozzo 3 e la linea sismica interpretata (in basso) nella quale sono riportate le denominazioni delle strutture maggiori individuate (Elaborazione in Kingdom software).

Sezione CC'

La sezione geologica CC' interpretata nella parte W ricalca l'interpretazione della struttura *fault propagation fold* interpretata in AA' conseguente alla struttura a duplex della piattaforma API che in questo punto presenta un alto strutturale, generato da una più articolata struttura a pop-up dovuta alle strutture R3, R2, F11, F12, T5. Anche qui la piega è tagliata e racchiusa tra le due faglie estensionali che delimitano il bacino: la faglia estensionale F11, di cui è difficile calcolare il rigetto per mancanza del dato visibile nella sezione sismica, e la faglia estensionale F15 che ha un rigetto di circa 400 m. La faglia F11, in questo caso è stata rappresentata in base ai dati di superficie e il confronto con le altre sezioni in particolare in posizione più a W rispetto alla sezione AA' e DD' rispettivamente a N e a S della stessa. Tale faglia in carta e in sezione taglia comunque i depositi quaternari e continentali confermando un suo ruolo nella genesi del bacino della Val d'Agri. Infatti, anche il rigetto della Faglia F11, in questo caso, definito attraverso metodo del bilanciamento e per la posizione degli orizzonti interpretati, si conferma essere di circa 1200 m. La posizione più a ovest

della Faglia F11 rispetto alle altre sezioni, potrebbe essere giustificata da una possibile dislocazione dovuta al proseguimento della faglia STR5 a W del bacino, che tuttavia rimane ipotizzato a causa della mancanza di dati sismici che ne permettano l'interpretazione verso W.

Rispetto alla sezione AA' nella sezione CC', come convalidato anche dai dati di superficie e dal dato di pozzo 3, è presente l'unità del Flysch Galestrino. Inoltre, proiettando il dato del pozzo 2 sulla sezione è possibile verificare anche la presenza molto localizzata della formazione di Serrapotamo.

Anche queste variazioni di spessore delle unità più alte della Lagonegro II possono essere frutto della presenza di strutture trascorrenti che, in particolare, potrebbero coincidere con la faglia a nord ovest del bacino presente in carta e individuata in questo studio come STR5. Tale faglia trascorrente potrebbe, infatti, determina una maggiore penetrazione verso E della formazione del Flysch Galestrino e presenza localizzata della formazione del Serrapotamo – SRP.

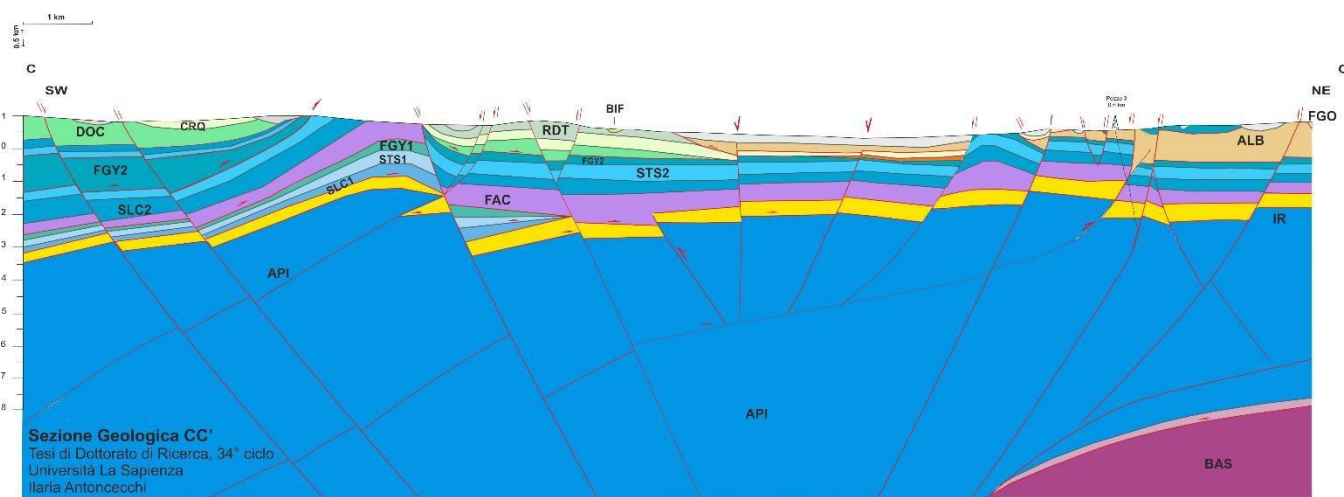


Figura 5.9 Sezione geologica CC' realizzata dall'analisi dei vincoli superficiali e profondi relativi all'area in cui ricade la sezione sismica cc'. I colori e la denominazione delle unità coincidono con quelle riportate nello schema delle unità geologico strutturali utilizzate (Figura 3.3). Le scale verticale e orizzontale sono in km e riportate in alto a sinistra.

5.4 Sezione DD'

Vincoli superficiali e profondi

Per la costruzione della sezione geologica DD' (Figura 3.37) sono stati utilizzati i vincoli superficiali presenti nella carta geologico – strutturale realizzata (Allegato 1), considerato anche che la sezione ricade in area rilevata descritta nel capitolo 4 e che le revisioni proposte rispetto alla carta geologica del foglio 505 determinano significativi scostamenti (Figura 4.1 e Figura 4.5). Le differenze riguardano in particolare l'interpretazione delle formazioni costituenti l'Unità di Lagonegro II e i rapporti fra loro e l'interpretazione strutturale della zona di Grumento Nova.

Le informazioni presenti nell'area, con particolare riguardo alle unità e alle strutture della carta geologico-strutturale realizzata, sono state utilizzate per la correlazione del dato strutturale in profondità riportando tutte le informazioni di superficie nel software Kingdom.

I vincoli profondi utilizzati, per la costruzione della Sezione geologica DD' consistono principalmente nelle stratigrafie dei pozzi 5, 4, 7, 6 (Figura 5.10). Anche la sezione sismica dd' copre solo la parte E

del Bacino, fino a circa metà del fiume Agri. Per la parte SW della sezione è stato effettuato un confronto con i dati di superficie e le sezioni vicine.

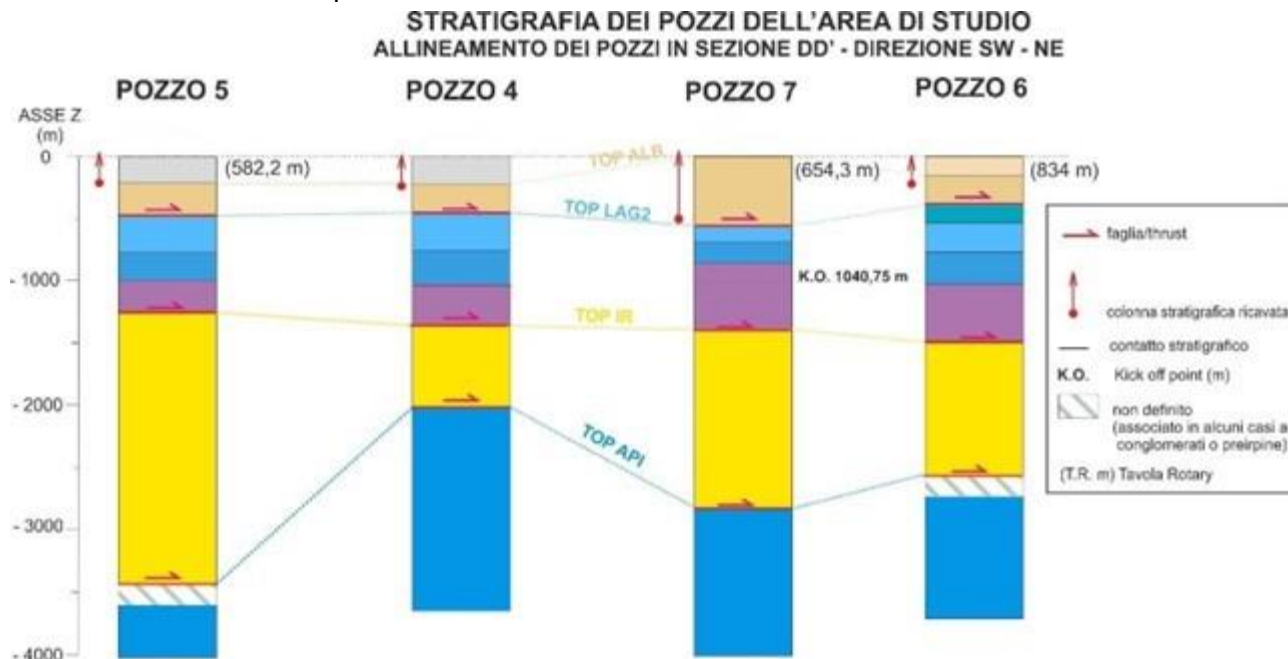


Figura 5.10 Rappresentazione della stratigrafia dei profili 1:1000 cartacei consultati durante la dataroom ENI. In figura i pozzi 5,4, 7, 6 sono rappresentati da SW a NE come allineati sulla linea sismica dd'. La scala verticale (z) è in metri di profondità (m); le quote della scala verticale (z) sono da riferire alla tavola rotary (T.R. espressa in metri) riportata in alto a destra del pozzo; sotto la denominazione del pozzo è riportata la proiezione del pozzo sulla linea sismica dd' in km (calcolata con il software Kingdom).

La parte alta del Pozzo 5, in base al profilo analizzato, riporta l'interpretazione del Flysch di Gorgoglione che poggia in sovrascorrimento sulle unità della Lagonegro II relative alle formazioni degli Scisti Silicei - STS2, Calcari con Selce - SLC2 e Monte Facito - FAC. Non è presente il Flysch di Galestrino -FGY2 e non è stata individuata l'Unità di Lagonegro I. L'Unità irpina in questo pozzo arriva a quasi a 2000 m di spessore e poggia su una Unità non definita nella parte sommitale (probabilmente conglomerato) che è stato interpretato come il top dell'unità della piattaforma Apula (posizionato a z= - 3500m).

Il Pozzo 4 conferma la mancanza del Flysch di Galestrino nella Lagonegro II. Lo spessore dell'Unità Irpina diminuisce. Differentemente dal Pozzo 5 non è presente l'Unità conglomeratica e dall'Unità Irpina si passa direttamente alla piattaforma Apula – API il cui contatto è riportato a circa z= - 3600 m.

I Pozzi 6 e 7 (proiettati rispettivamente a 0,07 km e a 2,7 km sulla sezione dd') sono già stati commentati per la sezione bb'.

Interpretazione della sezione sismica dd'

In riferimento alla correlazione di questi pozzi sulla sezione dd' e ai dati di superficie, ai fini dell'interpretazione è utile effettuare le seguenti considerazioni:

- il Flysch di Gorgoglione - FGO interpretato nei Pozzi 4 e 5 è stato ricondotto per coerenza e uniformità ai dati a disposizione, al Flysch di Albidona – ALB presente nei Pozzi 7 e 6;

- anche in questo caso nei Pozzi 4, 5, e 7 mancano le formazioni del Flysch di Galestrino e della formazione di Serrapotamo che, per coerenza con le altre sezioni AA' e CC' e ai dati di superficie, sono stati inseriti come livelli sottilissimi nei pozzi 4 e 5;
- anche in questo caso non risulta interpretata l'Unità di Lagonegro I che pertanto risulta assente nell'interpretazione della sezione dd'.

Su queste basi e considerate le strutture in carta, sono state interpretate nella parte SW della sezione le strutture denominate R3, R2, F11 e F12 (entrambe estensionali) e T5 in Figura 5.11. È stato poi riconosciuto il retroscorrimento R1, che taglia tutte le unità fino al top della Lagonegro II, ricordato sul thrust T3. La struttura T4 si trova a 4800 msec.

In questa sezione è stato possibile verificare la presenza della sola faglia normale F15 a causa dell'interruzione della linea sismica (rigetto quasi 100 msec).

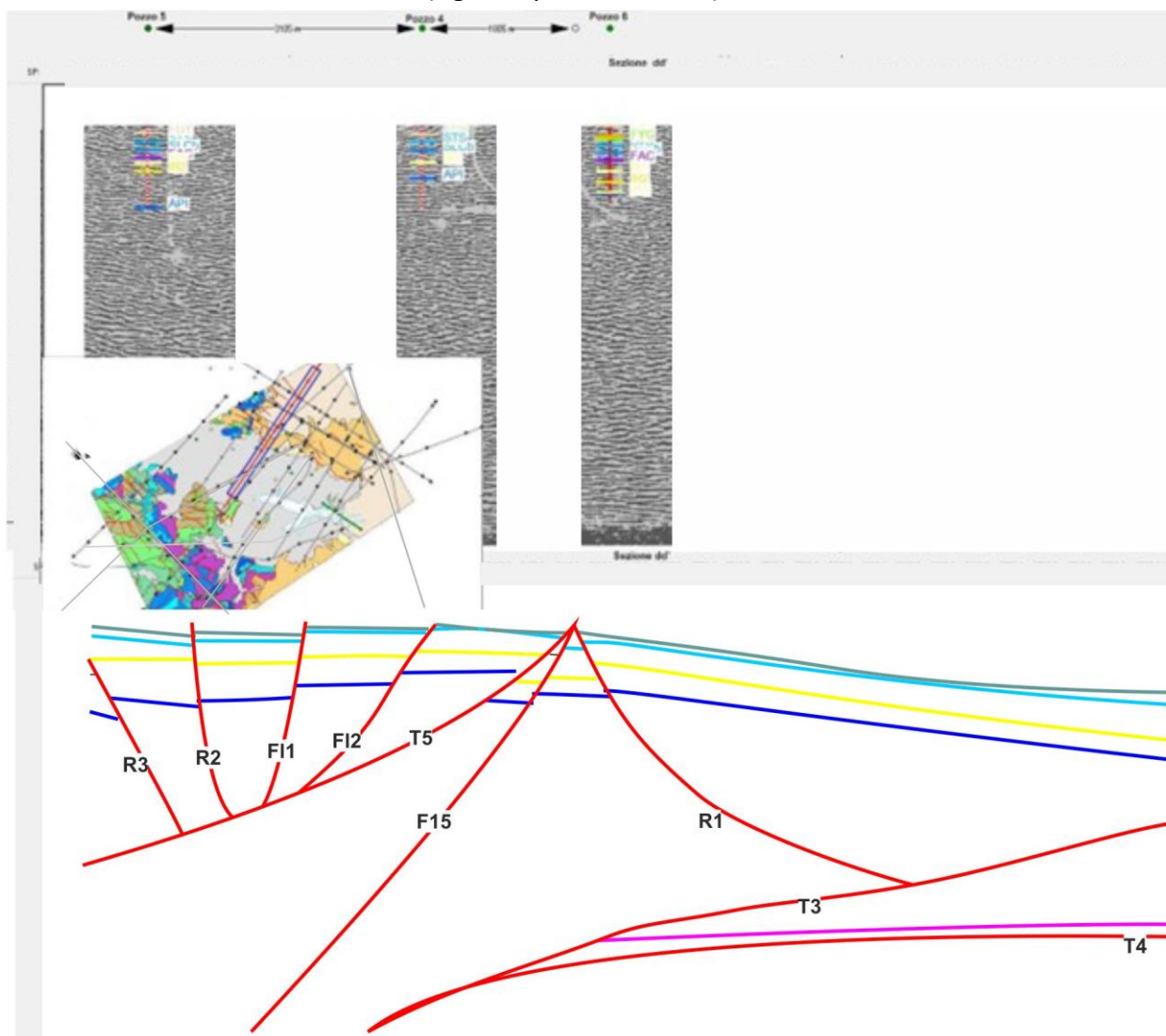


Figura 5.11 Confronto tra la linea sismica dd' non-interpretata (in alto) in cui sono proiettati i dati del pozzo 5, 4, 6 e la linea sismica interpretata (in basso) nella quale sono riportate le denominazioni delle strutture maggiori individuate (Elaborazione in Kingdom software).

Sezione DD'

Nella sezione DD' la parte W del bacino (in cui è assente il dato sismico) è caratterizzato dalla medesima *fault propagation fold* interpretata nelle precedenti sezioni, formatasi a causa del duplex della piattaforma Apula generato dal thrust T1. Sono presenti entrambe le unità lagonegresi deformate da un sistema di strutture estensionali prevalentemente immergenti a NE dove la Lagonegro II è superficiale e presente in affioramento e la Lagonegro I risulta essere più profonda rispetto alla sezione BB'. La Lagonegro I, come nel caso della sezione CC', non risulta presente nei pozzi esaminati e proiettati in sezione dd'. Questo ha portato ancora una volta a confermare l'ipotesi che questa unità si esaurisca sull'alto strutturale della piega generata dal thrust T1. Le Unità Irpine in questa struttura sono molto sottili e la piattaforma Apula - API è presente a 1000 m di profondità.

La faglia F11 ribassa la struttura T1 e riporta l'API, sotto il bacino, a una profondità di circa 3000 m. Dal lato E della faglia, come nei casi precedenti, sono state individuate le strutture R3, R2, FL1, FL2 e T5. Tali strutture portano alla formazione di un alto strutturale tra FL1 e FL2 dove è presente in un livello sottilissimo il Flysch di Galestrino -FGY2 in continuità con quanto interpretato nella sezione CC', e la formazione di Serrapotamo -SRP molto localizzata e in livello sottile presente nell'intorno del Pozzo 7. In questa parte della sezione come nei casi precedenti è confermato un ispessimento della unità Irpina.

Per quanto riguarda la faglia F15, nella sezione DD' presenta rigetti di circa 200m. A E della sezione si identifica ancora la struttura R1 che taglia le unità fino al top delle unità del Flysch di Albidona. Si confermano anche la presenza del T3 e del T4 quest'ultimo interpretato a circa 9 km.

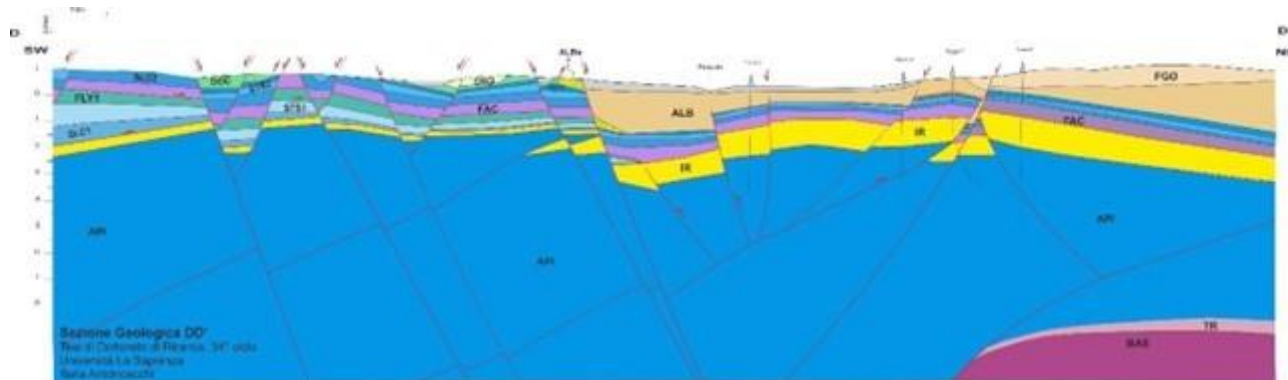


Figura 5.12 Sezione geologica DD' realizzata dall'analisi dei vincoli superficiali e profondi relativi all'area in cui ricade la sezione sismica dd'. I colori e la denominazione delle unità coincidono con quelle riportate nello schema delle unità geologico strutturali utilizzate (Figura 3.3 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). Le scale verticale e orizzontale sono in km e riportate in alto a sinistra.

5.5 Sezione EE'

Vincoli superficiali e profondi

Per la costruzione della sezione geologica EE' (Figura 3.37) sono stati utilizzati i vincoli superficiali presenti nella carta geologico – strutturale realizzata (Allegato 1), considerato anche che la sezione in oggetto non ricade in area rilevata e che le revisioni proposte non determinano significativi scostamenti in base a quanto riportato anche nel foglio 505.

Le informazioni presenti nell'area, con particolare riguardo alle unità e alle strutture, sono state utilizzate per la correlazione del dato strutturale in profondità riportando tutte le informazioni di superficie nel software Kingdom.

I vincoli profondi utilizzati, per la costruzione della Sezione geologica EE' consistono principalmente nelle stratigrafie dei pozzi 8, 10, 7, 6, 12 e 11 (Figura 5.13). Queste ed in particolare i top definiti delle unità geologiche principali sono state proiettate sulla linea sismica ee' attraverso il software Kingdom al fine di poter procedere all'interpretazione. Il risultato è riportato in Figura 5.14.

I pozzi 10, 7, 6, 12 e 11 sono già stati descritti per le precedenti sezioni.

Nel profilo 1:1000 del Pozzo 8, nella parte alta, si interpretano delle "Unità Irpine" intese come unità del bacino irpino e reinterpretate come per gli altri pozzi (vedi 11, 12, 13) come Unità del Flysch di Albidona - ALB. Non è presente l'Unità di Lagonegro I. L'Unità Irpina-IR ha uno spessore di circa 1000 m e API si trova a $z = -2500$ m di profondità.

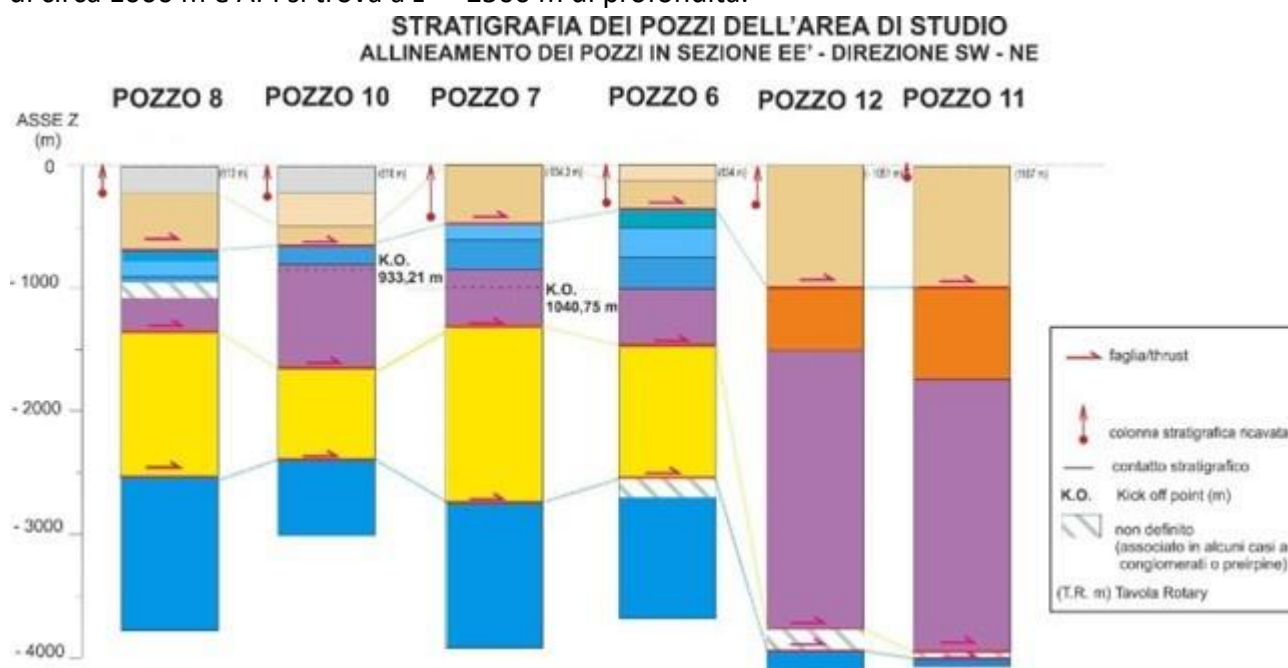


Figura 5.13 Rappresentazione della stratigrafia dei profili 1:1000 cartacei consultati durante la dataroom ENI. In figura i pozzi 8,10, 7, 6, 12, 11 sono rappresentati da SW a NE come allineati sulla linea sismica ee'. La scala verticale (z) è in metri di profondità (m); le quote della scala verticale (z) sono da riferire alla tavola rotary (T.R. espressa in metri) riportata in alto a destra del pozzo; sotto la denominazione del pozzo è riportata la proiezione del pozzo sulla linea sismica ee' in km (calcolata con il software Kingdom).

Interpretazione della sezione sismica ee'

Rispetto alla sezione DD' l'aspetto più importante che differenzia questa sezione è la presenza nella parte E del bacino della formazione di Serrapotamo - SRP al posto del Flysch di Galestrino - FGY2, che si rinviene anche in questo caso in onlap sulle formazioni dell'alto strutturale generato dalle strutture FI1 e FI2 sotto il pozzo 10 (Figura 5.14), entrambe a carattere estensionale e con rigetti di massimo 100 msec. Il T5 anche in questo caso presenta un rigetto di 800 msec e arriva a dislocare anche le unità oligoceniche del Flysch di Albidona. La struttura R1 ha un rigetto di circa 100 msec e disloca tutte le unità fino al top del Flysch di Albidona.

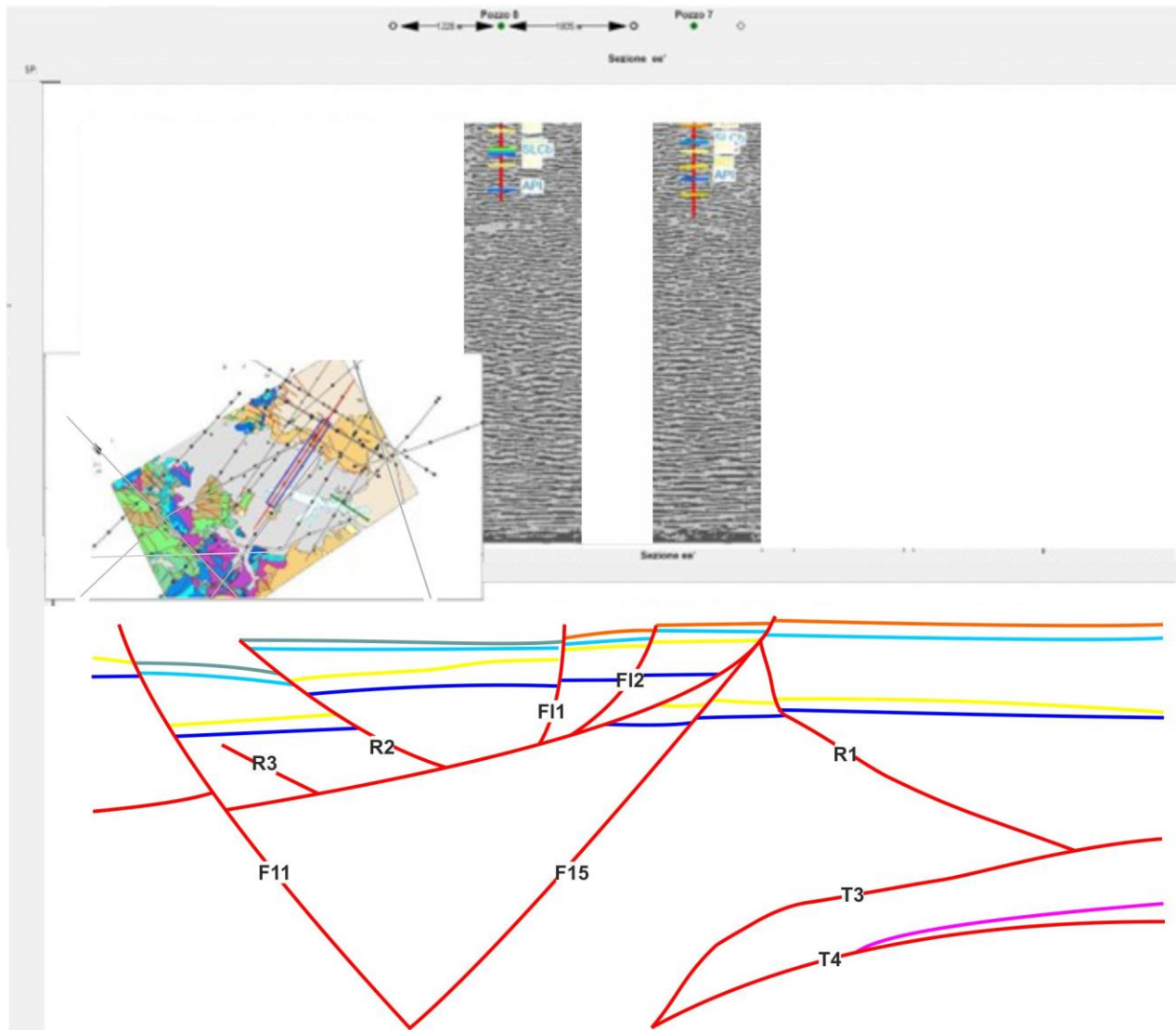


Figura 5.14 Confronto tra la linea sismica ee' non-interpretata (in alto) in cui sono proiettati i dati del pozzo 8, 7 e la linea sismica interpretata (in basso) nella quale sono riportate le denominazioni delle strutture maggiori individuate (Elaborazione in Kingdom software).

Sezione EE'

L'interpretazione della sezione EE' non si discosta molto dalle precedenti dal punto di vista strutturale. Ciò che cambia sono gli spessori delle formazioni: della Lagonegro I nella parte W e dell'unità Irpina nella parte E (Figura 5.15).

La motivazione dell'ispessimento della Lagonegro I nella parte W è dovuto ai dati di superficie. Infatti, nella zona in cui ricade la sezione, la Lagonegro II è molto esposta e prevalentemente erosa e la Lagonegro I si ritrova in affioramento (così come visto anche nella sezione BB'). Considerato che non ci sono dati che dimostrano una profondità della piattaforma Apula in quel punto minore di 1000 m è stato necessario immaginare uno spessore più alto delle unità Lagonegresi rispetto ai casi precedenti.

L'ispessimento dell'Unità Irpine nell'immediato intorno del pop-up compreso fra R3 e T5 diminuisce notevolmente in corrispondenza del retroscorrimento R1, come definito dai dati di

pozzo 11, 12 e 13, verso NE e con riferimento alle stesse unità presenti nelle sezioni più a N. Contrariamente in questo punto sembra essere maggiore lo spessore della Unità Lagonegrese (Figura 5.15), similmente a quanto interpretato per la sezione BB'.

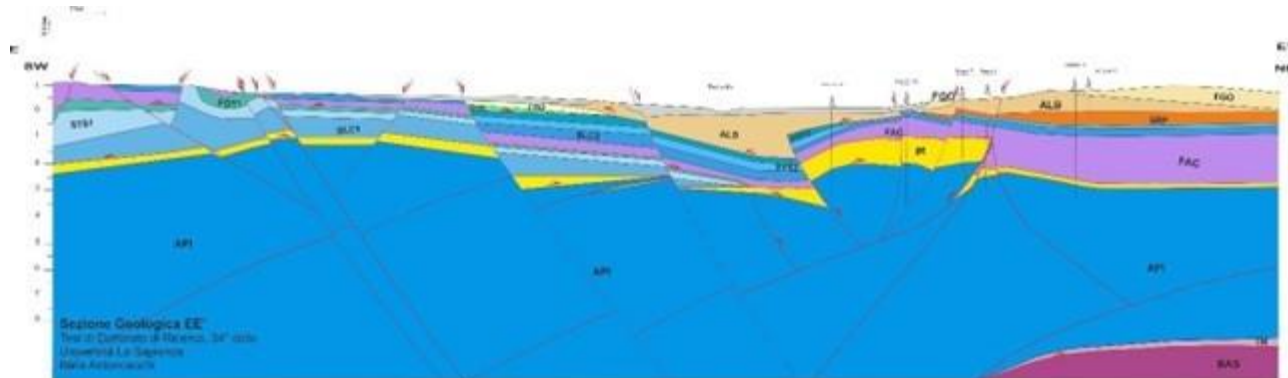


Figura 5.15 Sezione geologica EE' realizzata dall'analisi dei vincoli superficiali e profondi relativi all'area in cui ricade la sezione sismica ee'. I colori e la denominazione delle unità coincidono con quelle riportate nello schema delle unità geologico strutturali utilizzate (Figura 3.3). Le scale verticale e orizzontale sono in km e riportate in alto a sinistra.

5.6 Sezione FF'

Vincoli superficiali e profondi

Per la costruzione della sezione geologica FF' (Figura 3.37) sono stati utilizzati i vincoli superficiali presenti nella carta geologico – strutturale realizzata (Allegato 1), considerato anche che la sezione in oggetto ricade in area rilevata del settore sudoccidentale dove in sostanza sono presenti le Unità dei Flysch deformate da strutture estensionali di scarso rigetto immergenti a SW, attribuibili al sistema di Faglie Est della Val d'Agri – EAFS. Rispetto al foglio 505 Moliterno non ci sono grandi differenze se non la diversa estensione e distribuzione del Flysch di Gorgoglione che risulta ridimensionato nella carta strutturale elaborata (Figura 4.4).

Le informazioni presenti nell'area, con particolare riguardo alle unità e alle strutture, sono state utilizzate per la correlazione del dato strutturale in profondità riportando tutte le informazioni di superficie nel software Kingdom.

I vincoli profondi utilizzati per la costruzione della Sezione geologica FF' consistono principalmente nelle stratigrafie dei pozzi 9, 10, 12,16 (Figura 5.16). Le stratigrafie dei pozzi ed in particolare i top definiti delle unità geologiche principali sono state proiettate sulla linea sismica ff' attraverso il software Kingdom al fine di poter procedere all'interpretazione. Il risultato è riportato in Figura 5.17.

I profili di pozzo 9, 10 e 12 sono già stati commentati per le sezioni precedenti.

STRATIGRAFIA DEI POZZI DELL'AREA DI STUDIO
ALLINEAMENTO DEI POZZI IN SEZIONE FF' - DIREZIONE SW - NE

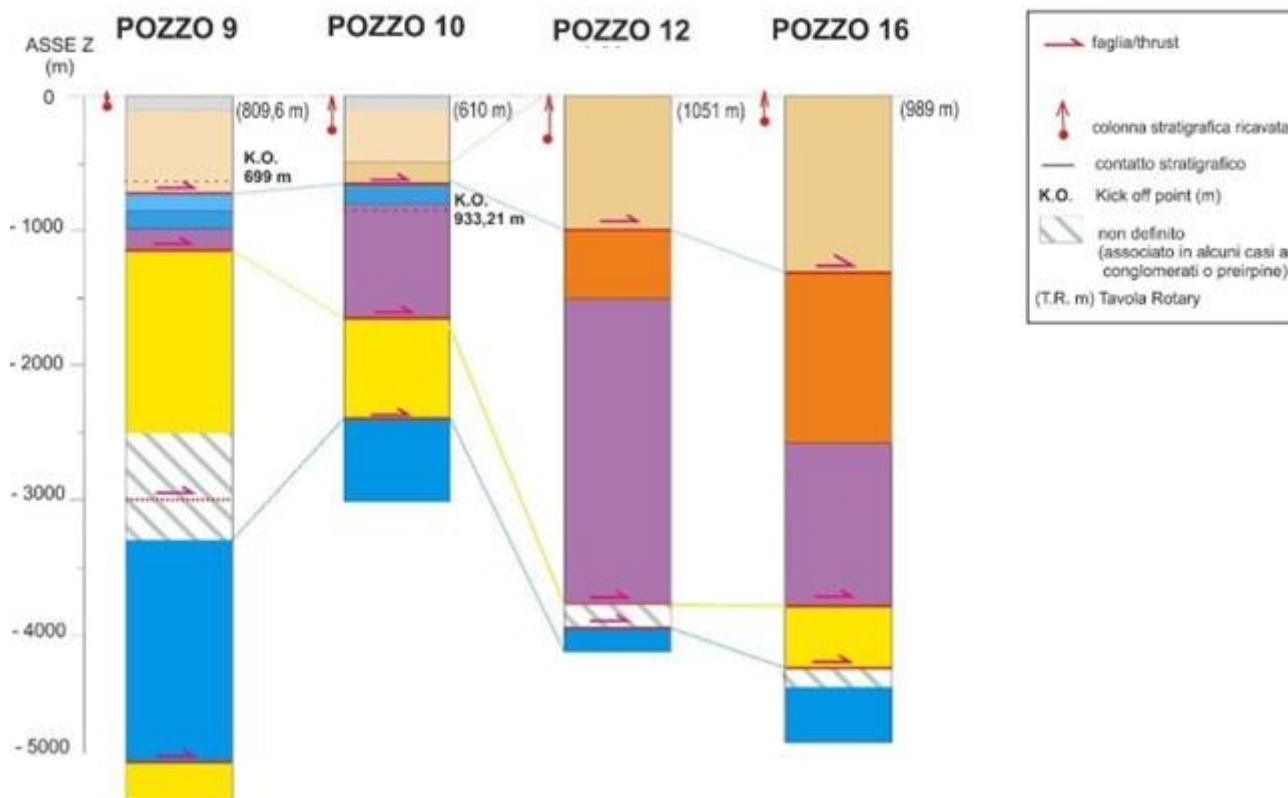


Figura 5.16 Rappresentazione della stratigrafia dei profili 1:1000 cartacei consultati durante la dataroom ENI. In figura i pozzi 9, 10, 12, 16 sono rappresentati da SW a NE come allineati sulla linea sismica ff'. La scala verticale (z) è in metri di profondità (m); le quote della scala verticale (z) sono da riferire alla tavola rotary (T.R. espressa in metri) riportata in alto a destra del pozzo ; sotto la denominazione del pozzo è riportata la proiezione del pozzo sulla linea sismica ff' in km (calcolata con il software Kingdom).

Interpretazione della sezione sismica ff'

Nell'allineamento dei pozzi sulla sezione sismica ff' troviamo quindi (Figura 5.17):

- un aumento dello spessore del Flysch di Albidona;
- un abbassamento dei principali top di unità individuate (top Lagonegro II- LAGII, top Unità Irpine - IR e top piattaforma Apula - API);
- la presenza a SW del Flysch Galestrino – FGY2 dell'Unità di Lagonegro II e a NE dell'Unità di Serrapotamo – SRP.

In base a quanto interpretato in sezione sismica, dunque, si osserva ancora la struttura di pop-up generata dalle strutture R3, R2, FI1, FI2 e T5. T5 con rigetto di 800 msec arriva a ridosso della faglia estensionale F15 immergente a SW che borda il lato E del bacino e ha un rigetto di 200 msec. Infine, anche in questa sezione si ritrova il retroscorrimento R1 che ha un rigetto di circa 100 msec. T4 si rinviene a 4600 msec di profondità.

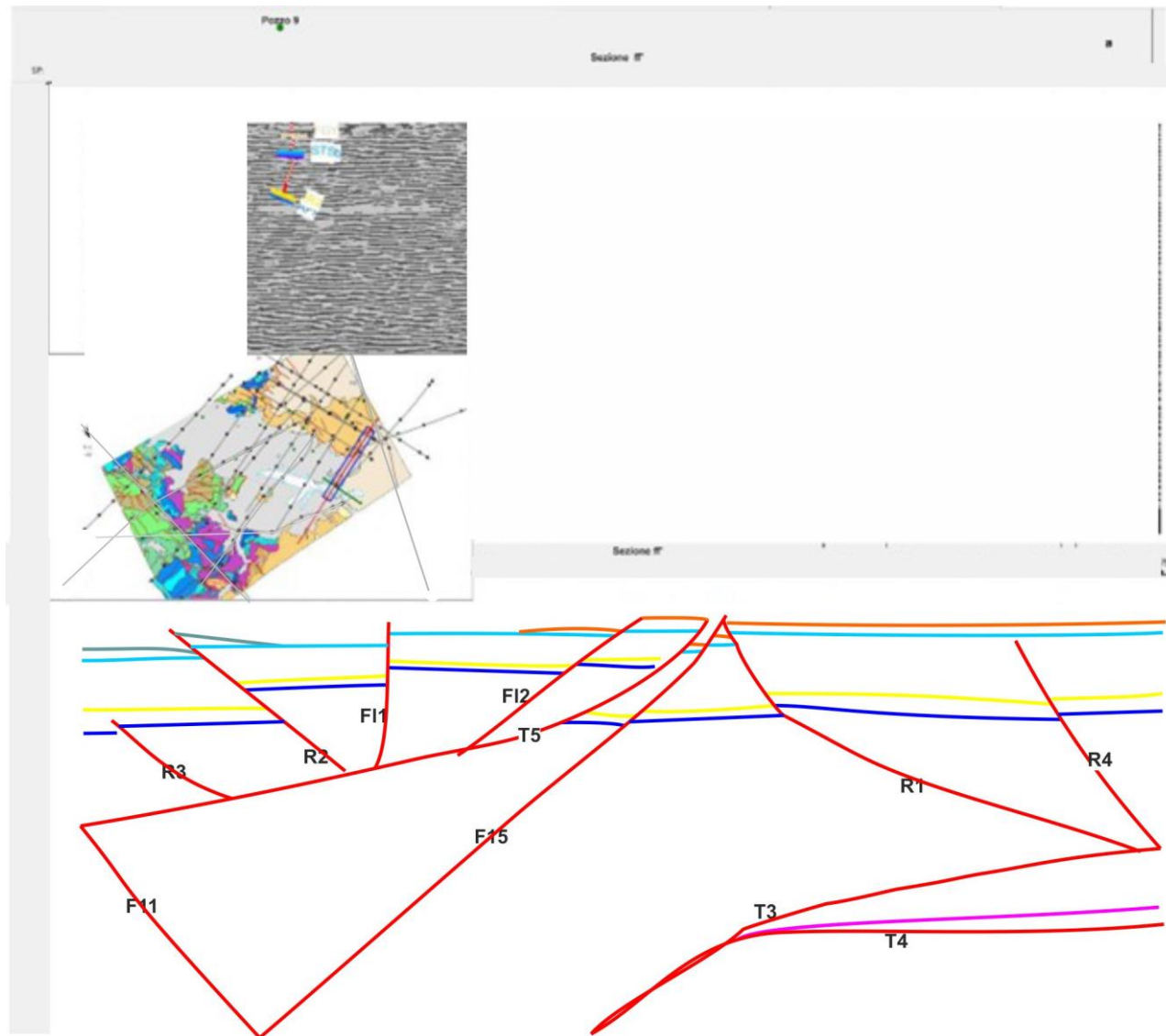


Figura 5.17 Confronto tra la linea sismica ff' non-interpretata (in alto) in cui sono proiettati i dati del pozzo 8, 7 e la linea sismica interpretata (in basso) nella quale sono riportate le denominazioni delle strutture maggiori individuate (Elaborazione in Kingdom software).

Sezione FF'

La Sezione FF', rappresentata in Figura 5.18, copre solo la parte E del bacino e non intercetta la faglia F11. Al contrario, mostra in dettaglio la parte a ridosso della struttura F15. In questa linea la struttura T5 (1000 m di rigetto) è a ridosso della F15 (circa 100 m di rigetto). Sono presenti i retroscorrimenti R3, R2 e le faglie F11 e F12, entrambe con cinematica estensionale. In aggiunta alle precedenti sezioni, nella sezione FF' si incomincia a vedere il back thrust R4 che caratterizza la struttura di Tempa del Vento.

Come nel caso di BB' e EE' in questa sezione l'Unità Lagonegro II ha spessori maggiori rispetto all'Unità Irpina che si assottiglia verso NE.

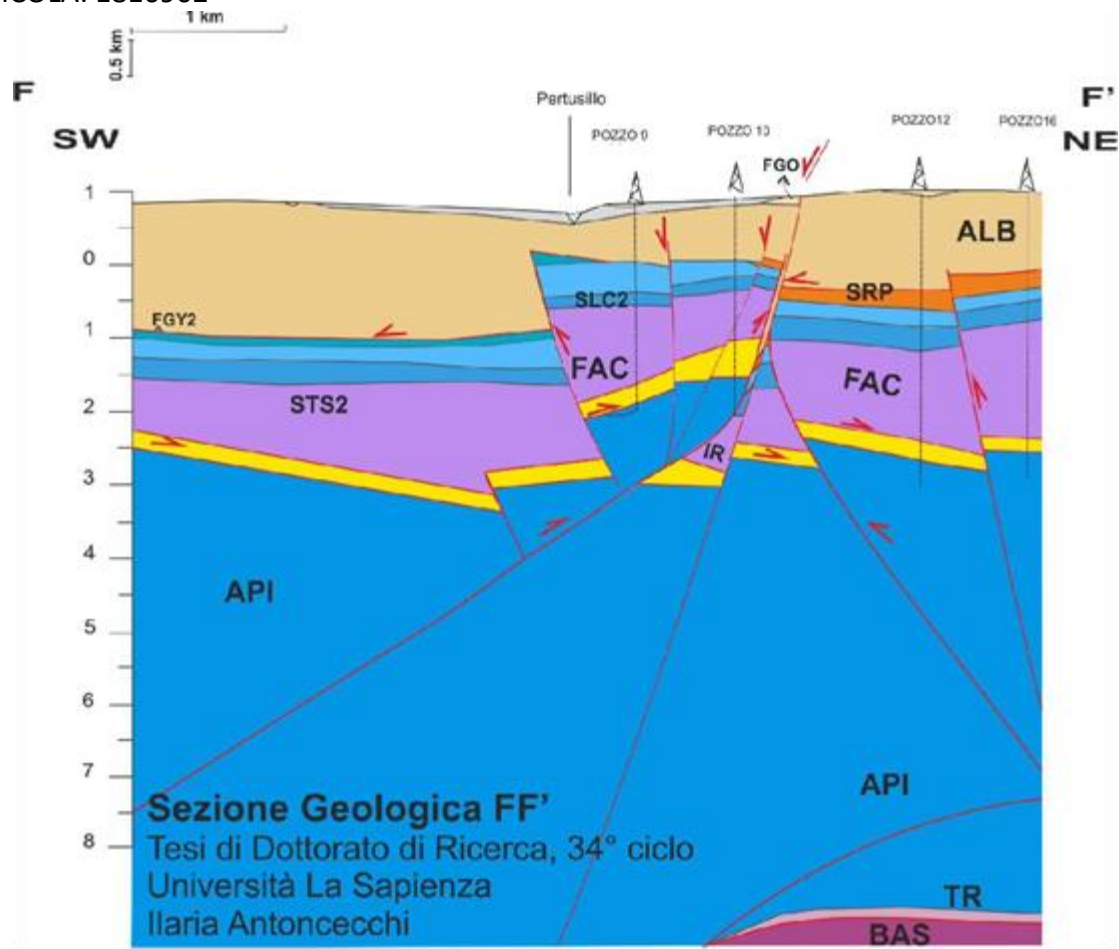


Figura 5.18 Sezione geologica FF' realizzata dall'analisi dei vincoli superficiali e profondi relativi all'area in cui ricade la sezione sismica ff'. I colori e la denominazione delle unità coincidono con quelle riportate nello schema delle unità geologico strutturali utilizzate (Figura 3.3). Le scale verticale e orizzontale sono in km e riportate in alto a sinistra.

5.7 Sezione GG'

Vincoli superficiali e profondi

Per la costruzione della sezione geologica GG' (Figura 3.37) sono stati utilizzati i vincoli superficiali presenti nella carta geologico – strutturale realizzata (Allegato 1), considerato anche che la sezione in oggetto non ricade in area rilevata e che non sono presenti significativi scostamenti rispetto la carta geologica riportata nel foglio 505 Moliterno.

Le informazioni presenti nell'area, con particolare riguardo alle unità e alle strutture, sono state utilizzate per la correlazione del dato strutturale in profondità riportando tutti i dati di superficie nel software Kingdom.

I vincoli profondi utilizzati, per la costruzione della sezione geologica GG' consistono principalmente nella stratigrafia del Pozzo 9, già descritta in precedenza per l'interpretazione delle sezioni BB', FF' (es. Figura 5.4; Figura 5.16) e del Pozzo 16 (Figura 5.19).

Per quanto concerne il profilo del Pozzo 16, coincidente con il profilo del pozzo pubblico Tempa del Vento, si riportano alcune delle informazioni più rilevanti. Come per i pozzi 11, 12 e 13 è riportata

una "Unità Irpina", ovvero appartenente al bacino Irpino reinterpretato come Unità del Flysch di Albidona (Figura 5.19).

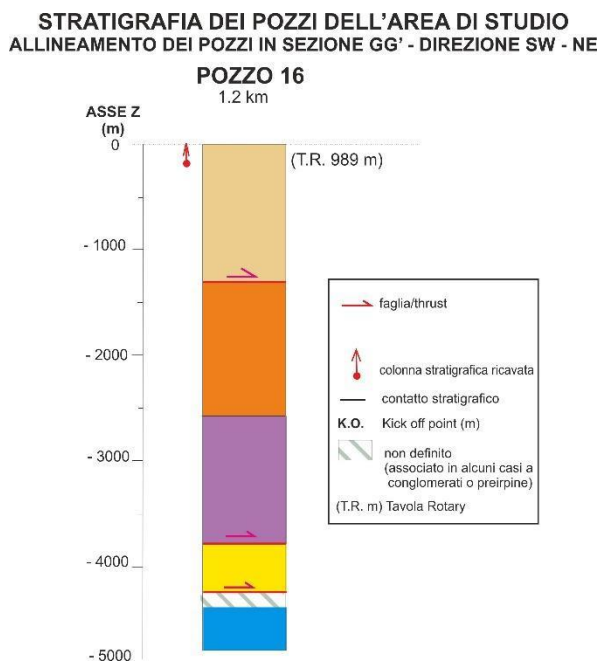


Figura 5.19 Rappresentazione della stratigrafia dei profili 1:1000 cartacei consultati durante la dataroom ENI. In figura il pozzo 16 proiettato sulla linea sismica gg'. La scala verticale (z) è in metri di profondità (m); le quote della scala verticale (z) sono da riferire alla tavola rotary (T.R. espressa in metri) riportata in alto a destra del pozzo; sotto la denominazione del pozzo è riportata la proiezione del pozzo sulla linea sismica gg' in km (calcolata con il software Kingdom).

Tale unità si trova in sovrascorrimento su una sottostante unità denominata nel profilo di pozzo come "Unità Liguride", che come per gli altri pozzi 11, 12 e 13 è stata reinterpretata come Unità di Serrapotamo (membro oligocenico dell'Unità di Lagonegro II). Le formazioni sottostanti l'Unità Liguride, vengono tutte raccolte all'interno del profilo di pozzo, in una Unità Lagonegrese indistinta con spessori di circa 1200 m. L'Unità Irpina ha uno spessore di circa 400 m e sovrascorre su uno spessore di unità non ben definita e descritta da conglomerati a $z = -4200$ m. A $z = -4300$ m viene segnalata l'unità di piattaforma Apula fino a $z = -4909$ m.

Le stratigrafie dei pozzi ed in particolare i top definiti delle unità geologiche principali sono state proiettate sulla linea sismica gg' attraverso il software Kingdom al fine di poter procedere all'interpretazione. Il risultato è riportato in Figura 5.20.

Interpretazione della sezione sismica gg'

In questa sezione è ancora possibile riconoscere alcune delle principali strutture precedentemente individuate. In particolare, sono presenti in parte la faglia normale F12, la struttura T5 (caratterizzata da 700 msec di rigetto), la faglia normale F15 (200 msec di rigetto) e la struttura R1 di 200 msec di rigetto (Figura 5.20).

Vi è un ispessimento delle Unità della Lagonegro II e un assottigliamento dell'Unità Irpina come risulta nelle sezioni EE', BB', FF' e come deducibile anche dal pozzo 16. Anche in questo caso la sezione sismica e la proiezione del pozzo 16 permettono di riconoscere la struttura R4 di Tempa del

Vento (che rialza i top delle unità stratigrafiche interpretate). I retroscorrimenti ricollegano alla struttura T3. La struttura T4 è riconosciuta a circa 4500 msec.

R3 e R4 si

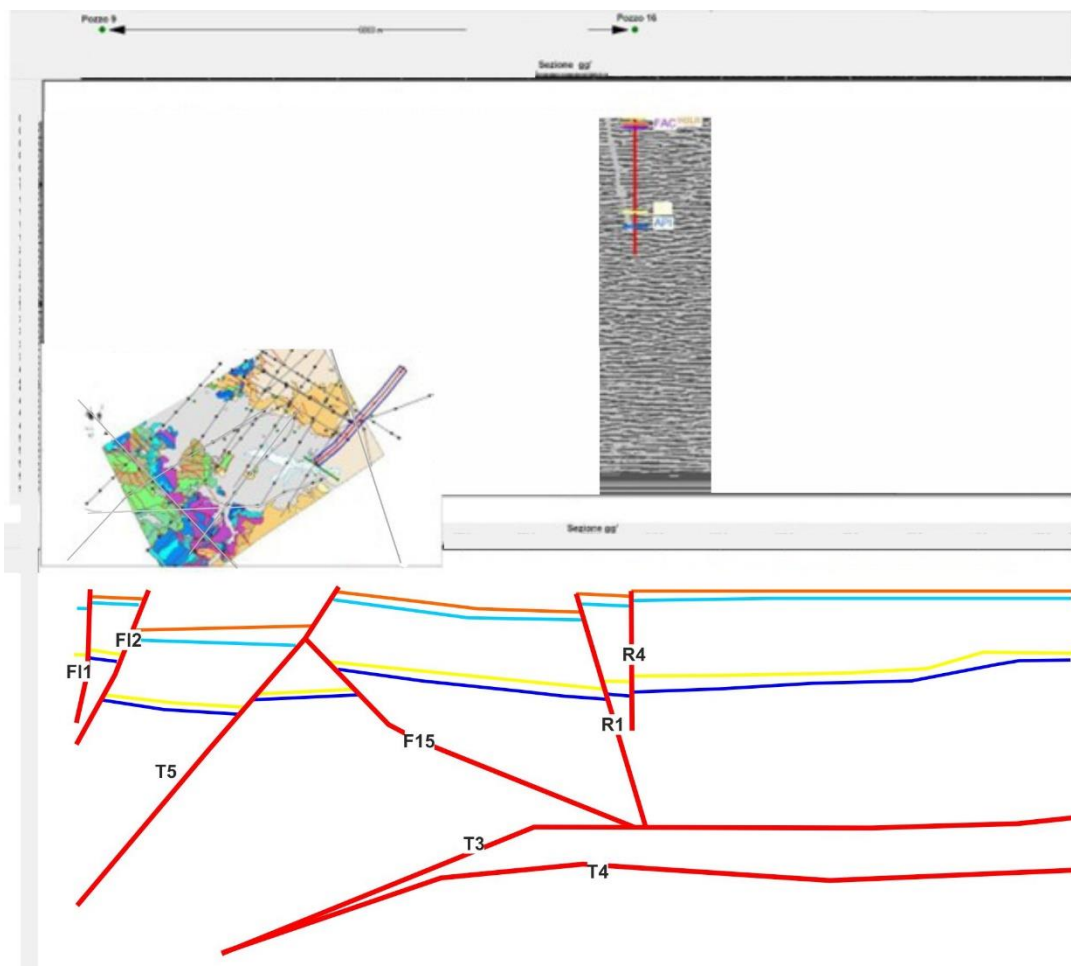


Figura 5.20 Confronto tra la linea sismica gg' non-interpretata (in alto) in cui sono proiettati i dati del pozzo 9,16 e la linea sismica interpretata (in basso) nella quale sono riportate le denominazioni delle strutture maggiori individuate (Elaborazione in Kingdom software).

Sezione GG'

La sezione sismica gg' non è perfettamente parallela alle altre sezioni, poiché la prima parte risulta essere leggermente più NW-SE per poi proseguire parallelamente alle linee precedenti nella parte più esterna dell'area di studio considerata. Questo fa sì che nella parte a W le diverse strutture individuate sembrano più vicine mentre la parte a E sembri più distanziata. Ad ogni modo l'interpretazione di questa linea rispetta quanto già visto nelle precedenti EE', BB' e FF'. Dato che la sezione GG' arriva anche ad intercettare la proiezione del pozzo 16 a 1,8 km di distanza, è possibile anche interpretare in parte la struttura di Tempa del Vento al di sotto del pozzo 16. In particolare,

è stato indentificato un ulteriore retroscorrimento (R4) che porta i top delle unità analizzate in posizione più alta rispetto alla struttura R1 (Figura 5.21).

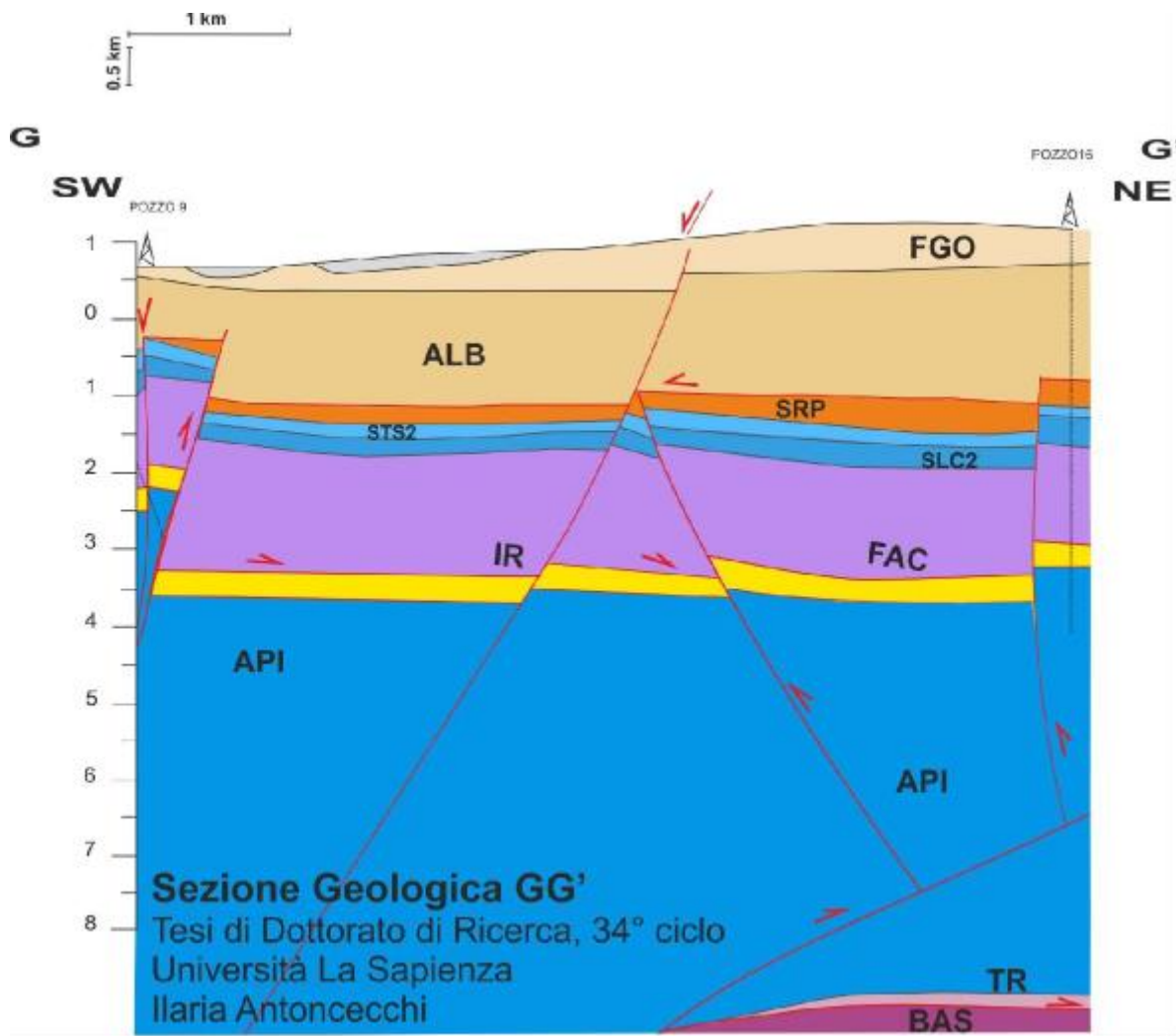


Figura 5.21 Sezione geologica GG' realizzata dall'analisi dei vincoli superficiali e profondi relativi all'area in cui ricade la sezione sismica gg'. I colori e la denominazione delle unità coincidono con quelle riportate nello schema delle unità geologico strutturali utilizzate (Figura 3.3). Le scale verticale e orizzontale sono in km e riportate in alto a sinistra.

5.8 Alcune considerazioni sulle sezioni parallele alle strutture appenniniche

Una volta analizzate le sezioni sismiche in direzione SW-NE, sono state fatte anche alcune verifiche sulle sezioni orientate in direzione NW-SE (in line) denominate pp', qq', rr', ss' (acquisizione 3D ENI) e tt', acquisizione 2D, in Figura 3.1.

In particolare, dai segnali riportati in queste sezioni e dai dati di pozzo, sono state verificate in 3D le strutture R1, R4, T3 e T4 ed è stato possibile interpretare le faglie denominate STR1, STR 2, STR 4, STR 5 probabilmente riconducibili a faglie di carattere trascorrente e trastensive. I rigetti sono comunque importanti: ad esempio, nella sezione sismica pp' STR5 ha un rigetto di circa 400 msec; STR1 300 msec; STR 2 200 msec. Tali rigetti sono variabili tra le diverse sezioni pp', qq', rr', ss', tt' (es. Figura 5.22, Figura 5.23, Figura 5.24, Figura 5.25, Figura 5.26).

La presenza di queste strutture è compatibile con l'assetto strutturale e la tettonica dell'area di studio che, anche nella carta geologico-strutturale prodotta e in quella riferita al foglio 505, è

caratterizzata dalla presenza di alcune faglie trascorrenti. Tuttavia, la loro interpretazione sulle sezioni sismiche rimane limitata alla parte E dell'area di studio non essendo presente un dato sismico della stessa qualità e con la stessa orientazione nella parte centrale del bacino e nel lato W dell'area di studio.

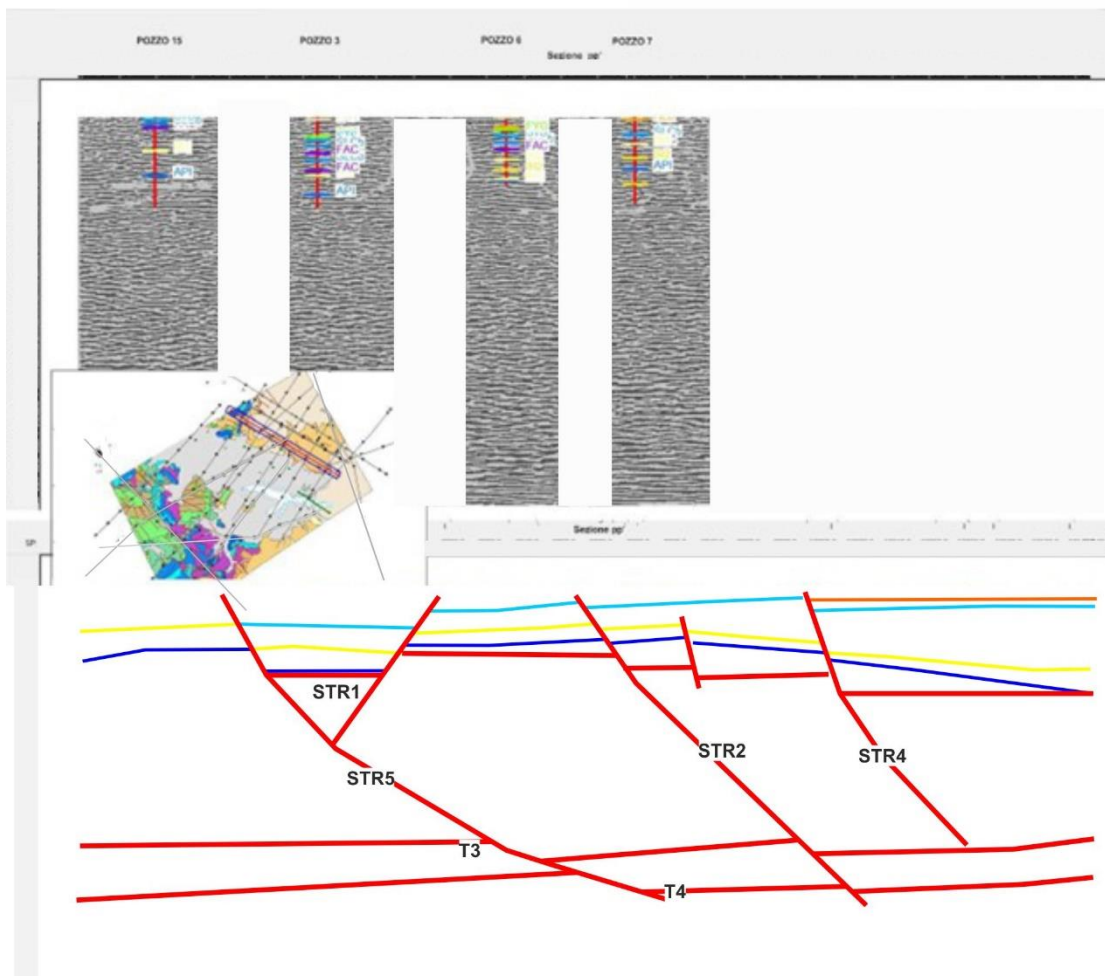


Figura 5.22 Confronto tra la linea sismica pp' non-interpretata (in alto) in cui sono proiettati i dati del pozzo 15, 3, 6, 7 e la linea sismica interpretata (in basso) nella quale sono riportate le denominazioni delle strutture maggiori individuate (Elaborazione in Kingdom software). L'interpretazione mette in luce la presenza delle strutture STR1, STR2, STR4 e STR 5 e delimita tridimensionalmente R1, T3 e T4.

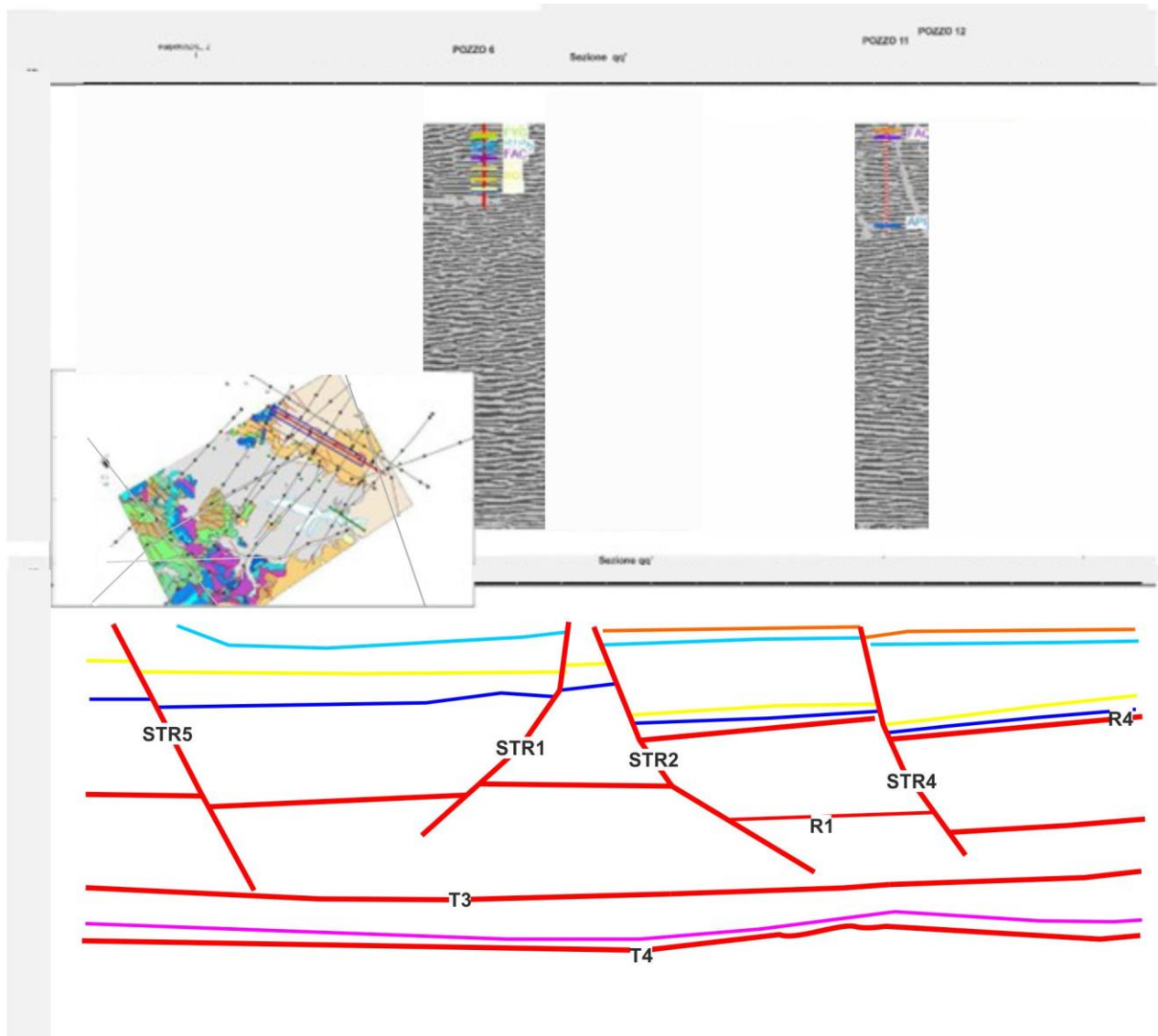


Figura 5.23 Confronto tra la linea sismica qq' non-interpretata (in alto) in cui sono proiettati i dati del pozzo 6,11,12 e la linea sismica interpretata (in basso) nella quale sono riportate le denominazioni delle strutture maggiori individuate (Elaborazione in Kingdom software). L'interpretazione mette in luce la presenza delle strutture STR1, STR2, STR4 e STR 5 e delimita tridimensionalmente R1, T3 e T4.

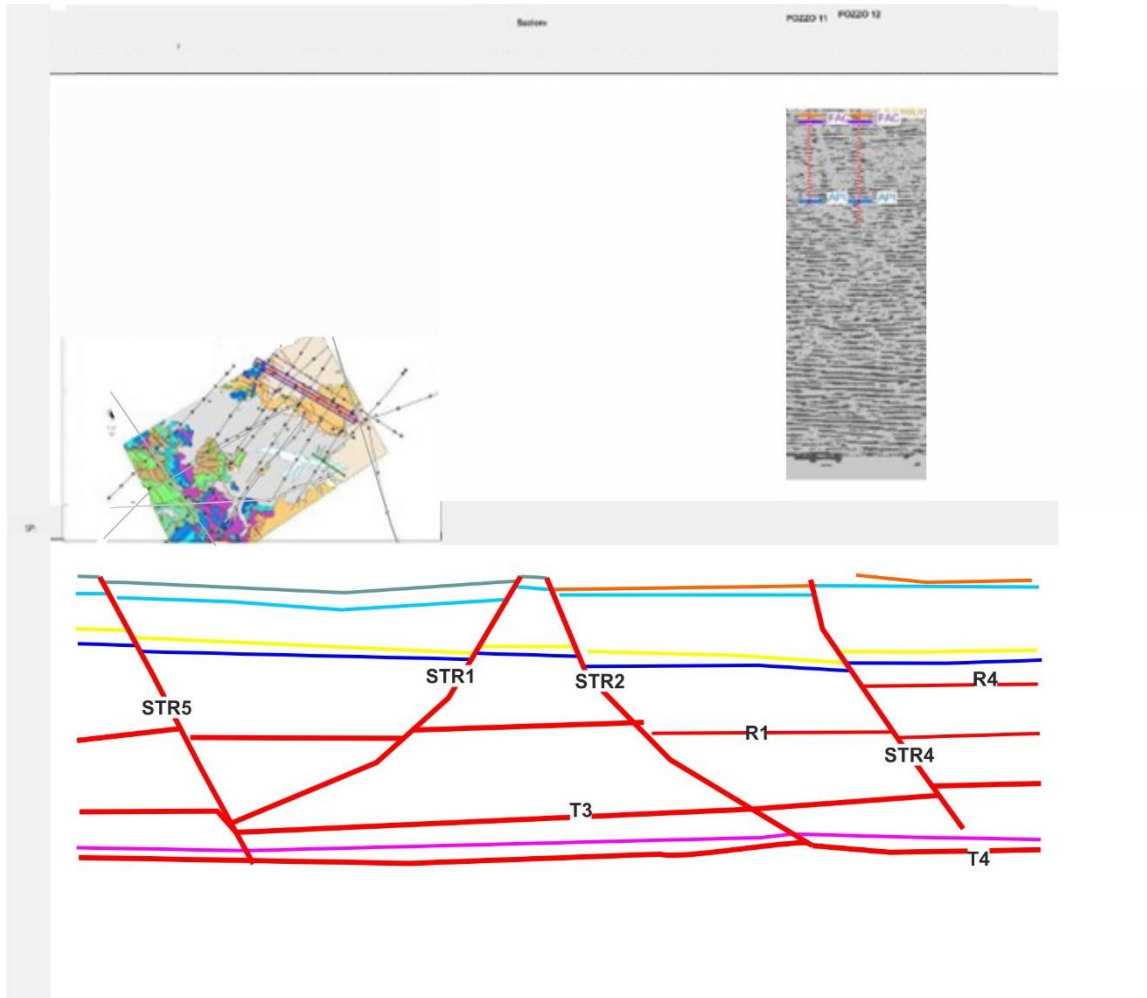


Figura 5.24 Confronto tra la linea sismica rr' non-interpretata (in alto) in cui sono proiettati i dati del pozzo 11, 12 e la linea sismica interpretata (in basso) nella quale sono riportate le denominazioni delle strutture maggiori individuate (Elaborazione in Kingdom software). L'interpretazione mette in luce la presenza delle strutture STR1, STR2, STR4 e STR 5 e delimita tridimensionalmente R1, T3 e T4.

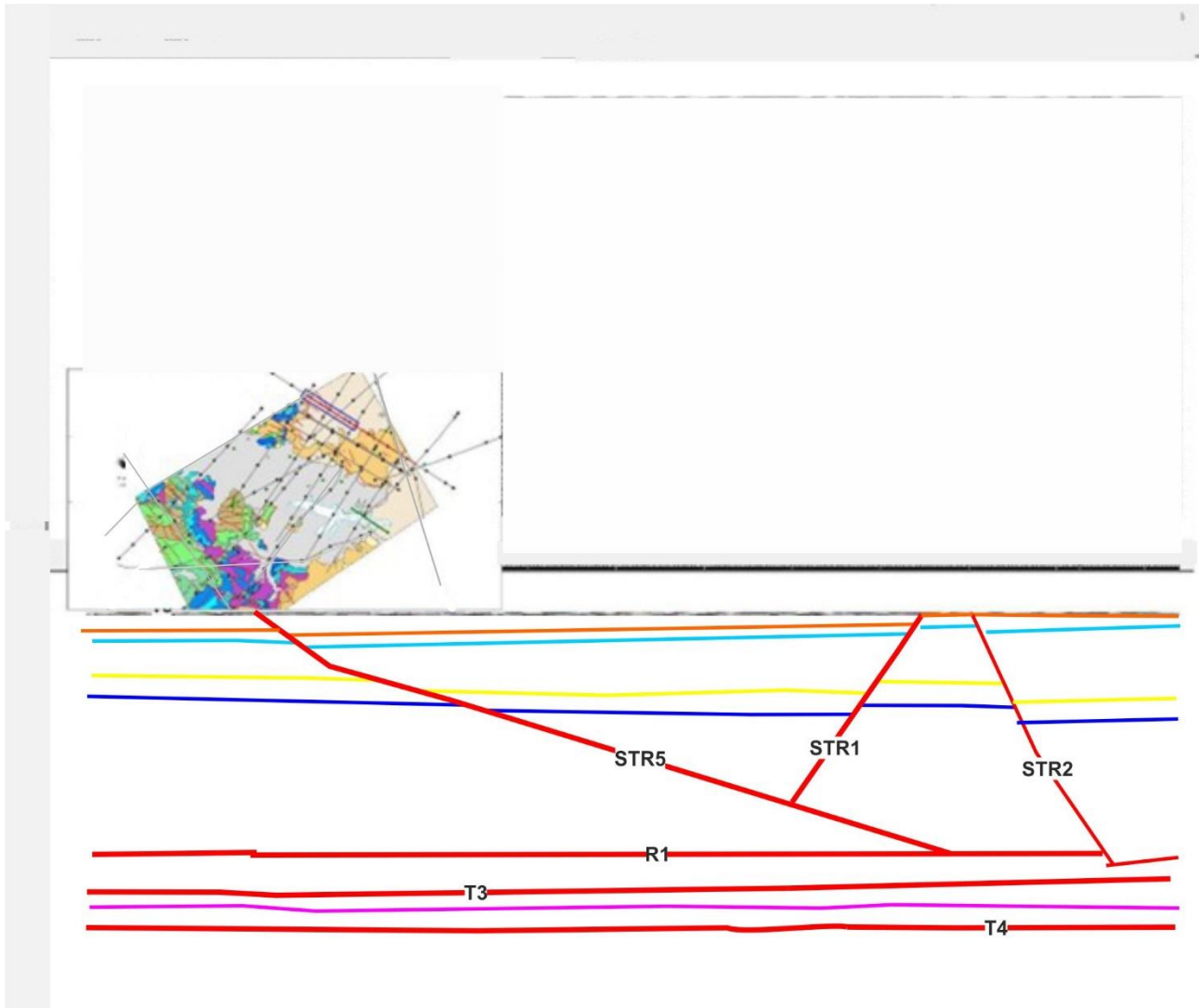


Figura 5.25 Confronto tra la linea sismica ss' non-interpretata (in alto) e la linea sismica interpretata (in basso) nella quale sono riportate le denominazioni delle strutture maggiori individuate (Elaborazione in Kingdom software). L'interpretazione mette in luce la presenza delle strutture STR1, STR2, STR 5 e delimita tridimensionalmente R1, T3 e T4.

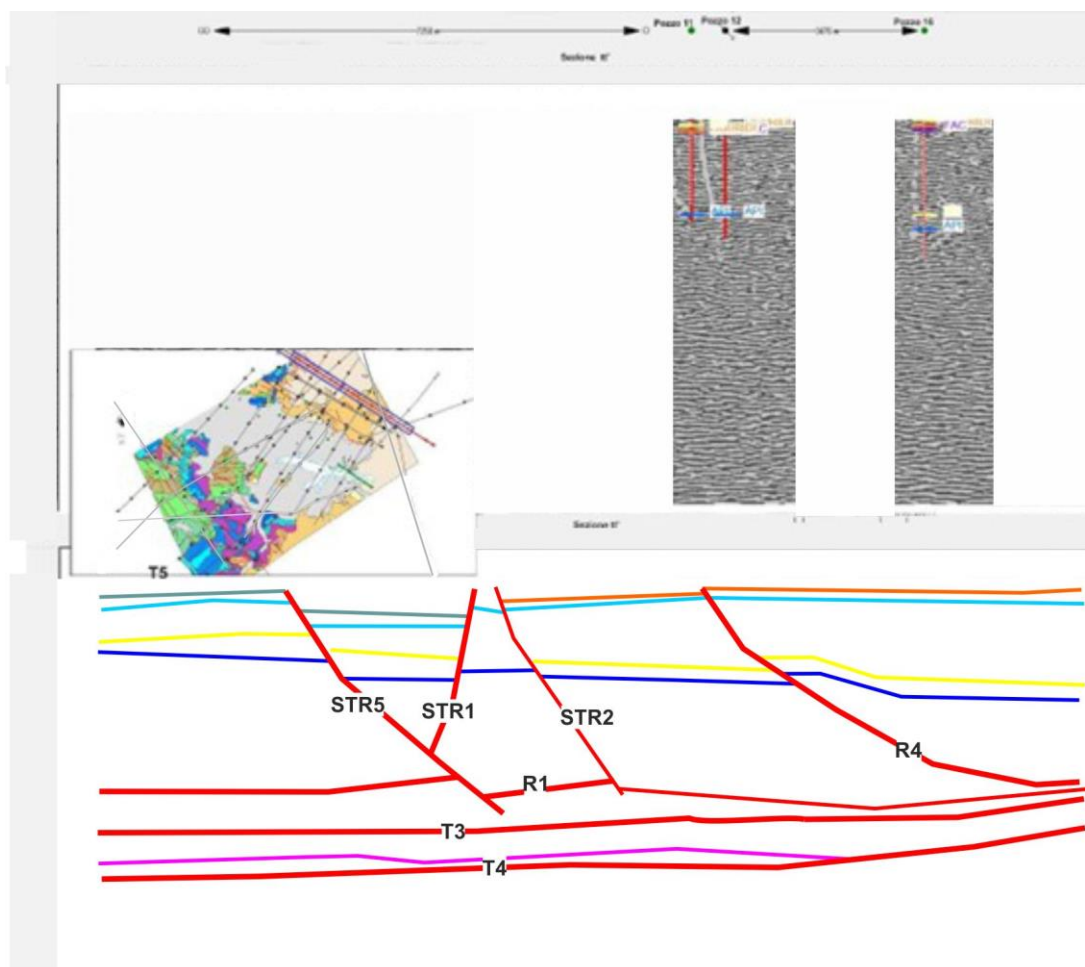


Figura 5.26 Confronto tra la linea sismica tt' non-interpretata (in alto) in cui sono proiettati i dati del pozzo 11, 12, 16 e la linea sismica interpretata (in basso) nella quale sono riportate le denominazioni delle strutture maggiori individuate (Elaborazione in Kingdom software). L'interpretazione mette in luce la presenza delle strutture STR1, STR2, STR4 e STR 5 e delimita tridimensionalmente R1, T3 e T4.

6. INTERPRETAZIONE E CONFRONTO CON LA LETTERATURA ESISTENTE

6.1 Interpretazione strutturale dell'area di studio e confronto con la letteratura

L'interpretazione strutturale effettuata attraverso la realizzazione delle sezioni AA'-GG' e pp'-tt' permette di descrivere compiutamente le strutture presenti nell'area e le principali fasi tettoniche che hanno interessato l'area di studio.

In primo luogo, si può distinguere una fase compressiva di età miocenico-pliocenica associata alla formazione della struttura a duplex della piattaforma apula generata dai thrust T1, T5, T3 e T4. Come conseguenza della formazione dei duplex sono presenti diverse *fault propagation fold* all'interno delle unità Lagonegresi con continuità laterale di chilometri a testimonianza di un notevole trasporto tettonico verso NE del bacino (il dato in sezione registra sicuramente una traslazione maggiore di 23 km – sezioni DD', EE' – che prosegue ulteriormente a N e E dell'area di studio in base a quanto riportato dalle carte strutturali limitrofe del Foglio CARG). Si riconoscono anche retroscorrimenti (vedi R1-R4), che coinvolgono i depositi oligocenici e sovrascorrimenti fuori

sequenza quali ad esempio quello presente nella sezione AA'. Il trasporto per diversi chilometri delle unità lagonegresi nonché la loro presenza in affioramento (specialmente della Lagonegro I) dimostra la presenza in profondità di sollevamenti locali della piattaforma apula che in alcuni settori (vedi Grumento Nova) raggiunge profondità di almeno 1000 m (questo dato è coerente con quanto riportato in letteratura anche da altri autori quali Nicolai & Gambini, 2007; Patacca e Scandone, 2007). In sostanza la fase compressiva ha portato alla formazione di una complessa struttura imbricata a geometria antiforme già descritta da Scrocca et al. (2005). Un analogo in affioramento è l'anticlinale di Alianello (vedi Patacca e Scandone, 2007).

Una seconda fase riconosciuta è a cinematica trascorrente-estensionale e di età pliocenico-pleistocenica. A questa fase corrisponde la formazione del pop-up riconosciuto nelle sezioni BB'-GG' formato dai retroscorrimenti R3, R2 e dalle faglie FI1 e FI2 e dalla parte terminale del thrust T5. Questo pop-up è stato riconosciuto anche in letteratura come corrispondente alla struttura di Monte Alpi, di cui analogo in affioramento si rinviene a M. Alpi di Latronico (a circa 40 km di distanza).

Alcuni autori (es. Van Dijk et al. 2000; Ghisetti e Vezzani, 1981; Van Dijk e Okkes, 1990; 1991) riconducono questa antiforme a una struttura a fiore positiva di carattere transpressivo. Altri autori, tuttavia hanno messo in evidenza il carattere estensionale di alcune faglie della struttura di Monte Alpi riconducendole ad una fase recente dell'evoluzione della struttura e a una recente sismicità dell'area di studio. Secondo il modello evolutivo della struttura di Monte Alpi proposto da vari autori (ad esempio Corrado et al., 2002; Mazzoli et al. 2006) la struttura carbonatica, dapprima formatasi in un contesto deposizionale di ambiente carbonatico e interessata dalla tipica struttura a horst e graben della piattaforma Apula (fino al tardo Messiniano; La Bruna et al., 2018) è stata soggetta durante il Pliocene Inferiore a seppellimento (causato dalla fase di thrusting secondo un modello *thick-skinned*), quando ha sperimentato anche il carico litostatico dovuto al sovrascorrimento di più di 4000 m di materiale, e successivamente, a partire dal tardo Pliocene-Pleistocene Inf., a sollevamento. Il sollevamento è avvenuto prima a un tasso più lento dovuto al thrusting del tardo Pliocene all'interno della piattaforma Apula secondo un modello *thick-skinned* e alla fase trascorrente del primo Pleistocene; poi tra il tardo Pleistocene e l'Olocene, a un tasso più veloce, a causa di una fase tettonica estensionale facilitata dalla contestuale rimozione meccanica dei depositi al tetto della faglia e dal sollevamento del letto (con relativa erosione) (Figura 6.1, Figura 6.2). Tale fase risulta essere tuttora attiva e responsabile della sismicità recente nell'area.

Ad ogni modo tutti gli autori concordano nel definire Monte Alpi come una antiforme strutturatasi attraverso due faglie inverse che bordano la struttura in profondità nella piattaforma Apula, successivamente alla fase compressiva del Pliocene Inferiore che ha generato la struttura a duplex nella piattaforma.

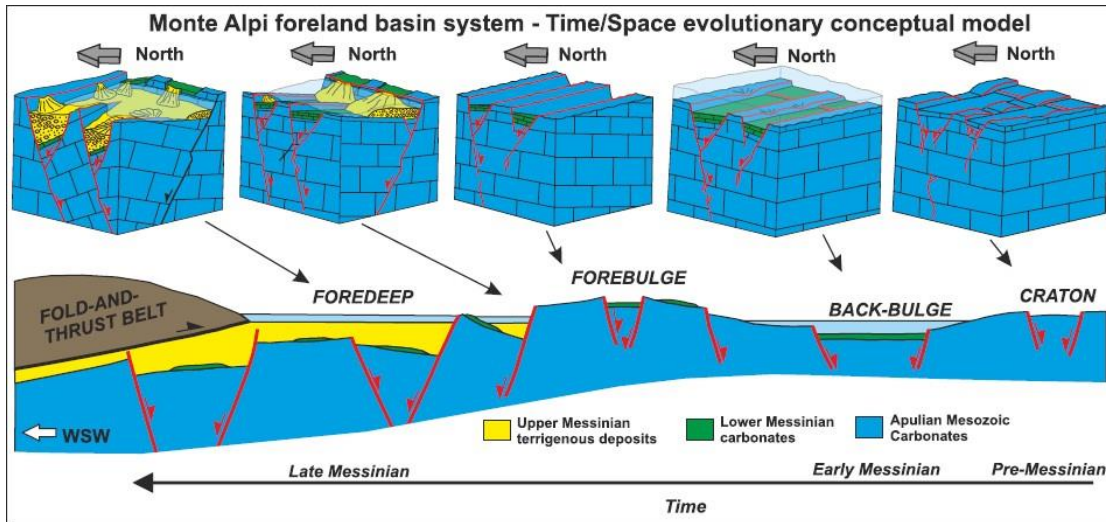


Figura 6.1 Schema evolutivo (da La Bruna et al., 2018) del sistema di bacino di avampaese del Monte Alpi (Pre- tardo Messiniano). Le faglie attive durante le principali fasi tettoniche sono illustrate nel diagramma 3D a blocchi, in cui si riporta anche la geometria dei depocentri.

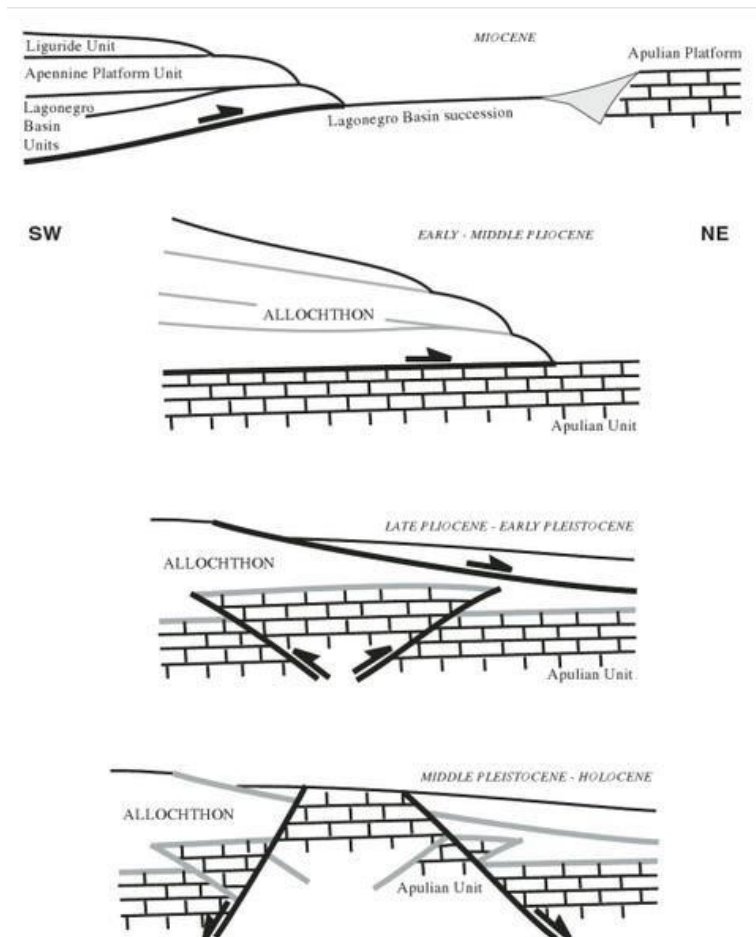


Figura 6.2 Schema tettonico evolutivo per la struttura di Monte Alpi (tardo Pliocene – Olocene). Da Mazzoli et al. (2006).

Questi modelli proposti in letteratura sono coerenti con quanto verificato dall'interpretazione sismica di questo studio. Infatti, la struttura individuata è bordata da faglie a cinematica inversa R3, R2, T5 che generano il pop-up a geometria antiforme all'interno della struttura della piattaforma apula interessata dal T5 (Figura 6.3). La componente trascorrente (che successivamente ha interessato queste strutture) è associata alle rapide variazioni di spessore delle unità della Lagonegro e delle Irpine da SW a NE. Invece la riattivazione recente con componente estensionale, originariamente inversa, è resa evidente dalla presenza delle faglie F11 e F12 che possono essere interpretate come faglie inverse riattivate in senso normale, soprattutto nel settore meridionale dell'area di studio (sezioni DD'-GG'). Infatti, in AA' le due strutture sono assenti, mentre in tutte le altre sezioni le due faglie sono entrambe estensionali.

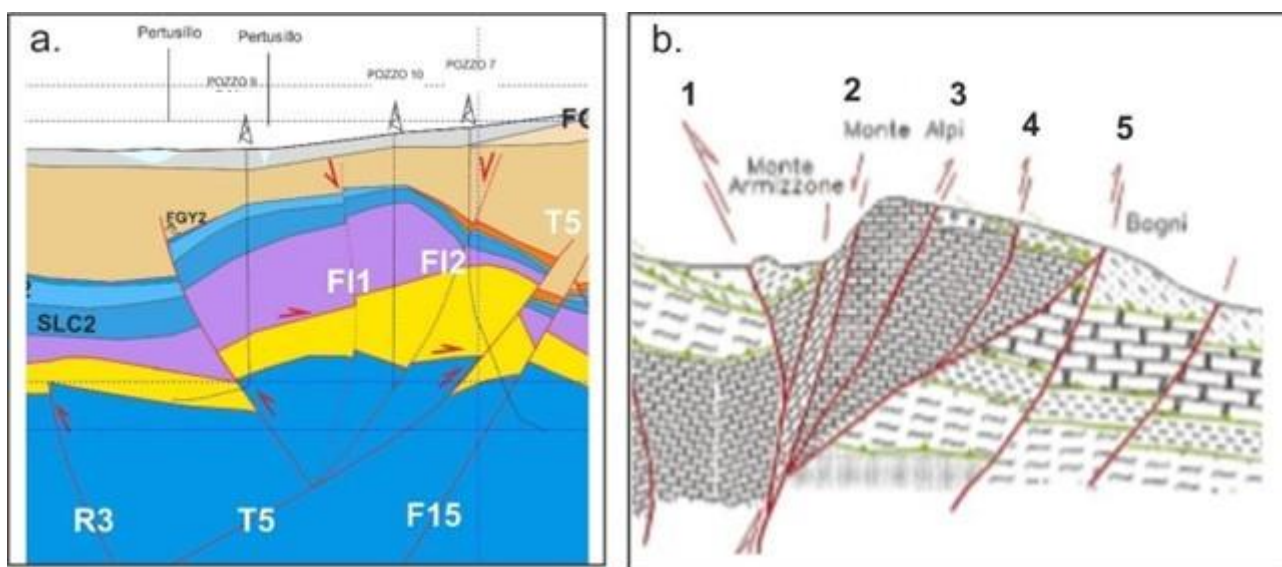


Figura 6.3 Confronto tra l'interpretazione della struttura di M. Alpi realizzata in questo studio (lettera a.) e l'interpretazione della struttura affiorante nella finestra tettonica di Monte Alpi di Latronico 40 km più a sudovest proposta da Van Dijk et al. (2000) (lettera b.). Si può osservare come la struttura sia bordata dai back-thrusts R3 e R2 sul lato SW e dal thrust T5 sul lato NE che sono analoghe alle faglie 1 e 5 dell'interpretazione di Van Dijk. Inoltre, anche la Faglia F11, probabilmente una faglia inversa riattivata come diretta, potrebbe avere un significato analogo alla faglia n.2 di Van Dijk et al. (2000). Anche la faglia F12 è da considerare come una faglia inversa riattivata in alcuni punti (in particolare nella parte N come faglia estensionale).

L'ultima fase estensionale, quaternaria, è associata anche alla presenza delle due importanti faglie F11 e F15 che bordano a E e W il bacino dell'Agri e che risultano come elementi esterni dei due sistemi identificati come EAFS e MMFS. Si tratta di faglie ad alto angolo che coinvolgono le unità pleistoceniche quaternarie e arrivano a tagliare le strutture più profonde associate alle precedenti fasi tettoniche. In particolare, la faglia F11, risulta avere un rigetto molto elevato che può arrivare anche a 1 km (rigetto ottenuto soprattutto tramite i vincoli presenti in AA', EE' e dal metodo del bilanciamento); mentre la Faglia F15 risulta avere sicuramente un rigetto molto inferiore e stimabile in qualche centinaio di m.

A riguardo delle strutture interpretate STR1, STR2, STR5, di tipo in prevalenza trascorrente non è possibile definire con certezza le relazioni con le altre faglie interpretate essendo il dato sismico arealmente limitato alla zona E del bacino. Diversamente la struttura STR4 è stata interpretata come

una trascorrente di svincolo (rampa laterale) del backthrust R4 secondo lo schema riportato in Figura 6.4.

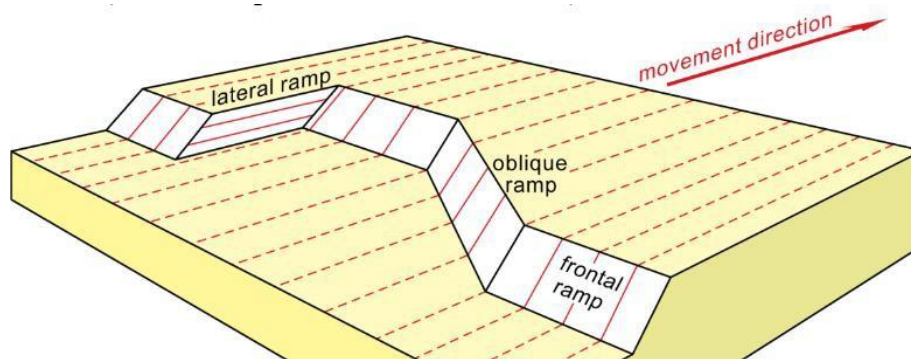


Figura 6.4 Schema di una rampa in un sistema di thrust.

Altra considerazione importante che scaturisce dall'interpretazione è la presenza e la geometria rappresentata dai thrust T3 e T4. I due thrust rispecchiano l'andamento del piano della Piattaforma Apula in subduzione. Infatti, il basamento e il thrust sovrastante T4 si rivengono a circa 9 km di profondità nelle sezioni sismiche analizzate (circa 4500 msec): il segnale ha una geometria continua e particolarmente marcata nella parte E delle sezioni dell'area di studio e diventa invece discontinuo a pochi km verso W, quando interseca il piano di subduzione che curva in profondità. Quello che si osserva è che il T4, che taglia il basamento, si approfondisce al di sotto della profondità di investigazione della sezione sismica determinando l'assenza del basamento nella parte a W e all'impossibilità che questo sia coinvolto nella deformazione che genera la struttura a duplex della piattaforma Apula.

In conclusione, l'assetto strutturale proposto si differenzia in alcuni aspetti rispetto alle recenti interpretazioni presenti in letteratura (es. Menardi Noguera e Rea, 2000; Candela et al., 2015) anche utilizzate per l'analisi della sismicità dell'area. Si riporta l'esempio del confronto con la sezione di Candela et al. (2015) (Figura 6.5):

- è possibile osservare che il sistema di thrust riconosciuto in questo lavoro si differenzia nel numero dei thrust individuati e nelle geometrie in quanto nella sezione BB' sono presenti 4 thrust principali con una inclinazione di massimo 30° mentre in Candela et al. (2015) i thrust interpretati sono più numerosi e con inclinazioni anche di 50°;
- nella sezione di Candela et al., 2015 lettera a) di Figura 6.5 a partire da SW verso NE si osservano numerose faglie inverse tagliare l'alloctono fino a un megathrust che taglia la piattaforma Apula con un rigetto di almeno 5 km (in realtà a SW della sezione a) di Figura 6.5 manca l'interpretazione dello spessore della piattaforma Apula). Tale porzione della sezione a) di Candela et al. (2015) coincide con l'area definita a SW della sezione BB' dal T1 caratterizzata dalla grande anticlinale NE vergente nell'area definita come campo a olio dell'Alta Val d'Agri (corrispondente alla zona a S di Giano Pepe e Tramutola), con profondità della Piattaforma Apula che arrivano a circa - 1000 m in corrispondenza di Grumento Nova. Nell'interpretazione in BB' si rinviene, dunque, lo stesso thrust ma in posizione più alta rispetto alla sezione di Candela et al. (2015): questo è anche dovuto all'interpretazione di uno spessore dell'alloctono soprastante più ridotto di circa 2 km, a sua volta condizionato da un maggiore sollevamento e dall'effetto dell'erosione dell'Unità appenniniche e

lagonegresi nella zona considerata. Questa interpretazione concorda con i dati del pozzo (Giano Pepe, pozzo 1) e con i dati superficiali riportati nella carta geologica;

- nell'interpretazione BB', rispetto alla sezione a) di Candela et al. (2015), l'alloctono nella porzione SW è coinvolto in una deformazione recente di tipo estensionale, coerentemente con i dati di stress regionali e con le strutture superficiali visibili nel sistema dei MMFS. Tali faglie normali interpretate in questa tesi arrivano a tagliare in profondità la Piattaforma Apula e i thrust responsabili della sua strutturazione con rigetti anche importanti; mentre le stesse faglie riconosciute in Candela et al., (2015) nella porzione più SW del campo a olio dell'Alta Val d'Agri non arrivano a coinvolgere la piattaforma Apula essendo separata dalle unità di mélange irpino (Borraccini et al., 2002, Cello et al., 2000);
- nella parte centrale della sezione interpretata nella sezione BB' risulta la presenza di strutture estensionali bordiere che tagliano i depositi quaternari e che controllano l'apertura del bacino; mentre in Candela et al. (2015) l'apertura del bacino dell'Agri è controllato da faglie di tipo trascorrenti laterali sinistre orientate WNW – ESE attive durante il Pleistocene inferiore, riattivate in regime estensionale tra il Pleistocene medio – Olocene (Giano et al., 2000);
- sempre nella parte centrale della sezione a) di Candela et al. (2015) e nel dettaglio della sezione b) è raffigurato il dettaglio della struttura corrispondente al campo a olio di M. Alpi comprensivo anche del giacimento di Costa Molina e Tempa Rossa. Questa grande struttura è interpretata come una struttura a fiore positiva che si raccorda su un thrust principale a 15/25 km di profondità (coinvolgendo il basamento). La struttura è delimitata a ovest da un back thrust con immersione a NE e a est dalla prosecuzione in superficie del thrust principale con orientazione SW (inclinazione dei thrust a circa 40°). Al suo interno la struttura a fiore (tipica di regimi tettonici trascorrenti) presenta una struttura pop-up che interessa la sola Piattaforma Apula e le unità irpine fino a una profondità di circa 3 km. Tale struttura dovrebbe essere riconducibile all'alto del CM2.

Questa interpretazione di Candela et al. (2015) si discosta da quanto interpretato in BB' dove la struttura antiforale di M. Alpi si raccorda su un secondo thrust T5 ad una profondità di 4,5 km con inclinazione circa 30° che non coinvolge il basamento. La struttura è delimitata a ovest da un back thrust R3/R2 che intercetta in posizione più alta la piattaforma apula (circa 2000 m di profondità come risulta dai dati di pozzo) e che interessa anche i depositi oligo-miocenici dei Flysch di Albidona. Allo stesso modo a est la struttura di M. Alpi è delimitata dallo stesso thrust T5 anch'esso che coinvolge i depositi oligo-miocenici del Flysch di Albidona. All'interno della struttura l'alto strutturale di M. Alpi registrato dai pozzi è definito dalla presenza di due faglie F11 e F12 probabilmente riattivate con cinematica estensionali immergenti verso SW.

- la struttura responsabile della formazione dell'alto del CM2, in base all'interpretazione BB', è una struttura differente da quella di M. Alpi e separata dalla faglia bordiera F15 che controlla l'apertura del bacino dell'Agri sul lato est. Rispetto alla sezione di Candela et al. (2015) il CM2 si raccorda in BB' su un ulteriore thrust denominato T3 a una profondità di 7 km, che non coinvolge il basamento, attraverso una struttura di pop-up generata da un back

thrust principale R1 e dal thrust T3, anche questi ultimi coinvolgenti i depositi olio-miocenici del Flysch.

- Il basamento non coinvolto nella deformazione nella sezione BB' si trova a circa 9 km al di sotto della struttura CM2 ed in particolare del thrust T4, mentre nella sezione di Candela et al. (2015) si rinviene deformato e quindi ad una profondità nella porzione interna a SW a circa 5 km e nella parte esterna a NE al di sotto della struttura di Tempa Rossa a una profondità di 20 km.

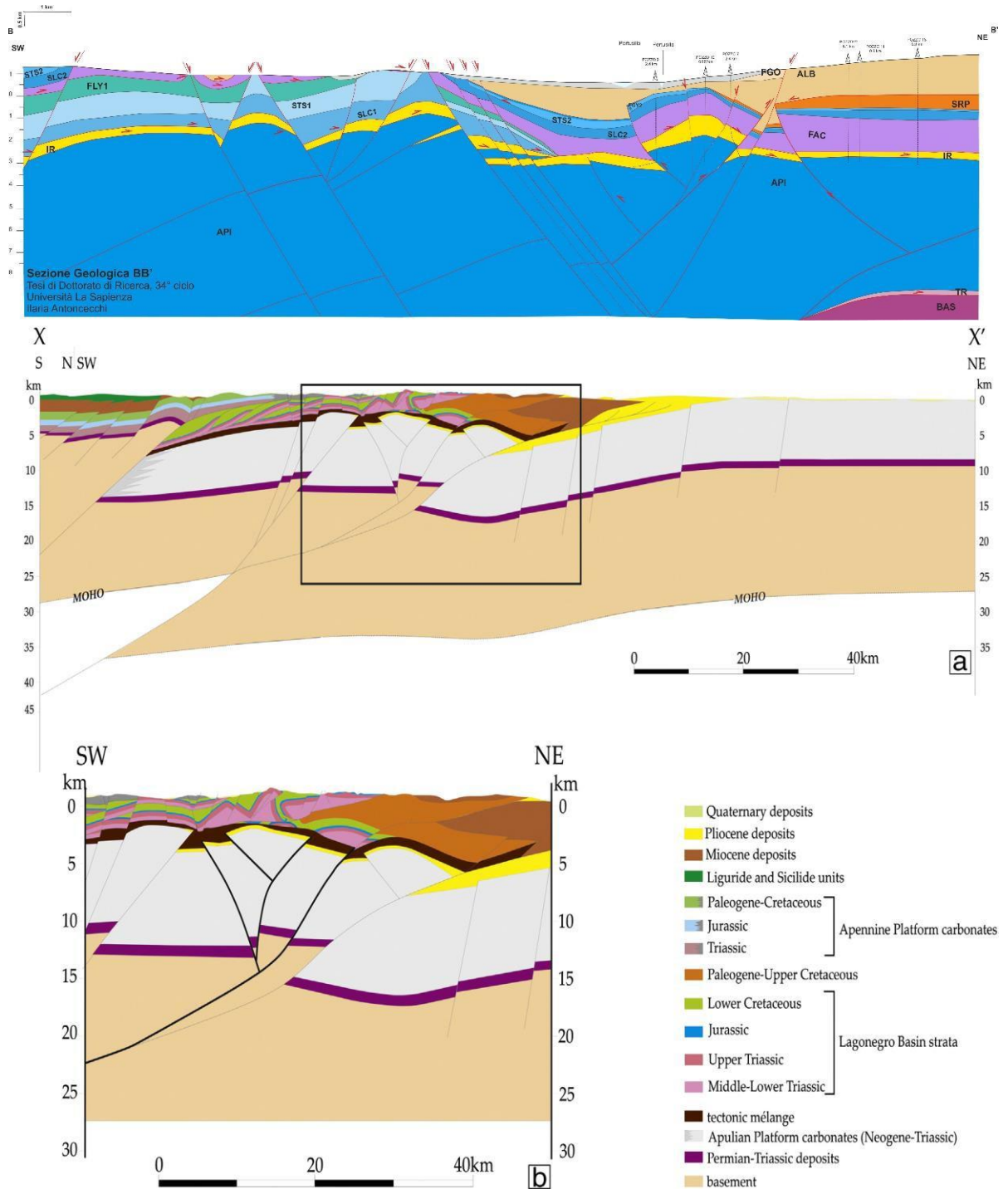


Figura 6.5 Confronto tra la sezione schematica dell'Appennino meridionale che attraversa la Val d'Agri da Candela et al. (2015), dopo Mazzoli et al., (2013) modificata da Santini et al. (2013) e la sezione BB' realizzata nell'ambito del presente studio.

6.2 Significato tettonico delle strutture interpretate e confronto con i modelli noti in letteratura

L'interpretazione strutturale dell'area e il relativo significato tettonico, sebbene risultino essere coerenti con i dati di superficie e i dati di pozzo, presentano alcuni limiti che si analizzano di seguito.

Riprendendo alcuni punti già descritti nei precedenti capitoli, l'interpretazione effettuata ha dei margini di incertezza legati almeno ai seguenti fattori:

- a) **risoluzione e qualità delle linee sismiche** - in base al dato di partenza si può sostenere che l'interpretazione risulta quanto più accurata dove il dato sismico era di migliore qualità in particolare nella parte E del bacino dove è stato acquisito un rilievo sismico 3D e dove la qualità dei dati permetteva una migliore identificazione dei riflettori, naturalmente più affidabile in superficie che in profondità per la diminuzione della risoluzione. In particolare, secondo quanto discusso nel capitolo 3 paragrafo 3.6, applicando alle sezioni CC' e BB', rispettivamente posizionate a nord e a sud dell'area di studio, l'espressione per la risoluzione verticale $\sigma_z = (\lambda/4)$ dove $\lambda = V/f$, in corrispondenza delle due principali strutture M.Alpi e Costa Molina a ovest e a est della sezione è stato possibile ottenere i seguenti valori di risoluzione verticale per le immagini della sismica 3D consegnata da Eni in pdf poi convertita in SEG-Y (Tabella 6.1).

Tabella 6.1 Tabella relativa ai valori di risoluzione verticale calcolati sulle sezioni DD' e BB' in corrispondenza delle strutture di M. Alpi e CM2.

Sez.	Settore	SP	Int	Top1 (msec)	Top2 (msec)	Spessore (msec)	Cicli	F (cicli/sec)	Vi (m/s)	λ	σ_z (m)
DD'	M.Alpi	2340	Lag II-IR	200	500	300	6	20	4500	225	56
DD'	M.Alpi	2340	IR-API	500	900	400	7	17,5	5000	285	71,4
DD'	CM2	2700	Lag II-IR	1100	1600	500	5	10	4000	400	100
DD'	CM2	2700	IR-API	1600	2000	400	5	12,5	5200	419	104
DD'	CM2	2700	TR-Bas	4500	4600	100	1	10	6500	650	162
BB'	M. Alpi	2320	Lag II-IR	300	800	500	6	12	4000	333	83
BB'	M. Alpi	2320	IR-API	800	1200	400	7	17,5	5000	285,7	71,4
BB'	CM2	2560	Lag II-IR	200	1300	1100	17	15,4	4000	259,7	65
BB'	CM2	2560	IR-API	1300	1450	150	1	6,6	5200	787	196
BB'	CM2	2560	TR-Bas	4300	4450	150	2	13,3	6500	488	122

In sintesi, è possibile quindi definire una risoluzione verticale media delle sezioni interpretate che varia da un valore medio di 75 m in superficie (settore di M.Alpi) fino a quasi 150 m in profondità (nel settore del CM2).

- b) **velocità applicate** - il modello di velocità utilizzato è preso dalla bibliografia ed è il risultato della tomografia sismica che ha di per sé dei margini di incertezza (Capitolo 3.5). Inoltre, la velocità applicata al target del pozzo per il processo di taratura della sezione sismica è tanto più affidabile quanto più applicata nell'immediato intorno del pozzo dove riesce a essere tarato con il segnale sismico interpretato; al contrario l'affidabilità diminuisce dove il dato di pozzo è assente e dove sono presenti minori vincoli (ad esempio in profondità) per cui l'interpretazione potrebbe essere soggetta a maggiori incertezze;

- c) **interpretazione della geometria di faglia** - la faglia è tanto più vincolata dove è presente il dato di pozzo o di superficie o comunque dove sono visibili in modo evidente discontinuità nei riflettori o zone di perdita di coerenza del segnale e/o terminazioni dei riflettori a kink beds;
- d) **numero di volte in cui è stata riscontrata la struttura** nelle sezioni sismiche analizzate; maggiore è il numero di volte in cui si ripete l'osservazione del dato, maggiore è l'affidabilità dell'interpretazione.

Ipotizzando che nell'applicazione di questi fattori tutti e 4 risultino soddisfatti è possibile considerare l'interpretazione con un'elevata percentuale di affidabilità (ad es. 100%), ove invece risulti che tutti questi fattori non siano soddisfatti è possibile valutare una bassa percentuale di affidabilità dell'interpretazione (ad es. 25%). Non è possibile considerare concreto il caso in cui nessuno di questi fattori sia soddisfatto (quindi lo 0%).

Si procede quindi ad analizzare in dettaglio l'interpretazione e il significato tettonico delle principali strutture individuate (rilevanti ai fini del modello strutturale dell'area) attraverso l'applicazione di questi criteri per quantificare l'incertezza legata alla loro interpretazione.

L'interpretazione del thrust T1 può essere considerata affidabile al 50% in quanto riscontra pienamente 2/4 fattori. Infatti, il thrust T1:

- si rinviene nella linea aa' che è l'unica dell'acquisizione 3D (quindi ha una buona risoluzione di partenza) che ha permesso l'individuazione delle strutture a W del bacino (fattore a soddisfatto);
- nella linea aa' le velocità applicate risultano essere ben tarate dal dato sismico essendo ricomprese e verificate tra il dato del pozzo 1 e del pozzo 2 (fattore b soddisfatto);
- la geometria della faglia e il suo rigetto non sono direttamente calibrate nel punto della faglia dal dato di pozzo ma risultano evidenti le discontinuità e le terminazioni dei riflettori soprattutto al top della struttura. Per quanto riguarda il rigetto (1000 msec) invece questo è desunto principalmente dal bilanciamento del dato dei due pozzi in sezione (fattore c parzialmente soddisfatto);
- è stato individuato solo in 1/7 linee sismiche analizzate, linea aa' (fattore d poco soddisfatto) (Figura 6.6).

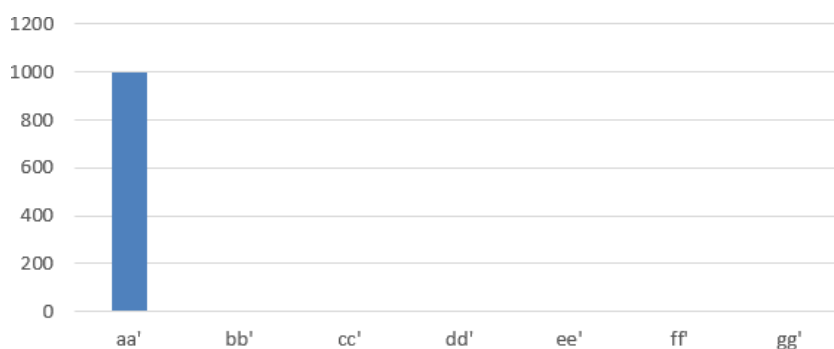


Figura 6.6 Grafico che riporta il rigetto della struttura T1 misurato in msec per le linee sismiche interpretate aa'-gg'. Nel caso specifico del T1 il rigetto è misurabile nella sola linea aa'.

L'interpretazione del thrust T5 può essere considerata affidabile al 100% in quanto soddisfa pienamente 4/4 fattori:

- si riviene su sezioni estratte dalla survey 3D che presentano una buona risoluzione (fattore a) soddisfatto);
- le velocità applicate nelle diverse sezioni risultano essere ben tarate dal dato sismico essendo ricomprese e verificate tra i numerosi dati di pozzo analizzati in questa parte del bacino (fattore b soddisfatto);
- la geometria della faglia e il suo rigetto sono nella maggior parte dei casi calibrate nel punto della faglia dal dato di pozzo (fatta eccezione per le sezioni aa' e ff'). In questo caso, quindi risulta anche ben stimato il rigetto che risulta avere un valore medio di 600 msec (fattore c soddisfatto);
- è stato individuato in tutte le linee analizzate (7/7), ma nella linea sismica aa' non è possibile valutare il rigetto (fattore d soddisfatto) (Figura 6.7).

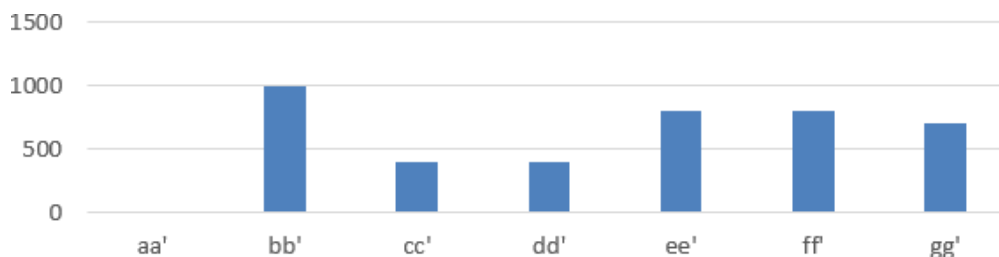


Figura 6.7 Grafico che riporta il rigetto della struttura T5 misurato in msec per le linee sismiche interpretate aa'-gg'. Nel caso specifico del T5 il rigetto è misurabile nelle linee bb' -gg' non è misurabile in aa'.

L'interpretazione della faglia F11 può essere considerata affidabile al 50% in quanto soddisfa pienamente 2/4 fattori:

- si rinviene su sezioni estratte dalla survey 3D che presentano quindi una buona risoluzione di partenza (fattore a soddisfatto);
- le velocità applicate nelle diverse sezioni risultano essere tarate dal dato sismico essendo ricomprese e verificate tra i dati di pozzo analizzati (fattore b soddisfatto);
- la geometria della faglia e il suo rigetto sono principalmente desunti dal bilanciamento della sezione. In questo caso quindi il rigetto calcolato ha una media di 650 msec (fattore c) poco soddisfatto);
- è stato individuato in 2/7 linee sismiche (fattore d poco soddisfatto) (Figura 6.8).

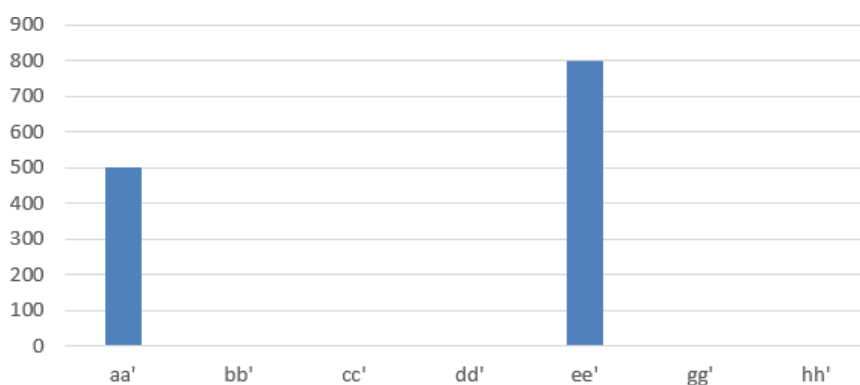


Figura 6.8 Grafico che riporta il rigetto della struttura F11 misurato in msec per le linee sismiche interpretate aa'-gg'. Nel caso specifico di F11 il rigetto è misurabile nelle linee aa' -ee'.

L'interpretazione della faglia F15 può essere considerata affidabile al 100% in quanto riscontra pienamente 4/4 fattori:

- si rinviene nella maggior parte delle linee sismiche di acquisizione 3D che presentano una buona risoluzione di partenza (fattore a soddisfatto);
- le velocità applicate nelle diverse sezioni risultano essere tarate dal dato sismico essendo ricomprese e verificate tra molti dei dati di pozzo analizzati (fattore b soddisfatto);
- la geometria della faglia e il suo rigetto sono valutati attraverso il dato di pozzo e il dato sismico (discontinuità delle terminazioni dei segnali con una diminuzione della risoluzione in profondità) oltre che dal bilanciamento della sezione. In questo caso il rigetto calcolato ha un valore medio di circa 160 msec (fattore c) soddisfatto);
- è stato verificato in 7/7 linee sismiche, in particolare risulta assente nella sezione aa' - fattore d soddisfatto) (Figura 6.9).

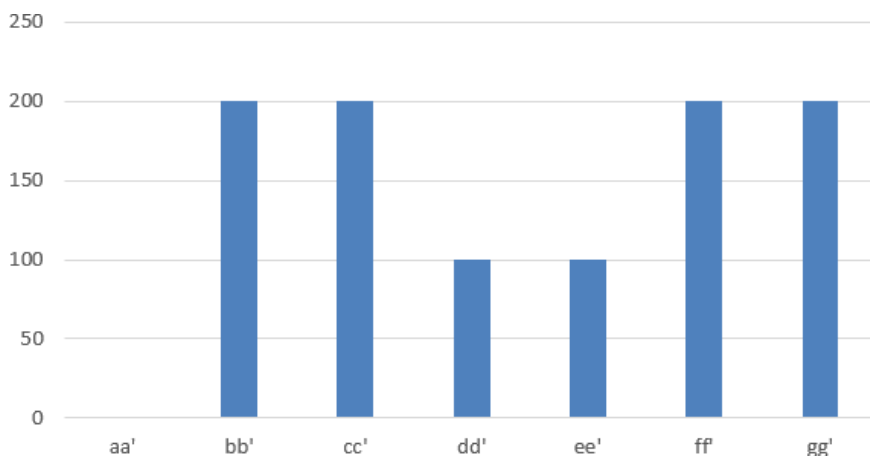


Figura 6.9 Grafico che riporta il rigetto della struttura F15 misurato in msec per le linee sismiche interpretate aa'-gg'. Nel caso specifico del F15 il rigetto è misurabile nelle linee bb' -gg' e non è misurabile in aa'.

L'interpretazione del retroscorrimento R1 può essere considerata affidabile al 100% in quanto riscontra pienamente 4/4 fattori:

- si rinviene in tutte le linee sismiche di acquisizione 3D che presentano una buona risoluzione di partenza (fattore a soddisfatto);
- le velocità applicate nelle diverse sezioni risultano essere tarate sul segnale sismico essendo inoltre ricompreso dai numerosi dati di pozzo analizzati (fattore b soddisfatto);
- la geometria della faglia e il suo rigetto sono valutati attraverso il dato di pozzo e il dato sismico (discontinuità delle terminazioni dei segnali con una diminuzione della risoluzione in profondità) oltre che dal bilanciamento della sezione. In questo caso il rigetto calcolato ha un valore medio di circa 200 msec (fattore c soddisfatto);
- è stato verificato attraverso 7/7 linee sismiche analizzate, in particolare risulta avere un rigetto importante nella sezione aa' dove è peraltro non è stato possibile verificare il rigetto di T5 e risulta assente la struttura F15 (fattore d soddisfatto) (Figura 6.10).

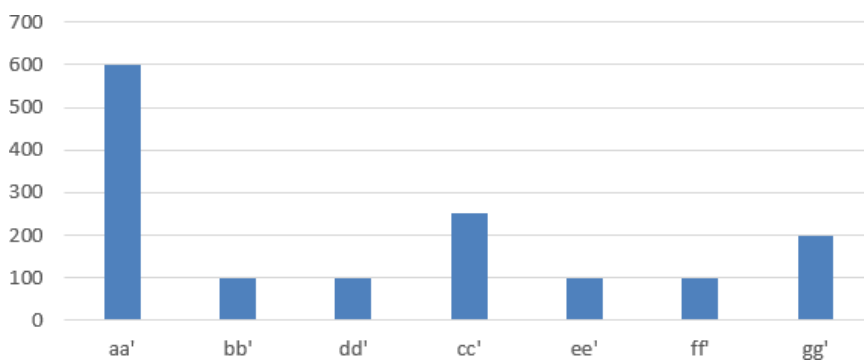


Figura 6.10 Grafico che riporta il rigetto della struttura R1 misurato in msec per le linee sismiche interpretate aa'-gg'.

L'interpretazione dei retroscorrimento R2 può essere considerata affidabile al 100% in quanto riscontra pienamente 4/4 fattori:

- si rinviene in linee sismiche di acquisizione 3D che presentano una buona risoluzione di partenza (fattore a soddisfatto);
- le velocità applicate nelle diverse sezioni risultano essere tarate sul segnale sismico e ricompresi dai numerosi dati di pozzo analizzati (fattore b soddisfatto);
- le geometrie della faglia e il loro rigetto sono valutati attraverso i dati di pozzo (in particolare la faglia R2 risulta essere vincolata dai pozzi 8 e 5 e 9 nelle sezioni dd', ee' e ff' e dal dato sismico (discontinuità delle terminazioni dei segnali oltre che dal bilanciamento della sezione. In questo caso il rigetto calcolato ha un valore medio di circa 350 msec (fattore c soddisfatto);
- è stato verificato in 6/7 linee sismiche analizzate, in particolare non risulta presente nella sezione aa' dove è peraltro assente tutta la struttura di pop-up del M. Alpi; non è invece stato possibile individuarla per mancanza di dato nella sezione gg' (fattore d soddisfatto) (Figura 6.11).

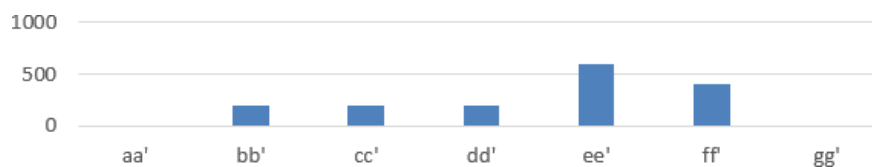


Figura 6.11 Grafico che riporta il rigetto della struttura R2 misurato in msec per le linee sismiche interpretate aa'-gg'. Nel caso specifico di R2 il rigetto è misurabile nelle linee bb'-gg' e non è misurabile in aa' e gg'.

L'interpretazione del retroscorrimento R3 può essere considerata affidabile al 75% in quanto riscontra pienamente 3/4 fattori:

- si rinviene in tutte le linee sismiche acquisite in 3D che presentano una buona risoluzione di partenza (fattore a soddisfatto);
- le velocità applicate nelle diverse sezioni risultano essere tarate sul segnale sismico e ricompresi dai numerosi dati di pozzo analizzati (fattore b soddisfatto);
- le geometrie della faglia e il loro rigetto sono valutate principalmente attraverso il dato sismico (discontinuità delle terminazioni dei segnali) e dal bilanciamento della sezione. Non risultano pozzi nell'immediato intorno della struttura. In questo caso il rigetto calcolato ha un valore medio di circa 150 msec (fattore c poco soddisfatto);
- è stata verificata attraverso 6/7 linee sismiche analizzate, in particolare risulta assente nella sezione aa' dove è peraltro assente tutta la struttura del pop-up di M. Alpi, e non è stato possibile individuarla per mancanza di dato nella sezione gg'. La struttura risulta inoltre poco evidente nella sezione ee' dove non sembra avere un rigetto importante (fattore d soddisfatto) (Figura 6.12Figura 6.10).

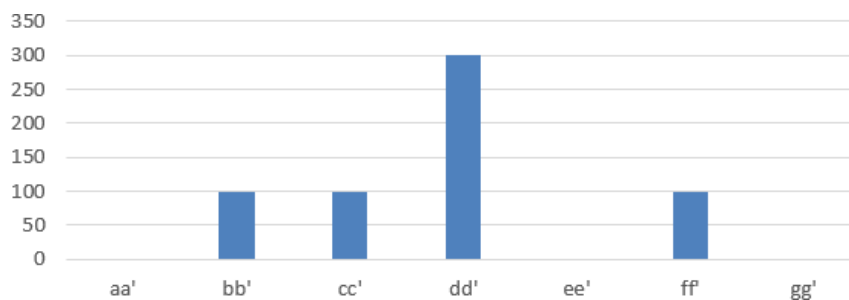


Figura 6.12 Grafico che riporta il rigetto della struttura R3 misurato in msec per le linee sismiche interpretate aa'-gg'. Nel caso specifico di R3 il rigetto non è misurabile in aa', ee' e gg'.

L'interpretazione della struttura F1 può essere considerata affidabile al 100% in quanto riscontra pienamente 4/4 fattori:

- si rinviene in tutte le linee sismiche acquisite in 3D che presentano una buona risoluzione di partenza (fattore a soddisfatto);
- le velocità applicate nelle diverse sezioni risultano essere tarate sul segnale sismico e ricompresi dai numerosi dati di pozzo analizzati (fattore b soddisfatto);
- le geometrie della faglia e il loro rigetto sono valutate attraverso il dato di pozzo (pozzo, 9, ,8 e 5 nelle sezioni cc', dd', ee', ff') attraverso il dato sismico (discontinuità delle terminazioni dei segnali) e dal bilanciamento della sezione. In questo caso il rigetto calcolato ha un valore medio di circa 200 msec (fattore c soddisfatto);
- è stata verificata attraverso 6/7 linee sismiche analizzate, in particolare risulta assente nella sezione aa' dove è peraltro assente tutta la struttura del pop-up di M. Alpi, e non è stato possibile individuarla per mancanza di dato nella sezione gg' (fattore d soddisfatto) (Figura 6.13Figura 6.10).

È da rilevare che la faglia ha un andamento inverso nella sezione cc' che presenta il maggiore rigetto registrato di 300 msec. Per la maggior parte di casi ha invece una cinematica normale con un rigetto medio di circa 200 msec.

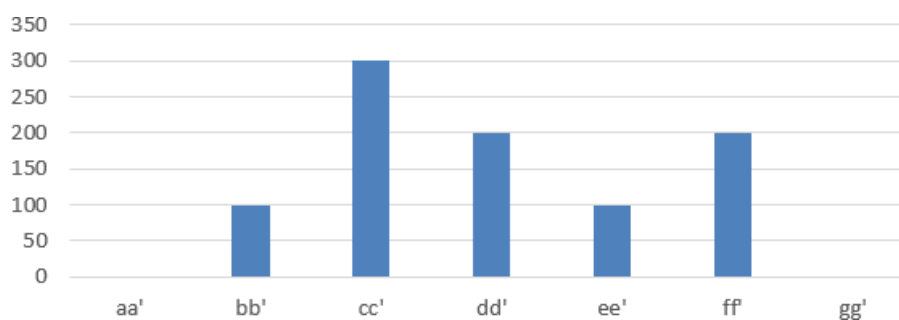


Figura 6.13 Grafico che riporta il rigetto della struttura F1 misurato in msec per le linee sismiche interpretate aa'-gg'. Nel caso specifico di F1 il rigetto non è misurabile in aa' e gg'.

L'interpretazione della struttura F12 può essere considerata affidabile al 100% in quanto riscontra pienamente 4/4 fattori:

- si rinviene in tutte le linee sismiche acquisite in 3D che presentano una buona risoluzione di partenza (fattore a soddisfatto);
- le velocità applicate nelle diverse sezioni risultano essere tarate sul segnale sismico e ricomprese da numerosi dati di pozzo analizzati (fattore b soddisfatto);
- le geometrie della faglia e il loro rigetto sono valutate attraverso il dato di pozzo (pozzo 10, 4 e 9, nelle sezioni bb', dd', gg') attraverso il dato sismico (discontinuità delle terminazioni dei segnali) e dal bilanciamento della sezione. In questo caso il rigetto calcolato ha un valore medio di circa 100 msec (fattore c soddisfatto);
- è stata verificata attraverso 6/7 linee sismiche analizzate, in particolare risulta assente nella sezione aa' dove è peraltro assente tutta la struttura del pop-up di M. Alpi, - (fattore d soddisfatto) (Figura 6.14/Figura 6.10).

È da rilevare che la faglia ha un andamento inverso nelle sezioni dd' e ee' mentre nella maggior parte dei casi ha invece una cinematica normale con un rigetto medio di circa 100 msec.

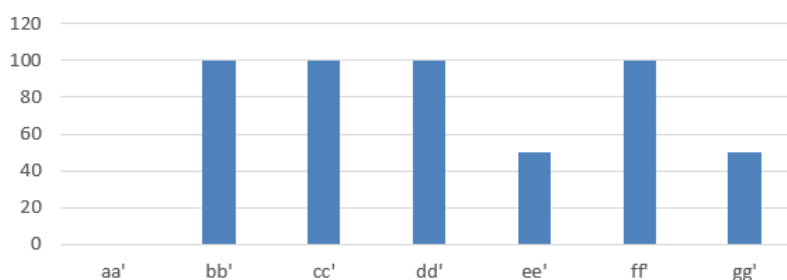


Figura 6.14 Grafico che riporta il rigetto della struttura F12 misurato in msec per le linee sismiche interpretate aa'-gg'. Nel caso specifico di F12 il rigetto non è misurabile in aa'.

Seguendo lo stesso ragionamento per le strutture T3 e T4 risulta che le stesse soddisfano i fattori a) e d) essendo ben visibili i segnali nelle sezioni 3D analizzate ma non soddisfano pienamente i fattori b) e c) non essendoci valori di pozzo nell'immediato intorno e non essendo possibile tarare con certezza la velocità degli orizzonti in base al dato sismico. Pertanto, l'affidabilità dell'interpretazione di queste due strutture oscilla tra il 25% e il 50%.

In sintesi, emerge quindi che, dal calcolo dell'affidabilità dell'interpretazione di ciascuna struttura in base ai fattori individuati, il modello strutturale fin qui descritto ha un range di affidabilità medio tra 82% e 88% in funzione che si calcoli il 25% o il 50% di affidabilità attribuito alle strutture T3 e T4. I margini di incertezza, oltre a queste ultime strutture (T3 e T4), sono più che altro legati alla mancanza di un dato o di una buona qualità nel lato W del bacino che non permettono di verificare adeguatamente le strutture T1 e F11.

Una volta verificata, seppur qualitativamente, l'attendibilità dell'interpretazione è possibile effettuare alcune considerazioni rispetto a quanto riportato nell'inquadramento (Capitolo 2.1 e 2.2) in merito all'assetto tettonico dell'area e nel paragrafo 6.1. sul confronto delle interpretazioni strutturali, tenendo presente i diversi margini di incertezza analizzati che potrebbero influire in

minima percentuale sull'attribuzione al primo o secondo modello utilizzato in letteratura (*thick o thin skinned*; Scrocca et al., 2010).

Nel caso dell'interpretazione adottata, infatti, rispetto alle sezioni realizzate da Menardi Noguera, & Rea (2000) e Candela et al. (2015), si evince che:

- il trasporto tettonico verso NE e lo scollamento delle unità lagonegresi al di sopra della piattaforma Apula (che prosegue per più di 23 km al di là delle sezioni dell'area di studio analizzate – vedi sez. DD', EE', e BB'), nonché la loro presenza in superficie sono tali da giustificare un raccorciamento considerevole della piattaforma apula (come confermato sia dai dati di superficie che i vincoli profondi);
- il sistema di faglie estensionali è caratterizzato da due trend a comportamento differente. Il sistema dei MMFS (immergente a NE), in particolare la faglia F11, ha un ruolo importante nella tettonica recente dell'area poiché interessa in modo inequivocabile le strutture dei thrust più profondi (T1 e T5) con un rigetto di almeno 650 msec; al contrario il sistema EAFS (immergente a SW) ha rigetti inferiori, poco più di 150 msec e non sembra coinvolgere le strutture dei thrust più profondi (T1 e T5) (in questo caso si ricorda che l'affidabilità dell'interpretazione del sistema MMFS è del 50% mentre quella del EAFS è del 100%). Questa considerazione supporta quanto già ipotizzato in letteratura rispetto ad una contemporanea presenza di una fase tettonica estensionale che procede verso NE, guidata dallo sviluppo del Bacino Tirrenico, di bacini e di una fase compressiva al fronte della catena come riportato da alcuni autori (vedi capitolo 2.1 es. Doglioni et al., 1996; Scrocca et al. 2010 e Carminati et al., 2010);
- le strutture nella parte E del bacino R2, F11, F12, T5, F15 e R1 sembrano tagliare le unità irpine (IR) e lagonegresi che caratterizzano i seal dei principali giacimenti dell'area di studio arrivando a interessare anche i depositi oligocenici. Questo ha importanti implicazioni dal punto di vista dell'interpretazione sismotettonica dell'area e del potenziale impatto delle attività di coltivazione sulla sismicità che dovrà essere verificato sia attraverso un confronto con i dati degli eventi sismici (affrontata in parte in questo studio nel successivo Capitolo 7), sia tramite future analisi sulla permeabilità delle strutture e sulla circolazione dei fluidi in profondità;
- il basamento non sembra essere coinvolto nella deformazione e si insinua al di sotto di un thrust principale (questa considerazione è parzialmente affidabile in base a quanto descritto in precedenza).

Tutti questi elementi sono coerenti con una interpretazione di tipo *thin-skinned* dell'area di studio, anche se l'incertezza sull'interpretazione delle strutture in profondità, in particolare del coinvolgimento o meno del basamento, potrebbe lasciare un ristretto margine di incertezza per una possibile interpretazione di tipo *thick-skinned* che tuttavia non sarebbe compatibile con i raccorciamenti ottenuti nella piattaforma apula e con il sovrastante scollamento delle unità lagonegresi.

7 REALIZZAZIONE DI UN MODELLO PSEUDO - 3D

7.1 Modello strutturale dell'area di studio: faglie e mappe dei top interpretati

Al fine di poter confrontare la posizione degli ipocentri degli eventi sismici registrati nell'area con il modello strutturale interpretato, il modello è stato importato nel software Petrel. I dati e la metodologia utilizzata sono stati già descritti nel capitolo 3, paragrafo 3.7, Fase 5. Il modello strutturale pseudo 3D ottenuto è costituito dalle superfici di faglia e dai top delle unità convertite in profondità nonché dalle sezioni geologiche interpretate AA'-GG'.

In Figura 7.1 è rappresentata la visualizzazione in pianta e in vista frontale delle principali strutture individuate. Sono, invece, rappresentati a parte e non inserite in Figura 7.1 i thrust T3 e T4 poiché trattandosi di strutture profonde (profondità >9 km) per essere visibili in modo completo necessitano di una scala verticale ridotta ($z=1:0.2$). Tale scala appiattirebbe la visualizzazione di tutte le altre faglie. In particolare, dalla conversione dei poligoni in superfici è stato possibile risolvere alcuni problemi legati all'interpolazione delle superfici dove, ad esempio, non era presente il dato.

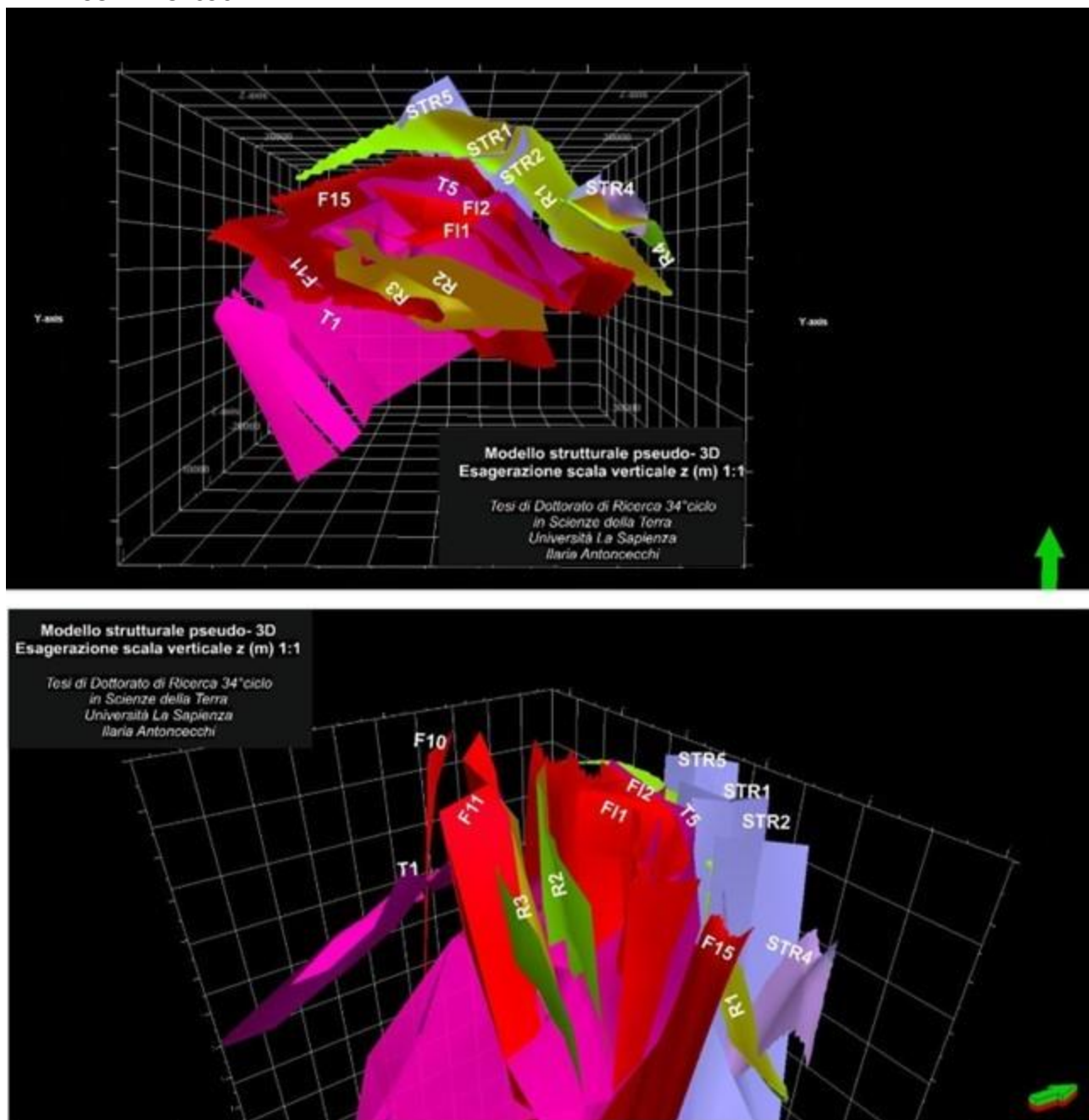


Figura 7.1 Modello strutturale 3D realizzato in Petrel Software. Nel modello sono rappresentate tutte le principali strutture individuate nell'area di studio e descritte nei precedenti paragrafi 5, 6 con esagerazione della scala verticale 1:1 in pianta e in vista frontale. In fucsia è rappresentato il sistema dei Thrust T1, T5 (sono esclusi in questa vista i thrust T3 e T4); in rosso le faglie estensionali, F11, F1, F12, F15; in verde il sistema di retroscorrimenti R4, R3, R2, R1; e in viola le faglie trascorrenti/trastensive STR5; STR1, STR2; STR4.

Passando a descrivere brevemente i diversi sistemi individuati è possibile quindi verificare che il sistema di thrust è costituito da 4 faglie principali denominate, da W verso E, T1, T5, T3 e T4. T1 rappresenta il thrust più a W; il T5 è il thrust centrale e che arriva più in superficie; i thrust T3 e T4 sono quelli più a E e che portano la Piattaforma Apula interna a sovrascorrere al di sopra della unità di piattaforma carbonatica e del basamento presenti a profondità di circa 9 km. Le caratteristiche in termini di lunghezze e rigetto stimato sono riportate in Tabella 7.1.

Tabella 7.1 Sintesi delle caratteristiche del sistema di thrust individuato

NOME THRUST	LUNGHEZZA IN CARTA LUNGO STRIKE (km)	RIGETTO STIMATO IN (km)
T1	15*	> 1,5
T5	15*	1
T3	15*°	non misurabile
T4	15*°	> 2

* lunghezza riscontrabile in carta ma con probabile prosecuzione.

° Misurata fino al punto di curvatura

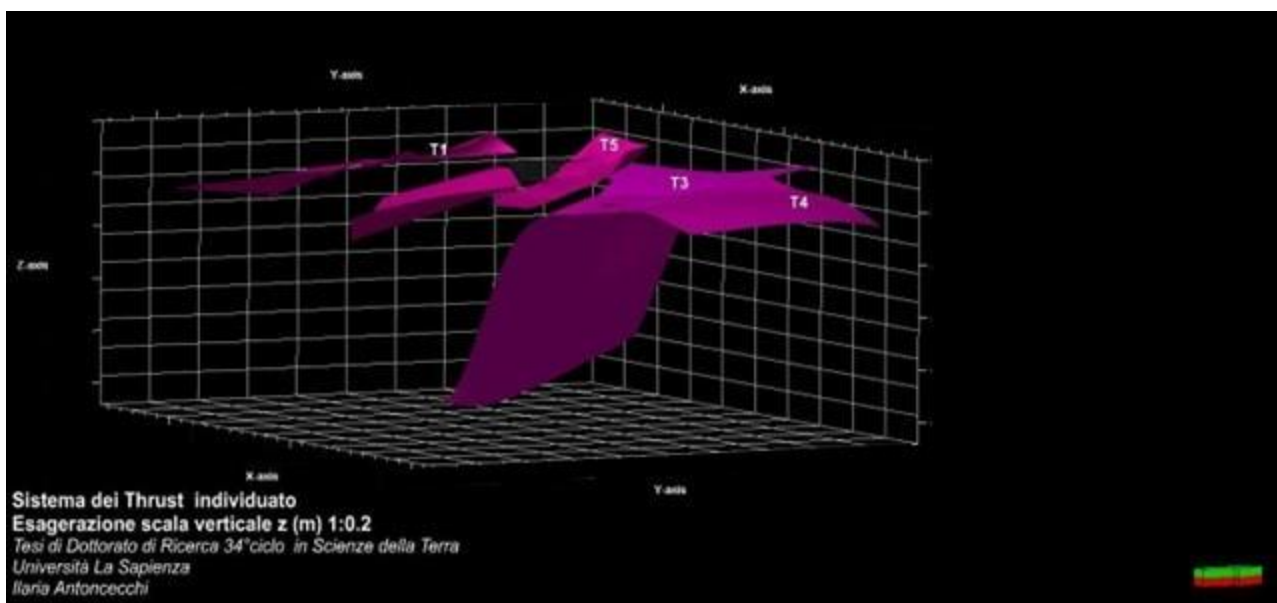


Figura 7.2 Rappresentazione del sistema di thrust 3D realizzato in Petrel Software. Nel modello sono rappresentate T1, T5, T3 e T4 con esagerazione della scala verticale a 1:0.2.

Il sistema di faglie normali individuato (Figura 7.3) è composto da 4 faglie principali F11, F1, F12 e F15 dove la F11 e la F15 sono le faglie che bordano il bacino e sono rappresentative del EAFS e MMFS; mentre F11 e F12 sono le faglie originariamente inverse riattivate in senso estensionale della struttura del pop-up di Monte Alpi. Come si può osservare dalla disposizione delle strutture nello spazio le faglie F11, F12 e F15, ad orientazione appenninica immergenti a SW, nella parte E delle sezioni sono molto più vicine e addensate e spesso sono fra loro connesse. Al contrario, la F11, a orientazione appenninica immergente a NE, risulta essere più isolata. Le lunghezze in pianta e i rigetti calcolati sono riportati in Tabella 7.2 Sintesi delle caratteristiche del sistema di faglie individuato. La faglia F11 ha un'evidenza in superficie nella parte N (come possibile osservare nella

carta realizzata Allegato 1); mentre non vi sono particolari evidenze in superficie della F15 nella zona di Montemurro, che da modello arriva a coinvolgere i depositi oligocenici del Flysch di Albidona e della Formazione di Gorgoglione. Anche per le faglie F11 e F12 non vi sono evidenze superficiali poiché coperte in questa zona dai depositi alluvionali del bacino e da modello arrivano a coinvolgere le medesime formazioni della F15 ovvero il Flysch di Albidona e la Formazione di Gorgoglione. Quindi si può concludere che le faglia a orientazione appenninica del sistema dei MMFS in cui ricade la F11 sono caratterizzate da un rigetto maggiore rispetto al sistema di faglia a orientazione appenninica dell'EAFS in cui ricadono F15, F11, F12.

Tabella 7.2 Sintesi delle caratteristiche del sistema di faglie individuato.

NOME FAGLIA	LUNGHEZZA IN CARTA LUNGO STRIKE (km)	RIGETTO STIMATO (km)
F11	> 11*	> 1,5
F11	8,8	basso e non misurabile in modo attendibile
F12	8,8	basso e non misurabile in modo attendibile
F15	14,4	0,15

* 11 km è l'effettiva lunghezza del tracciato in carta, tuttavia il tracciato prosegue nella parte nord ricongiungendosi probabilmente alla traccia della faglia sismogenetica individuata nel DISS denominata ITCS034 anche nota come "Irpina-Agri Valley Fault".

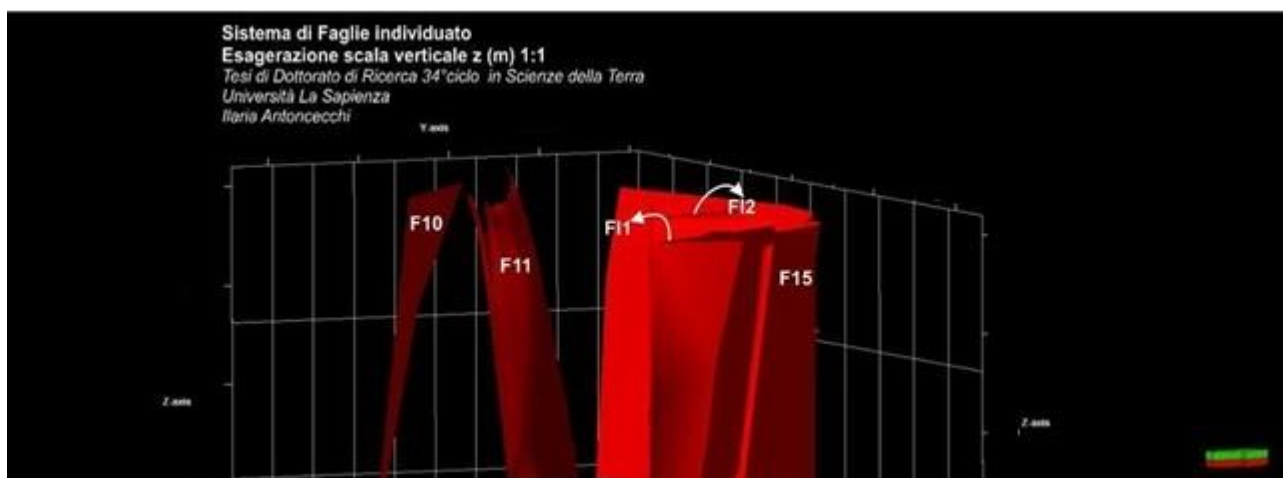


Figura 7.3 Rappresentazione del sistema di faglie 3D realizzato in Petrel Software. Nel modello sono rappresentate F10, F11, F12, F15 in scala con esagerazione verticale rispettivamente di 1:1.

Il sistema di retroscorrimenti è caratterizzato da 4 strutture, denominate da W verso E, R3, R2, R1, R4 (come riportate in Figura 7.4). Il retroscorrimento più a W è più profondo e di piccolo rigetto (come visibile dalla Tabella 7.3), coinvolge in alcuni luoghi i depositi delle unità irpine. Il retroscorrimento R2 è più superficiale e interessa anche i depositi lagonegresi fino alle unità oligoceniche. Il retroscorrimento R1 ha orientazione appenninica e immersione a NE, rappresenta il retroscorrimento di maggiore estensione nell'area che caratterizza la struttura del pozzo 12 ed ha un rigetto che si differenzia tra la parte N e la parte S passando rispettivamente da circa 600 m a

200 m. Infine, il retroscorrimento R4 che caratterizza la struttura di Tempa del Vento e la separa da quella del pozzo 12, si rinviene localizzato unicamente nella parte S dell'area di studio.

Tabella 7.3 Sintesi delle caratteristiche del sistema di retroscorrimenti individuato.

NOME RETROSCORRIMENTO	LUNGHEZZA IN CARTA LUNGO STRIKE (km)	RIGETTO STIMATO (km)
R3	8,8	0,2
R2	11	0,5
R1	15,5	0,2
R4	2	0,2

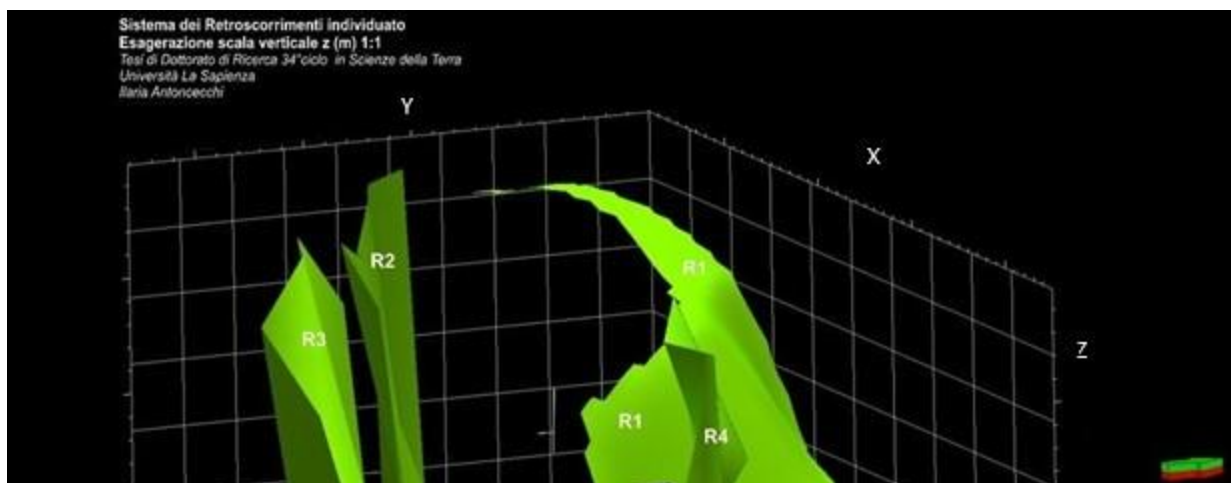


Figura 7.4 Rappresentazione del sistema di retroscorrimenti 3D realizzato in Petrel Software. Nel modello sono rappresentate R3, R2, R1, R4 con esagerazione in scala verticale 1:1.

Il sistema di faglie trascorrenti è composto da almeno 4 strutture denominate da N verso S, STR5, STR1, STR2, STR4 (Figura 7.5). Le faglie trascorrenti si rinviengono solo nella parte E dell'area di studio dove il dato sismico permette la loro interpretazione (presenza delle sezioni 3D parallele al tratto appenninico). Al contrario, per mancanza del dato sismico, non si riesce a seguire una loro possibile prosecuzione nella parte E dell'area di studio. Ne risulta l'impossibilità di valutare la relazione di queste strutture con le faglie presenti nella parte W (ad esempio con la faglia F15). È possibile osservare che le faglie STR5, STR2, STR1 interessano i depositi oligocenici e sono di tipo trastensivo. Invece, come descritto nel precedente capitolo 6 par. 6.1, la faglia STR4 è stata interpretata come trascorrente sinistra con orientazione E-W e rappresenta la rampa laterale del backthrust R4 con orientazione NW-SE che delimita a SE la struttura di CM2 e Tempa del Vento (Figura 7.5).

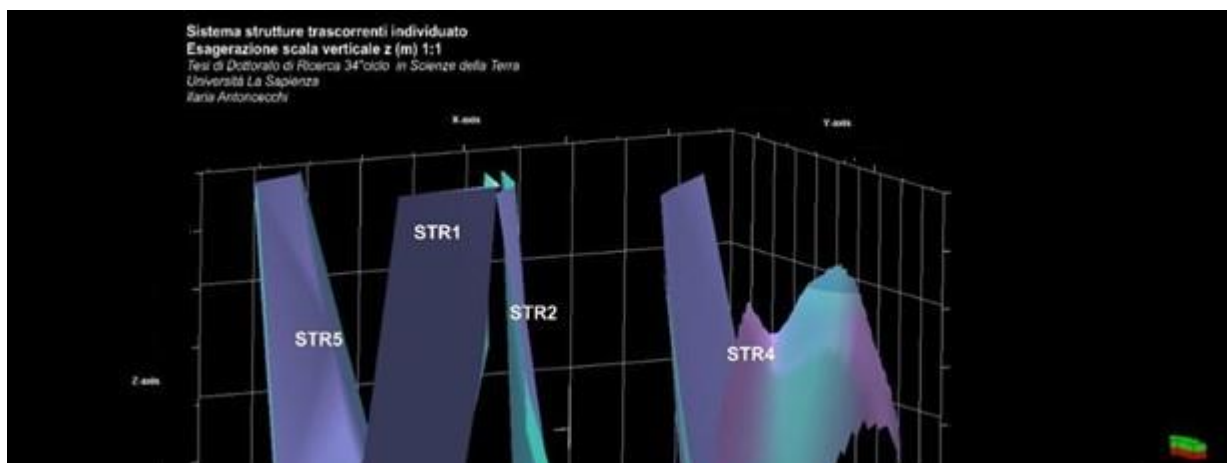


Figura 7.5 Rappresentazione del sistema di faglie trascorrenti 3D realizzato in Petrel Software. Nel modello sono rappresentate STR5, STR1, STR2 (trastensive), STR4 (trascorrente sinistra) con esagerazione in scala verticale 1:1.

Oltre alle superfici di faglia sono state importate in profondità (metri) le superfici dei principali top analizzati. Le superfici di uno stesso top risultano delimitate dalle superfici di faglia e pertanto anche nell'elaborazione delle mappe isobate dei principali orizzonti sismici interpretati risultano segmentate nelle aree dove insistono le faglie principali sopra descritte (qualora siano effettivamente coinvolte dalla faglia), oppure dove si addensano le curve isobate in corrispondenza delle faglie trascorrenti denominate STR1, STR2, STR4, STR5. Dove invece c'è carenza di dato sismico o non è presente l'orizzonte sismico del top interpretato, la mappa delle isobate risulta interrotta.

Di seguito si procede a descrivere le mappe ottenute:

- **unità Lagonegresi (I e II) e top del Flysch di Galestrino (FYG2) e dell'Unità di Serrapotamo (SRP)**. Il top delle unità Lagonegresi in sismica è rappresentato dalla distribuzione di due unità distinte: a ovest il Flysch Galestrino FYG2 e a est il Serrapotamo – SRP, entrambi membri superiori dell'Unità di Lagonegro II. Il FYG2 è presente nella parte NW – NE della struttura di M. Alpi; il SRP è prevalentemente presente nella parte SE (Figura 7.6). A SW non è stato possibile terminare l'interpretazione per mancanza del dato. In particolare, le due formazioni sono interrotte dalle faglie che delimitano l'alto strutturale (FI1 e FI2). Quindi si osserva in mappa che FYG2 è prevalentemente nella parte NW dove è presente anche in affioramento (ad esempio nella zona di Giano Pepe, Tramutola a N di Moliterno dove affiorano le unità Lagonegresi); si ritrova inoltre a profondità poco inferiori dove presente la sezione CC' e tende a scomparire nella zona SE sostituita dalla formazione di Serrapotamo – SRP.

SRP ha due alti strutturali in corrispondenza del pozzo CM2 (pozzo 12) e in corrispondenza della struttura FI2. Nell'intorno della struttura R1 da NE verso SE lo spessore del Serrapotamo è molto variabile: passa da uno spessore significativo in aa', ad uno quasi nullo da cc' a dd' per poi riprendere in ee' e toccare il massimo spessore in corrispondenza della sezione bb' per poi diminuire ancora in ff' e gg'.

Una possibile spiegazione di queste variazioni di spessori e della distribuzione non uniforme di queste due formazioni (Flysch Galestrino e Serrapotamo), come riportato in precedenza, potrebbe essere ricondotta al ruolo giocato dalle strutture trascorrenti individuate: in particolare il prolungamento della faglia STR5 andrebbe a separare la zona N di aa' da quella al centro del bacino di cc' - dd' e il prolungamento delle faglie STR4 o della STR2 andrebbe a separare quest'ultima da quella a S, dove presenti le sezioni di ee', bb', ff', gg'.

Al disotto delle due unità rappresentate al top dell'Unità di Lagonegro II, Flysch Galestrino – FGY2 e formazione di Serrapotamo – SRP (Flysch di ambiente bacinale di età cretacea e miocenica), l'Unità degli Scisti Silicei – STS2 della Lagonegro II, risulta invece avere una distribuzione omogenea e continua su tutta l'area: da SW dove è presente con spessori maggiori (circa 2 km) e quote più superficiali (900 m), a NE dove è presente con spessori inferiori più profondi. Fa eccezione l'ispessimento confermato in corrispondenza delle due strutture di pop-up di M. Alpi e Costa Molina, nella zona a S in corrispondenza dei retroscorrimenti R2 e R1 e F11 e F12 (vedi sezione BB' e EE' rispetto sezione CC' e DD').

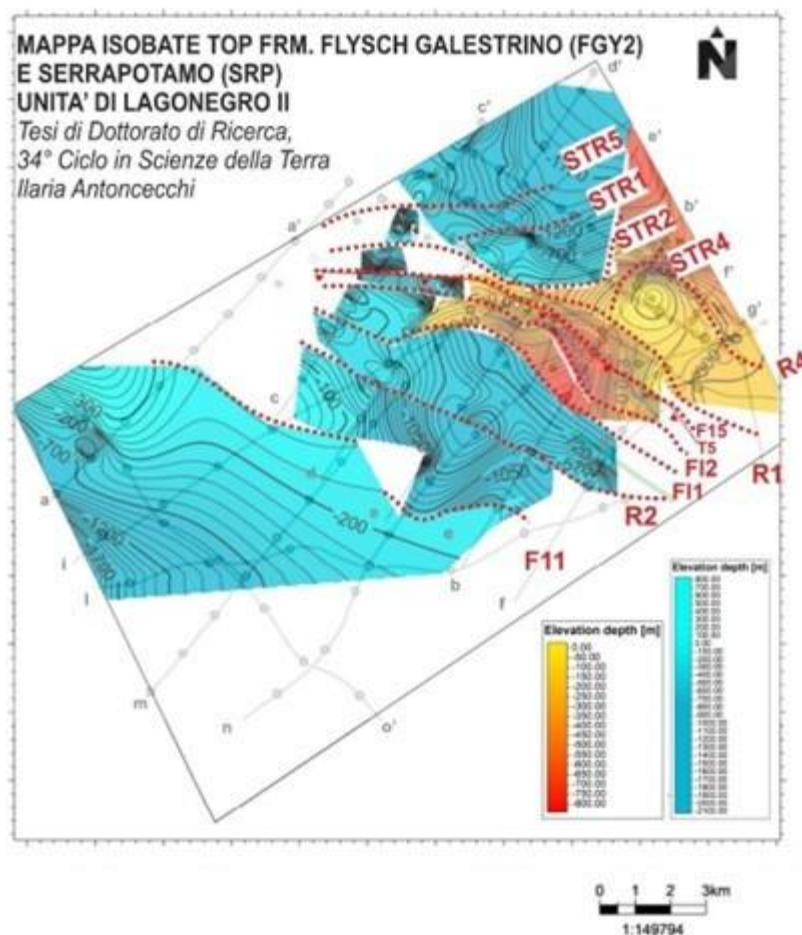


Figura 7.6 Mappa dell'isobata del top dell'unità di Lagonegro II elaborata in Petrel Software. Particolare della distribuzione del membro superiore caratterizzato dalle Formazioni del Flysch di Galestrino e dalla Formazione di Serrapotamo (celeste e giallo in mappa). In rosso sono riportate le tracce delle strutture interpretate che coinvolgono queste formazioni.

- **Unità Irpina IR.** Il top dell'Unità Irpina è rappresentato in Figura 7.7. La profondità delle unità Iripine varia dai 2000 ai 2800 m di profondità e risulta come l'unità lagonegrese più superficiale a W che a E, dove si approfondisce in corrispondenza della struttura del CM2 delimitata dal retroscorrimento R1 e da quella di Tempa del Vento delimitata dal retroscorrimento R4 (2950 m di profondità). Inoltre, risulta più superficiale (1350 m di profondità) in corrispondenza della struttura di M. Alpi. In questo caso gli spessori maggiori dell'unità si rinvergono a N dell'area di studio mentre si riducono andando verso SE, in particolare in corrispondenza della struttura del CM2. Anche in questo caso, però si osserva un ispessimento in corrispondenza della struttura di M. Alpi in corrispondenza delle strutture che delimitano il pop-up e quindi del retroscorrimento R2 e nell'alto generato dalle strutture FI1 e FI2.

Anche in questo caso in mappa è visibile l'addensamento delle isobate dove sono presenti le strutture trascorrenti. Si ricorda che tali faglie che coinvolgono le unità Iripine non proseguono a W dell'area di studio per mancanza del dato sismico.

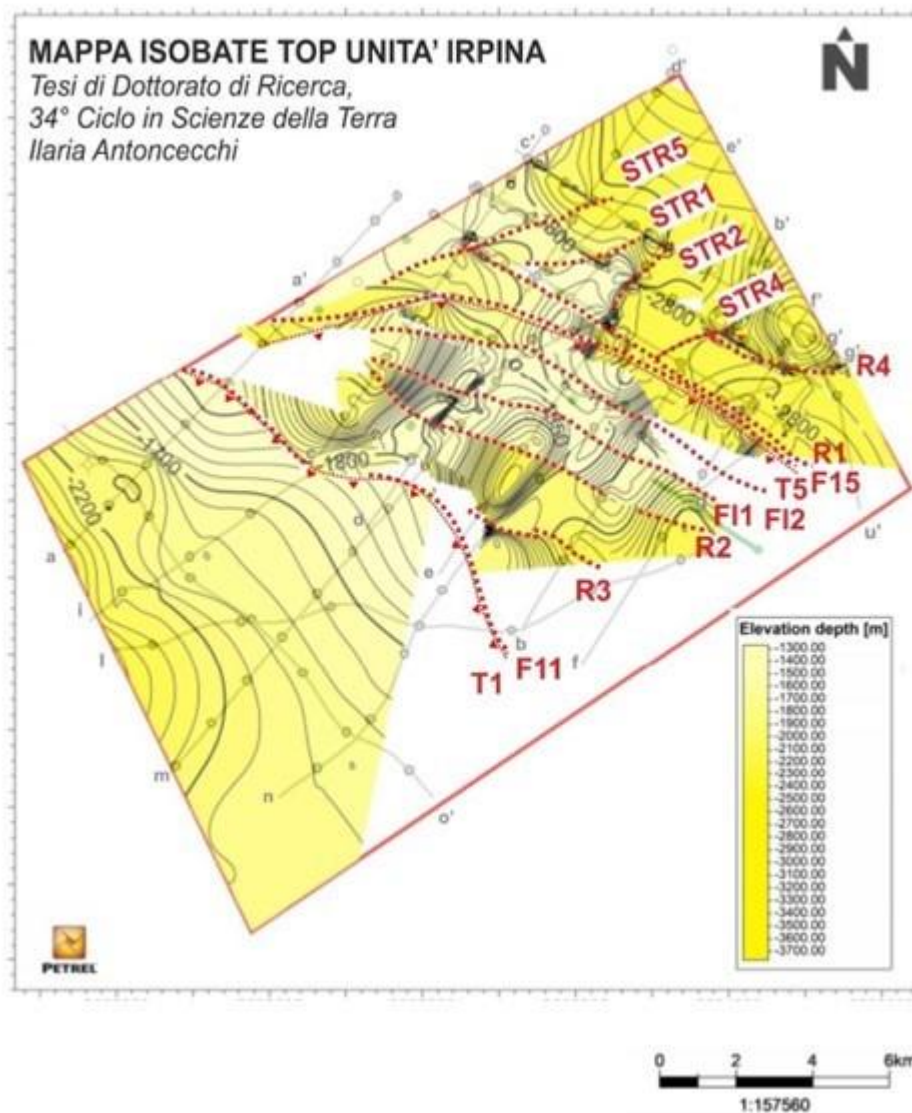


Figura 7.7 Mappa dell'isobata del top dell'unità Irpina elaborata in Petrel Software. In rosso sono riportate le tracce delle strutture interpretate che coinvolgono questa unità.

- **Unità della Piattaforma Apula – API.** Il top della Piattaforma Apula è rappresentato in Figura 7.8. L'unità è più profonda nella parte SW (dai 3000 m di profondità) e diventa più superficiale in corrispondenza della zona di Grumento Nova (circa 1500 m). Tale alto è generato dal Thrust T1 poi tagliato dalla faglia F11. Un altro alto individuabile dalla mappa è quello dell'antiforme generata dal T5 e della struttura di pop-up di M. Alpi nella parte compresa tra le due faglie F11 e F12 a circa 1650 m. Infine a NE nella zona del pozzo 12, coincidente con il CM2, tra R1 e R4 la piattaforma Apula ha una profondità di circa 2900 m.

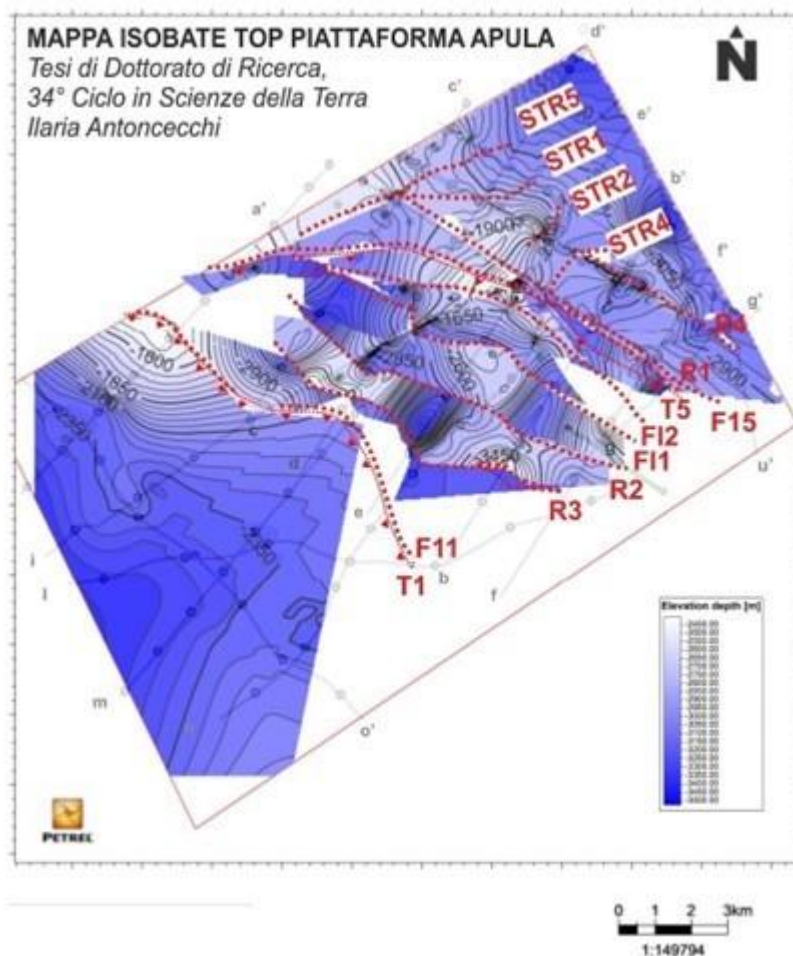


Figura 7.8 Mappa dell'isobata del top dell'unità della piattaforma Apula elaborata in Petrel Software. In rosso sono riportate le tracce delle strutture interpretate che coinvolgono queste formazioni.

8. CONFRONTO CON I DATI DI SISMICITA' RECENTE

Una volta elaborato il modello pseudo 3D, sono stati caricati i dati dei cataloghi di sismicità locale del periodo 2001-2014 prodotti dall'INGV come descritto nel capitolo 3, paragrafo 3.9 Fase 6.

Tali dati riportati in carta geologico-strutturale confermano la presenza di due diversi cluster che saranno denominati, per comodità e omogeneità con i lavori sul tema (Stabile et al., 2014a, Valoroso et al., 2009, 2011, Improta et al., 2015, Buttinelli et al., 2016, Improta et al., 2017) cluster 1 e cluster 2 (Figura 8.1).

Il cluster 1 è caratterizzato da eventi lungo quasi tutto il bordo W da N a S dell'area di studio (lungo il sistema di Faglia MMSF) e, in particolare nelle aree dove potrebbe essere più superficiale la piattaforma Apula in corrispondenza del T1 e della faglia F11 che taglia la struttura. Nella parte Nord dell'area di studio il cluster 1 è rappresentato da diversi eventi nell'intorno della faglia normale riportata in carta Figura 8.1 coincidente con la faglia F11 interpretata. Tuttavia, nella parte sudoccidentale dell'area di studio nell'immediate vicinanze delle sezioni EE' e BB' l'addensamento degli eventi del cluster 1 sembra più evidente. In dettaglio, tra le due sezioni EE' e BB', già in mappa è evidente uno spostamento del cluster 1 più a W nella sezione BB' rispetto alla posizione dello stesso cluster in EE'.

Il cluster 2 si rinviene unicamente nella parte E del bacino in corrispondenza della sezione BB' e nell'immediato intorno dei pozzi 11 e 12. Tale circostanza è confermata da tutti i cataloghi INGV, sia quello relativo agli eventi selezionati (descritti al capitolo 3) che quelli relativi agli eventi non selezionati.

È da sottolineare invece l'assenza di ulteriori allineamenti significativi degli eventi in altre aree del modello strutturale realizzato, come ad esempio nell'immediato intorno della struttura di M. Alpi (tra le due faglie che bordano il bacino F11-F15 e le strutture che caratterizzano il pop-up R3, R2, F11 e F12 e T5).

La localizzazione degli eventi dei due cluster con il modello strutturale interpretato offre sicuramente importanti informazioni per la caratterizzazione della sismicità dell'area che di seguito si analizzano in dettaglio in relazione al modello strutturale 3D interpretato. Al fine di poter effettuare queste valutazioni sono stati considerati gli eventi in un raggio di 3 km dalle sezioni EE' e BB' dove i cluster 1 e 2 sono maggiormente addensati.

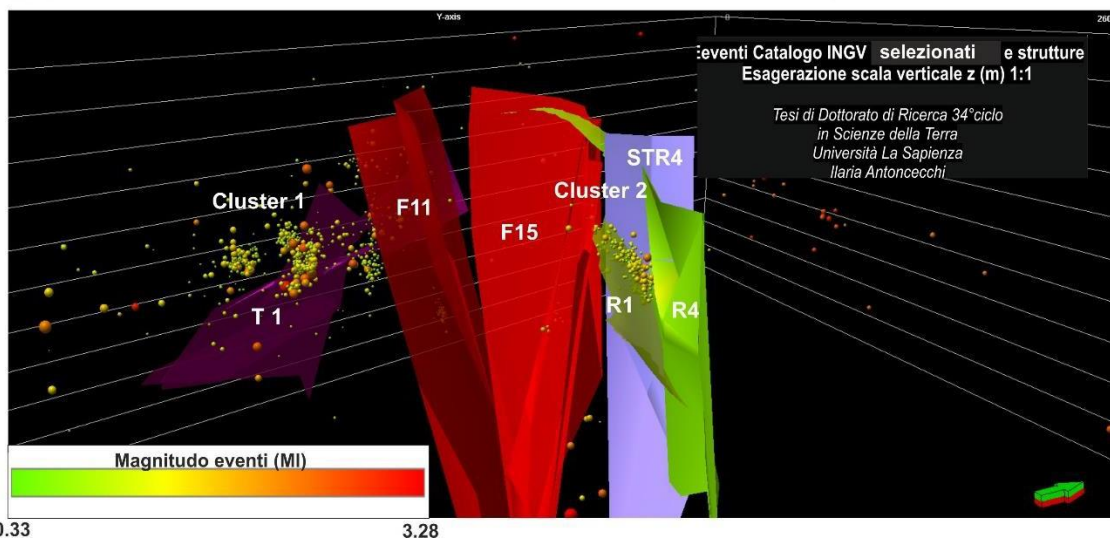
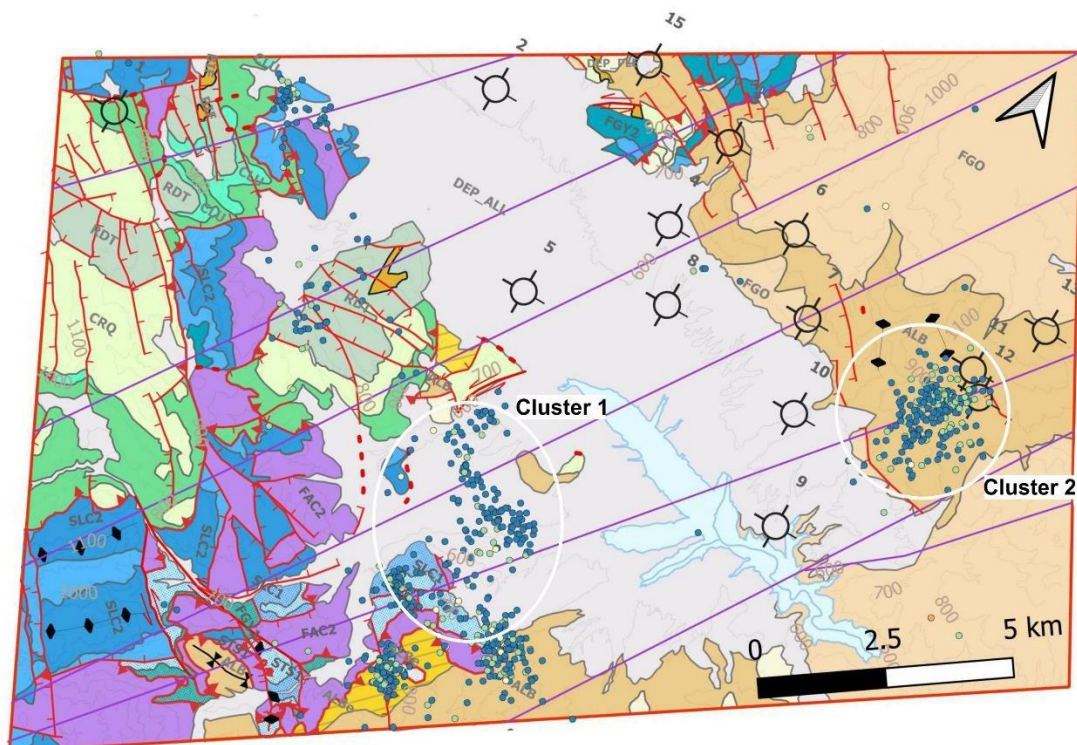


Figura 8.1 Localizzazione degli eventi sismici del catalogo INGV (eventi selezionati) in pianta su carta strutturale realizzata in Q GIS ed in ambiente 3D nel modello strutturale pseudo 3D realizzato (esagerazione scala verticale 1:1 in Petrel software). A W della carta ed in corrispondenza della struttura T1 si individua il cluster 1; a E della carta e in corrispondenza della struttura R1 si individua il cluster 2. Gli eventi sono rappresentati in funzione della Magnitudo MI nella scala di colori indicata in legenda.

Osservando lo stesso catalogo della sismicità nel modello pseudo 3D in profondità si riscontra quanto segue:

- il cluster 1 osservato sulla sezione EE' è localizzato in corrispondenza della Faglia F11 dove quest'ultima taglia il thrust T1. Gli eventi di questo cluster hanno un range di Magnitudo Locale tra $-0,26 < MI < 3,28$ e sono localizzati quasi esclusivamente al di sotto del top della Piattaforma Apula (Figura 8.2);

- il cluster 1 osservato in mappa e sulla sezione BB' si posiziona più a W della F11, coerentemente con quanto già osservato in Figura 8.3. Una possibile spiegazione di questa sismicità associata alla faglia F11 dei MMFS, come ipotizzato in Improta et al. (2017), potrebbe giustificare questo spostamento verso ovest del cluster 1 all'effetto della dislocazione dovuto alla faglia trascorrente sinistra ipotizzata in mappa al di sotto dei depositi alluvionali che separa l'intero settore di Pian di Maglia da quello di Moliterno (Figura 8.3). Questa struttura dovrebbe quindi proseguire lungo tutta l'area di studio in direzione SW -NE parallelamente alla sezione BB' creando una separazione tra le strutture di BB' e quelle di EE' e potrebbe coincidere o con le faglie STR4 o STR2. Questa considerazione potrebbe anche essere supportata dalle evidenze nella differenza degli spessori registrati tra la parte N (a N di EE') e a S (sotto BB') dell'area di studio sia nelle Unità Irpine che in quelle Lagonegresi.

Tuttavia, un'altra interpretazione, maggiormente esplorata in questo studio (Capitolo 9.3), considera l'addensamento degli eventi del subcluster principale del cluster 1 sul Thrust T1, confermato anche ad un'immersione degli eventi verso SW. Tale allineamento in EE' e BB' (più spostato a W) può indicare una possibile riattivazione con cinematica estensionale del thrust giustificata da una favorevole orientazione del piano di faglia rispetto al campo di stress attuale.

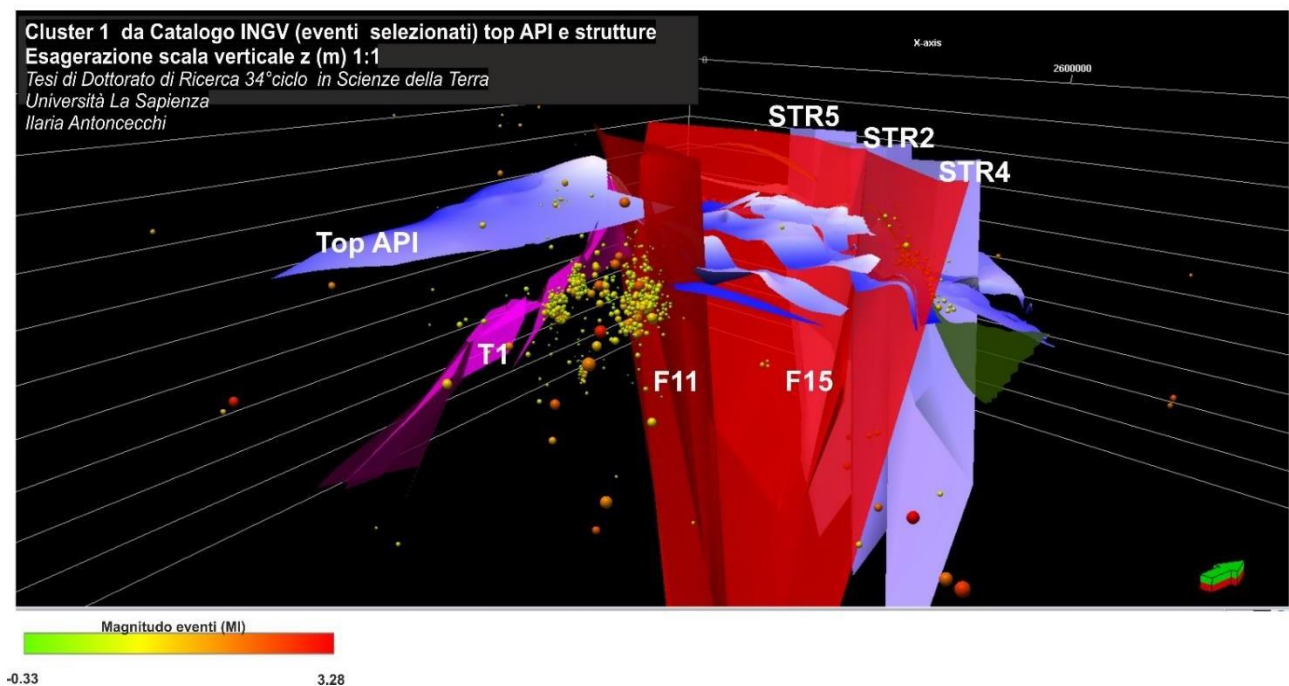


Figura 8.2 Dettaglio della localizzazione degli eventi sismici del catalogo INGV (eventi selezionati) nel modello strutturale pseudo 3D realizzato in Petrel Software (esagerazione scala verticale 1:1). L'immagine mette in evidenza l'allineamento degli eventi del cluster 1 a W del bacino sulla struttura T1 e al di sotto del top delle unità della piattaforma Apula. Gli eventi sono rappresentati in funzione della Magnitudo MI nella scala di colori indicata in legenda.

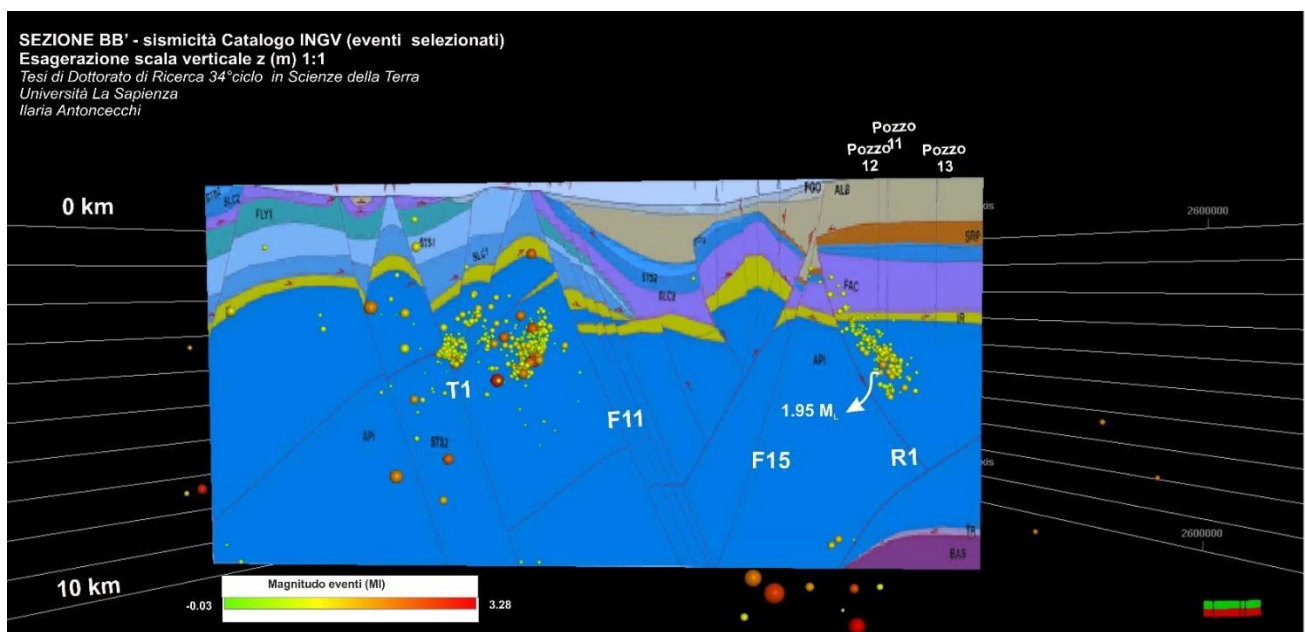
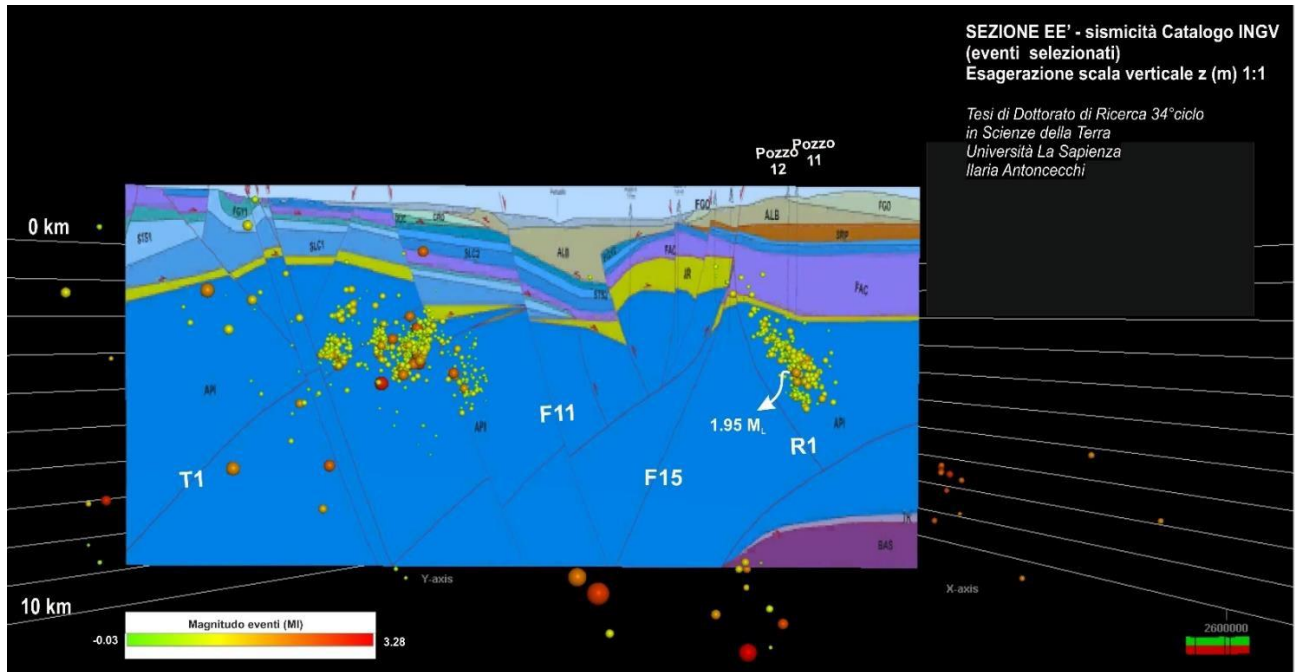


Figura 8.3 Confronto della localizzazione sulle sezioni EE' e BB' degli eventi sismici del catalogo INGV (eventi selezionati) nel modello strutturale pseudo 3D realizzato in Petrel software (esagerazione scala verticale 1:1). Gli eventi proiettati sono localizzati ad una distanza massima dalle sezioni di 3 km. Nella sezione in alto EE' (più a N) gli eventi del cluster 1 sono prevalentemente allineati sul thrust T1 sia a tetto che a letto della faglia F11 che taglia il T1. Nella sezione in basso BB' (più a S) l'allineamento del cluster 1 pur rimanendo allineato sul thrust T1 è spostato verso W e non viene interessato dalla faglia F11. Gli eventi sono rappresentati in funzione della Magnitudo MI nella scala di colori indicata in legenda.

- Il cluster 2 in Figura 8.4 è caratterizzato da eventi con Magnitudo Locale (MI) compresa in un range tra -0,03 e 1,7. Si tratta di eventi a MI molto bassa selezionati e tutti confinati all'interno della struttura del CM2. L'evento di maggiore MI registrato nel cluster 2 ha un valore di 1,95 e si trova in corrispondenza del pozzo 12 (maggior evento registrato durante la fase di sperimentazione da INGV in data 26.10.2010);

- si osserva un evidente allineamento degli eventi del cluster 2 sul retroscorrimento R1 nella sezione EE' (più a N) che rimane sostanzialmente invariato nella sezione BB' (più a S);
- gli eventi sono confinati all'interno dell'unità della piattaforma Apula (al di sotto del fondo pozzo) (Figura 8.3 vista sezione EE') e solo pochi sparsi eventi sono localizzati all'interno dell'Unità Irpina. Infatti, nonostante la faglia R1, in base all'interpretazione effettuata, interessa le unità del Serrapotamo e quelle oligoceniche del Flysch di Albidona, gli eventi registrati (riportati in entrambi i cataloghi di INGV) si attestano ad una profondità tra i 3 e i 5 km. Come è possibile osservare non ci sono eventi al di sopra dell'Unità Irpina, inoltre gli eventi rimangono confinati tra la faglia R1 e la struttura STR4 e non interessano la struttura estensionale F15.

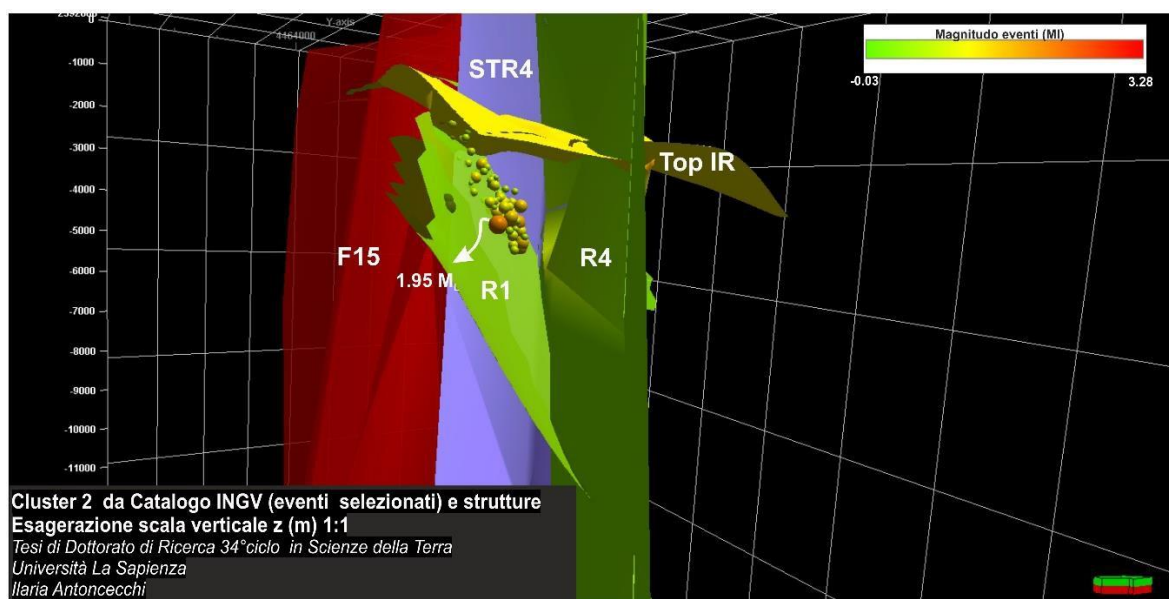


Figura 8.4 Dettaglio della localizzazione degli eventi sismici del catalogo INGV (eventi selezionati più l'evento di maggiore MI registrato) nel modello strutturale pseudo 3D realizzato in Petrel software (esagerazione scala verticale 1:1). Il particolare la figura mette in evidenza l'allineamento degli eventi sulla struttura R1 e al di sotto del top delle unità Irpine. Gli eventi sono rappresentati in funzione della Magnitudo MI nella scala di colori indicata in legenda.

Sempre relativamente al cluster 2 si osserva un altro leggero allineamento di pochi eventi lungo un piano a immersione opposta (SW) relativo, probabilmente, ad una faglia non individuata nelle sezioni sismiche analizzate e un generale allineamento degli stessi sulla faglia trascorrente STR4 che chiude a N la struttura. Risulta pressoché non coinvolta la faglia R4.

Infine, come è possibile osservare sempre in Figura 8.3, gli eventi del cluster 1 a ovest del bacino sono caratterizzati da magnitudo superiori rispetto a quelle del cluster 2;

I risultati del confronto del modello strutturale interpretato con la sovrapposizione degli eventi sismici sono confermati anche dal recente lavoro pubblicato da Balasco et al. (2021) che ha confrontato l'acquisizione di un profilo di resistività lungo tutta l'area di studio con la sismicità registrata. Sono stati quindi analizzati i risultati del loro confronto con il modello strutturale interpretato in questa tesi (Figura 8.5). Dalla sovrapposizione si osserva una buona corrispondenza tra il modello realizzato e il profilo di resistività e vengono messi in evidenza importanti elementi a supporto dei risultati ottenuti:

- la presenza di due antiformali a W e a E della Val d'Agri (corrispondente all'area di studio indagata in questa tesi) costituite dai carbonati della Piattaforma Apula in un dominio di elevati valori di resistività ($100 \Omega\text{m} < \rho < 300$) e dove si localizza la sismicità dei due cluster individuati (Figura 8.5); tali antiformali coincidono con il bordo W del bacino dove è presente il sistema dei Monti della Maddalena e il bordo E dove è presente la EAFS e si rinviene la struttura del CM2;
- l'altezza della fascia a elevata resistività (dove si localizza la sismicità) della Piattaforma Apula si trova a profondità concordi sia con quanto noto in letteratura (Nicolai e Gambini, 2007) che con il top di API interpretato in questa tesi;
- la sismicità risiede tutta all'interno della piattaforma Apula nella fascia verde di Figura 8.5 a elevata resistività ed è assente nelle zone in giallo caratterizzate da stessa V_p ma più bassa resistività; di fatto la fascia gialla costituisce una barriera reologica (De Landro et al., 2015);
- nella parte W la sismicità è più diffusa dai 4 km di profondità verso la superficie in quanto è presente una maggiore permeabilità e circolazione dei fluidi generata dalla presenza del sistema di faglie dei MMFS ENE-immergenti che tagliando le strutture profonde permette la risalita di fluidi (vedi ad esempio le manifestazioni superficiali di idrocarburi presenti nella sorgente di Tramutola).
- una zona centrale nel profilo MT imputabile ad una complessa zona di faglia caratterizzata da un corridoio ad elevata conduttività (C1) (elevata permeabilità) costituita da una moltitudine di faglie su piccola scala e relative strutture che forniscono alta permeabilità e circolazione di fluidi e che si distingue per i valori di bassa resistività. Questa zona dove risultano assenti eventi sismici coincide con un piano immergente a SW a 6 km di profondità delimitato dalla Faglia di Caldarosa che taglia il fianco del bordo orientale della Val d'Agri. Nel modello realizzato in questo studio tale zona coincide con la porzione terminale delimitata dalla T5 e dalla F15. Un'interpretazione alternativa a questo abbassamento della resistività potrebbe essere dovuta, secondo gli autori, alla presenza di una zona di taglio come supposto e testato in un precedente studio sintetico (Candela et al., 2015) e che ben si concilia anche con l'interpretazione effettuata in questo studio nel caso del proseguimento delle faglie individuate STR2, STR4.
- osservando inoltre in dettaglio la distribuzione del cluster 2 nel modello MT rispetto alle strutture interpretate, quello che si osserva è che la posizione di R1, dove si allineano gli eventi, si localizza nella fascia colorata in verde (ad alta resistività), mentre la faglia che borda a E la struttura del CM2 ricade nel dominio in giallo a bassa resistività.

Queste considerazioni hanno importanti implicazioni a supporto della caratterizzazione della sismicità indotta discusse nel prossimo paragrafo.

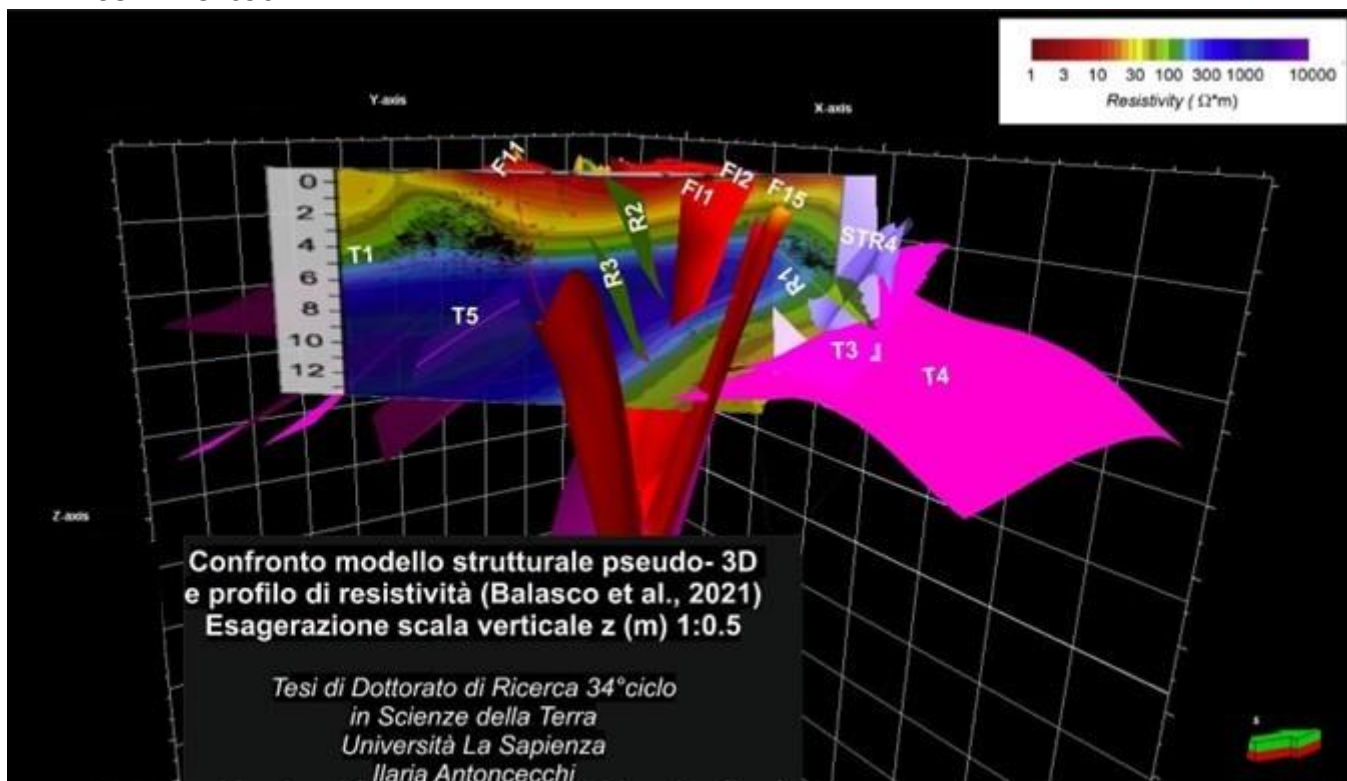


Figura 8.5 Sovrapposizione del modello strutturale realizzato e degli eventi del catalogo INGV con il profilo di resistività acquisito da Balasco et al. (2021). In fucsia sono rappresentati i Trust (T1 e T5 in trasparenza dietro la sezione) in rosso le faglie principali che bordano il bacino F11 e F15, in verde il retroscorrimento R1 e in viola la faglia STR4.

Altre valutazioni possono scaturire dal confronto del modello realizzato in questa tesi e quanto riportato nel lavoro di Vadacca et al. (2021). Il lavoro di Vadacca et al. (2021) ha permesso di effettuare alcune simulazioni con modelli accoppiati fluido-geomeccanici delle faglie del CM2 individuate da Buttinelli et al. (2016), arrivando a considerazioni importanti riguardo ai meccanismi che possono avere generato la sismicità nella zona a E del bacino della Val d'Agri. Tra queste sicuramente vi è una stretta relazione tra la localizzazione degli eventi e le faglie che sono favorevolmente orientate rispetto al campo di stress (in questo caso quindi sulle faglie con immersione a NE), al contrario di quanto avviene ad esempio nelle faglie che sono orientate sfavorevolmente rispetto al campo di stress (Figura 8.6).

In particolare, le simulazioni effettuate hanno messo in evidenza che l'iniezione di acqua di strato nel pozzo CM2 vicino alla faglia F2, in questo studio vicino alla faglia R4, incide sulla diffusione di fluidi nella zona della faglia F1, coincidente con R1, innescando la sismicità. Tale risultato, seppure solido nella metodologia utilizzata, ha comunque il limite di non considerare adeguatamente il contributo della coltivazione del campo e deve quindi essere verificato alla luce delle informazioni sulle produzioni e sulle informazioni di sottosuolo relative alla permeabilità (l'evoluzione delle pressioni di poro sono calcolate come risultante della produzione dell'iniezione ed escludendo i valori di pressione di produzione fino a 30-40 bar tra il 2006 e il 2014). In dettaglio, nello studio Vadacca et al., (2021) ipotizzano che il nucleo di faglia, caratterizzato da bassa permeabilità, si comporti come una barriera geologica (Caine et al., 1996) per la migrazione di fluidi in direzione NE (normale al piano di faglia). Al contrario, la zona di danneggiamento consente la migrazione di fluidi

in direzione tangenziale al piano di faglia. Data l'impostazione strutturale del sistema di faglie individuato nello studio di Vadacca et al. (2021), pressochè coincidente con l'interpretazione effettuata in questa tesi, le faglie F1 e F5 in Figura 8.7 sono coincidenti con le strutture interpretate R1 e STR4. E' presente inoltre nella simulazione di Vadacca et al. (2021) la faglia normale F2 che non è stata individuata nel modello proposto in questa tesi. Nella simulazione le faglie si intersecano a circa 5 km di profondità rappresentando un unico passaggio per la circolazione dei fluidi. In sostanza è stato simulato il comportamento di queste faglie all'iniezione del pozzo CM2 per verificarne la stabilità tramite l'analisi di variazione della slip tendency. La slip tendency (ST) nel caso di faglie preesistenti (a bassa coesione) è descritta dalla legge di Amontons ed è uguale al rapporto tra lo stress di taglio (τ) sullo stress normale (σ).

Quindi, la faglia risulta stabile dove $ST < \mu_s$ (dove μ_s rappresenta il coefficiente di frizione di scivolamento) e risulta instabile se $ST > \mu_s$. Assumendo le incertezze dovute al valore reale di μ_s e al campo di stress iniziale sulla faglia, la simulazione è stata fatta considerando ST come valore relativo di variazione rispetto a un dato valore all'inizio dell'iniezione (non assoluto).

Come possibile osservare dalla Figura 8.7 la simulazione mette in evidenza che all'avvio dell'iniezione di acqua dal pozzo CM2 sulla faglia F2, la faglia F2 risponde con un aumento del valore di slip tendency, mentre la faglia F1 antitetica registra più bassi valori di slip tendency (in termini di variazione). Inoltre è visibile che dal basso verso l'alto della struttura F2 aumentano i valori di slip tendency. Tra i risultati più interessanti della simulazione di Vadacca et al. (2021) ai fini di questo progetto di ricerca vi è il confronto dei risultati della simulazione con la sismicità. Infatti, è evidente in Figura 8.7 che la sismicità sia allineata prevalentemente sulla struttura F1 che ha registrato la minore variazione di slip tendency (valore 0,012); mentre avviene il contrario per la F2 che ha registrato un aumento della variazione di slip tendency (valore 0,025) e non presenta eventi sismici.

Questo è stato spiegato da Vadacca et al. (2021) attraverso un modello meccanico che prevede l'assenza di sismicità nella parte meno profonda della faglia F2 giustificata da un comportamento di rottura asismico della faglia, dove sono presenti eventi solo nella fase iniziale della sperimentazione a profondità di circa 5 km (in giallo in Figura 8.7) e una reazione di tipo sismico della faglia F1 (coincidente con la faglia R1) sulla quale è presente la maggior parte degli eventi registrati nelle ore successive (in nero in Figura 8.7). L'aumento della velocità e della pressione dei fluidi sulla faglia F2 favorirebbe quindi nel tempo lo scorrimento asismico della faglia e il trasferimento dello stress generato sulla faglia F1, riattivando F1 in profondità con un comportamento a modalità mista di scorrimento: scorrimento della faglia e microsismicità su patch di faglia che potrebbero essere più inclini a sviluppare instabilità di attrito. Infine, la sismicità si propagherebbe verso l'alto della struttura F1 per lo stesso effetto combinato di trasferimento di stress dei fluidi descritto su F2.

Un altro importante risultato del lavoro di Vadacca et al. (2021) da riprendere per la caratterizzazione della sismicità indotta in questo progetto di ricerca è il ruolo della zona di trasferimento F5 (che nel modello realizzato in questa tesi coincide con la faglia trascorrente sinistra STR4 svincolo laterale della faglia R4) nella compartimentazione del serbatoio. Come detto questa faglia è mal orientata rispetto allo stress regionale e locale (gli eventi infatti hanno meccanismi focali si orientano prevalentemente lungo piani nodali NW- SE in accordo con il campo di stress regionale

con sforzo minimo orizzontale orientato NE-SW, definito dai dati strutturali, dai breakouts di pozzo e dai dati GPS, es. Figura 8.6 (Cucci et al., 2004; Ferranti et al., 2014; Maschio et al., 2005; Montone et al., 2012) e questo significa che è meno probabile che si riattivi rispetto a faglie con immersione differente. Il valore massimo di slip tendency ottenuto per questa struttura è di 0,002. Tuttavia, anche se la faglia F5 non è prossima ad una riattivazione, il suo ruolo di barriera idrologica è fondamentale nella redistribuzione dello stress nel giacimento dovuta alla reiezione di acqua. Infatti, la zona di trasferimento impedisce la migrazione di fluidi verso S nella direzione normale al piano di faglia. In questo modo, la pressione interstiziale aumenta principalmente sul lato nord della faglia e questo può spiegare perché la grande quantità di microsismicità si concentri su quel lato della faglia.

L'adozione di un modello strutturale innovativo rispetto a Buttinelli et al. (2016), come quello interpretato in questa tesi in relazione all'architettura interna dell'alto strutturale del CM2 ovvero in relazione alla posizione, allo strike e ai dip dei thrusts e back-thrusts individuati) potrebbe dare un interessante contributo agli studi geomeccanici e alle modellazioni future sulla scia dell'analisi di Vadacca et al., 2021.

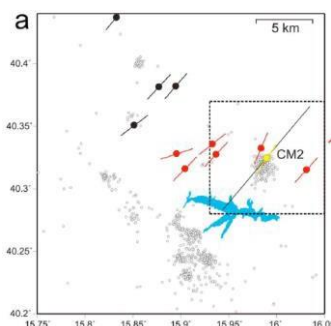


Figura 8.6 Mappa degli eventi sismici nell'area di studio (da Improta et al., 2017) che riporta la posizione dei pozzi e i dati di breakouts. Le linee spesse sul pozzo indicano la direzione di minimo stress orizzontale.

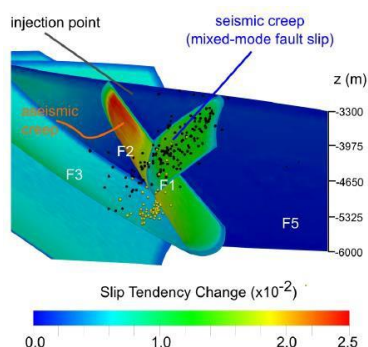


Figura 8.7 Risultati della simulazione realizzata da Vadacca et al., 20212 attraverso il modello accoppiato di simulazione fluido geomeccanica della struttura del CM2. La figura mette in evidenza il comportamento asismico della faglia F2 a maggiore slip tendency, coincidente con la STR4 del modello strutturale realizzato in questo studio, rispetto alla reazione a comportamento sismico (modello mix mode) della faglia F1, coincidente con la R1 del modello strutturale realizzato in questo studio. Inoltre, riporta l'evidenza del differente ruolo delle faglie a orientazione sfavorevole rispetto al campo di stress nella capacità di diffusione della sismicità, come testimoniato dall'assenza di eventi sulla faglia F5, coincidente con la prosecuzione della struttura STR4 nel modello strutturale realizzato. I puntini gialli indicano gli eventi del primo mese di sperimentazione durante la fase di iniezione e sono localizzati tutti in profondità verso l'intersezione delle due strutture; i puntini neri rappresentano gli eventi da luglio 2006 a dicembre 2013 ripresi dal lavoro di Improta et al. (2017).

9 DISCUSSIONE

La presente tesi di dottorato ha come obiettivo principale la caratterizzazione della sismicità indotta dalla attività di produzione di idrocarburi nella zona della Val d'Agri attraverso l'analisi dei vincoli derivanti dalla modellazione geologico-strutturale 3D e dai dati sismologici.

A questo scopo, si è avvalsa dell'utilizzo di nuovi e numerosi dati messi a disposizione da parte della società titolare della concessione Val d'Agri (Eni S.p.A.) e da parte di INGV, grazie ai quali è stato possibile formulare nuove considerazioni attraverso il confronto tra l'interpretazione derivata dai dati di sottosuolo (pozzi e linee sismiche) e dal dataset avanzato (poiché migliorato attraverso tecniche di processamento avanzato) della sismicità registrata.

In concreto la ricerca ha prodotto a supporto delle conclusioni dello studio il seguente materiale:

- una nuova carta geologico-strutturale dell'area di studio;
- sette sezioni geologiche;
- un modello geo-strutturale pseudo 3D vincolato da dati superficiali e profondi;
- mappe di profondità dei principali orizzonti stratigrafici identificati;
- confronto tra la microsismicità rilevata e il modello realizzato.

Il modello strutturale interpretato in questo studio ha un'affidabilità compresa tra l'82-85% e permette di rispondere ad alcuni quesiti ancora aperti di carattere geo-strutturale e sismotettonico nella Val D'Agri.

In primo luogo, è stato possibile ricostruire l'assetto geologico-strutturale dell'area tenendo conto sia dei dati di superficie che di sottosuolo (pozzi e linee sismiche). Questo ha permesso di rivedere alcuni aspetti significativi delle caratteristiche di alcune unità tettoniche, quali ad esempio la distinzione tra l'Unità di Lagonegro I e II nell'area di studio, la loro distribuzione in base alle formazioni riconosciute e gli spessori e le caratteristiche di alcune delle principali strutture attribuibili ai due sistemi noti dei MMFS e EAFS.

Ad esempio, le caratteristiche delle Unità della Lagonegro I e II hanno permesso di riconoscere e supportare l'interpretazione delle unità in profondità permettendo una migliore valutazione della strutturazione del top dell'Unità Irpine e delle Unità della Piattaforma Apula e dei loro spessori; mentre la valutazione delle faglie estensionali dei due sistemi MMFS e EAFS che proseguono in profondità hanno permesso di capire le relazioni tra le diverse fasi che hanno interessato l'area.

Infatti, dall'analisi effettuata sui dati è stato possibile realizzare un modello strutturale (2D e 3D) che mettesse in evidenza le principali strutture, le loro relazioni e le diverse fasi tettoniche che hanno interessato l'area di studio evidenziando nello specifico anche importanti caratteristiche in termini di lunghezze, rigetti e cinematica delle faglie presenti.

In sostanza sono state riconosciute 3 fasi tettoniche attraverso l'identificazione delle strutture riportate:

- fase compressiva di età miocenico-pliocenica associata alla formazione di una complessa struttura imbricata a piega antiforale che interessa le unità all'interno dell'area di studio, caratterizzata dalla formazione di una struttura a duplex della piattaforma apula generata dai thrust T1; T5; T3; T4; formazione di una *fault propagation fold* all'interno delle unità Lagonegresi (rigetto verso NE stimato in più di 23 km), retroscorrimenti R1; R2, R3 e R4 che coinvolgono i depositi oligocenici e sovrascorrimenti fuori sequenza quali ad esempio quello

- presente nella sezione AA'. Il trasporto per diversi chilometri delle unità lagonegresi nonché la loro presenza in affioramento dimostra la presenza in profondità di sollevamenti locali significativi della piattaforma apula generati dai thrust T1 e T5 e dai loro rigetti;
- fase trascorrente di età pliocenico-pleistocenica a cui corrisponde la formazione dell'antiforme di Monte Alpi ulteriormente definita attraverso un pop-up generato a W dai retroscorrimenti R3, R2 e a E dal thrust T5. Nella parte centrale della struttura si riconoscono altre due faglie F11 e F12 originariamente compressive e riattivate in senso estensionale;
 - fase estensionale quaternaria associata alla presenza delle faglie F11 e F15 che bordano a E e W il bacino dell'Agri e che risultano come elementi dei due sistemi identificati come EAFS e MMFS. Si tratta di faglie ad alto angolo che coinvolgono le unità pleistoceniche quaternarie e arrivano a tagliare le strutture più profonde associate alle precedenti fasi tettoniche. In particolare, la faglia F11, risulta avere una lunghezza della traccia in mappa >15 km (che prosegue a N in continuità con la faglia sismogenica "Irpina") e con rigetto > 1 km (affidabilità di circa il 50%); mentre la Faglia F15 risulta avere una lunghezza della traccia in mappa di 15,5 km per un rigetto di circa 150 m (affidabilità del 100%).

9.1 Thin- vs thick-skinned tectonics

Tale modello rispetto al significato tettonico delle strutture interpretate riesce a fornire alcune importanti evidenze a supporto del complesso dibattito scientifico per l'attribuzione dell'Appennino Meridionale a un modello di tipo *thin o thick skinned* (vedasi Capitolo 6, par. 6.1 e 6.2 per una discussione). Si analizza questo aspetto attraverso gli elementi discussi da Scrocca et al., 2005:

1. scollamento delle unità alloctone;
2. geometria dei thrust principali;
3. deformazione del basamento;
4. raccorciamento del basamento;
5. spostamento verso ovest del piano di subduzione.

Per quanto riguarda lo scollamento delle unità alloctone il lavoro di rilevamento e di elaborazione della carta geologico-strutturale, unita all'analisi dei vincoli profondi, ha permesso di ridefinire la distribuzione delle Unità Lagonegresi all'interno dell'area di studio rispetto a quanto oggi riportato nell'ambito del progetto CARG Foglio 505 "Moliterno". Quindi, la presenza/assenza della Lagonegro I/II nella porzione SW e NE dell'area di studio è necessaria a quantificare lo spessore delle unità alloctone e lo scollamento delle stesse sulla piattaforma Apula. Nell'interpretazione effettuata in questo studio il rigetto supera di gran lunga i 23 km. Tuttavia, questo dato non risulta essere sufficiente, poiché per definire appropriatamente l'attribuzione a un modello *thin skinned* lo scollamento delle unità alloctone dovrebbe essere almeno di 280-300 km.

Altre considerazioni importanti riguardano invece i punti 2- 5. In merito alle geometrie dei thrust è possibile sostenere, grazie alle evidenze riportate dal dato sismico, che queste non risultano ruotate e che rispetto a quanto portato in sezioni quali ad esempio quella di Candela et al., 2015 i thrust sono meno inclinati. Queste considerazioni sono molto affidabili se consideriamo le interpretazioni delle geometrie, anche in profondità, dei thrust T1 e T5. Per quanto riguarda, invece, il basamento questo non risulta essere coinvolto nella deformazione in quanto il top risulta essere

presente esclusivamente nel lato est delle sezioni a circa 9-10 km. Tale interpretazione risulta tuttavia avere un'affidabilità di circa il 50% per quanto riguarda l'interpretazione di T3 e T4 considerate le incertezze legate alle profondità, all'assenza del dato di pozzo e alla possibilità di vincolare il modello di velocità applicato.

La presenza e la geometria del T3 e T4 sembra tuttavia essere in accordo anche con quanto reso evidente dal profilo di resistività realizzato nello studio di Balasco et al. (2021) che definisce appunto un'importante interruzione dei carbonati al di sotto dei 6 km determinato da una zona ad elevata conduttività che taglia il fianco orientale della Val d'Agri attraverso una struttura di faglie complessa che immerge a SW. In sintesi, nonostante le difficoltà di poter visualizzare in profondità attraverso la sismica i piani di faglia responsabili della sua strutturazione (Van Dijk, 2013), l'analisi di informazioni secondarie quali quelle considerate in questo studio ha permesso di ricondurre l'interpretazione in generale accordo con un modello tettonico-geodinamico di tipo *thin skinned*. Tuttavia, è bene che tali evidenze siano ulteriormente verificate in un contesto di lavoro dedicato e a scala più ampia che prenda in esame tutta l'area dell'Appennino Meridionale.

9.2 Sismotettonica

Dal punto di vista sismologico, l'interpretazione effettuata offre un modello geologico – strutturale innovativo e più dettagliato rispetto a quanto presente in letteratura da poter utilizzare per la caratterizzazione della sismicità nell'area di studio (Candela et al. 2015, e, nell'intorno del pozzo CM 2, Buttinelli et al. 2016). Infatti, rispetto la localizzazione degli eventi sulla sezione interpretata da Candela et al. (2015) (Figura 9.1), la sismicità registrata sembra acquisire un significato più coerente e solido con i dati di sottosuolo nell'interpretazione effettuata in questa tesi: nel lavoro di Candela et al. (2015) un primo cluster situato nell'area Val d'Agri è rappresentato da una serie di eventi immergenti verso NE ma non corrispondenti ad alcuna struttura; un secondo cluster invece si allinea su una faglia inversa F2 immergente a NE che coincide con il back thrust della struttura del CM2. L'ipotesi riportata nel lavoro di Megna et al., 2017, considerati i meccanismi focali degli eventi del secondo cluster, è appunto quella che il back thrust si sia riattivato in senso estensionale in conseguenza di un'attività sismica presente sul thrust principale che in profondità deforma il basamento arrivando ad ipotizzare anche un ruolo dello stesso nella genesi del terremoto del 1857. Tale modello, si discosta come spiegato nei paragrafi precedenti in modo significativo dall'interpretazione strutturale effettuata in questo studio, di cui si riporta uno schema tettonico semplificato in Figura 9.2.

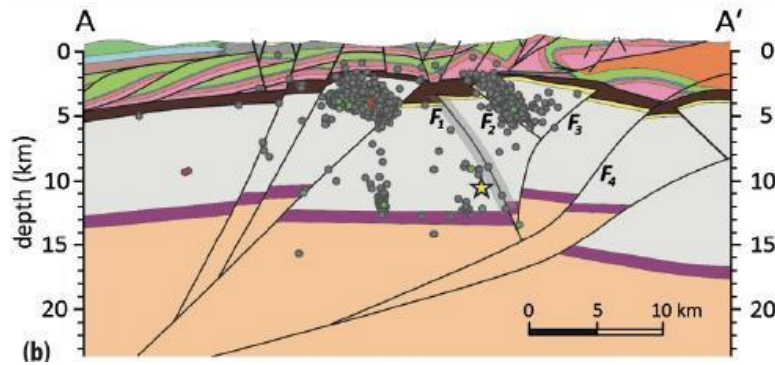
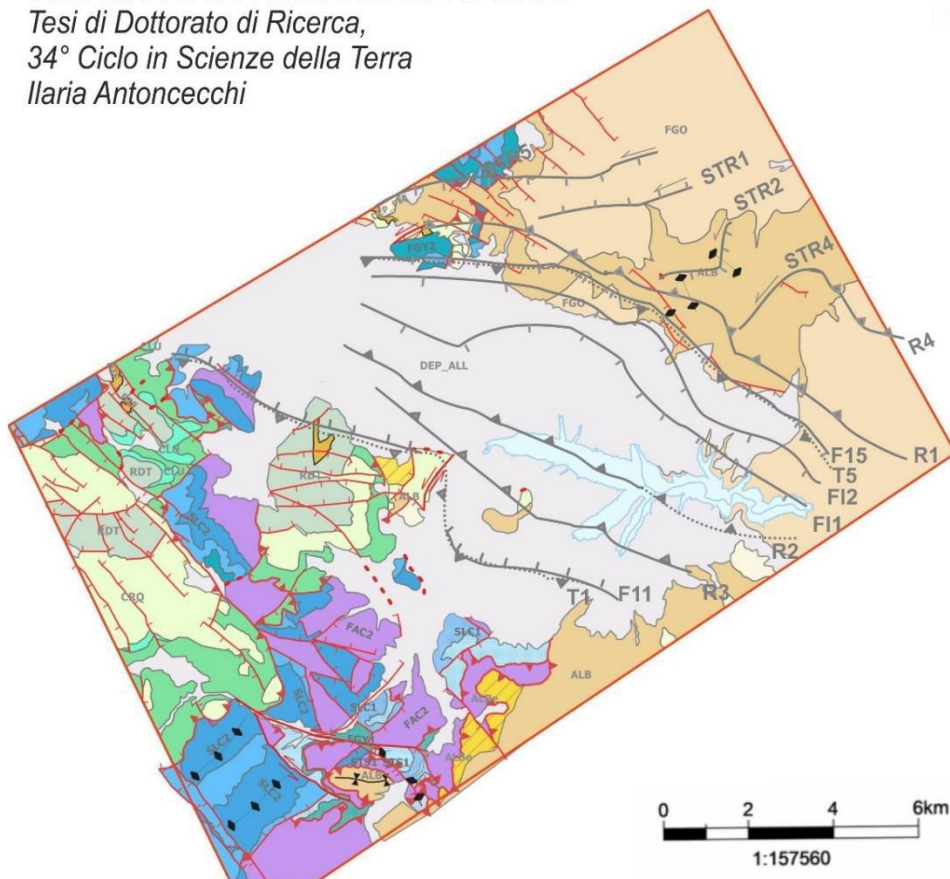


Figura 9.1 Sismicità strumentale registrata durante il periodo 2005-2013 da stazioni INGV temporanee e permanenti (Improta et al., 2015; Valoroso et al., 2011) proiettata sul modello strutturale dell'area di studio realizzato da Candela et al. (2015) (cfr. Megna et al., 2017).

SCHEMA STRUTTURALE SEMPLIFICATO

Tesi di Dottorato di Ricerca,
 34° Ciclo in Scienze della Terra
 Ilaria Antoncecchi



SIMBOLOGIA STRUTTURE

Strutture superficiali

- Struttura incerta
- > Trascorrente destra/Sinistra (le frecce indicano il senso del taglio)
- |— Faglia Normale
- <— Faglia Inversa
- ∩— Piega Sinclinale
- ∪— Piega Anticlinale

Strutture profonde

- > Trascorrente (le frecce indicano il senso del taglio)
- |— Trastensiva (le frecce indicano il senso del taglio)
- |— Faglia Normale
- <— Faglia Inversa

Figura 9.2 Schema tettonico semplificato elaborato in QGIS v. 3.16 delle strutture presenti nell'area di studio in affioramento e in profondità.

Il posizionamento degli eventi sismici registrati nell'area (dataset INGV) nel modello interpretato ha confermato l'allineamento degli eventi secondo due cluster di sismicità a W e a E del bacino del Lago del Pertusillo. Nella parte S (sotto Grumento Nova) si osserva che il primo cluster coincide con la zona di taglio del T1 da parte della faglia F11 (Figura 9.2) e che il secondo cluster si allinea lungo la faglia immergente a NE denominata R1 (Figura 9.2) che definisce la struttura del Costa Molina 2 (confermando quanto già noto da Buttinelli et al., 2016). È altresì importante notare come tutta la sismicità di entrambi i cluster si rinvenga al di sotto delle unità Irpine e all'interno dell'unità della Piattaforma Apula. Tale dato è coerente anche con quanto dimostrato da Balasco et al. (2021), capitolo 8 che conferma l'addensamento degli eventi sismici nelle zone a elevata resistività e corrispondenti alle due strutture antiformi dei Monti della Maddalena del sistema di faglie a E della Val d'Agri. Tuttavia, lo studio di Balasco et al. (2021) mette anche in evidenza, coerentemente con i risultati ottenuti in questa tesi, che mentre il cluster 2 è sicuramente isolato all'interno della trappola di idrocarburi generata dalla struttura del CM2, il cluster 1 sembra inserirsi in un contesto di maggiore circolazione di fluidi e migrazione verso la superficie (testimoniata

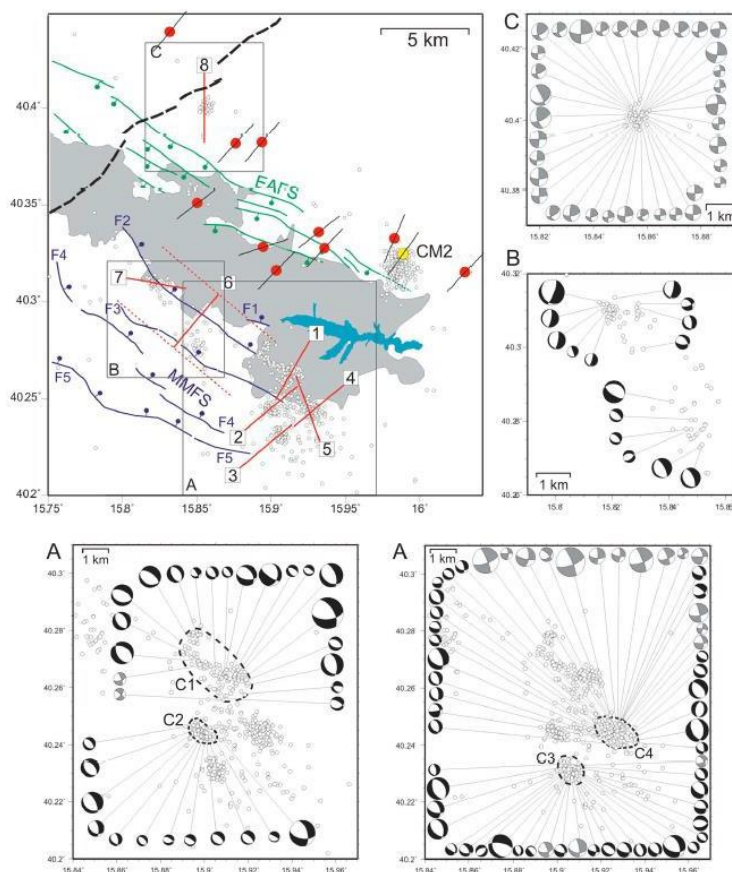


Figura 9.3 Rappresentazione dei meccanismi focali degli eventi registrati nell'area della Val d'Agri nell'area a sud del Pertusillo (da Improta et al., 2017), lungo il lato ovest (b) e il lato est c) (sciame sismico di Marsicovetere). I meccanismi focali neri e grigi sono rispettivamente prevalentemente a meccanismi estensionale e trascorrente. La linea tratteggiata in nero in a) rappresenta i cluster sismici principali da C1 – C4. In carta le faglie normali superficiali quaternarie sono rappresentate con il colore blue (MMFS) e verde (EAFS); La linea tratteggiata in nero in carta segnala una faglia transpressiva cieca riconosciuta al top dell'API (D'Adda et al., 2017; Nicolai & Gambini, 2007); i puntini più piccoli rappresentano gli epicentri degli eventi, mentre i cerchi simboleggiano i breakouts dei pozzi con l'indicazione della direzione minima di stress orizzontale. L'area in grigio corrisponde al bacino quaternario.

peraltro dalla risalita di idrocarburi nella parte NW del bacino, es. Tramutola; Van Dijk et al., 2013) che spiega anche il perché gli eventi si rinvengano lungo tutto il bordo ovest del bacino.

Entrambi i due cluster 1 e 2 sono caratterizzati da eventi con meccanismi focali che testimoniano una cinematica prevalentemente di faglia normale (Improta et al., 2017, **Errore. L 'origine riferimento non è stata trovata.** A, B e Figura 9.4, localizzata intorno al Costa Molina 2).

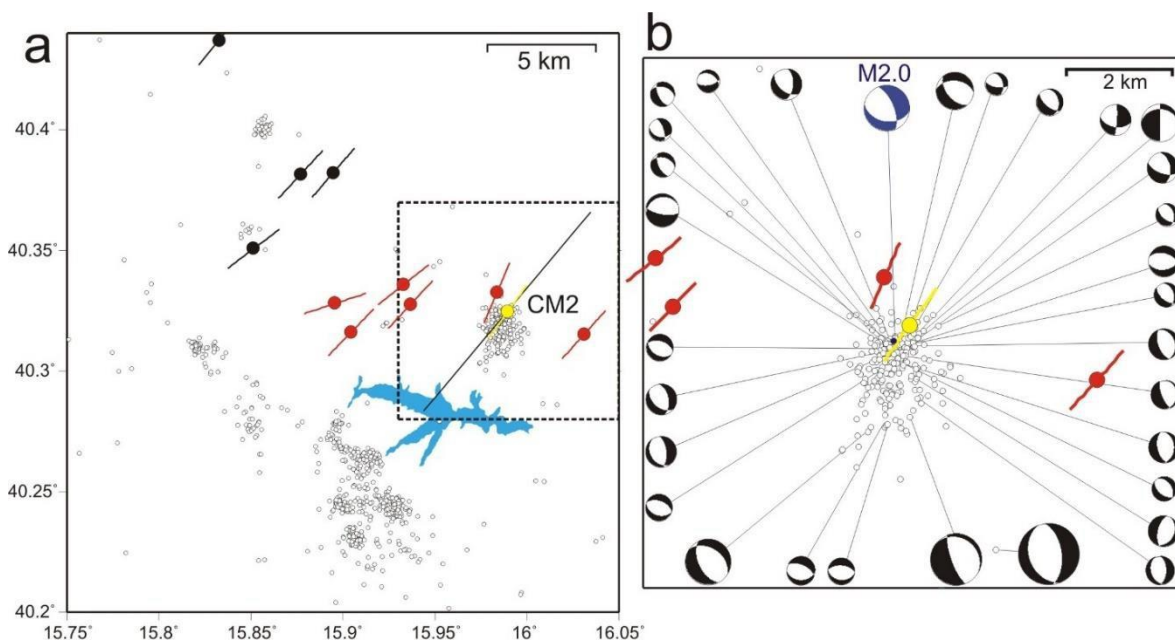


Figura 9.4 Rappresentazione dei meccanismi focali nell'intorno del pozzo CM2 (Improta et al., 2017). (a) Vista in mappa degli eventi sismici e dei pozzi con i relativi dati di breakouts disponibili. Le barre indicano la direzione minima di stress orizzontale. (b) Vista in mappa dei meccanismi focali di 31 eventi selezionati entro 5 km dal pozzo CM2 ($M_L \geq 1$; Polarità $P \geq 8$). Il pozzo CM2 è evidenziato da un cerchio giallo. Il meccanismo focale in blue rappresenta l'evento di maggiore magnitudo ($M_L 2.0$).

L'addensamento degli eventi e i meccanismi focali del cluster 1 prevalentemente estensionali registrati nella zona a W del Pertusillo concordano, dunque, perfettamente con l'interpretazione strutturale realizzata allineandosi nell'intorno della faglia bordiera F11 ed in particolare sul thrust T1 con immersione SW.

Pertanto, oltre, a confermare la bontà dell'interpretazione realizzata, come discusso in precedenza, lo studio permette di fare alcune considerazioni in merito alla caratterizzazione della sismicità nell'area grazie al confronto con gli eventi sismici e quanto noto in letteratura.

In merito alla localizzazione dell'evento sismico del 1857 di magnitudo 7 (Benedetti et al., 1998) sul lato ovest o est del bacino (Cello et al., 2003; Maschio et al., 2005), è possibile ridiscutere l'attribuzione dell'evento al sistema EAFS, in particolare rispetto a una faglia presente nella zona di Montemurro che ha assenza di evidenze in superficie del piano di faglia (come emerso dal rilevamento) e uno scarso rigetto in profondità come riscontrato dal dato sismico (circa 150 m, cfr. faglia F15 dell'interpretazione effettuata Figura 9.2). Tale rigetto, infatti, potrebbe essere difficilmente compatibile con un evento di tale magnitudo che suggerirebbe la rottura di una struttura principale e matura e non coerente con lo stile tettonico dell'area caratterizzata da una contemporanea presenza di una fase tettonica estensionale di maggior entità verso NE che è confermata tra l'altro dalla distribuzione più numerosa e diffusa degli eventi sismici a maggiore

magnitudo nel cluster 1 e lungo tutto il bordo W del bacino sulle faglie che immergono a NE dei MMFS.

Infatti, la localizzazione di questo evento sul bordo ovest del bacino in relazione al sistema dei MMFS (in particolare con la faglia F11 dell'interpretazione effettuata Figura 9.2) oltre a essere in maggiore accordo con i risultati del modello di sottosuolo qui presentato, in quanto la Faglia F11, seppur localizzata con un'affidabilità del 50% , è supportata anche da dati di letteratura (es. Balasco et al. 2021), dalla stima della lunghezza complessiva in traccia della faglia bordiera eventualmente coinvolta F11 > di 15 km con un rigetto sicuramente > di 1 km che prosegue sul tracciato della Faglia sismogenica dell'Irpina. Considerate tali dimensioni è necessario considerare, infatti, che un evento di magnitudo 7 come quello del 1857 debba aver necessariamente attivato anche un'altra faglia importante nelle vicinanze. Le evidenze della localizzazione degli eventi del cluster 1 anche a NW dell'area di studio (vicino a Tramutola) tra l'altro associata all'evidenza della faglia in superficie (probabilmente coincidente con un affioramento della faglia F11 individuata) ne è un ulteriore indizio.

Tutte queste considerazioni vanno a supportare la tesi di una sismicità storica legata al sistema dei MMFS le cui strutture che interessano le faglie profonde nell'unità della Piattaforma Apula determinano una maggiore permeabilità dell'area e quindi una maggiore diffusione degli eventi sismici coincidenti con la sismicità attuale registrata nel cluster 1 del lago del Pertusillo.

Tuttavia, come richiamato anche nel capitolo 8, un'altra interpretazione considerata in questo studio relativamente all'interpretazione del cluster 1 potrebbe mettere in relazione l'allineamento degli eventi con una riattivazione del thrust T1 con cinematica estensionale. Tale interpretazione è giustificata nel successivo paragrafo 9.3, attraverso il modello dei *graviquakes*.

Per quanto invece concerne la sismicità del cluster 2 questa è chiaramente riconducibile a un tipo di sismicità indotta (come già noto dagli studi di diversi autori Valoroso et al., 2009, Stabile et al. 2014b, Improta et al. 2015 e Buttinelli et al., 2016; Improta et al., 2017) nell'ambito della sperimentazione di iniezione delle acque di strato del CM2 nella concessione Val d'Agri.

Nell'ambito dell'interpretazione strutturale del CM2 effettuata in questo studio si riporta che il modello non si discosta in modo significativo da quanto interpretato da Buttinelli et al. (2016) ma presenta alcune caratteristiche differenti, di seguito riportate (Figura 9.2, Figura 9.5):

- il sistema a E del CM2 è rappresentato da un minor numero di faglie inverse immergenti verso SW: tra queste è presente il back thrust R4 (orientato NW-SE e con immersione NE) che chiude la struttura del CM2 sia a E che a N attraverso la sua prosecuzione in rampa laterale coincidente con la faglia STR4 (orientazione WSW-ENE); mentre in Buttinelli et al. (2016) la struttura del CM2 è chiusa a E da un thrust che immerge SW (in Figura 9.5) ed è interpretata una struttura trascorrente;
- a W la struttura è delimitata da un back thrust importante coincidente denominato R1 che ha maggiore estensione verso sud rispetto a quanto riportato da Buttinelli et al. (2016) e non si ferma al di sotto delle unità irpine ma taglia anche le unità lagonegresi e arriva a coinvolgere i depositi delle unità oligoceniche;
- in Buttinelli et al. (2016) è stato identificato un ulteriore thrust più alto al di sotto del pozzo - CM2. Tale thrust può essere ricondotto nell'interpretazione effettuata in

questo studio al thrust T3 (sotto il pozzo coincidente con CM2 denominato pozzo 12) che nel modello di questa tesi si differenzia in profondità poiché si approfondisce fino a ricongiungersi con il thrust T4 relativo al piano in subduzione.

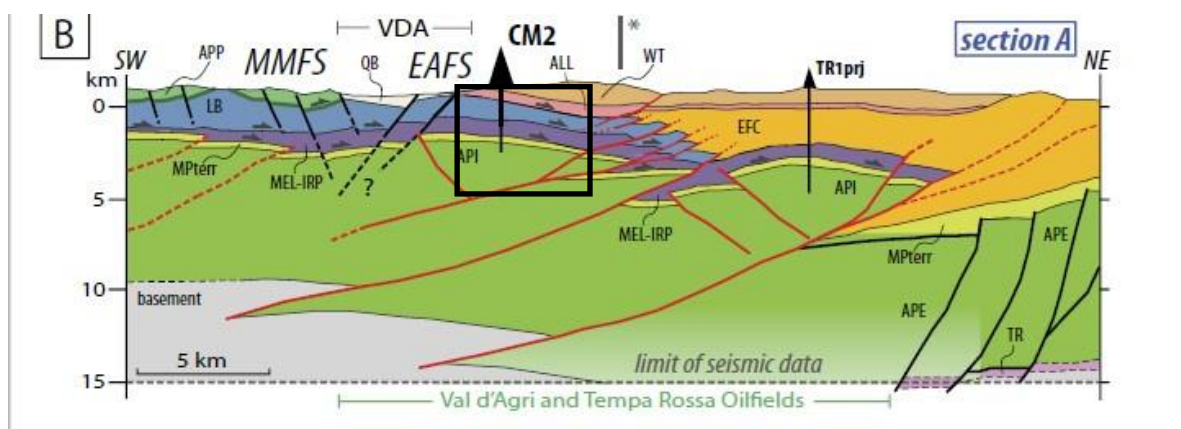
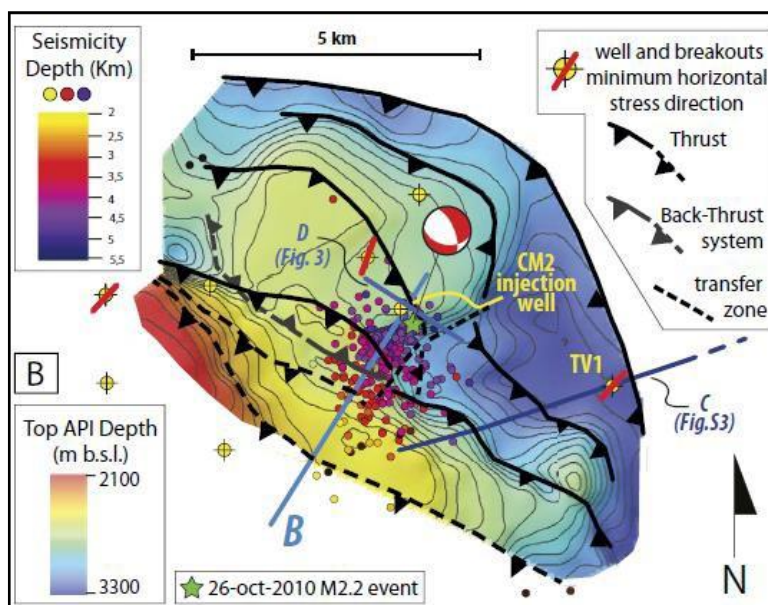


Figura 9.5 In alto in figura: mappa strutturale da Buttinelli et al. (2017) relativa all'area del CM2 interpretata che rappresenta il top della Piattaforma Apula nell'area di iniezione e la distribuzione degli eventi sismici dal 2006 al 2014. La mappa mostra le principali strutture immergenti a SW rappresentative dei thrust, la faglia trascorrente subverticale (tratteggiata), e una struttura di back-thrust immergente a NE correlata alla sismicità indotta. In basso si riporta la sezione A del lavoro di Buttinelli et al. (2016) modificata da dal lavoro di Menardi Noguera e Rea (2000).

Pertanto, in merito alla localizzazione della sismicità con il modello interpretato, rispetto a quanto riportato da Buttinelli et al. (2016) è possibile evidenziare e confermare alcuni aspetti essenziali:

- l'allineamento della sismicità avviene su una struttura orientata NW-SE e immergente a NE (Stabile et al. 2014b e Buttinelli et al. 2016) coincidente con il retroscorrimento R1 interpretato nel modello di questa tesi; si localizza al di sotto della piattaforma Apula, qualche km sotto il pozzo CM2 – pozzo 12 (Buttinelli et al., 2016);

- tale sismicità è caratterizzata da valori di M_l compresi tra - 0,03 e 1.95 ed è localizzata all'interno del serbatoio carbonatico della Piattaforma Apula confinato al tetto dalle unità Irpine e Lagonegresi impermeabili che impediscono la diffusione verso l'alto della sismicità registrata (coincidenti con i livelli a bassa resistività di Balasco et al., 2021) e la struttura R1 che delimita gli eventi all'interno della Piattaforma Apula.
- altra importante nota in merito al confinamento degli eventi nella struttura di CM2 riguarda la chiusura della struttura determinata da una faglia trascorrente sinistra STR4 ad orientazione E-W che, come svincolo laterale sinistro della faglia R4, impedisce la migrazione della sismicità verso S, favorendo la localizzazione degli eventi sulla R1 (a conferma dell'ipotesi di Vadacca et al. 2021).

Quindi, l'interpretazione effettuata ha riconfermato anche un possibile ruolo fondamentale delle strutture trascorrenti nella distribuzione della sismicità nell'area localizzata nell'intorno del pozzo CM2.

Nel capitolo 8 l'interpretazione effettuata per la caratterizzazione della sismicità con il modello strutturale del CM2 è stata confrontata sia con i risultati di Balasco et al. (2021) che con i risultati del lavoro di Vadacca et al. (2021) che permettono di confermare la presenza di una zona a bassa resistività che registra una maggiore variazione di slip tendency all'avvio dell'iniezione e una zona a elevata resistività dove si concentrano gli eventi sismici, coincidente con R1, dove è stata simulata una bassa variazione di slip tendency. L'assenza di eventi sismici associata a queste caratteristiche sottolinea la presenza di una zona a comportamento asismico; mentre l'allineamento degli eventi sulla faglia (R1) ne suggerisce un comportamento sismico in superficie e di tipo mix-mode fault slip nella parte più profonda della faglia (Vadacca et al. (2021).

9.3 Caratterizzazione della sismicità attraverso il modello dei *graviquakes*

Quanto finora discusso è compatibile e interpretabile attraverso il modello proposto da Doglioni et al. (2014); (2015) e Doglioni (2018) sui *graviquakes*. Tale modello parte dal presupposto che un terremoto si verifica quando il volume vicino a una faglia si sposta, *fase "Fault on" o fase cosismica*. Questa fase cosismica è preceduta o seguita da una fase chiamata "*Fault off*" o fase intersismica. L'evoluzione da una fase intersismica a una cosismica e viceversa è comunemente conosciuta come ciclo sismico (Thatcher and Rundle, 1979; Savage, 1983; Cattin and Avouac, 2000; Meade and Hager, 2005; Sieh et al., 2008). Una faglia si blocca (*locked fault*) e si sblocca (*unlocked or active fault*) in funzione di diversi fattori che includono le variazioni di carattere elasto-plastiche (Kanamori and Anderson, 1975; Ruina, 1983; Hobbs and Ord, 1988; Marone, 1998) rappresentate nel modello dei *graviquakes* attraverso il passaggio da dominio fragile a duttile (*Brittle-Ductile Transition* BDT in Figura 9.6). Le transizioni BDT, secondo il modello dei *graviquakes*, controllano il ciclo sismico.

In sostanza il modello prevede in regimi estensionali, come quello dell'area di studio, che la deformazione di una faglia normale nella zona duttile profonda generi una banda di dilatazione a partire dall'interfaccia BDT fino all'interno del volume di tetto della faglia, antitetico alla porzione di faglia bloccata più fragile e superficiale (Figura 9.6); tale processo nei regimi estensionali è prevalentemente guidato dalla forza di gravità. Durante la fase intersismica, il volume dilatato può gradualmente espandersi e generare una banda progressivamente sempre più indebolita dalla

fratturazione e che permette una maggiore migrazione dei fluidi. Nella fase cosismica, la banda superficiale indebolita nella porzione fragile può essere attivata e una faglia coniugata sopra la BDT può sperimentare una cinematica opposta (in Figura 9.6). Alcuni esempi che confermano questo modello sono il terremoto de L'Aquila 2009, dove è stata attivata la banda antitetica come faglia normale coniugata sul bordo occidentale sulla quale si sono allineati gli *aftershock* e i *foreshocks* (Chiarabba et al., 2009; Di Luccio et al., 2010), e l'esempio della faglia normale antitetica che ha generato il terremoto dell'Irpina del 1980.

Quindi, l'accumulo durante la fase intersismica nel contesto estensionale su una faglia normale bloccata nella zona fragile, ma attiva nella zona duttile, si sostanzia, nella fase cosismica, nell'attivazione della faglia nella zona fragile e in un rilascio di energia (evento sismico) che avviene su una faglia coniugata con cinematica opposta (Figura 9.6).

Allo stesso modo, in contesti di tettonica compressiva dove il processo è guidato prevalentemente dal rimbalzo elastico, l'accumulo di energia nella fase intersismica su una faglia inversa bloccata nella zona fragile, ma attiva nella zona duttile, si sostanzia, nella fase cosismica, in un'attivazione della parte superficiale della faglia e in un rilascio di energia su una faglia coniugata a cinematica opposta (Figura 9.6); un esempio di questo processo sono i terremoti di Tohoku 2011 e Sumatra 2004 (Doglioni et al., 2014). L'energia associata ai terremoti nei due contesti è generalmente più bassa nei regimi estensionali rispetto a quelli che avvengono in regimi compressivi.

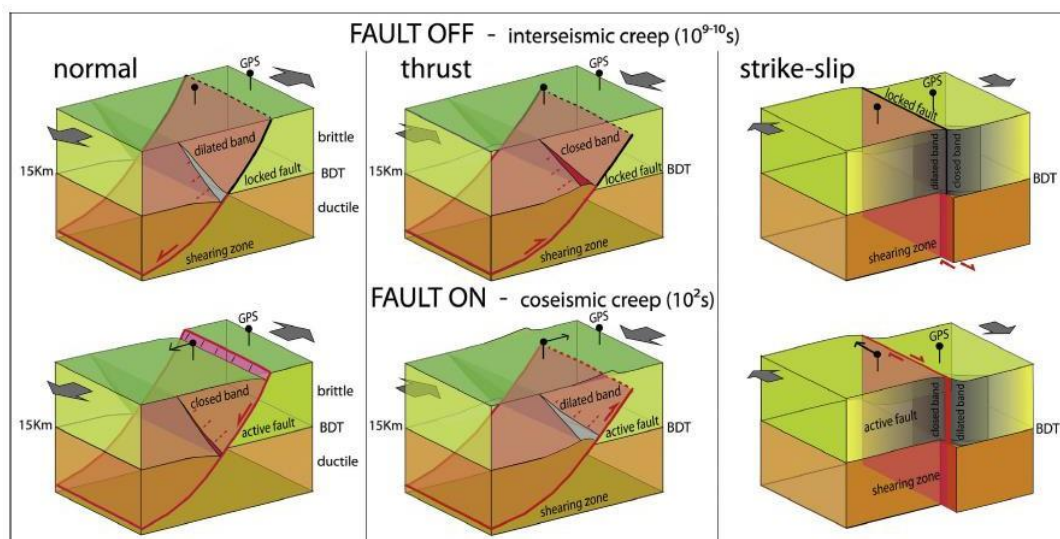


Figura 9.6 Modello geologico del ciclo sismico (cosismico intersismico) nei 3 principali contesti tettonici (Doglioni et al., 2014). Durante la fase intersismica la transizione fragile duttile (BDT) separa la crosta superiore fragile, dove le faglie sono per lo più ferme, da quelle relative alle zone di taglio più profonde, che sono al contrario costantemente fratturate nella crosta inferiore quasi-plastica (duttile). La crosta alta sopra la BDT sperimenta, nel caso di faglia normale, una dilatazione, nel caso di faglia inversa una compressione, e nel caso di una trascorrente due opposti regimi di dilatazione e compressione. Durante lo stadio cosismico, la faglia della crosta superficiale viene attivata, e una struttura coniugata sopra il BDT sperimenta un evento a cinematica opposta, compressione dove vi era dilatazione, dilatazione dove vi era compressione.

Nel caso in esame tale modello potrebbe riflettere quanto osservato nel bacino della Val d'Agri, caratterizzato da cinematica estensionale.

A ovest del bacino per quanto riguarda la caratterizzazione del *cluster 1*, considerando come *mainshock* l'evento del 1857 di $M=7$ localizzato su una faglia normale nel sistema dei MMFS, coincidente con la faglia F11, si potrebbe considerare l'attuale sismicità registrata con prevalente cinematica estensionale localizzata lungo la faglia T1, come dovuta ad una riattivazione della faglia T1 in conseguenza dell'accumulo di energia nella fase intersismica sulla faglia F11 (*locked fault*, immergente a NE e meglio orientata rispetto al campo di stress) e pertanto come coniugata della F11. Secondo il modello, essendo T1 originariamente un thrust con cinematica compressiva, in quanto, coniugata della faglia F11, a seguito della fase cosismica che sblocca la F11 nel tratto superficiale fragile, si dovrebbe riattivare con cinematica inversa ovvero distensiva.

Questo è appunto confermato: i) dall'allineamento degli eventi del cluster 1 (foreshock nella fase intersismica rispetto al *mainshock* del 1857) prevalentemente sulla faglia T1; ii) dai meccanismi focali degli eventi registrati con cinematica distensiva (come riportato da Improta et al., 2017) che ne testimoniano appunto una riattivazione del tratto superiore in senso estensionale.

Nel caso del *cluster 2* per la nuvola di eventi intorno a CM2 la sperimentazione ha dimostrato che l'avvio della sismicità è avvenuto a partire dalla reiniezione in data 2 giugno 2006 (Improta et al., 2015). Poiché prima non era presente nell'area la sismicità del cluster 2 (Stabile et al., 2014b) è sicuramente tutta imputabile ad una sismicità indotta. Durante i 7 anni di sperimentazione si osserva un aumento degli eventi sismici in corrispondenza degli aumenti delle pressioni di iniezione (rispettivamente di 14 MPA e 13 MPA nel 2006 e nel 2010) intervallati da due fasi a bassa attività sismica. Il mainshock degli eventi del 2006 corrisponde all'evento di maggiore magnitudo registrato in data 26 ottobre 2010. Possiamo quindi sintetizzare che nel 2006 e nel 2010 si hanno le fasi cosismiche dovute alla massima pressione di iniezione dei fluidi nel volume della struttura CM2; mentre tra il 2007-2009 e il 2011-2013 si sono registrate due fasi intersismiche. Come visto in precedenza, è presente una porzione a E della struttura del CM2 in cui non si registrano eventi che si comporta in modo asismico nelle fasi intersismiche (*locked fault*); tale porzione, nella fase cosismica, a seguito del mainshock $M=1.95$ avvenuto all'interfaccia fragile duttile coincidente con il punto di intersezione delle due porzioni fragile e duttile, determina il rilascio di energia e il comportamento sismico del backthrust coniugato R1, riattivato in senso estensionale. Tale interpretazione è supportata da: i) l'allineamento degli eventi su R1; ii) dai meccanismi focali degli eventi con cinematica normale (Improta et al., 2017) che testimoniano appunto una riattivazione del tratto superiore in senso estensionale.

Analizzando la questione dal punto di vista dei parametri fisici che possono influenzare i processi di attivazione e riattivazione delle faglie è utile soffermarsi sul ruolo del coefficiente di frizione μ_s : maggiore è l'attrito della roccia più inclinata è la faglia e viceversa; questo implica che le faglie a basso angolo necessitano di minore energia rispetto alle faglie ad alto angolo e questo spiega perché in genere si registrano sulle faglie a basso angolo eventi a minore magnitudo. Le rapide variazioni laterali del μ_s possono influenzare la velocità di deformazione e produrre frequenti rotture in rocce a basso coefficiente di frizione con comportamento asismico così come avviene ad esempio in Appennino Meridionale dove sono presenti molte variazioni laterali del coefficiente di frizione dovute al passaggio da rocce carbonatiche a rocce argillose, scistose, ecc. Questo può spiegare ad esempio il comportamento asismico della porzione a E della struttura del CM2 (confermata da

Vadacca et al. (2021) che si localizza, come confermato dal lavoro di Balasco et al. (2021), in una zona di passaggio tra rocce a elevata (zona in verde) e bassa resistività (zona in giallo), dove alle basse resistività è associata una barriera di tipo reologico che coincide con la presenza di rocce a minore coefficiente di frizione e quindi, come precedentemente osservato, a bassa sismicità o con comportamento asismico (Figura 9.7). Le considerazioni fin qui riportate in merito al coefficiente di frizione sono coerenti e spiegano la prevalente presenza degli eventi sismici nelle zone della Piattaforma Apula a elevata resistività e maggiore coefficiente di frizione (Figura 9.7).

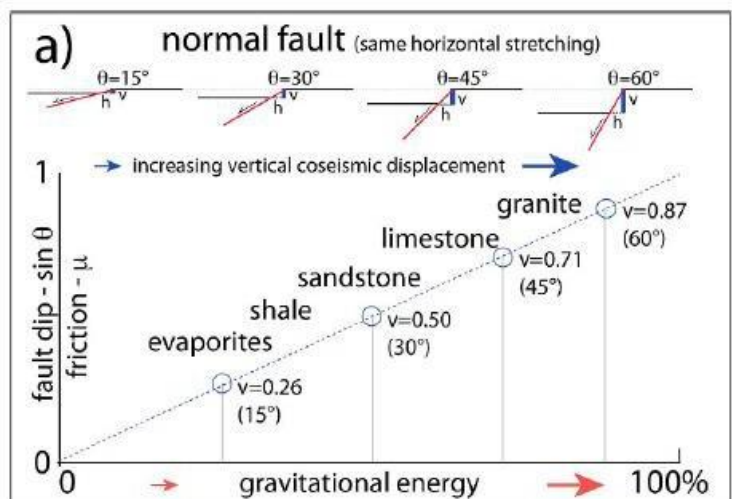


Figura 9.7 Schema relativo alle relazioni fra inclinazione delle faglie, attrito, energia gravitazionale potenziale (da Doglioni et al., 2015). Per una data quantità di estensione crostale, che è rappresentata dalla componente di spostamento (h) orizzontale della faglia normale, l'inclinazione della faglia normale (θ) controlla lo spostamento verticale (v). Più l'inclinazione è superficiale, minore è lo spostamento verticale. Pertanto, faglie più inclinate rilasciano maggiori quantità di energia gravitazionale potenziale per il terremoto. Ciò è coerente con l'assenza di terremoti energetici associati con faglie normali a basso angolo. Si osserva che faglie normali a basso angolo si sviluppano in rocce a basso attrito e viceversa faglie normali ripide si formano in rocce ad alto attrito.

Se si confronta ancora queste risultanze con il lavoro di Vadacca et al. (2021) è possibile verificare che il modello strutturale interpretato, a cui è applicabile il modello dei *graviquakes*, oltre a confermare le risultanze del lavoro di Balasco et al., 2021 è coerente con la simulazione in termini di variazione di slip tendency (ST) dell'instabilità delle faglie associate all'iniezione dei fluidi del CM2. Infatti dove il coefficiente di frizione μ_s è maggiore (coincidente con le aree ad elevata resistività della Piattaforma Apula) si registra una minore variazione di slip tendency e si allineano tutti gli eventi sismici; dove invece il coefficiente è minore (zone a bassa resistività in giallo) si registra una variazione minore di slip tendency nonché l'assenza di eventi e un comportamento prevalentemente asismico.

Inoltre, il modello (in accordo con Doglioni et al., 2015) propone anche un metodo per stabilire la relazione empirica tra la magnitudo e l'area di rottura in funzione della lunghezza della faglia e la profondità del volume di roccia interessato, che è stato applicato ai casi specifici individuati in questa tesi relativamente ai *cluster 1* sulla faglia T1 e *cluster 2* sulla faglia R1 (Figura 9.8). Nel caso del thrust T1 e della Faglia F11, poiché la faglia F11 ha una lunghezza $L > 15$ km e una profondità di almeno 10 km, l'area di faglia coinvolta (considerata nel solo tratto presente nell'area di studio) ha una estensione di almeno 75 km^2 che, quindi, in base alla relazione empirica stabilita da Doglioni et al. (2015) potrebbe produrre eventi di Magnitudo momento anche con $M_w > 5.5$ fino

a $M_w=7$ (limite della M_w stimata per un contesto faglia normale Figura 9.8) compatibile con la Magnitudo 7 dell'evento sismico del 1857 della Val d'Agri (area fucsia in Figura 9.8).

Se si considerano le della struttura del CM2 considerando l'estensione della struttura in base alla lunghezza della faglia STR4 (4 km come riportata nel capitolo 7) e la profondità di intersezione delle R1 con la porzione a E a 5 km, la struttura del CM2 coinvolgerebbe un'area di faglia di circa 20 km² che nel diagramma della relazione empirica con la Magnitudo momento - M_w di Doglioni et al. (2015) coincide con una Magnitudo momento compresa tra $0 < M_w < 4$. In questo caso quindi il modello interpretato potrebbe essere compatibile con i valori di Magnitudo locale compresa tra $0,03 < M_l < 1,7$ del *cluster 2* registrate durante la sperimentazione del CM2 confermando la relazione empirica stabilita. In nessun caso sembra comunque che nella struttura del CM2 le magnitudo M_l associate alle attività abbiano superato il valore di 1,95 (mainshock del cluster considerato) (area in verde in Figura 9.8).

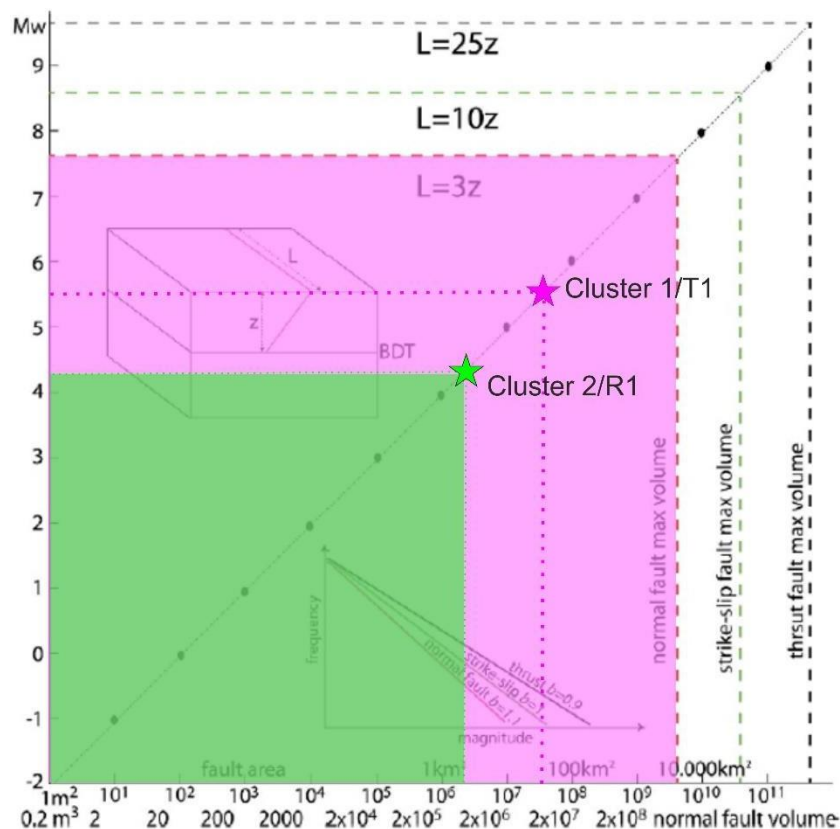


Figura 9.8 Modello di relazione empirica tra magnitudo dei terremoti e area di rottura di faglia (Doglioni et al., 2015) applicato al caso dei due cluster della Val d'Agri. Ciascun contesto tettonico ha la sua tipologia di volume coinvolto che può determinare la magnitudo massima attesa per un terremoto. Nel caso in questione si rientra nel contesto di regime estensionale e di faglia normale. La stella in verde rappresenta il massimo valore della M_w associabile alla faglia R1 e comprende le magnitudo degli eventi registrati per il cluster 2 sulla struttura R1; la stella fucsia rappresenta il minimo valore della M_w associabile alla faglia T1 fino a un massimo individuato di $M_w=7,5$. M_w calcolato in base ai parametri (L) lunghezza della faglia e (z) la profondità del volume coinvolto.

È da sottolineare, infine, che oltre alla stretta relazione della sismicità del *cluster 2* con le operazioni di iniezione è necessario valutare anche l'effetto combinato con la produzione di idrocarburi, dove la rimozione dei fluidi potrebbe produrre una diminuzione del tasso di sismicità stabilizzando la faglia, come dimostrato dal lavoro di Garcia et al., 2021.

Il lavoro Garcia et al. (2021) ha, infatti, valutato l'effetto della produzione sulla stabilità di faglia attraverso un'analisi a grande scala sui tassi di sismicità di *background* registrati nell'intorno di diverse concessioni di produzione di idrocarburi, anche in Val d'Agri, e ha evidenziato a livello statistico una diminuzione del tasso di sismicità a seguito del picco di produzione di gas e di olio (Figura 9.9) a supporto di un possibile effetto di inibizione. Tale risultato è stato verificato attraverso l'applicazione di un modello teorico che ha permesso di calcolare la variazione dello stress di Coulomb sui piani di faglia orientati favorevolmente rispetto al campo di stress. L'effetto della produzione sulla stabilità della faglia è attualmente oggetto di ulteriore dibattito nella comunità scientifica (Candela et al., 2019). Infatti, se da un lato la produzione tende a stabilizzare la faglia avendo un effetto diretto sull'aumento dello stress normale, dall'altro può generare localmente un aumento dello stress di taglio come effetto indiretto della risposta poroelastica del materiale in funzione della distanza della sorgente del fluido e delle caratteristiche della faglia.

Queste prime evidenze in merito all'effetto della produzione sulla stabilità delle faglie lasciano il campo a ulteriori studi da condurre a scala di dettaglio attraverso l'utilizzo di un modello strutturale ben calibrato e di dati di produzione e reiniezione di maggiore dettaglio.

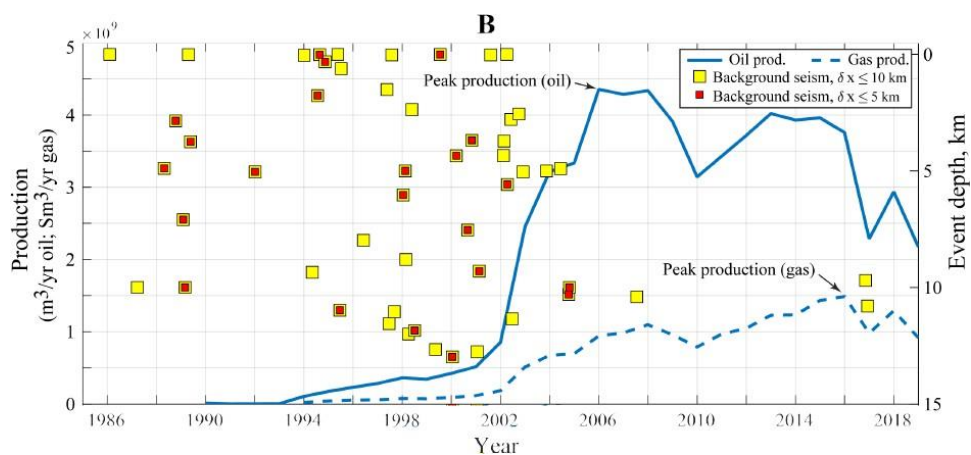


Figura 9.9 Analisi della variazione del tasso di sismicità prima e dopo il picco di produzione di gas e olio nella concessione Val d'Agri tra il 1986 e il 2018 (da Garcia et al., 2021). L'immagine riproduce la serie temporale dei dati di produzione e la sovrapposizione dell'occorrenza degli eventi di sismicità di background in funzione della profondità.

Pertanto, è possibile concludere per la sismicità dell'area della Val d'Agri che essa è associata a un modello di *graviquakes* sia per il *cluster 1* (relativo alla sismicità naturale dell'area) sia per il *cluster 2* (Doglioni et al., 2014 e 2015). Dove la sismicità del cluster 2 associata alla struttura del CM2, in base alla classificazione della sismicità indotta proposta da Doglioni (2018), può essere attribuita alla tipologia I – *graviquakes* e alla tipologia II *re injection quakes* (Figura 1.1) durante le fasi di iniezione che aumentano la pressione dei pori sollecitando e determinando un accumulo di energia lungo la porzione a E della struttura nelle fasi intersismiche.

10 CONCLUSIONI

Concludendo, oltre all'aggiornamento delle conoscenze sui temi strutturali e di sismicità nell'area, il carattere innovativo della ricerca risiede soprattutto nell'utilizzo di nuovi dati messi a disposizione da parte della società titolare della concessione Val d'Agri (Eni S.p.A.) e da parte di

INGV, grazie ai quali è stato possibile formulare nuove considerazioni per la caratterizzazione della sismicità nell'area della Val d'Agri (HAV) attraverso il confronto tra l'interpretazione derivata dai vincoli di sottosuolo (pozzi e linee sismiche messi a disposizione da ENI) e dal dataset innovativo della sismicità registrata da parte di INGV (migliorato attraverso tecniche di processamento avanzato).

In sostanza, sono stati realizzati nel corso del lavoro i seguenti prodotti:

- una nuova carta geologico-strutturale dell'area di studio;
- sette sezioni geologiche;
- un modello geo-strutturale pseudo 3D vincolato da dati superficiali e profondi;
- mappe di profondità dei principali orizzonti stratigrafici identificati;
- confronto tra la microsismicità rilevata e il modello realizzato.

La ricerca ha portato a definire alcuni aspetti strutturali, tettonici e sismici fornendo evidenze a supporto dell'attuale dibattito scientifico sull'area di studio in merito ai seguenti aspetti:

- realizzare una più dettagliata interpretazione geologico- strutturale delle serie affioranti (es. Unità Lagonegresi e carbonati della Piattaforma Apula nella struttura di M. Alpi) al fine fornire evidenze a supporto della definizione dello stile deformativo dell'area e dell'adozione di un modello di tipo *thick or thin skinned*;
- verificare l'allineamento degli eventi sismici registrati su una struttura immergente verso NE nell' Unità Apula a circa 1 km sotto la base del pozzo CM2, e l'eventuale presenza di evidenze superficiali;
- confermare la presenza di una struttura sub-verticale trascorrente orientata NNE-SSW che taglia la piattaforma apula vicino al CM2;
- definire le faglie attive e caratterizzare la sismicità sia naturale che indotta, in particolare fornendo potenziali indizi per la localizzazione della sorgente dell'evento sismico della Val d'Agri del 1857 sul bordo est o ovest del bacino e definendo i meccanismi che sottendono alla formazione del cluster 2 nell'intorno del CM2;
- caratterizzare la sismicità in base ai modelli attualmente esistenti con particolare riferimento all'applicabilità del modello dei *graviquakes* in funzione del contesto tettonico e dei parametri che possono influire sulla sismicità quali stress, coefficiente di frizione e migrazione dei fluidi.

Lo studio ha portato a definire un modello strutturale dell'area della Val d'Agri che si discosta parzialmente da quanto presente in letteratura utilizzato ai fini della caratterizzazione della sismicità nell'area (es. Candela et al., 2015 e Buttinelli et al., 2016). Per questo motivo rappresenta un valore aggiunto per future modellazioni numeriche e valutazioni di carattere geomeccanico.

Il modello conferma sicuramente la conformazione della struttura del CM2 come definita da una struttura immergente a NE sul lato occidentale (coincidente con il backthrust R1) e la presenza di una struttura sub verticale trascorrente orientata NNE-SSW (coincidente con la faglia trascorrente STR4). Oltre a queste evidenze conferma con buona affidabilità l'attribuzione dell'area di studio a un modello di tipo *thin skinned* attraverso la verifica dello scollamento delle Unità Lagonegresi affioranti, la definizione del top della piattaforma apula e la sua geometria in profondità, la presenza

del basamento a profondità di circa 10 km. L'attribuzione del modello alla tipologia *thin skinned* ha importanti implicazioni sulla definizione dello stile defomativo definito da un prevalente regime estensionale attuale con trasporto verso NE (dimostrato anche dalle attività di rilevamento in campo) e presenza di faglie normali ad alto angolo (visibili in sismica) che dislocano porzioni profonde della Piattaforma Apula.

Ne deriva un ruolo di maggior rilievo del sistema dei MMFS nella caratterizzazione della sismicità dell'area, rispetto a quello della EAFS, supportato da diverse evidenze sia superficiali (es. presenza delle faglie in affioramento) che profonde (distribuzione della sismicità nell'area, rigetto significativo della faglia F11). Al contrario, il sistema dell'EAFS sembra non avere un ruolo significativo nella caratterizzazione della sismicità naturale dell'area.

Da queste osservazioni e dal confronto con la sismicità è stato possibile rivalutare la localizzazione dell'evento sismico del 1857 sul bordo est del bacino non essendo stato possibile individuare in superficie e in profondità una struttura (es. F15) con caratteristiche tali in termini di rigetto da giustificare un terremoto di $M=7$.

Dallo studio emerge in particolare che attualmente la sismicità registrata dai due *cluster 1 e 2* nella Val d'Agri a sud del Pertusillo (*cluster 1*) e sulla struttura del CM2 (*cluster 2*) sono attribuibili alle faglie interpretate come T1 e R1 e possono essere spiegati con buon accordo attraverso l'applicazione del modello dei *graviquakes*. Il ciclo sismico per il cluster 1 comprende, in particolare, una fase cosismica relativa all'evento del 1857 seguita da una fase intersismica ancora in corso. Durante questa fase la faglia T1 coniugata alla F11 registra una riattivazione con cinematica opposta (estensionale).

Il ciclo sismico per il *cluster 2* è caratterizzato da una fase presismica in cui non sono stati registrati eventi. All'avvio della sperimentazione della iniezione del CM2 sono state registrate due fasi cosismiche 2006 e 2010 coincidenti con i picchi di pressione della reiniezione intervallate da due fasi intersismiche (2007-2009 e 2011-2013). Durante la fase cosismica del 2006 il *mainshock* riconosciuto è l'evento al di sotto del pozzo CM2 con $M_L=1.95$ del 26 ottobre 2010. A seguito di questo evento nella fase intersismica sono stati registrati gli eventi del *cluster 2* localizzati sulla struttura individuata come R1. È stato possibile osservare, anche attraverso il confronto con la letteratura più recente, come il comportamento di R1 sia giustificato ancora una volta dal modello dei *graviquakes* ovvero considerando R1 come un a faglia coniugata che registra una riattivazione con cinematica opposta (estensionale) rispetto alla porzione E della struttura del CM2 attivata che si comporta in modo asismico.

L'applicabilità del modello dei *graviquakes* per la caratterizzazione delle due sismicità è supportata dal modello strutturale interpretato, dai meccanismi focali degli eventi registrati (Stabile et al., 2014b; Improta et al., 2017), dalla distribuzione della sismicità (Valoroso et al., 2009, 2011, Improta et al. 2015), dalle evidenze del profilo di resistività (Balasco et al., 2021) e dalle simulazioni numeriche effettuate per l'analisi dello slip tendency (Vadacca et al., 2021).

Inoltre, anche l'applicazione del modello empirico per il calcolo della Magnitudo associata apporta ulteriore conferma a favore di una possibile attribuzione dell'evento alla faglia F11 del MMFS, indicando per la faglia F11 (in base alle caratteristiche di lunghezza e volumi interessati) la possibilità di generare un terremoto di $M_w > 5.5$.

Concludendo, il primo *cluster* può essere attribuito alla sismicità di fondo (periodo intersismico) dovuto al sistema dei MMFS che può aver generato anche il terremoto del 1857, spiegabile attraverso la riattivazione del thrust T1 con cinematica estensionale e attraverso il modello dei *graviquakes* (Doglioni et al. 2014 e 2015); mentre il secondo *cluster* può essere attribuito alla sismicità indotta generata dalla reiniezione del pozzo CM2 in base alla classificazione di Doglioni (2018) del tipo I - *graviquakes* e II - *re injection quakes*. Le implicazioni sulla sismicità dell'effetto combinato e delle interazioni fra la fase di produzione (eventualmente stabilizzante la faglia) e la fase di reiniezione (destabilizzante che provoca l'attivazione della faglia R1) sono ad oggi ancora oggetto di ricerca.

11 BIBLIOGRAFIA

- Allmendinger, R. W., Cardozo, N. C., and Fisher, D., (2013) *Structural Geology Algorithms: Vectors & Tensors*: Cambridge, England, Cambridge University Press, 289 pp
- Abercrombie, R. E., e Leary, P. C., (1993) Source parameters of small earthquakes recorded at 2.5 km depth, Cajon Pass, southern California: implications for earthquake scaling, *Geophys. Res. Lett.*, 20(14), 1511–1514, doi:10.1029/93GL00367
- Agip Mineraria, (1968) Interpretation report reconnaissance marine seismic survey Adriatic Sea: Zone D. Geophys, Serv. Intern. Limited, London
- Agocs W.B. e Terry S.A., (1959) Southern Italy 's igneous structure from aeromagnetic profile. *Boll. Serv. Geol. d'Italia*, 81, Roma
- Bally, A.W., Burbi, L., Cooper, J.C., and Ghelardoni, R., (1986) Balanced sections & seismic reflection profiles across the Central Apennines. *Memorie della Società Geologica Italiana*, 35, 257-310. Also reproduced in Agip S.p.A., 1996
- Benedetti, L., Tapponier, P., King, G.C.P., e Piccardi, L., (1998) Surface rupture of the 1857 southern Italian earthquake? *TerraNova*, 10(4), 206– 210
- Bertello, F., Fantoni, R., Franciosi, R., Gatti, V., Ghielmi, M., e Pugliese, A., (2010) From thrust-and-fold belt to foreland: hydrocarbon occurrences in Italy. *Geological Society, London, petroleum Geology Conference Series*, V. 7, pp. 113-126
- Badley, M., (1985) *Practical Seismic Interpretation*. IHRDC
- Balasco, M., Cavalcante, F., Romano, G., Serlenga, V., Siniscalchi, A., Stabile, T.A., Lapenna, V., (2021) New insights into the High Agri Valley deep structure revealed by magnetotelluric imaging and seismic tomography (Southern Apennine, Italy), *Tectonophysics*, Volume 808, 228817, ISSN 0040-1951
- Bonarelli, G. (1932, a); Possibilità petrolifere nel territorio di Tramutola in Basilicata. *Giornale di Geologia*, s. 2a, 7, 25-46, 2 tavv., Bologna
- Bonarelli, G., (1932, b, Int. Rept.) *Relazione geologica. Parte II. "Programma di ulteriori studi e ricerche"*. Unknown [Asa]
- Borraccini F., De Donatis M., Di Bucci D., Mazzoli S., Megna A., Nesci O., Santini S. & Savelli D., Tramontana, M. & Triggiani P., (2002) Analisi della tettonica quaternaria nel basso bacino del F. Metauro (Marche settentrionali) e nell'adiacente offshore adriatico attraverso l'integrazione di dati sismici, geomorfologici, stratigrafici e strutturali. *Studi Geologici Camerti*, 2/2002, 29-43
- Braun, T., Cesca, S., Kühn, D., Martirosina-Janssen, A., Dahm, T., (2018) Anthropogenic seismicity in Italy and its relation to tectonics: state of the art and perspectives. *Antropocene* 21 (2018) 80-94
- Bucci, F., Cardinali, M. & Guzzetti, F., (2013) Structural geomorphology, active faulting and slope deformations in the epicenter area of the mw 7.0, 1857 southern Italy earthquakes. *Physics and chemistry of the earth*, 63, 12–24
- Bucci, F., Novellino, R., Tavarnelli, E., Prosser, G., Guzzetti, G., Cardinali, M., Gueguen, E., Guglielmi, P., Adueno, I., (2014). Frontal collapse during thrust propagation in mountain belts: A case study in the Lucanian Apennines. *Southern Italy. J. Geol. Soc.* 2014, 171, 571–581
- Burrato, P., e Valensise G., (2008) Rise and fall of a hypothesized seismic gap: Source complexity in the 16 December 1857, southern Italy earthquake (Mw 7.0), *Bull. Seismol. Soc. Am.* 98, no. 1, 139–148, doi: 10.1785/0120070094
- Butler, R. W. H., Mazzoli, S., Corrado, S., De Donatis, M., Di Bucci, D., Gambini, R., Naso, G., Nicolai, D., Scrocca, D., Shiner, P., e Zucconi V., (2004) Applying thick-skinned tectonic models to the Apennine thrust belt of Italy- Limitations and implications. In: K. R. McClay, ed., *Thrust tectonics and hydrocarbon systems: AAPG Memoir* 82, pp. 647– 667
- Buttinelli, M., Improta, L., Bagh, S., Chiarabba, C., (2016) Inversion of inherited thrusts by wastewater injection induced seismicity at the Val d'Agri oilfield (Italy) *Scientific Reports*, 6, p. 37165, [10.1038/srep37165](https://doi.org/10.1038/srep37165)
- Calcagnile G., D'Inge F. e Panza G.F., (1980) The lithosphere in South – eastern Europe; preliminary results. In: *Evolution and tectonics of the Western Mediterranean and surrounding areas"*. Inst. Geogr. Nac., Madrid
- Calò, M., & Dorbath, C., (2013) Different behaviours of the seismic velocity field at Soultz-sous-Forêts revealed by 4D seismic tomography: Case study of GPK3 and GPK2 injection tests. *Geophysical Journal International*, 194(2), 1119–1137. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt153>
- Candela, S., Mazzoli, S., Megna, A. & Santini, S., (2015) Finite element modelling of stress field perturbations and interseismic crustal deformation in the Val d'Agri region, southern Apennines, Italy. *Tectonophysics* 657(30), 245–259

- Candela, T., Osinga, S., Ampuero, J.-P., Wassing, B., Pluymaekers, M., Fokker, P. A., Muntendam-Bos, A. G., (2019) Depletion-induced seismicity at the groningen gas field: Coulomb rate-and-state models including differential compaction effect. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124 (7), 7081-7104. doi: <https://doi.org/10.1029/2018JB016670>
- Cardozo, N., e Allmendinger, R. W., (2013) Spherical projections with OSXStereonet: *Computers & Geosciences*, v. 51, no. 0, p. 193 - 205, doi: 10.1016/j.cageo.2012.07.021
- Carminati, E., Lustrino, M., Cuffaro, M., Doglioni, C., (2010) Tectonics, magmatism and geodynamics of Italy: What we know and what we imagine. In: (Eds.) Marco Beltrando, Angelo Peccerillo, Massimo Mattei, Sandro Conticelli, e Carlo Doglioni, *Journal of the Virtual Explorer*, volume 36, paper 9, doi: 10.3809/jvirtex.2010.00226
- Casero, P., Roure, F., Endigoux, L., Moretti, I., Muller, C., Sage, L., e Vally, R., (1988) Neogene geodynamic evolution of the Southern Apennines. *Memorie della Società Geologica Italiana*, 41, 109–120
- Cassinis R., Franciosi R. e Scarascia S., (1979) The structure of the Earth 's Crust in Italy. A preliminary typology based on seismic data. *Boll. Geof. Teor. Appl.*, 21, Trieste
- Cattin, R., Avouac, J.P., (2000) Modeling mountain building and the seismic cycle in the Himalaya of Nepal. *Journal of Geophysical Research* 105 (B6), 13,389e13, 407
- Cazzini, F.F., (2020) Addio al Metano di Italia. Libro online <http://www.pionierieni.it/wp/wp-content/uploads/Addio-al-metano-dItalia.-di-F.-Cazzini-update-sept.-2019.pdf>
- Cello, G., Lentini, F., and Tortorici, L., (1990) La struttura del settore Calabro-Lucano e suo significato nel Quadro dell'evoluzione tettonica del sistema a thrust sudappenninica. *Studi Geol. Cameriti, Spec. Vol. 8*, 1990, 27-34
- Cello, G.; Gambini, R.; Mazzoli, S.; Read, A.; Tondi, E.; Zucconi, V., (2000) Fault zone characteristics and scaling properties of the Val d'Agri Fault System (Southern Apennines, Italy). *J. Geodyn.* 2000, 29, 293–307, doi:10.1016/S0264-3707(99)00043-5
- Cello, G., Tondi, E., Micarelli, L., & Mattioni, L., (2003) Active tectonics and earthquake sources in the epicentral area of the 1857 basilicata earthquake (southern Italy). *Journal of Geodynamics*, 36 (1), 37 - 50. (Active Faults: Analysis, Processes and Monitoring) doi: [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(03\)00037-1](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(03)00037-1)
- Chiarabba, C., 28 others, (2009) The 2009 L'Aquila (central Italy) MW6.3 earthquake: main shock and aftershocks. *Geophysical Research Letters* 36, L18308. [http:// dx.doi.org/10.1029/2009GL039627](http://dx.doi.org/10.1029/2009GL039627)
- Ciarapica G., (1994) Le successioni di piattaforma del Trias Superiore e del Lias Inferiore. In: PASSERI L.(Ed.), *Appennino Umbro-Marchigiano*. Guide Geologiche Regionali, Soc. Geol. It., 7: 24-27, 1 fig., BE-MA(Ed.), Lodi (MI)
- Crema, C., (1902) Il petrolio nel territorio di Tramutola (Potenza). *Boll. Soc. Geol. It.*, 21, 36-38, 2 febbraio 1902, Roma (it)
- Corrado, S., Invernizzi, C., Mazzoli, S., (2002) Tectonic burial and exhumation in a foreland fold and thrust belt: the Monte Alpi case history (Southern Apennines, Italy). *Geodinamica Acta* 15, 159–177
- Corral, A., (2004) Long-term clustering, scaling, and universality in the temporal occurrence of earthquakes, *Phys. Rev. Lett.* 92, 108501
- Cremonini, G., (1994) Rilevamento Geologico. Realizzazione e interpretazione delle carte geologiche. Pitagora Editrice, Bologna. ISBN 88-371-0697-1
- Dahm, T., Becker, D., Bischoff, M., Cesca, S., Dost, B., Fritschen, R., Hainzl, S., Klose, C. D., Kühn, D., Lasocki, S., Meier, T., Ohrnberger, M., Rivalta, E., Wegler, U. e Husen, S., (2013) Recommendation for the discrimination of human-related and natural seismicity, *J. Seismol.*, 17(1), 197–202
- Davis, S. D., e C. Frohlich, (1993) Did (or will) fluid injection cause earthquakes? *Seismol. Res. Lett.*, 64(3–4), 207–224
- D'Adda, P., Longoni, R., Magistroni, C., Meda, M., Righetti, F., Cavozi, C., Storti, F., (2017) Extensional reactivation of a deep transpressional architecture: Insights from sandbox analogue modeling applied to the Val d'Agri basin (Southern Apennines, Italy). *Interpretation*, 5(1), SD55–SD66. <https://doi.org/10.1190/INT-2016-0078.1>
- D'Argenio, B., Pescatore, T., and Scandone, P., (1973) Schema geologico dell'Appennino meridionale (Campania-Lucania). *Atti del Convegno: moderne vedute sulla geologia dell'Appennino*. Acc. Naz. Lincei, Quaderno 183, 49-72
- De Landro, G., Amoroso, O., Stabile, T.A., Matrullo, E., Lomax, A., Zollo, A., (2015). High-precision differential earthquake location in 3-D models: evidence for a rheological barrier controlling the microseismicity at the Irpinia fault zone in southern Apennines. *Geophys. J. Int.* 203, 1821–1831. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv397>
- De Lorenzo, G., (1895) Osservazioni geologiche nell'Appennino della Basilicata meridionale. *Atti Acc. Sc. fis. e mat.*, ser. 2, 7 (8), 31 pp., 12 figg., Napoli

- Dieterich, J., (1994) A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B2), 2601-2618
- Dieterich, J. H., Richards-Dinger, K. B., e Kroll, K. A., (2015) Modeling injection-induced seismicity with the physics-based earthquake simulator RSQSim, *Seismol. Res. Lett.*, 86, 1102–1109
- Di Luccio, F., Ventura, G., Di Giovambattista, R., Piscini, A., Cinti, F.R., (2010) Normal faults and thrusts re-activated by deep fluids: the 6 April 2009 Mw 6.3 L'Aquila earthquake, central Italy. *Journal of Geophysical Research* 115 (B06315), 15. <http://dx.doi.org/10.1029/2009JB007190>
- Di Niro, A., e Giano, S.I., (1995) Evoluzione geomorfologica del bordo orientale dell'Alta Val d'Agri (Basilicata). *Studi geologici camerti*, vol. spec./2: 207-218
- *DISS Working Group (2018) Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas.* <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; DOI:10.6092/INGV.IT-DISS3.2.1
- Doglioni, C., (1991) A proposal for the kinematic modelling of W-dipping subductions—Possible applications to the Tyrrhenian-Apennines system. *Terra Nova* 1991, 3, 423–434
- Doglioni C., (1993-1994) *Elementi di Tettonica*. IL SALICE
- Doglioni, C., Mongelli, F. e Pieri, P., (1994) The Puglia uplift (SE Italy): An anomaly in the foreland of the Apenninic subduction due to buckling of a thick continental lithosphere, *Tectonics*, 13, 1309 –1321.
- Doglioni, C., Harabaglia, P., Martinelli, G., Mongelli, F. e Zito, G., (1996) A geodynamic model of the southern Apennines accretionary prism, *Terra Nova*, 8, 540–547
- Doglioni, C., Barba, S., Carminati, E., Riguzzi, F., (2014) Fault on-off versus coseismic fluids reaction. *Geoscience Frontiers* 5 (6), 767e780. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2013.08.004>
- Doglioni, C., Carminati, E., Petricca, P., Riguzzi, F., (2015) Normal fault earthquakes or graviquakes. *Scientific Reports* 5, 12110. <https://doi.org/10.1038/srep12110>
- Doglioni, C., (2018) A classification of induced seismicity. *Geoscience Frontiers*, Volume 9, Issue 6, Pages 1903-1909, ISSN 1674-9871. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2017.11.015>
- Ellsworth W.L., (2013) Injection-Induced Earthquakes. *Science* 341, doi: 10.1126/science.1225942
- Frohlich, C., (2012) Two-year survey comparing earthquake activity and injection-well locations in the Barnett Shale, Texas, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 109 (35), 13,934–13,938, doi:10.1073/pnas.1207728109
- Frohlich, C., H., DeShon, B., Stump, C., Hayward, M., Hornbach, e Walter, J. I., (2016a) A historical review of induced earthquakes in Texas, *Seismol. Res. Lett.*, 87(4), 1022–1038
- Galadini, F., Meletti, C., Vittori, E., (2000 b) Stato delle conoscenze sulle faglie attive in Italia: elementi geologici di superficie. In: Galadini, et al. (Ed.), *Le ricerche del GNDT nel campo della pericolosità sismica (1996–1999)*. CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Roma, pp. 107–136 (also available from: http://www.ingv.it/gndt/Pubblicazioni/Meletti_copertina.htm)
- Garcia, A., Faenza, L., Morelli, A. e Antoncecchi, I., (2021) Can Hydrocarbon Extraction From the Crust Enhance or Inhibit Seismicity in Tectonically Active Regions? A Statistical Study in Italy. *Front. Earth Sci.* 9:673124. doi: 10.3389/feart.2021.6731
- Ghisetti, F., and Vezzani, L., (1981, a) Contribution of structural analysis to understanding the geodynamic evolution of the Calabrian Arc (Southern Italy). *Journ. Struct. Geol.*, 3, 371-381
- Giano, S.I., Lapenna, V., Piscitelli, S., and Schiattarella, M., (2000) Electrical imaging and self-potential surveys to study the geological setting of the Quaternary slope deposits in the Agri high valley (Southern Italy). *Ann. Geofis.*, Vol. 43 (2), pp. 409-419
- Goertz - Allmann, B. P., Goertz, A., e Wiemer, S., (2011) Stress drop variations of induced earthquakes at the Basel geothermal site, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L09308, doi:10.1029/2011GL047498
- Grandjacquet, C., (1961, a) Aperçu morphotectonique et paléogéographique du domaine calabro-lucanien (Italie méridionale). *Bull. Soc. Géol. France*, S. 7, 3, 610-618
- Grandjacquet, C., Glangeaud, L., Dubois, R., e Caire, A. (1961) Hypothèse sur la structure profonde de la Calabre (Italie). *Rev. Geogr. Phys. Geol. Dyn.*, 4 (3), 131-147
- Grandjacquet, C., (1962, a) Importance de la tectonique tangentielle en Italie meridionale. *Rev. Geogr. Phys. Geol. Dyn.*, 5 (2), 107-111
- Grandjacquet, C., (1962, b) Données nouvelles sur la tectonique tertiaire des massifs calabro-lucaniens. *Bull. Soc. Géol. France*, S. 7, 4, 695-706
- Grandjacquet, C., (1963) Schéma structural de l'Apennin campano-lucanien (Italie). *Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dyn.*, S. 2, 5 (3), 185-202
- Grigoli, F., Cesca, S., Priolo, E., Rinaldi, A. P., Clinton, J. F., Stabile, T. A., Dost, B., Fernandez, M. G., Wiemer, S., e Dahm, T., (2017) Current challenges in monitoring, discrimination, and management of induced seismicity

- related to underground industrial activities: A European perspective, *Rev. Geophys.*, 55, doi:10.1002/2016RG000542
- Gupta, H. K., (2002) A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India, *Earth Sci. Rev.*, 58(3/4), 279–310, doi: 10.1016/S0012-8252(02)00063-6
 - Hainzl, S., and Y. Ogata (2005) Detecting fluid signals in seismicity data through statistical earthquake modeling, *J Geophys. Res.*, 110, B05S07, doi:10.1029/2004JB003247
 - Hippolyte, J.-C., Angelier, J., Roure, F., (1994) A major geodynamic change revealed by Quaternary stress patterns in the southern Apennines (Italy). *Tectonophysics*, 230, 199–210
 - Hobbs, B., Ord, A., (1988) Plastic instabilities: Implications for the origin of intermediate and deep focus earthquakes. *Journal of Geophysical Research* 93 (B9). <http://dx.doi.org/10.1029/JB093iB09p10521>
 - Indirizzi e Linee Guida per il monitoraggio della microsismicità delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro delle attività antropiche – ILG. Ministero Sviluppo Economico, 2014
 - ICHESE, (2014) International Commission on Hydrocarbon Exploration and Seismicity in the Emilia-Romagna region, Report on the hydrocarbon exploration and seismicity in Emilia Region. Technical Report. Regione Emilia- Romagna, E-R Ambiente, Geologia, sismica e suoli, Bologna, Italy. http://www.mappegis.regione.emilia-romagna.it/gstatico/documenti/ICHESE/ICHESE_Report.pdf
 - Improta, L., Ferranti, L., De Martini, P.M., Piscitelli, S., Bruno, P.P., Burrato, P., Civico, R., Giocoli, A., Iorio, M., D'Addezio, G., Maschio, L., (2010) Detecting young, slow-slipping active faults by geologic and multidisciplinary high-resolution geophysical investigations: a case study from the Apennine seismic belt, Italy. *Journal of Geo-physical Research* 115, B11307. <http://dx.doi.org/10.1029/2010JB000871>
 - Improta, L., De Gori, P., & Chiarabba, C., (2014) New insights into crustal structure, Cenozoic magmatism, CO₂ degassing, and seismogenesis in the southern Apennines and Irpinia region from local earthquake tomography. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 119, 8283–8311
 - Improta, L., Valoroso, L., Piccinini, D. & Chiarabba, C., (2015) A detailed analysis of wastewater-induced seismicity in the Val d'Agri oil field (Italy). *Geophys. Researc Lett.* 2682–2690 (2015)
 - Improta, L., Bagh, S., De Gori, P., Valoroso, L., Pastori, M., Piccinini, D., Chiarabba, C., Anselmi, M., e Buttinelli, M., (2017) Reservoir structure and wastewater-induced seismicity at the Val d'Agri oilfield (Italy) shown by three-dimensional Vp and Vp/Vs local earthquake tomography. *J. Geophys. Res. -Solid Earth* 122, 9050–9082, <https://doi.org/10.1002/2017JB014725>
 - ISPRA (2014). Geological maps of Italy (1:50.000), Foglio 505 Moliterno, Coordinatori S. Carbone and F. Lentini, ISPRA/Regione Basilicata, Sistema Cartografico Roma. <http://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/>
 - ISPRA (2012) Carta Geologica di Italia (1:50.000), Foglio 489 “Marsico nuovo”, Coordinatori, F. Lentini e S. Carbone ISPRA/Regione Basilicata, Sistema Cartografico Roma. <http://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/>
 - ISPRA (2014) Carta Geologica di Italia (1:50.000), Foglio 490 “Stigliano”, Coordinatori P.Renda e M. Tramutoli, ISPRA/Regione Basilicata, Sistema Cartografico Roma. <http://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/>
 - ISPRA (2005) Carta Geologica di Italia (1:50.000), Foglio 506 “Sant’Arcangelo”, Coordinatori F.Lentini e S. Carbone, ISPRA/Regione Basilicata, Sistema Cartografico Roma, <http://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/>
 - ISPRA (2011) Carta Geologica di Italia (1:50.000), Foglio 522 “Senise”, Coordinatori T.Pescatore e M. Schiattarella, ISPRA/Regione Basilicata, Sistema Cartografico Roma, <http://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/>
 - ISPRA (2014) Carta Geologica di Italia (1:50.000), Foglio 521 “Lauria”, Coordinatori G. Bonardi, G. Iannace, M.L. Putignano, ISPRA/Regione Basilicata, Sistema Cartografico Roma <http://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/>
 - Juanes, R., Jha, B., Hager, B. H., Shaw, J. H., Plesch, A., Astiz, L., Dieterich, J. H., e Frohlich C., (2016) Were the May 2012 Emilia-Romagna earthquakes induced? A coupled flow-geomechanics modeling assessment, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 6891–6897, doi:10.1002/2016GL069284
 - Julian, B. R., Ross, A., Foulger, G. R., & Evans, J. R., (1996) Three-dimensional seismic image of a geothermal reservoir: The Geysers, California. *Geophysical Research Letters*, 23(6), 685–688. <https://doi.org/10.1029/95GL03321>
 - Kanamori, H., Anderson, D.L., (1975) Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bulletin of Seismological Society of America* 65, 1073e1095
 - Keranen K. M., Weingarten, M., Abers, G. A., Bekins, B. A., Ge, S., (2014) Sharp increase in central Oklahoma seismicity since 2008 induced by massive wastewater injection. *Science*, 345, 448-451; DOI: 10.1126/science.1255802

- La Bruna, V., Agosta, F., Lamarche, J., Viseur, S. and Prosser, G., (2018) Fault growth mechanisms and scaling properties in foreland basin system: The case study of Monte Alpi, Southern Apennines, Italy. *Journal of Structural Geology*, 116, 94–113, <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2018.08.009>
- Lentini, F., Carbone, S., Di Stefano, A., e Guarnieri, P., (2002) Stratigraphical and structural constraints in the Lucanian Apennines (southern Italy): Tools for reconstructing the geological evolution. *J. Geodyn.*, 34, 141 – 158
- Malinverno, A., Ryan, W.B.F., (1986) Extension in the Tyrrhenian Sea and shortening in the Apennines as result of arc migration driven by sinking of the lithosphere. *Tectonics*, 5, 227–245
- Marone, C., (1998) Laboratory-derived friction laws and their application to seismic faulting. *Annual Review of Earth Planetary Science* 26, 643e696
- Maschio, L., Ferranti, L., Burrato, P., (2005) Active extension in Val d’Agri area, Southern Apennines, Italy: Implications for the geometry of the seismogenic belt. *Geophys. J. Int.*, 162, 591–609
- Mazzoli, S., Corrado, S., De Donatis, M., Scrocca, D., Butler, R.W.H., Di Bucci, D., Naso, G., Nicolai, C., Zucconi, V., (2000) Time and space variability of “thin-skinned” and “thick-skinned” thrust tectonics in the Apennines (Italy). *Rendiconti dei Lincei, Scienze Fisiche e Naturali* 11, 5-39
- Mazzoli, S., Barkham, S., Cello, G., Gambini, R., Mattioni, L., Shiner, P., & Tondi, E., (2001) Reconstruction of continental margin architecture deformed by the contraction of the Lagonegro Basin, Southern Apennines, Italy. *Journal of the Geological Society, London*, 158(2), 309–319. <https://doi.org/10.1144/jgs.158.2.309>
- Mazzoli, S., Aldega, L., Corrado, S., Invernizzi, C., and Zattin, M., (2006) Pliocene-Quaternary thrusting, syn-orogenic extension and tectonic exhumation in the Southern Apennines (Italy): Insights from the Monte Alpi area, in *Styles of Continental Contraction*, edited by S. Mazzoli and R. W. H. Butler, *Spec. Pap. Geol. Soc. Am.*, 414, 55–77
- Mazzoli, S., Ascione, A., Candela, S., Iannace, A., Megna, A., Santini, S., Vitale, S. (2013) Subduction and continental collision events in the southern Apennines: constraints from two crustal cross-sections. *Rend. Online Soc. Geol. Ital.* 25, 78–84. <http://dx.doi.org/10.3301/ROL.2013.07>
- Mazzotti, A., Stucchi, E., Fradelizio, G., Zanzi, L., e Scandone, P., (2000) Seismic exploration in complex terrains: A processing experience in the southern Apennines. *Geophysics*, 65, 1402–1417
- McGarr, A., Simpson, D., and Seeber, L., (2002) Case histories of induced and triggered seismicity. *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Part A*, W.H.K. Lee et al., eds., Academic Press, 647-661.
- McGarr, A. (2014) Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 1008–1019
- Meade, B.J., Hager, B.H., (2005) Block models of crustal motion in southern California constrained by GPS measurements. *Journal of Geophysical Research* 110, B03403. <http://dx.doi.org/10.1029/2004JB003209>
- Megna, A., Santini, S., & Mazzoli, S., (2017) Structural inheritance controlling active crustal deformation in the Val d’Agri area (southern Apennines, Italy): new insights from finite element modelling. *Rendiconti Online della Società Geologica Italiana*, 42, 111-114. <https://doi.org/10.3301/ROL.2017.26>
- Menardi Noguera, A., & Rea, G., (2000) Deep structure of the Campanian-Lucanian Arc, Southern Apennine, Italy. *Tectonophysics*, 324(4), 239–265. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00137-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00137-2)
- Monaco, C., Tortorici, L. & Paltrinieri, W., (1998) Structural evolution of the Lucanian Apennines, Southern Italy. *Journ. Struct. Geol.*, 20, 617-638
- Morelli C., Carrozzo M.T., Ceccherini P., Finetti L., Gantar C., Pisani M., Schmidt Di Fredberg P., (1969) Regional geophysical study of the Adriatic sea. *Boll. Geof. Teor. Appl.* XI, nn. 41 -42, pp 3-46
- Mostardini, F., and Merlini, S., (1986) Appennino centro meridionale, sezioni geologiche e proposta di modello strutturale. *Mem. Soc. Geol. Ital.*, 35, 177–202
- Nicolai, C., & Gambini, R., (2007) Structural architecture of the Adria platform-and-basin system. In A. Mazzotti, E. Patacca, & P. Scandone (Eds.), *Results of the CROP Project, Sub-Project CROP-04 Southern Apennines (Italy)*, *Ital. J. Geosci.* (Vol. 7, pp. 21–37). Rome, Italy: Bollettino della Società Geologica Italiana
- Oprsal, I., & Eisner, L., (2014) Cross-correlation—an objective tool to indicate induced seismicity. *Geophys. J. Int.*, 196(3), 1536-1543, doi: 10.1093/gji/ggt501
- Ortolani, F., and Torre, M., (1971) Il Monte Alpi (Lucania) nella paleogeografia dell’Appennino meridionale. *Boll. Soc. Geol. Ital.*, 90 (2), 213-248
- Pasari, S., and Dikshit, O., (2015) Earthquake interevent time distribution in Kachchh, Northwestern India, *Earth, Planets and Space*, 67(129), doi: 10.1186/s40623-015-0295-y
- Patacca, E., Scandone, P., Bellatalla, M., Perilli, N., and Santini, U., (1988) L’Appennino meridionale: modello strutturale e palinspastica dei domini esterni. *Relaz. 74th Congr. Geol. Ital.*, 67-69, Sorrento

- Patacca, E., & Scandone, P., (2001) Late thrust propagation and sedimentary response in the thrust belt-foredeep system of the Southern Apennines. In G. B. Vai, & I. P. Martini (Eds.), *Anatomy of an orogen: The Apennines and adjacent Mediterranean basin*, (pp. 401–440). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9829-3_23
- Patacca, E., and Scandone, P., (2007 b) Constraint on the interpretation of the CROP-04 seismic-line derived from Plio-Pleistocene foredeep and thrust-sheet-top deposits (Southern Apennines, Italy), in Mazzotti, A., Patacca, E., and Scandone, P., eds., *Results of the CROP Project, Sub-project CROP 04 Southern Apennines (Italy): Bollettino della Società Geologica Italiana (Italian Journal of Geosciences)*, Special Issue no. 7, p. 241–256
- Prosser, G., Schiattarella, M., Tramutoli, M., Doglioni, C., Harabaglia, P., e Bigozzi A., (1996) Una sezione rappresentativa dell'Appennino meridionale, in atti della Conferenza Sulla Ricerca Scientifica in Basilicata, pp. 150 – 154, Univ. della Basilicata-Regione Basilicata, Potenza, Italy
- Prosser, G., Palladino G., Avagliano, D., Coraggio, F., Bolla, E.M., Riva, M., e Catellani, D.E., (2021) Stratigraphic and Tectonic Setting of the Liguride Units Cropping Out along the Southeastern Side of the Agri Valley (Southern Apennines, Italy). *Geoscience*, 11, 125, pp 1-30. DOI: 10.3390/geosciences11030125
- Ricchetti, G., Ciaranfi, N., Luperto Sinni, E., Monelli, F., Pieri, P., (1988) Geodinamica ed evoluzione sedimentaria e tettonica dell'avampaese apulo. *Memorie della Società Geologica Italiana* 41, 57-82
- Romano, G., Siniscalchi, A., Balasco, M., Gueguen, E., Petrillo, Z., Tripaldi, S., (2018) Geological and geostructural characterization of the Montemurro area (Southern Italy) inferred from audiomagnetotellurics survey. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 9:1, 1156-1171, DOI: 10.1080/19475705.2018.1502210
- Roue, F., Casero, P., Vially, R. (1991) Growth processes and melange formation in the southern Apennines accretionary wedge. *Earth and Planetary Science Letters* 102, 395-412
- Ruina, A., 1983. Slip instability and state variable friction laws. *Journal of Geophysical Research* 88, 10359e10370
- Santini, S., Candela, S., Mazzoli, S., Megna, A. (2013) Finite element modelling of active structures in the Val d'Agri area (southern Apennines). *Rend. Online Soc. Geol. Ital.* 29, 154–157
- Savage, J.C., 1983. A dislocation model of strain accumulation and release at a subduction zone. *Journal of Geophysical Research* 88, 4984e4996
- Schiattarella, M., Di Leo, P., Benedice, P., e Giano S. I., (2003) Quaternary uplift vs tectonic loading. A case study from the Lucanian Apennine, southern Italy. *Quat. Int.*, 101 – 102, 239 – 251
- Scandone, P., (1967) Studi di geologia lucana: Carta dei terreni della serie calcareo-silico-marnosa e i suoi rapporti con l'Appennino calcareo. *Boll. Soc. Natur. in Napoli*, 76, 301-469
- Scandone, P., (1972) Studi di geologia lucana: Carta dei terreni della serie calcareo-silico-marnosa e note illustrative. *Boll. Soc. Natur. in Napoli*, 81, 225-300
- Sciamanna, S., Gambini, R., Mosca, F., Nicolai, C., Rudkiewicz, J. L., and Sassi, W., (2000) Southern Apennine Thrust Belt: Forward structural and geochemical modelling since Messinian times, paper presented at *Geology and Petroleum Geology of Mediterranean Basins*, Eur. Assoc. of Geosci. And Eng., Malta, 1 – 4 Oct
- Scrocca, D., Carminati, E., Doglioni, C., (2005) Deep structure of the southern Apennines, Italy: Thin-skinned or thickskinned?. *Tectonics* 24, TC3005 10.1029/2004TC001634
- Scrocca, D., (2010) Southern Apennines: structural setting and tectonic evolution. in *Journal of the Virtual Explorer, Electronic Edition*, ISSN 1441-8142, volume 36, paper 14In: (Eds.) Marco Beltrando, Angelo Peccerillo, Massimo Mattei, Sandro Conticelli, and Carlo Doglioni, *The Geology of Italy: tectonics and life along plate margins*, 2010
- Selli, R., (1957) Sulla trasgressione del Miocene nell'Italia meridionale. *Giornale di Geologia*, S. 2a, Vol. 26, 54 pp.
- Shapiro, S. A., Kummerow, J., Dinske, C., Asch, G., Rothert, E., Erzinger, J., Kumpel, H.-J., and Kind, R., (2006) Fluid induced seismicity guided by a continental fault: injection experiment of 2004/2005 at the German Deep Drilling Site (KTB), *Geophys. Res. Lett.*, 33, L01309, doi:10.1029/2005GL024659.39
- Shaw, J. H., Connors, C.D., and Suppe, J., (2004) Part. 1 Structural Interpretation Methods. *Seismic Interpretation of Contractional Fault-Related Folds: An AAPG Seismic Atlas (AAPG Studies in Geology) (AAPG Studies in Geology #53)* Spiral-bound 156 pp. – August 1, 20. ISBN-10:0891810609; ISBN-13: 978-0891810605.
- Shapiro, S. A., Dinske, C., Langenbruch, C., and Wenzel, F., (2010) Seismogenic index and magnitude probability of earthquakes induced during reservoir fluid stimulations. *The Leading Edge*, 29(3), 304-309
- Shapiro, S. A., Krüger, O. S., and Dinske, C., (2013) Probability of inducing given magnitude earthquakes by perturbing finite volumes of rocks, *J. Geophys. Res.Solid Earth*, 118, 3557–3575

XXXIV Ph.D. in Earth Sciences

Ilaria Antoncecchi

MATRICOLA: 1816902

- Shiner, P., Beccacini, A., Mazzoli S., (2004) Thin-skinned versus thick-skinned structural models for Apulian carbonate reservoirs: constraints from the Val d'Agri Fields, S Apennines, Italy. *Marine and Petroleum Geology* 21 (2004) 805–827
- Schlumberger, (1987) Well Evaluation Conference. WEC ITALIA 1987
- Shaw, J.H., Connors, D., and Supper J., (2004) Part 1 Structural interpretation method in Seismic Interpretation of Contractional Fault-Related Folds. An AAPG Seismic Atlas Studies in Geology #53 pp 1-70
- Sieh, K., Natawidjaja, D.H., Meltzner, A.J., Shen, C.-C., Cheng, H., Li, K.-S., Suwargadi, B.W., Galetzka, J., Philibosian, B., Edwards, R.L., (2008) Earthquake supercycles inferred from sea-level changes recorded in the Corals of West Sumatra. *Science* 322 (5908), 1674e1678. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1163589>
- Simm, R. & White, R., (2002) Phase, polarity and the interpreter's wavelet. *First Break*. 20. 277-281. [10.1046/j.1365-2397.2002.00277.x](http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2397.2002.00277.x)
- Stabile, T. A., Serlenga, V., Satriano, C., Romanelli, M., Gueguen, E., Gallipoli, M. R., Ripepi, E., Saurel, J.-M., Panebianco, S., Bellanova, J., & Priolo, E., (2020). The INSIEME seismic network: a research infrastructure for studying induced seismicity in the High Agri Valley (southern Italy). *Earth System Science Data*, 12(1), 519–538. <https://doi.org/10.5194/essd-12-519-2020>
- Stabile, T. A., Giocoli, A., Lapenna, V., Perrone, A., Piscitelli, S., & Telesca, L., (2014a). Evidences of low-magnitude continued reservoir-induced seismicity associated with the Pertusillo artificial lake (southern Italy). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(4), 1820–1828. <https://doi.org/10.1785/0120130333>
- Stabile, T. A., Giocoli, A., Perrone, A., Piscitelli, S. & Lapenna, V., (2014b) Fluid injection induced seismicity reveals a NE dipping fault in the southeastern sector of the High Agri Valley, southern Italy. *Geophys. Res. Lett.* 41, 5847–5854
- Thatcher, W., Rundle, J.B., (1979) A model for the earthquake cycle in underthrust zones. *Journal of Geophysical Research* 84, 5540e5556
- Tselentis, G. A., Martakis, N., Paraskevopoulos, P., Sokos, E., & Lois, A., (2011) High-resolution passive seismic tomography (PST) for 3D velocity, Poisson's ratio ν , and P-wave quality QP in the Delvina hydrocarbon field, southern Albania. *Geophysics*, 76(3), B1–B24
- Vadacca, L., Rossi, D., Scotti, A., and Buttinelli, M., (2021) Slip tendency analysis, fault reactivation potential and induced seismicity in the Val d'Agri oilfield (Italy), *J. Geophys. Res.* 126, no. 1, doi:10.1029/2019JB019185
- Valoroso, L., Improta, L., Chiaraluce, L., Di Stefano, R., Ferranti, L., Govoni, A., and Chiarabba, C., (2009) Active faults and induced seismicity in the Val d'Agri area (Southern Apennines, Italy). *Geophys. J. Int.*, Vol. 178, pp. 488–502. [doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04166.x]
- Valoroso L., Improta L., De Gori P. & Chiarabba C. (2011) Upper crustal structure, seismicity and pore pressure variations in an extensional seismic belt through 3D and 4-D VP and VP/VS models: The example of the Val d'Agri area (southern Italy). *Jour. Geophys. Res.*, 116, B07303, <http://dx.doi.org/10.1029/2010JB007661>
- Van Dijk, J.P., and Okkes, F.W.M., (1988) The analysis of shear zones in Calabria. implications for the geodynamics of the Central Mediterranean. *La Ricerca Scient., Suppl.*, 68, 24-27
- Van Dijk, J.P., and Okkes, F.W.M., (1990, a) The analysis of shear zones in Calabria. implications for the geodynamics of the Central Mediterranean. *Riv. Ital. Strat. Paleont.*, 96 (2-3), 241-270
- Van Dijk, J.P., and Okkes, F.W.M., (1991) Neogene tectonostratigraphy and kinematics of Calabrian Basins. implications for the geodynamics of the Central Mediterranean. *Tectonophysics*, 196, 23-60
- Van Dijk, J.P., Bello M., Toscano C., Bersani A., Nardon S., (2000) Tectonic model and three-dimensional fracture network analysis of Monte Alpi (southern Apennines), *Tectonophysics* 324 (2000) 203–237
- Van Dijk, J.P., and Cavalli, C., (2001, Int. Rept.) Italia – Giacimento di Monte Alpi. Modellizzazione 3D del sistema di faglie e fratture. 34 pp. Eni-Agip, GESE
- Van Dijk, J.P., Affinito, V., Atena, R., Caputi, A., Cestari, A., D'Elia, S., Giancipoli, N., Lanzellotti, M., Lazzari, M., Oriolo, N., & Picone, S., (2013) Cento Anni di Ricerca Petrolifera - L'Alta Val d'Agri (Basilicata, Italia meridionale)
- Van Hinsbergen, D.J.J., Torsvik, T.H., Schmid, S.M., Mañenco, L.C., Maffione, M., Vissers, R.L.M., Gürer, D., Spakman, W., (2020) Orogenic architecture of the Mediterranean region and kinematic reconstruction of its tectonic evolution since the Triassic. *Gondwana Res.* 81, 79–229. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2019.07.009>
- Vanorio, T., Virieux, J., Capuano, P., & Russo, G. (2005). Three-dimensional seismic tomography from P wave and S wave microearthquake travel times and rock physics characterization of the Campi Flegrei Caldera. *Journal of Geophysical Research*, 110, B03201. <https://doi.org/10.1029/2004JB003102>
- Veeken, P.C.H., (2007) Seismic stratigraphy, basin analysis and reservoir characterisation. *Handbook of geophysical exploration*, Series 37: Elsevier Science Publishing
- Veeken, P.C.H., and van Moerkerken, B., (2013) Seismic Stratigraphy and Depositional Facies Models. EAGE AcaDTMic Press, Netherlands, 496 pp.

XXXIV Ph.D. in Earth Sciences

Ilaria Antoncecchi

MATRICOLA: 1816902

- ViDEPI, (2012 ultimo aggiornamento). Progetto ViDEPI - Visibilità Dati Esplorazione Petrolifera in Italia. <http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it/videpi/>
- Zhang, H., Sarkar, S., Toksoz, M. N., Kuleli, H. S., & Al-Kindy, F., (2009) Passive seismic tomography using induced seismicity at a petroleum field in Oman. *Geophysics*, 74(6), WCB57–WCB69. <https://doi.org/10.1190/1.3253059>
- Zhang, Q., & Lin, G., (2014) Three-dimensional Vp and Vp/Vs models in the Coso geothermal field, California: Seismic characterization of the magmatic system. *Journal of Geophysical Research*, 119(6), 4907–4922. <https://doi.org/10.1002/2014JB010992>
- Zoback M., (2012). Managing the seismic risk posed by wastewater disposal. *Earth*, 57: 38–43.
I software utilizzati in questo progetto di ricerca sono:
 - *QGis open software versione 3.16;*
 - *Stereonet 2011-2020 v. 11.3.0 64 bit – Richard W. Allmendinger*
 - *Kingdom software versione 2017 della IHS Markit (licenza del Ministero dello Sviluppo Economico DGS UNMIG);*
 - *Petrel Software della Schlumberger versione 1.7 (licenza del Ministero dello Sviluppo Economico DGS UNMIG);*
 - *Seisee Open software;*
 - *Kogeo seismic toolkit open software.*

12 APPENDICE I

In questo capitolo sono riportati i dati degli stop esaminati durante il rilevamento nelle Z.1, Z.2, Z.3, Z.4 di cui al par. 3.3 del Capitolo 3.

Tabella 12.1 Misure raccolte in Z.1 stop 1 Montemurro (simbolo in blu in Figura 3.4).

Stop	Coordinate WGS 84 UTM 33	Strato (S0)	Vena //	Vena I	Strie	Descrizione
1	582039,6836; 4463365,1853	336/18		150/61		Flysch di Albidona - ALB: marne con vene di calcite
1	582039,6836; 4463365,1853			200/80		Flysch di Albidona - ALB: marne con vene di calcite
2	582127,3679; 4463549,6470	52/32				Flysch di Albidona – ALB: siltiti con vene di calcite
3	582154,6474; 4463637,9808	164/43				Flysch di Albidona - ALB...alternanza arenaceo pelitica misure piega
3	582154,6474; 4463637,9808	171/31				Flysch di Albidona - ALB: alternanza arenaceo pelitica misure piega
3	582154,6474; 4463637,9808	171/12				Flysch di Albidona – ALB: alternanza arenaceo pelitica misure piega
4	581928,6169; 4463771,7805	94/18				Flysch di Albidona – ALB: alternanze arenarie/peliti
5	581795,4667; 4463741,9029	78/59				Flysch di Albidona – ALB: alternanze arenarie/peliti laminate piano parallele e convolute
6	581766,0762; 4463779,6558	43/10				Flysch di Albidona – ALB: alternanze arenarie/peliti a gradazione diretta (prima misura piega)
6	581766,0762; 4463779,6558	229/32				Flysch di Albidona – ALB: alternanze arenarie/peliti a gradazione diretta (seconda misura piega)
7	581540,2936; 4464180,4099	172/38	172/38	40/60		Flysch di Albidona – ALB: alternanza marne calcareniti con vene di calcite perpendicolari alle superfici di spessore 50 cm
7	581540,2936; 4464180,4099			360/40		Flysch di Albidona – ALB: alternanza marne calcareniti con vene di calcite perpendicolari alle superfici di spessore 50 cm
8	581555,2679; 4464202,8711	224/29				Flysch di Albidona - ALB: marne
9	581560,2702; 4464222,9817	339/16				Flysch di Albidona – ALB. marne
10	581542,0839; 4464265,8496	331/33				Flysch di Albidona – ALB: marne
11	581555,9932; 4464589,2649			360/80		Flysch di Albidona – ALB: vene perp. alla superficie di strato (10) e prelievo dei campioni IL1 e IL2
12	581665,0046; 4464607,7141	80/60			160/33	Flysch di Albidona – ALB: gradini transpressione sinistra
13	581547,9295; 4464319,1097	332/39				Flysch di Albidona – ALB: siltiti marnose con maggiore contenuto terrigeno
14	581605,8798; 4464748,1629					Flysch di Albidona – ALB: possibile contatto stratigrafico tra calcareniti con

XXXIV Ph.D. in Earth Sciences

Ilaria Antoncecchi

MATRICOLA: 1816902

					gradazione diretta e intervallo laminato a tetto che precede le marne
15	581684,2927; 4464335,3864	41/20			Flysch di Albidona – ALB: marne
16	581372,0530; 4464370,6095	209/39			Flysch di Albidona – ALB: marne e calcalreniti
17	581383,2571; 4464321,0842	24/49			Flysch di Albidona – ALB: marne
18	581553,8307; 4464079,4963	308/28			Flysch di Albidona – ALB: Calcareniti con stratificazioni irregolari
19	581555,2922; 4464036,6284	132/63			Flysch di Albidona – ALB: calcareniti a blocchi nelle parti basali
20	581675,5966; 4463860,7485	282/36			
20	581675,5966; 4463860,7485	330/30			
21	581759,3460; 4463375,0424	334/38			Flysch di Albidona – ALB: livello di marne distali con all'interno strati arenacei
22	581783,9208; 4463355,6140	240/40		280/8	Flysch di Albidona – ALB: Marne con vene di calcite
23	582150,2461; 4463227,3351	349/41			Flysch di Albidona – ALB: marne

Tabella 12.2 Tabella delle misure raccolte in Z.2. stop 1 "Grumento Nova" (stop 1 -8 simbolo viola in Figura 3.4, stop 1-2 in arancione in Figura 3.4);

Stop	Coordinate WGS 84 UTM 33	Strato (S0)	"J" –"S"	Vena //	Vena ⊥	Strie	Altri indicatori	Descrizione
1	575738,8500; 4459250,2476		40/40					Calcari Con Requiene E Gasteropodi - CRQ
1	575738,8500; 4459250,2476		70/60					Calcari Con Requiene E Gasteropodi - CRQ
1	575738,8500; 4459250,2476		60/50					Calcari Con Requiene E Gasteropodi - CRQ
1	575738,8500; 4459250,2476	130/30						Calcari Con Requiene E Gasteropodi - CRQ
1	575738,8500; 4459250,2476		80/60			80/20		Calcari Con Requiene E Gasteropodi - CRQ
1	575738,8500; 4459250,2476	190/80						Calcari Con Requiene E Gasteropodi - CRQ
1	575738,8500; 4459250,2476	120/24						Calcari Con Requiene E Gasteropodi - CRQ
1	575738,8500; 4459250,2476	145/30						Calcari Con Requiene E Gasteropodi - CRQ

XXXIV Ph.D. in Earth Sciences

Ilaria Antoncecchi

MATRICOLA: 1816902

1	575738,8500; 4459250,2476	160/40					Calcari Con Requiene E Gasteropodi - CRQ
1	575738,8500; 4459250,2476					Piano di Faglia 220/10	Calcari Con Requiene E Gasteropodi - CRQ
1	575738,8500; 4459250,2476		60/50			Piano di Faglia 270/30	Calcari Con Requiene E Gasteropodi - CRQ
1	575738,8500; 4459250,2476					Piano di Faglia 220/80	Calcari Con Requiene E Gasteropodi - CRQ
1	575738,8500; 4459250,2476	160/10					Calcari Con Requiene E Gasteropodi - CRQ
2	575837,5387; 4459860,9317	310/10					Calcari Con Requiene e Gasteropodi - CRQ
2	575837,5387; 4459860,9317	350/45					Calcari Con Requiene e Gasteropodi - CRQ
3	576001,1200; 4460062,2626	350/30					Calcari Con Requiene e Gasteropodi - CRQ
3	576001,1200; 4460062,2626	350/20					Calcari Con Requiene e Gasteropodi - CRQ
1.	574871,1749; 4458724,0084	120/40		260/30	230/80	Fibre direzione SW NE	Flysch di Albidona - ALB
1.	574871,1749; 4458724,0084	100/40					Flysch di Albidona - ALB
2.	574922,3492; 4459187,1356	200/40				F1 200/40	Calcari Con Requiene e Gasteropodi - CRQ
2.	574922,3492; 4459187,1356	80/60				F2 80/60	Calcari Con Requiene e Gasteropodi - CRQ
4.	575107,7144; 4459404,7915	270/50					Calcari Con Requiene e Gasteropodi - CRQ
4.	575107,7144; 4459404,7915	210/50					Calcari Con Requiene e Gasteropodi - CRQ
4.	575107,7144; 4459404,7915	80/20					Calcari Con Requiene e Gasteropodi - CRQ
4.	575107,7144; 4459404,7915	250/20					
5.	575142,3181; 4459461,4158	50/20				Fibre NW-SE	
5.	575142,3181; 4459461,4158	220/50					Calcari Con Requiene e Gasteropodi - CRQ

XXXIV Ph.D. in Earth Sciences

Ilaria Antoncecchi

MATRICOLA: 1816902

6.	575189,5050; 4459319,4177	320/40					Flysch di Albidona - ALB
	575189,5050; 4459319,4177	300/30					Flysch di Albidona - ALB
6.	575189,5050; 4459319,4177	340/20					Flysch di Albidona - ALB
6.	575189,5050; 4459319,4177	350/30		280/30			Flysch di Albidona - ALB
7.	574884,3629; 4459077,6289	310/50					Calcari Con Requiene e Gasteropodi - CRQ
7.	574884,3629; 4459077,6289	260/30					Calcari Con Requiene eGasteropodi - CRQ
8.	574648,4284; 4459757,1205	140/40					Calcari Con Requiene e Gasteropodi - CRQ
8.	574648,4284; 4459757,1205	180/30					Calcari Con Requiene e Gasteropodi - CRQ
8.	574648,4284; 4459757,1205	130/20					Calcari Con Requiene e Gasteropodi - CRQ
8.	574648,4284; 4459757,1205	140/30					Calcari Con Requiene e Gasteropodi - CRQ
9.	574683,0321; 4459700,4962	80/70					Dolomie Indifferenziate - DOC
9.	574683,0321; 4459700,4962	70/40					Dolomie Indifferenziate - DOC

Tabella 12.3 Misure relative agli stop della Z.3 di Pian di Maglia (stop 1- 13 in giallo in Figura 3.4; stop 1-7 in rosso in Figura 3.4).

Stop	Coordinate WGS 84 UTM 33	Strato (S0)	Vena //	Vena I	Altri indicatori	Strie	Descrizione
1.	573849,9020; 4452949,7428	250/30					Monte Facito- FAC: calcareniti in matrice gialla
2.	573957,2907; 4452992,6360	280/8					Monte Facito- FAC: calcareniti in matrice gialla
3.	574078,7522; 4453010,6921	270/30					Calcari con Selce SLC2
4.	574330,2364; 4453041,7520	211/31					Calcari con Selce SLC2
5.	574526,9547; 4453081,8087	18/30					Scisti Silicei – STS1: scisti di colore verde in strati cm
5.	574526,9547;	342/28					

XXXIV Ph.D. in Earth Sciences
Ilaria Antoncecchi

MATRICOLA: 1816902

	4453081,8087						
5.	574526,9547; 4453081,8087	300/20					
6.	574608,4280; 4453049,9014	200/10			Piano di Faglia 200/80		Scisti Silicei – STS1: scisti di colore verde in strati cm
7.	574692,6190; 4453024,1197						Scisti Silicei STS1: scisti di colore verde in strati cm
8.	574681,7188; 4453007,2650	40/2					Scisti Silicei STS1: scisti di colore verde in strati cm
9.	574744,9704; 4452982,6748				Piega SW-NE		Scisti Silicei STS1: scisti di colore verde in strati cm
10.	574635,3976; 4453130,8523	30/20			Piano di Faglia 240/30		Scisti Silicei: scisti di colore verde in strati cm a contatto con Flysch di Galestri FGY1
11.	574604,0042; 4453139,3930				Piano di Faglia 220/40		Scisti Silicei: scisti di colore verde in strati cm a contatto con Flysch di Galestri FGY1
12.	574557,3778; 4452936,8673						
13.	574261,0632; 4452923,1347						Contatto stratigrafico tra la Monte Facito – FAC e i Calcari con Selce – SLC2
15	575251,0215; 4452350,3048				Piano di Faglia 220/60		Contatto per faglia diretta tra la Monte Facito -FAC e Calcari con Selce – SLC1 - SLC1
16	575342,3416; 4452023,3832	220/30					Monte Facito- FAC: calcareniti in matrice gialla
16	575342,3416; 4452023,3832	190/42					Monte Facito- FAC: calcareniti in matrice gialla

XXXIV Ph.D. in Earth Sciences
Ilaria Antoncecchi
MATRICOLA: 1816902

17.	575470,9916; 4451738,4029	244/25					Calcarei con Selce – SLC1 - SLC1
17.	575470,9916; 4451738,4029	315/57			Piano di Faglia 318/75		Calcarei con Selce – SLC1 - SLC1 in contatto tettonico con il Flysch di Galestri – FGY1
18.	575501,5282; 4451723,6729	18/32					Calcarei con Selce – SLC1 - SLC1
21	575733,8951; 4452302,8274	300/20					Scisti Silicei – STS1
22	575733,9175; 4452302,1773	172/57					Scisti Silicei – STS1
23	575738,2409; 4452279,4421	10/20					Scisti Silicei – STS1 in contatto con la Monte Facito
1.	575682,9759; 4452218,5691	8/50	25/20		Piano di Faglia 8/71	N-S	Monte Facito - FAC: calcareniti in matrice gialla
1.	575682,9759; 4452218,5691	40/35	40/30	220/90		NW-SW	Monte Facito - FAC: calcareniti in matrice gialla
1.	575682,9759; 4452218,5691	40/40		250/80			Monte Facito - FAC: calcareniti in matrice gialla
3.	575612,3396; 4452152,2137	25/30					Monte Facito - FAC: calcareniti in matrice gialla
4.	575567,3892; 4452112,6146	40/65					Monte Facito - FAC: calcareniti in matrice gialla
5.	575547,0545; 4452064,4534	280/40					Monte Facito - FAC: calcareniti in matrice gialla
6.	575398,2900; 4452275,2922	285/50					Calcarei con Selce – SLC1 - SLC1
6.	575398,2900; 4452275,2922	270/30			Asse piega circa SW-NE (40/58)		Calcarei con Selce – SLC1 - SLC1
6.	575398,2900; 4452275,2922	300/70			Asse piega circa SW-NE (40/58)		Calcarei con Selce – SLC1 - SLC1

XXXIV Ph.D. in Earth Sciences

Ilaria Antoncicchi

MATRICOLA: 1816902

6.	575398,2900; 4452275,2922	20/40			Asse piega circa SW-NE 40/58		Calcari con Selce – SLC1 - SLC1
6.	575398,2900; 4452275,2922	10/70			Asse piega circa SW-NE		Calcari con Selce – SLC1 - SLC1
6.	575398,2900; 4452275,2922	25/70			Asse piega circa SW-NE		Calcari con Selce – SLC1 - SLC1
6.	575398,2900; 4452275,2922	20/20			Asse piega circa SW-NE		Calcari con Selce – SLC1 - SLC1
7.	575348,6888; 4452357,4478	220/30					Calcari con Selce-SLC1
7.	575348,6888; 4452357,4478	70/20	70/80				Calcari con Selce-SLC1
7.	575348,6888; 4452357,4478	165/20	100/55	220/15			Calcari con Selce-SLC1
7.	575348,6888; 4452357,4478		90/55				Calcari con Selce-SLC1
7.	575348,6888; 4452357,4478	70/10	50/70	280/8			Calcari con Selce-SLC1

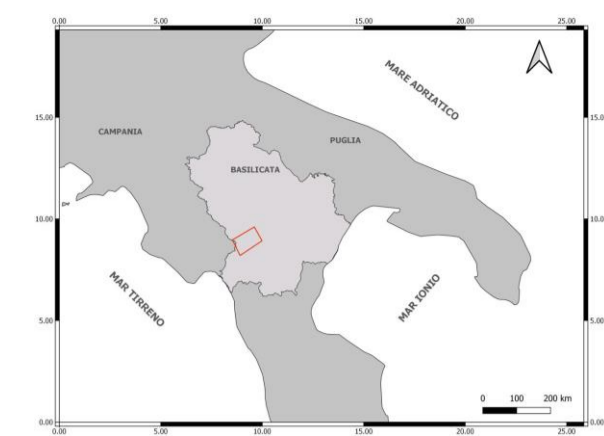
Tabella 12.4 Misure relative agli stop 8-11 Z.4 Moliterno (in rosa e in viola in Figura 3.4).

stop	Coordinate WGS 84 UTM 33	Strato (S0)	Vena //	Vena I	Altri indicatori cinematici	Descrizione
8	573549,6132; 4454318,3045	70/20	80/40	140/70		Calcari con Selce – SLC2
8	573549,6132; 4454318,3045	60/30				Calcari con Selce-SLC2
8	573549,6132; 4454318,3045	100/10				Calcari con Selce-SLC2
8	573549,6132; 4454318,3045	110/30				Calcari con Selce-SLC2
8	573549,6132; 4454318,3045	80/10				Calcari con Selce-SLC2
26	573503,9454; 4454350,2317	70/40				Calcari con Selce-SLC2
26	573503,9454; 4454350,2317	6/18				Monte Facito- FAC
4	573576,4377 4454308,1010	130/20				Calcari con Selce-SLC2
5	573724,2569 4454368,9677	100/20				Calcari con Selce-SLC2
6.	573322,2312; 4454808,0184	110/30				Monte Facito - FAC:
6.	573322,2312; 4454808,0184	120/40				Monte Facito - FAC:
10.	573642,4285; 4456254,4240	256/40				Monte Facito - FAC:
10.	573642,4285; 4456254,4240	260/20				Monte Facito - FAC:
10.	573642,4285; 4456254,4240	220/70				Monte Facito - FAC:

XXXIV Ph.D. in Earth Sciences**Ilaria Antoncecchi**

MATRICOLA: 1816902

11.	573730,4491; 4456307,8094	250/40				Monte Facito - FAC:
11.	573730,4491; 4456307,8094	240/50				Monte Facito - FAC:
3.	573615,1553; 4456248,2937	140/20				Calcari con Selce – SLC2
		140/40				Calcari con Selce – SLC2
	573615,1553; 4456248,2937				S-C: 155/30	Monte Facito - FAC: "S" parte centrale Fac
4.	575152,1465; 4455968,3750					Monte Facito - FAC: "C" alta



CARTA GEOLOGICO-STRUTTURALE DELL' ALTA VAL D'AGRI - HVDA

Sistema di riferimento WGS84 UTM 33 - coordinate decimali

Tesi di dottorato XXXIV ciclo della Scuola di Dottorato in Scienze della Terra presso l'Università «La Sapienza» di Roma

Autore: Ilaria Antoncecci

Tutor: Carlo Doglioni - Università «La Sapienza» - Dipartimento di Scienze della Terra;

Co-Tutor: Eugenio Carminati - Università «La Sapienza» - Dipartimento di Scienze della Terra;

CoTutors esterni: Giacomo Prosser - Università della Basilicata - Dipartimento di Scienze della Terra; Luigi Improta - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

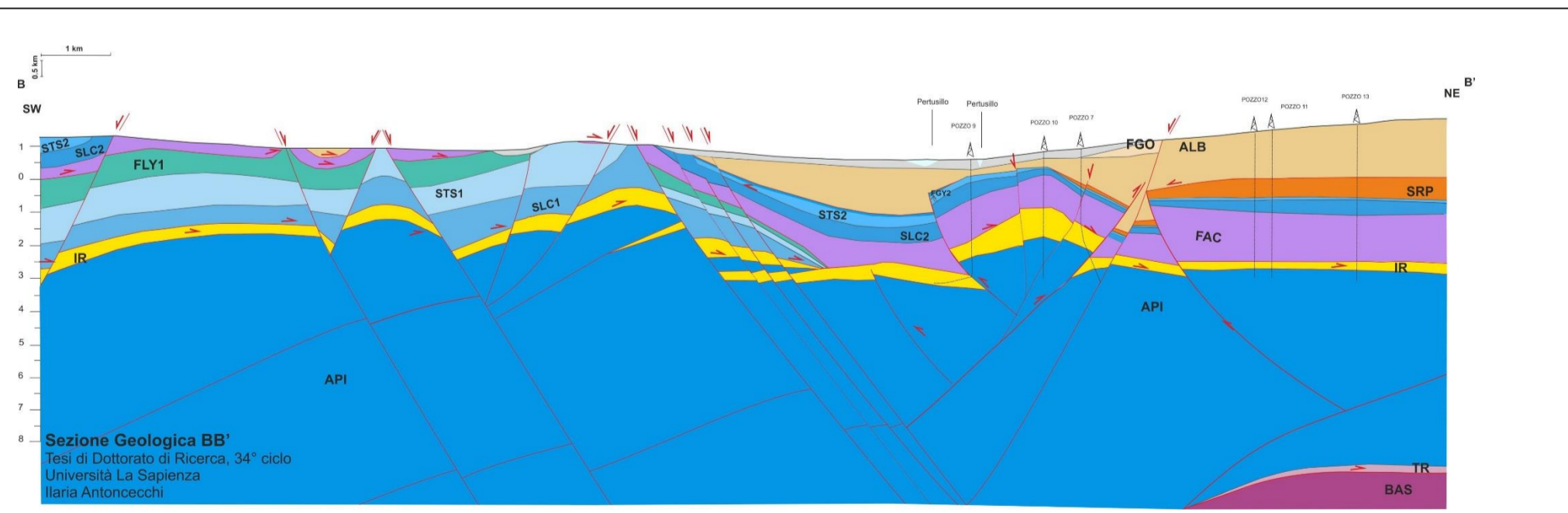
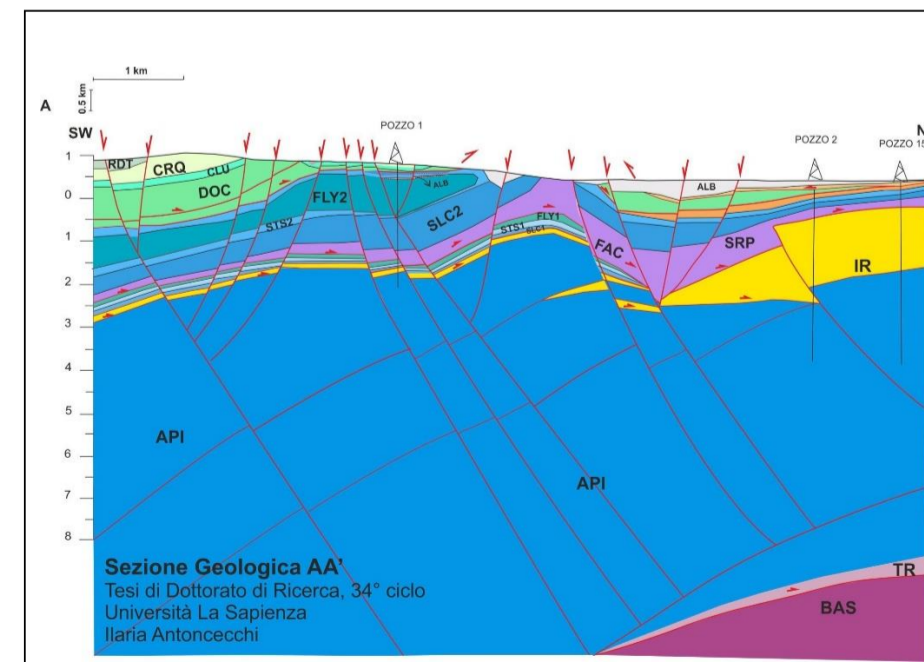
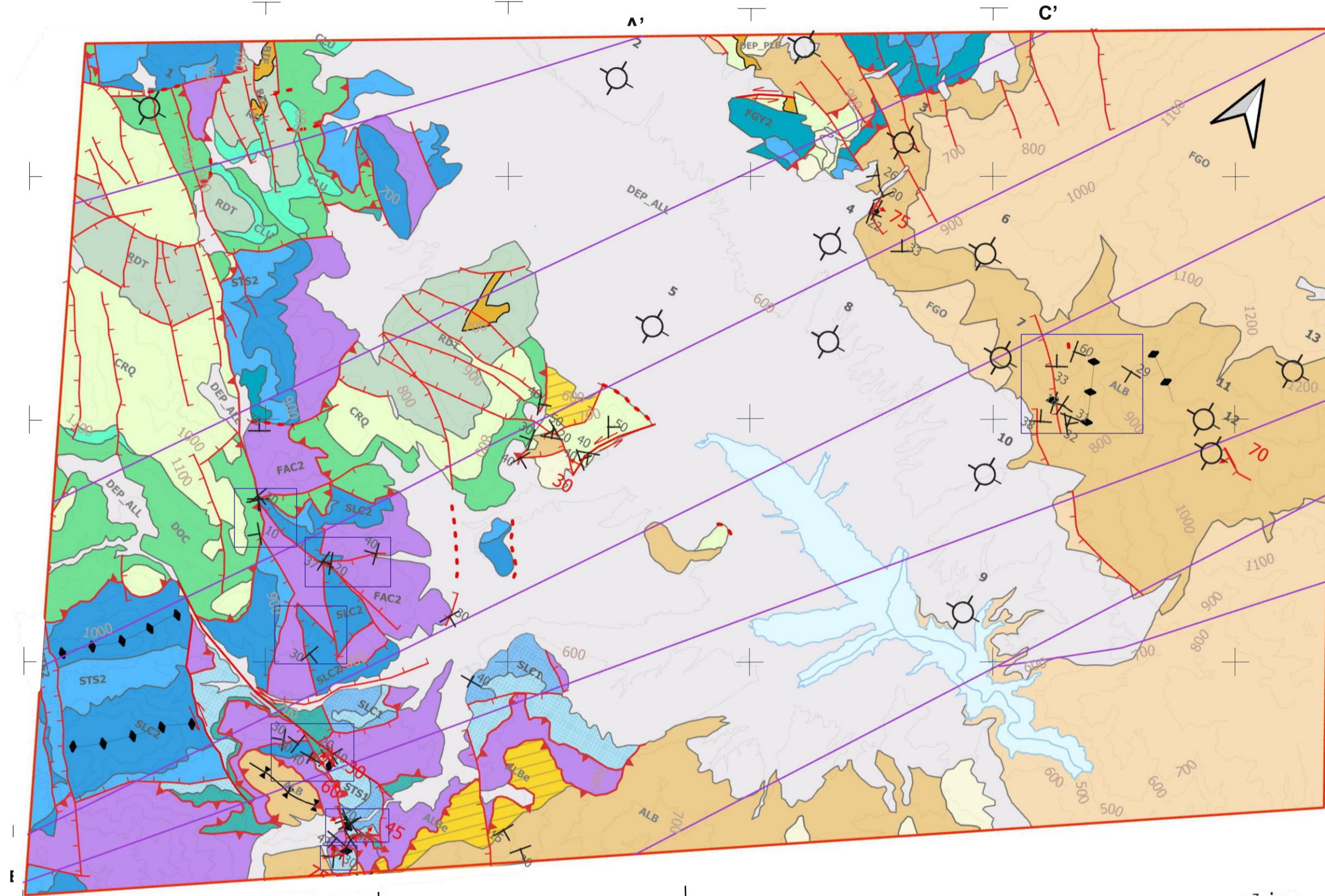


LEGENDA

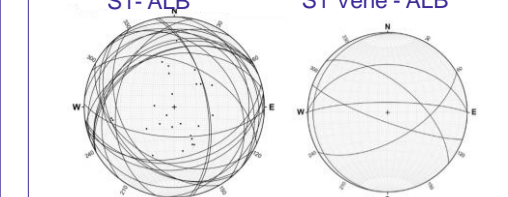
- DEPOSITI ALLUVIONALI (Pleistocene Sup. - Attuale) - DEP_ALL
- DEPOSITI PLEISTOCENICI (Pleistocene Inf. - Medio) - DEP_PLE
- UNITA' SINOROGENICHE MIOCENICHE**
- Unità sinorogena
- FLYSCH DI GORGOLIONE (Miocene Medio) - FGO
- Unità tettonica Silentina
- FLYSCH DI ALBIDONA ESTERNO (Miocene Medio) - ALBe
- FLYSCH DI ALBIDONA (Miocene Inf.) - ALB
- UNITA' DELLA PIATTAFORMA APPENNINICA**
- Unità tettonica dei Monti della Maddalena
- FORMAZIONE DEL BIFURTO (Miocene Inf. - Medio) - BIF
- CALCARI A RADIODIOTIDI (Cenomaniano - Santoniano) - RDT
- CALCARI CON REQUIENE E GASTEROPODI (Titanico - Cenomaniano) - CRQ
- CALCARI E CALCARI DOLOMITICI (Triassico Sup. ? - Cretaceo Sup. ?) - CLU
- DOLOMIE INDIFFERENZIATE (Triassico Sup. - Paleocene) - DOC
- UNITA' TETTONICA LAGONEGRO II**
- ARGILLI DEL SERRAPOTAMO (Oligocene Sup.) - SRP
- FLYSCH GALESTRINO (Cretaceo) - FGY2
- SCIISTI SILICEI (Retico - Cretaceo) - STS2
- CALCARI CON SELCE (Triassico Sup.) - SLC2
- FORMAZIONE DI MONTE FACITO (Triassico Inf.) - FAC2
- UNITA' TETTONICA LAGONEGRO I**
- FLYSCH GALESTRINO (Cretaceo Inf.) - FGY1
- SCIISTI SILICEI (Retico - Giurassico Sup.) - STS1
- CALCARI CON SELCE (Carnico - Norico) - SLC1
- UNITA' TETTONICA IRPINE**
- UNITA' IRPINE (Miocene) - IR
- UNITA' DELLA PIATTAFORMA APULA INTERNA**
- PIATTAFORMA APULA INTERNA (Triassico - Cretaceo) - API
- DEPOSITI CLASTICI (Permo-Triassico) - TR
- BASAMENTO**

SIMBOLOGIA

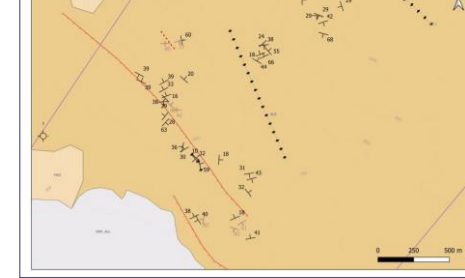
- ▲ Pozzo di produzione e/o reiniezione in sezione verticale
- Pozzo di produzione e/o reiniezione in pianta
- ✂ Giaciture di strato prese in campo
- ⊥ Giacitura di strato orizzontale
- ⊥ Giacitura di strato verticale
- ⊥ Giacitura piano di faglia
- ⊥ Giaciture altri indicatori cinematici (vene, fibre, strie ecc.)*
- *simbolo visibile fino alla scala < 1:25.000
- Traccia delle sezioni geologiche AA'; BB'; CC'; DD'; EE'; FF'; GG'
- Contatto Stratigrafico
- Struttura incerta
- Trascorrente destra/Sinistra (le frecce indicano il senso del taglio)
- Faglia Normale
- Faglia Inversa
- Piega Sinclinale
- Piega Anticlinale



Z.1 - Montemurro
S1 - ALB S1 Vene - ALB

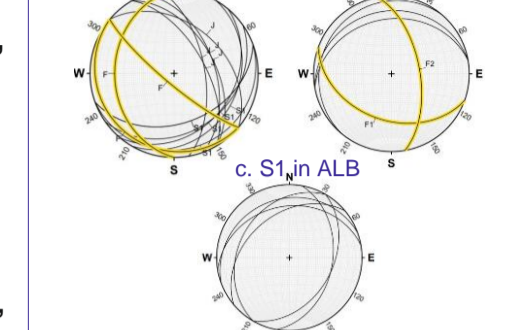


Z.1 - Montemurro

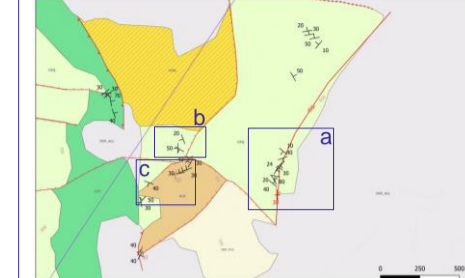


Z.1 - Grumento Nova

a. S1 J e Faglia - CRQ Fratture e S1 - CRQ

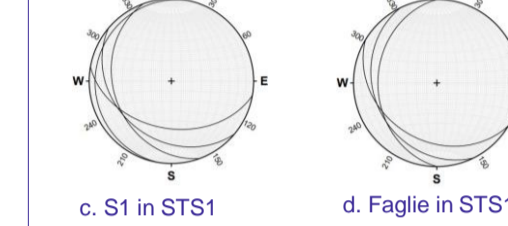


Z.1 - Grumento Nova



Z.3 a - Pian di Maglie, Santa Maria del Rito

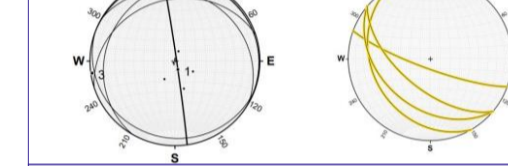
a. S1 FAC b. S1 in SLC2



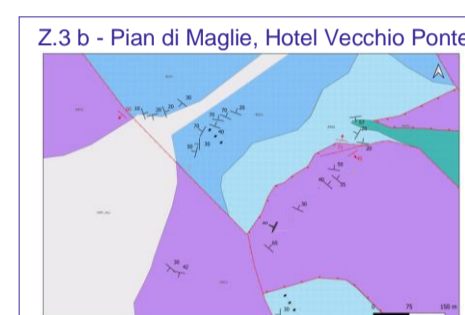
Z.3 a - Pian di Maglie, Santa Maria del Rito



c. S1 in STS1 d. Faglie in STS1

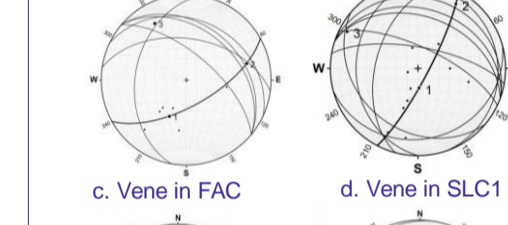


Z.3 b - Pian di Maglie, Hotel Vecchio Ponte

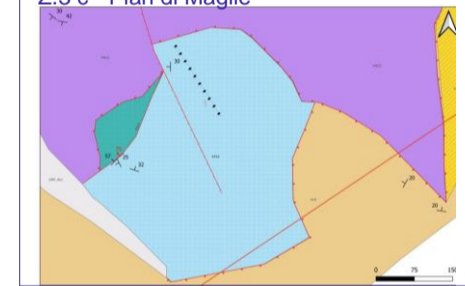


Z.3 b - Pian di Maglie, Hotel Vecchio Ponte

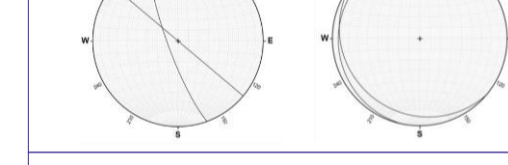
a. S1 FAC b. S1 in SLC1



Z.3 c - Pian di Maglie

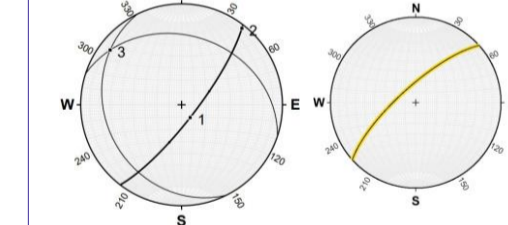


c. Vene in FAC d. Vene in SLC1



Z.3 c - Pian di Maglie

a. S1 in STS1 b. Faglia in STS1

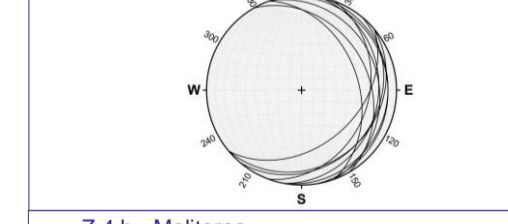


Z.4 a - Moliterno



Z.4 a - Moliterno

S1 in SLC2

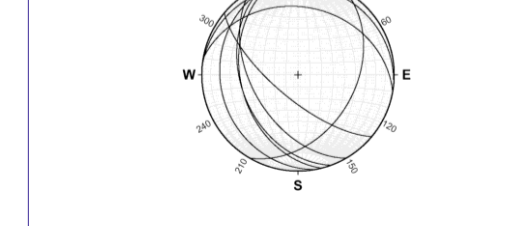


Z.4 b - Moliterno



Z.4 b - Moliterno

S1 in FAC



Z.4 c - Moliterno

