



**RIDEFINIZIONE DELLE ZONE DI ATTENZIONE DELLE FAGLIE ATTIVE E CAPACI EMERSE
DAGLI STUDI DI MICROZONAZIONE SISMICA EFFETTUATI NEL COMUNE DI LEONESSA,
IN PROVINCIA DI RIETI, INTERESSATO DAGLI EVENTI SISMICI VERIFICATISI A FAR
DATA DAL 24 AGOSTO 2016 – FASE 1**



Vista panoramica del fianco sud-occidentale del bacino di Leonessa; il paese di Leonessa è visibile al centro della foto (Foto: Giada Santucci)

Coordinatore: Emanuela Falcucci

Relazione a cura di: Emanuela Falcucci e Stefano Gori,
con il contributo di Deborah Maceroni⁽²⁾⁽¹⁾ e Girolamo Dixit Dominus⁽¹⁾

Gruppo di Lavoro: Emanuela Falcucci⁽¹⁾, Stefano Gori⁽¹⁾,
Marco Moro⁽¹⁾, Michele Saroli⁽²⁾⁽¹⁾, Fawzi Doumaz⁽¹⁾,
Deborah Maceroni⁽²⁾⁽¹⁾, Girolamo Dixit Dominus⁽¹⁾,
Francesco Chiaretti⁽³⁾

Le indagini geofisiche sono state realizzate da Giuseppe Di
Giulio⁽¹⁾, Valerio Materni⁽¹⁾, Vincenzo Sapia⁽¹⁾, Maurizio
Vassallo⁽¹⁾

- (1) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma
- (2) Università di Cassino e Lazio Meridionale - DiCeM – Cassino
- (3) Libero Professionista
- (4) Università degli Studi dell'Insubria

2020-2021

*Attività operativa nell'ambito
dell'accordo di collaborazione
scientifica tra INGV e la Presidenza del
Consiglio dei Ministri– Commissario
Straordinario del Governo, ai fini della
ricostruzione nei territori interessati
dagli eventi sismici verificatisi a far
data dal 24 agosto 2016, con sede in
Roma - Via IV Novembre n.119/a in
persona dell'On. Avv. Giovanni Legnini
(del 03/10/2020)*

2020-2021

RIDEFINIZIONE DELLE ZONE DI ATTENZIONE DELLE FAGLIE ATTIVE E CAPACI EMERSE DAGLI STUDI DI MICROZONAZIONE SISMICA EFFETTUATI NEL COMUNE DI LEONESSA, IN PROVINCIA DI RIETI, INTERESSATO DAGLI EVENTI SISMICI VERIFICATISI A FAR DATA DAL 24 AGOSTO 2016 – FASE 1

Coordinatore: Emanuela Falcucci

Relazione a cura di: Emanuela Falcucci e Stefano Gori,

con il contributo di Deborah Maceroni⁽²⁾⁽¹⁾ e Girolamo Dixit Dominus⁽¹⁾

Gruppo di Lavoro: Emanuela Falcucci⁽¹⁾, Stefano Gori⁽¹⁾, Marco Moro⁽¹⁾, Michele Saroli⁽²⁾⁽¹⁾, Fawzi Doumaz⁽¹⁾, Deborah Maceroni⁽²⁾⁽¹⁾, Girolamo Dixit Dominus⁽¹⁾, Francesco Chiaretti⁽³⁾

Le indagini geofisiche sono state realizzate da Giuseppe Di Giulio⁽¹⁾, Valerio Materni⁽¹⁾, Vincenzo Sapia⁽¹⁾, Maurizio Vassallo⁽¹⁾

Al fine di una ottimizzazione delle conoscenze scientifiche sull'area e sull'oggetto dello studio (Faglie Attive e Capaci), alle attività di ricerca collaborano: Prof. Alessandro Maria Michetti⁽⁴⁾, Dott.ssa Rosa Nappi⁽¹⁾, Dott.ssa Rosella Nave⁽¹⁾, Giuliana Alessio⁽¹⁾.

(1) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma

(2) Università di Cassino e Lazio Meridionale - DiCeM – Cassino

(3) Libero Professionista

(4) Università degli Studi dell'Insubria

INDICE

1. Introduzione
 2. Inquadramento geografico
 3. Inquadramento geologico
 - **3.1** Successioni stratigrafiche del substrato pre-quadernario
 - **3.2** Tettonica pre-quadernaria e quadernaria
 - **3.3** Bacino Leonessa
 4. Inquadramento sismotettonico regionale e sismicità storica
 5. La faglia di Leonessa: lo stato delle conoscenze sull'attività quadernaria e tardo-quadernaria
 6. Analisi fotogeologica e indagini geologiche di terreno
 7. Indagini geofisiche: prime indagini e risultati
 - **7.1** Prospezioni geoelettriche
 - **7.2** Misure di rumore sismico ambientale
 8. Conclusioni
- Bibliografia

1) INTRODUZIONE

L'attività operativa nell'ambito dell'accordo di collaborazione scientifica tra l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia e la Presidenza del Consiglio dei Ministri- Commissario Straordinario del Governo, prevede la ridefinizione delle zone di attenzione delle faglie attive a capaci emerse degli studi di Microzonazione Sismica (MZS) effettuati nel comune di Leonessa (Lotto n.5), in provincia di Rieti, interessato dagli eventi sismici verificatisi a far data dal 24 agosto 2016.

Nello specifico, la faglia di Leonessa è stata definita negli studi di MZS "attiva e capace". Secondo quanto definito dagli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica attualmente vigenti in Italia (Gruppo di lavoro MS, 2008) ed in particolare dalle "Linee Guida per la gestione del territorio in aree interessate da faglie attive e capaci (FAC)" (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2015), è considerata attiva una faglia che si è attivata almeno una volta negli ultimi 40.000 anni (parte alta del Pleistocene Superiore-Olocene), ed è considerata capace una faglia attiva che raggiunge la superficie topografica, producendo una frattura/dislocazione del terreno.

Tale assunzione per la faglia di Leonessa deriva dalla presenza della faglia di Leonessa nel Catalogo delle faglie capaci (ITHACA) dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. Specificatamente, ITHACA riporta la faglia di Leonessa come faglia normale capace, orientata NO-SE e immergente verso NE, composta da due rami paralleli fra loro (uno principale e uno di minor lunghezza), che interessano il margine sud-occidentale del bacino di Leonessa, per una lunghezza superficiale di circa 15 km. Secondo quanto definito dal Catalogo, la struttura tettonica mostrerebbe evidenze di attività nel Pleistocene Medio-Superiore, essendo responsabile della dislocazione di depositi e/o morfologie che ne attesterebbero l'ultima attività in un ambito cronologico compreso fra i 125.000 e 700.000 anni prima del presente. Tuttavia, per la definizione della capacità di una faglia, ITHACA non sempre riporta l'evidenza di attivazione negli ultimi 40.000 anni, come richiesto e previsto dalle succitate Linee Guida FAC.

Lo scopo del presente lavoro è quello di attestare l'attività e capacità della faglia di Leonessa secondo i criteri scientifico-operativi previsti dalle Linee Guida FAC e, successivamente, di definire la traccia della struttura tettonica in superficie e, di conseguenza, la zonazione (Zona di Rispetto e Zona di Suscettibilità, definite dalle Linee Guida FAC) ad essa associate.

La FASE 1 dell'attività operativa prevede quanto riportato qui di seguito:

1) distinzione delle FAC meritevoli di approfondimento (secondo quanto previsto dall'allegato tecnico dell'Ordinanza n° 83) da quelle che possono essere eliminate in quanto non coerenti con il modello sismotettonico regionale e con gli indizi di carattere geologico e geomorfologico ed anche a seguito delle indagini geofisiche in campo.

2) coerentemente con le Linee Guida, per le FAC indicate nelle carte delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS) allegate agli Studi di Microzonazione Sismica saranno verificate la sussistenza di almeno due delle condizioni preliminari affinché si debbano eseguire studi di dettaglio sulle FAC:

- a) l'area oggetto di studi di MS ricade in area epicentrale di terremoti storici con $M_w > 5.5$;
- b) la letteratura scientifica disponibile già riporta la presenza di faglie all'interno di formazioni tardo-pleistoceniche-oloceniche;
- c) sono segnalate evidenze di attività recente delle faglie rilevate sul campo da geologi, durante i rilievi geologico-tecnici per la stesura delle carte di MZS.

A supporto della FASE 1, dove sarà ritenuto opportuno, potranno essere svolte indagini specifiche tra quelle indicate come necessarie per la FASE 2 dello studio. Ciò consentirà di rimuovere, dalle

Carte delle MOPS, alcune Zone di Attenzione per presenza di FAC, con conseguente modifica della disciplina d'uso prevista al Capitolo 9 delle LL.G.

Al fine del raggiungimento degli obiettivi del presente lavoro, è stato effettuato uno studio multidisciplinare e multimetodologico che ha previsto:

- 1) l'analisi di tettonica attiva e di sismologia storica della regione in cui si colloca la faglia di Leonessa, allo scopo di definire in dettaglio il quadro sismotettonico dell'area e valutare l'occorrenza di eventi storici di Magnitudo rilevante possibilmente associabili alla struttura tettonica in esame.
- 2) l'analisi dettagliata di tutta la letteratura disponibile sull'area inerente la faglia di Leonessa, allo scopo di verificare e analizzare tutte le informazioni relative ad oggi presenti circa l'attività quaternaria e tardo-quaternaria della faglia.
- 3) il rilevamento geologico-geomorfologico-strutturale di terreno, coadiuvata dall'analisi aerofotogeologica multi-scalare e multi-temporale, in aree selezionate, al fine di reperire nuove informazioni atte a migliorare il quadro delle conoscenze sulla traccia della faglia e sull'attività della stessa nel corso del Pleistocene Superiore-Olocene.
- 4) l'esecuzione di indagini geofisiche preliminari (indagini di tomografia elettrica e misure di rumore sismico ambientale), pianificate ed eseguite in aree selezionate, per ottenere informazioni sull'assetto geologico-strutturale di sottosuolo nelle zone potenzialmente interessate dalla presenza della faglia.

Tali analisi ed attività verranno descritte di seguito ad alcuni paragrafi introduttivi, utili a fornire un quadro delle conoscenze geologiche della porzioni di territorio entro il quale si colloca la struttura tettonica oggetto del presente studio.

I risultati delle analisi e delle indagini saranno riassunti nelle conclusioni, nelle quali verranno fornite delle prime valutazioni circa l'attività e la capacità della faglia di Leonessa.

2) INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

Il bacino di Leonessa costituisce una depressione intermontana situata a circa 20 km a NNE di Rieti, ad una quota media di circa 900 m s.l.m. Il bacino è delimitato da tre principali dorsali montuose: a sud dal grande complesso montuoso del Terminillo, con le due vette più elevate del Monte Terminillo (2216 m) e del Monte di Cambio (2081 m), e con le vette del M. Tilia (1776 m), del M. Catabio (1731 m) e del Colle La Croce (1626 m), queste ultime prospicienti al bacino; nella parte nord del bacino si trovano il Monte Tolentino (1568 m) e il M. Massa (1128 m) (Fig. 1a, b). Questi due rilievi dividono il bacino in tre rami diseguali, il maggiore dei quali si allunga in direzione NO-SE, e gli altri due ad andamento circa N-S, con quello occidentale che si estende in direzione dell'abitato di Monteleone di Spoleto, e quello orientale che si estende verso la frazione di Terzone.

Il sistema idrografico del bacino è governato da un sistema fluviale principale, costituito dal Fosso Tascino, che dal massiccio del Terminillo defluisce verso N, attraverso una stretta valle (nominata Vallonina) che si apre nel bacino di Leonessa, e scorre nella parte centrale del bacino (Fig. 1a, b). Il Fiume Tascino si unisce poi al torrente di Vallunga nel settore settentrionale della depressione, dando origine al Fiume Corno, che costituisce il più importante affluente di sinistra del Fiume Nera. Fossi secondari interessano il bacino (es. fosso Vorga), collegandosi al corso del Tascino-Corno in diversi tratti del corso principale. L'attuale corso del Fiume Tascino risulta fortemente incassato nella superficie sub-pianeggiante, a debole pendenza verso nord, che caratterizza il fondo della depressione di Leonessa. I versanti che circondano il bacino sono interessati da incisioni vallive a tratto rettilineo ad alta pendenza, che convogliano lo scorrimento delle acque superficiali lungo rilievi.

3) INQUADRAMENTO GEOLOGICO

3.1 Successioni stratigrafiche del substrato pre-quadernario

I rilievi che circondano il bacino di Leonessa sono costituiti da formazioni geologiche marine carbonatiche mesozoiche e terziarie, che costituiscono il substrato roccioso pre-quadernario (Fig. 2). Tali formazioni sono costituite prevalentemente da calcari, calcari marnosi e marne appartenenti ad un dominio paleogeografico di transizione fra piattaforma carbonatica e bacino carbonatico (Lotti e Crema 1927; Fogli Geologici d'Italia n.138 "Terni" e n.139 "L'Aquila", a scala 1:100.000) (Fig. 2 e 3). Molte delle formazioni si presentano nella facies cosiddette di "transizione", ovvero riferibili ad un margine paleogeografico del bacino carbonatico mesozoico umbro-marchigiano-sabino. La successione carbonatica va dalle dolomie e calcari dolomitici del Lias inferiore (compatti calcari dolomitici bianchi stratificati del gruppo del Terminillo e del M. Tolentino); alla Formazione del "Rosso Ammonitico" del Lias superiore (caratteristica del versante orientale del Monte Tolentino, di parte dei rilievi del settore settentrionale del bacino e del primo tratto della Vallonina, dove sono presenti calcari nodulari, marne e marne argillose, generalmente rosse e grigie ricche di ammoniti); alla Formazione della "Maiolica" del Cretaceo inferiore (costituita da calcare bianco compatto, ben stratificato, estesamente diffusa nella zona compresa

tra il Monte Terminillo, il Monte di Cambio e il Monte Tilia), fino alle Formazioni della “Scaglia Bianca e Scaglia Rossa del Cretaceo superiore-Paleogene (costituiti da calcari e calcari marnosi da bianchi a rossi, presenti soprattutto nella zona della Vallonina). I versanti che delimitano il bacino sono costituiti, nella parte orientale, dalle formazioni del Lias e del Cretaceo inferiore e medio e, nella parte nord-occidentale, da termini del Cretaceo superiore e dell’Eocene.

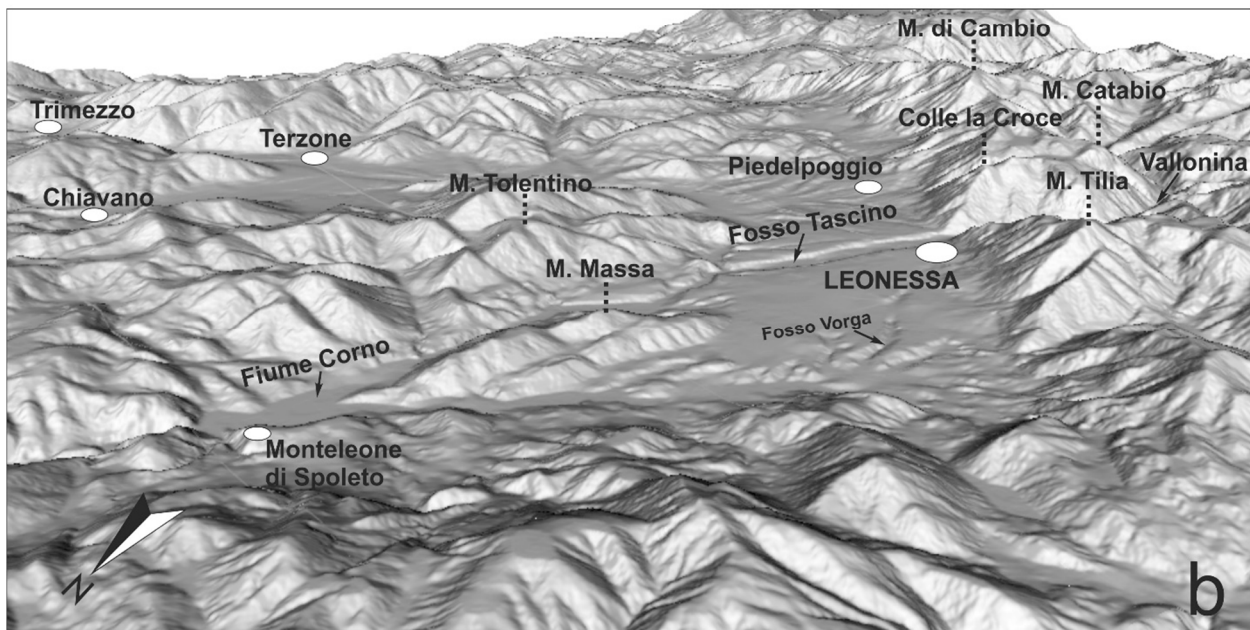
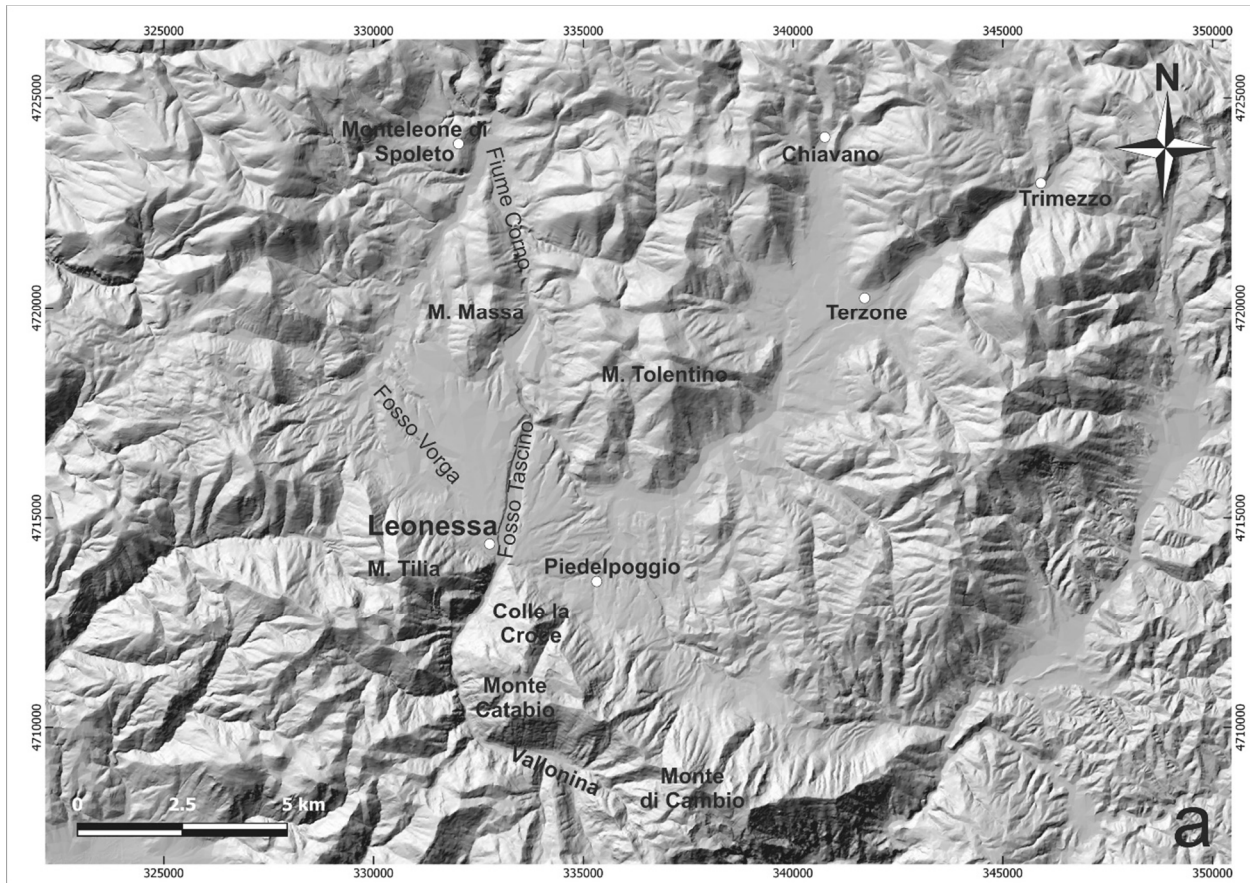


Fig. 1. a) Modello digitale del terreno (vista in pianta) del settore del bacino di Leonessa. Sono indicati i principali rilievi che bordano il bacino e i principali elementi idrografici che interessano il bacino. b) Modello digitale del terreno (in vista prospettica verso SE) del bacino di Leonessa.

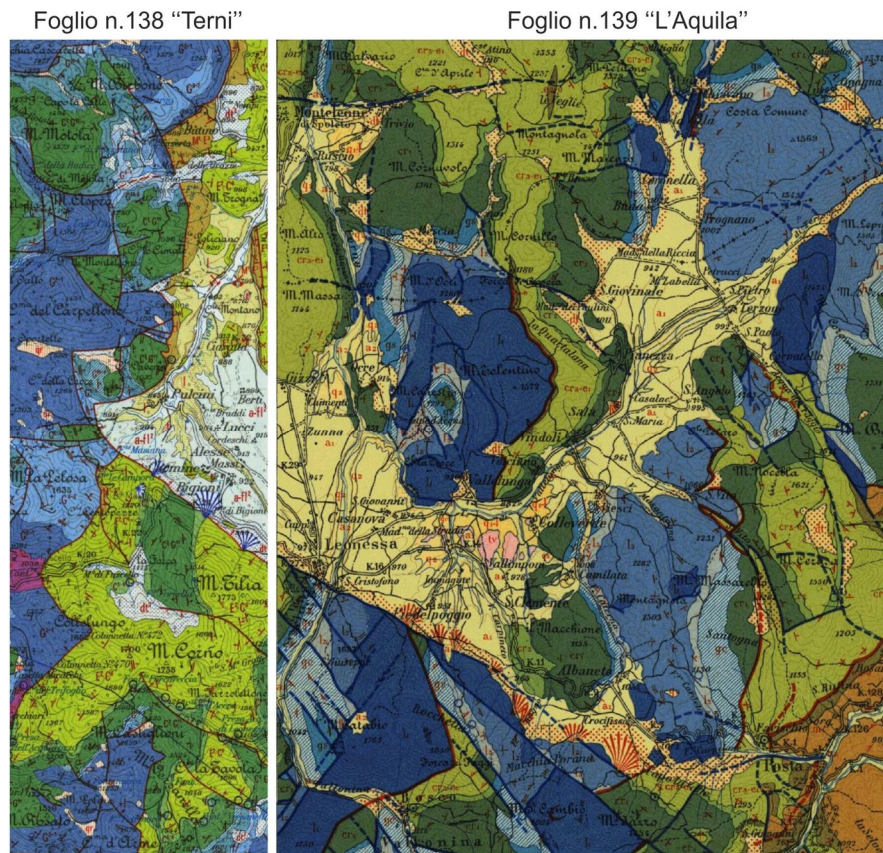


Fig. 2. a) Stralci dei Fogli Geologici di Italia (scala 1:100.000) n. 138 e 139 comprendenti l'area del bacino di Leonessa, al centro dell'immagine. Per la legenda si veda quella originale.

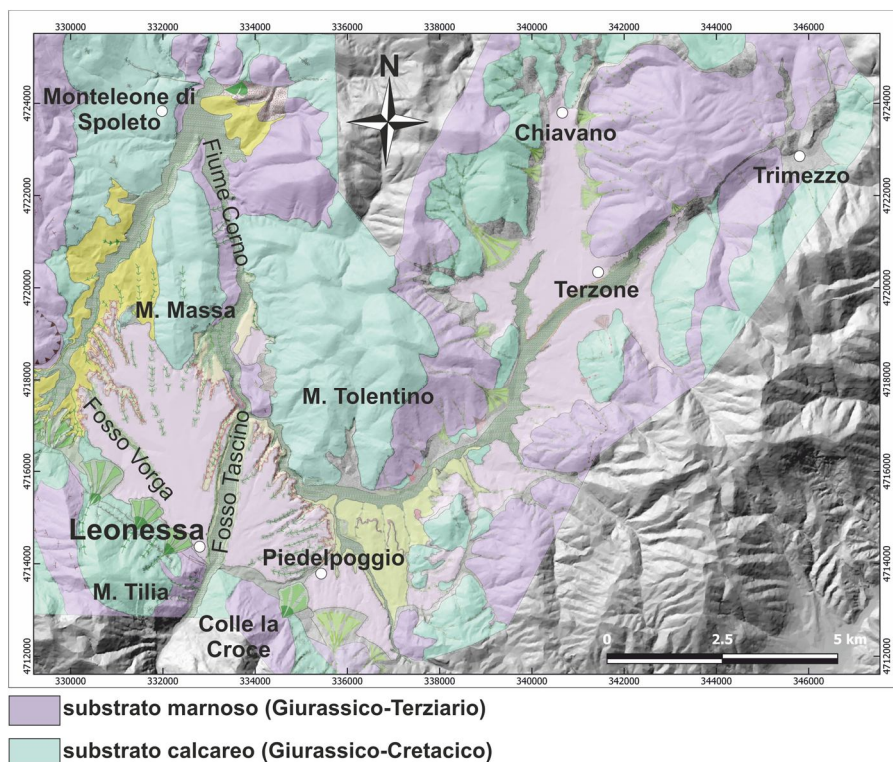


Fig. 3. a) Schema geologico semplificato dell'area del bacino di Leonessa, ridisegnato da Falcucci (2004) e Fubelli et al. (2008).

3.3 Tettonica pre-aterniana e aterniana

L'area del bacino di Leonessa si colloca in un settore appenninico che ha visto una complessa evoluzione tettonica polifasica, a partire dal Mesozoico. Questo settore, infatti, è ubicato in corrispondenza del margine paleogeografico fra la piattaforma carbonatica laziale-abruzzese e il bacino pelagico umbro-marchigiano. Tale limite era marcato da una struttura tettonica regionale nota come "Linea Ancona-Anzio" (e.g. Castellarin et al., 1978), ad andamento circa NNE-SSO, e da strutture ad essa associate, la cui attività estensionale nel corso del Mesozoico ha determinato, appunto, la giustapposizione di questi domini paleogeografici. Sono note strutture tettoniche estensionali, ad attività mesozoica, che hanno appunto determinato settori in abbassamento rispetto ad altri, riscontrabili nello studio delle sequenze carbonatiche (e.g. Castellarin et al., 1978; Tavarnelli, 1996; 1999; Tavernelli et al., 2004; Di Domenica et al., 2012).

Successivamente, una prima fase di strutturazione in catena di questo settore è avvenuta nel corso del Messiniano Inferiore (e.g. Cosentino et al., 2010). In questa fase, la tettonica compressiva ha determinato la formazione di pieghe e sovrascorrimenti, che hanno deformato in compressione le sequenze marine meso-cenozoiche che costituiscono il substrato pre-aterniano. Una seconda fase deformativa compressiva ha poi interessato l'area nel Pliocene Inferiore, con l'attivazione "fuori sequenza" di una struttura tettonica regionale compressiva (o traspressiva) nota come "Sovrascorrimento Olevano-Antrodoto-Sibillini", ad andamento da NE-SO a N-S (e.g. Cosentino et al., 2010; Di Domenica et al., 2012) (Fig. 4). L'attività di questa struttura ha ri-deformato le strutture plicative precedentemente formate, marcando fortemente l'assetto strutturale della regione interessata mediante la formazione di una serie di piani di sovrascorrimento con vergenza verso E, associati al fronte compressivo principale.

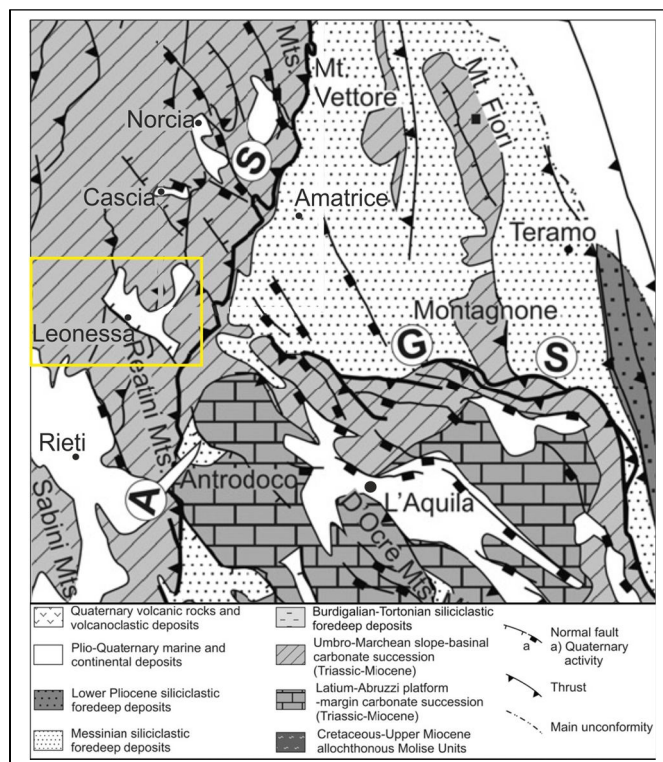


Fig. 4. Schema strutturale dell'Appennino centrale, modificato da Di Domenica et al. (2012) L'area del bacino di Leonessa è compresa nel rettangolo giallo.

A partire dal Pliocene Superiore-Pleistocene Inferiore, mentre i fronti compressivi migravano verso il settore adriatico, la parte interna della catena appenninica ha iniziato ad essere interessata da un regime tettonico estensionale (e.g. Cavinato e De Celles, 1999). Questa nuova fase tettonica ha determinato la formazioni di sistemi di faglie normali, ad andamento generalmente NO-SE, che hanno disseccato l'edificio strutturale della catena ereditato dalla fase tettonica compressiva. L'estensione tettonica è stata accompagnata dal sollevamento generalizzato, a scala dell'intera catena appenninica, valutato per via geologica in circa 1000 m di sollevamento nel corso del Quaternario (e.g. D'Agostino et al., 2001).

L'inizio dell'attività di queste strutture tettoniche estensionali ha contribuito alla formazione di depressioni intermontane, fra le quali le principali sono quelle dell'Aquila, di Norcia, del Fucino, di Sulmona. L'attività quaternaria della faglia di Leonessa sarebbe per alcuni autori (e.g. Michetti e Serva, 1990) testimoniata dalla presenza del bacino di Leonessa.

Queste depressioni intermontane hanno rappresentato delle "trappole" per la deposizione di ingenti spessori di sequenze sedimentarie continentali di età pliocenico-quaternaria, riferibili a diversi ambienti di sedimentazione, rappresentati da depositi di origine lacustre, alluvionale e di versante. Caratteristiche comuni di fasi sedimentarie all'interno dei bacini intermontani ha permesso di definire dei cicli sedimentari correlabili in termini crono-stratigrafici attraverso depressioni diverse e distanti fra loro (e.g. Bosi et al., 2003). La sedimentazione di queste sequenze continentali ha permesso di scandire l'attività quaternaria delle faglie estensionali, permettendo di chiarire il perdurare per tutto il Quaternario dell'attività di alcune di queste strutture tettoniche.

3.2 Il bacino di Leonessa

Il bacino di Leonessa è, come detto nel paragrafo precedente, una delle depressioni intermontane dell'Appennino centrale. Questa ha ospitato una spessa successione di sedimenti continentali a partire dal Pliocene Superiore-Pleistocene Inferiore (e.g. GE.MI.NA., 1963; Fubelli et al., 2008).

Negli anni sessanta del secolo scorso, la società GE.MI.NA. ha eseguito un rilevamento geologico di dettaglio e una serie di sondaggi (Fig. 5) che hanno raggiunto profondità di circa 200 m dal piano campagna senza però raggiungere il substrato sepolto sotto la sequenza sedimentaria quaternaria, finalizzati alla ricerca di torbe e ligniti. Sulle sequenze sedimentarie attraversate dai sondaggi sono state condotte analisi palinologiche (Ricciardi, 1963), che hanno consentito una prima analisi crono-stratigrafica della sequenza continentale.

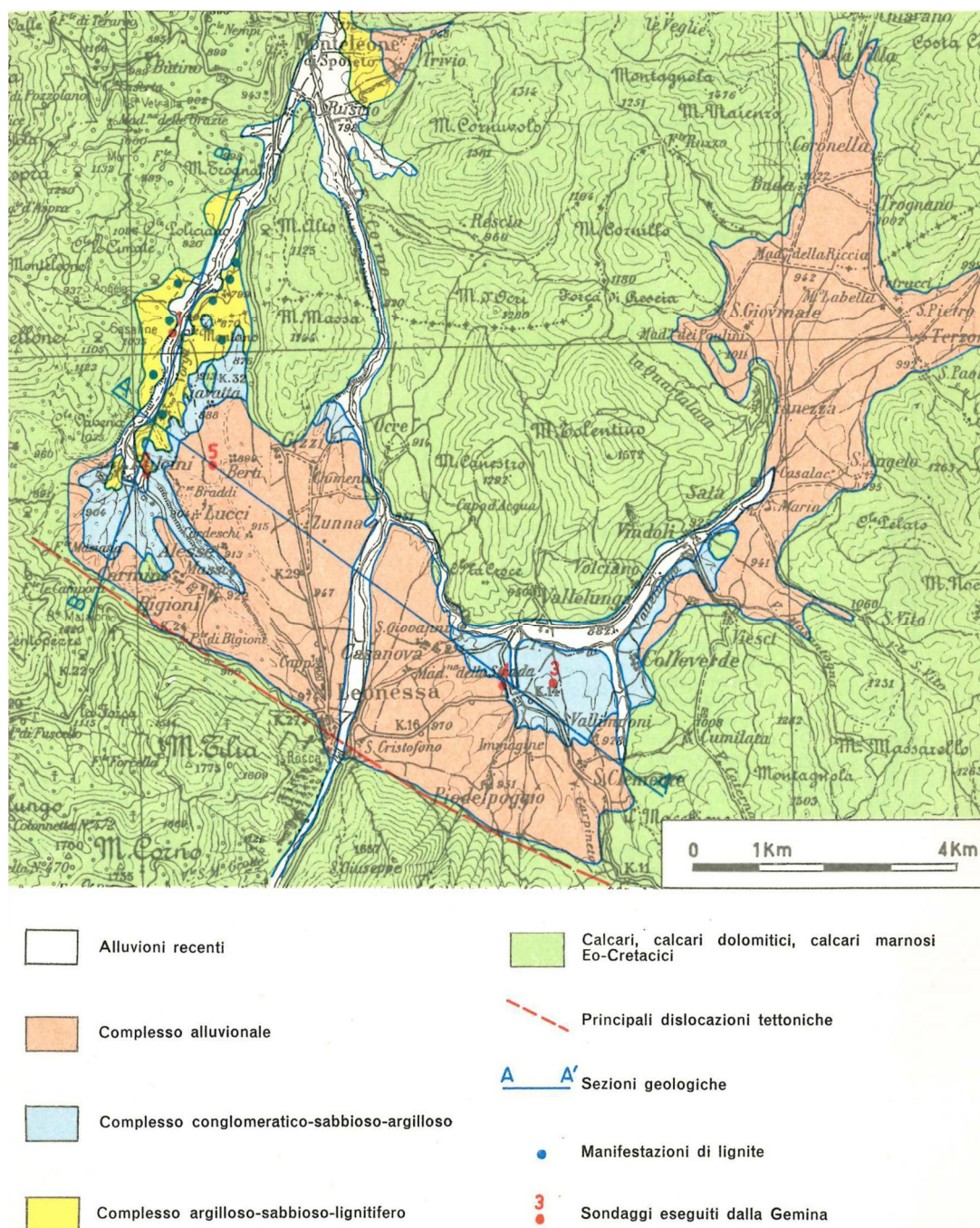


Fig. 5. Carta geologica realizzata da Ge.Mi.Na. (1963) del bacino di Leonessa.

Più recentemente, le caratteristiche geomorfologiche e geologiche del Quaternario del bacino di Leonessa sono state analizzate da Fubelli (2004) e Fubelli et al. (2008) i quali, a partire dai dati di GE.MI.NA. (1963), hanno migliorato il quadro cronostratigrafico quaternario del bacino, mediante nuovi dati geologici, paleontologici, palinologici e paleomagnetici.

Gli autori hanno distinto il riempimento continentale del bacino in diversi sintemi di età a partire dal Pliocene Superiore-Pleistocene Inferiore, per caratteristiche sedimentologiche e per rapporti morfo-stratigrafici (Fig. 6).

CARTA GEOLOGICA DEL QUATERNARIO DEL BACINO DI LEONESSA (RIETI)
GEOLOGICAL MAP OF THE QUATERNARY DEPOSITS OF THE LEONESSA BASIN (RIETI)

Fubelli G., Falucci E., Mei A., Dramis F.

Scale: 0 2km 4km
1:50.000

Schema morfo-stratigrafico
Morpho-stratigraphic scheme

Legenda / Legend

- Detriti di versante e depositi colluviali (DVC) (LOLOCENE)
Slope - detrital debris and colluvial deposits (DVC) (LOLOCENE)
- Depositi alluvionali (DA) (OLOCENE)
Alluvial deposits (DA) (OLOCENE)
- Sistema di Valle Tevere - Monte Tiazi (SVTF); ai depositi ghiaiosi-sabbiosi di conoidi alluvionali; (5) depositi sabbiosi (LATE PLEISTOCENE SUPERIORE)
Valle Fucina - Monte Tiazi Syncline (SVTF); ai alluviali fan deposits made of gravel and sand; (5) alluvial deposits (LATE PLEISTOCENE)
- Sistema di Fossa della Ripa (SFR); depositi ghiaioso-sabbiosi di conoidi alluvionali (PLEISTOCENE SUPERIORE)
Fossa della Ripa Syncline (SFR); alluvial fan deposits made of gravel and sand; (5) alluvial deposits (LATE PLEISTOCENE)
- Sistema Cervini - Monte Tila (SCT); ai depositi ghiaioso-sabbiosi di conoidi alluvionali; (5) depositi alluvionali (PLEISTOCENE SUPERIORE)
- Sistema di Ternone (ST); depositi colluviali (PLEISTOCENE MEDIO SUPERIORE)
Ternone Syncline (ST); colluvial deposits (MODUL - UPPER PLEISTOCENE)
- Depositi vulcanici (DV) (PLEISTOCENE MEDIO)
Volcanic deposits (DV) (MODUL PLEISTOCENE)
- Sistema di Leonessa (SL); ai depositi ghiaiosi-sabbiosi di conoidi alluvionali; (5) depositi sabbiosi (LATE PLEISTOCENE SUPERIORE)
Leonessa Syncline (SL); ai alluviali fan deposits made of gravel and sand; (5) silty-sandy lacustrine deposits (MODUL PLEISTOCENE)
- Sistema di Villa Pulci - Colle Montorio (VPM); depositi argillo-sabbiosi (PLEISTOCENE INFERIORE)
Villa Pulci - Colle Montorio Syncline (VPM); silty-sandy lacustrine deposits (LATE PLEISTOCENE (?) - EARLY PLEISTOCENE)
- Substrato (TERZIARIO - CRETACEO)
Bedrock (TERTIARY - CRETACEOUS)
- Faglia normale
Normal fault
- Faglia normale presunta
Presumed normal fault
- Sito della sezione stratigrafica
Site of stratigraphic section
- Isoipse (equidistanza 10 m)
Contour line (equidistance 10 m)
- Isoipse (equidistanza 10 m)
Contour line (equidistance 10 m)

11

Recentemente, Aringoli et al. (2014) e Skrame et al. (2014) hanno effettuato rilievi geofisici nel bacino di Leonessa, per analizzare l'assetto profondo della depressione. Gli autori riconoscono un depocentro profondo del bacino che è a tratti orientato circa NO-SE ma distante dalla faglia di Leonessa e non osservato per l'intera estensione del bacino in superficie. In particolare, Skrame et al. (2014), mediante indagini gravimetriche di dettaglio, mostrano due depocentri del bacino, uno occidentale, molto articolato, che sembra mostrare due assi principali di allungamento, orientati sia NO-SE che NE-SO; il secondo depocentro, localizzato nella parte orientale del bacino, ha anch'esso un andamento piuttosto irregolare, con un asse di allungamento che sembra disporsi in direzione circa NE-SO. In entrambi i lavori, comunque, gli autori evidenziano come i depocentri del bacino, anche nelle loro porzioni orientate NO-SE, non siano individuabili a ridosso della faglia di Leonessa ma sono distanti qualche km dalla emergenza della faglia in superficie. In particolare, Skrame et al. (2014), nel loro modello tridimensionale del substrato sepolto sotto i depositi continentali quaternari (Fig. 7), mostrano il substrato affiorante o sub-affiorante al tetto della faglia, nel settore occidentale del bacino. Tale ricostruzione è in buon accordo con quanto già proposto da GE.MI.NA. (1963) circa i massimi spessori dei depositi lacustri del Pliocene Superiore-Pleistocene Inferiore.

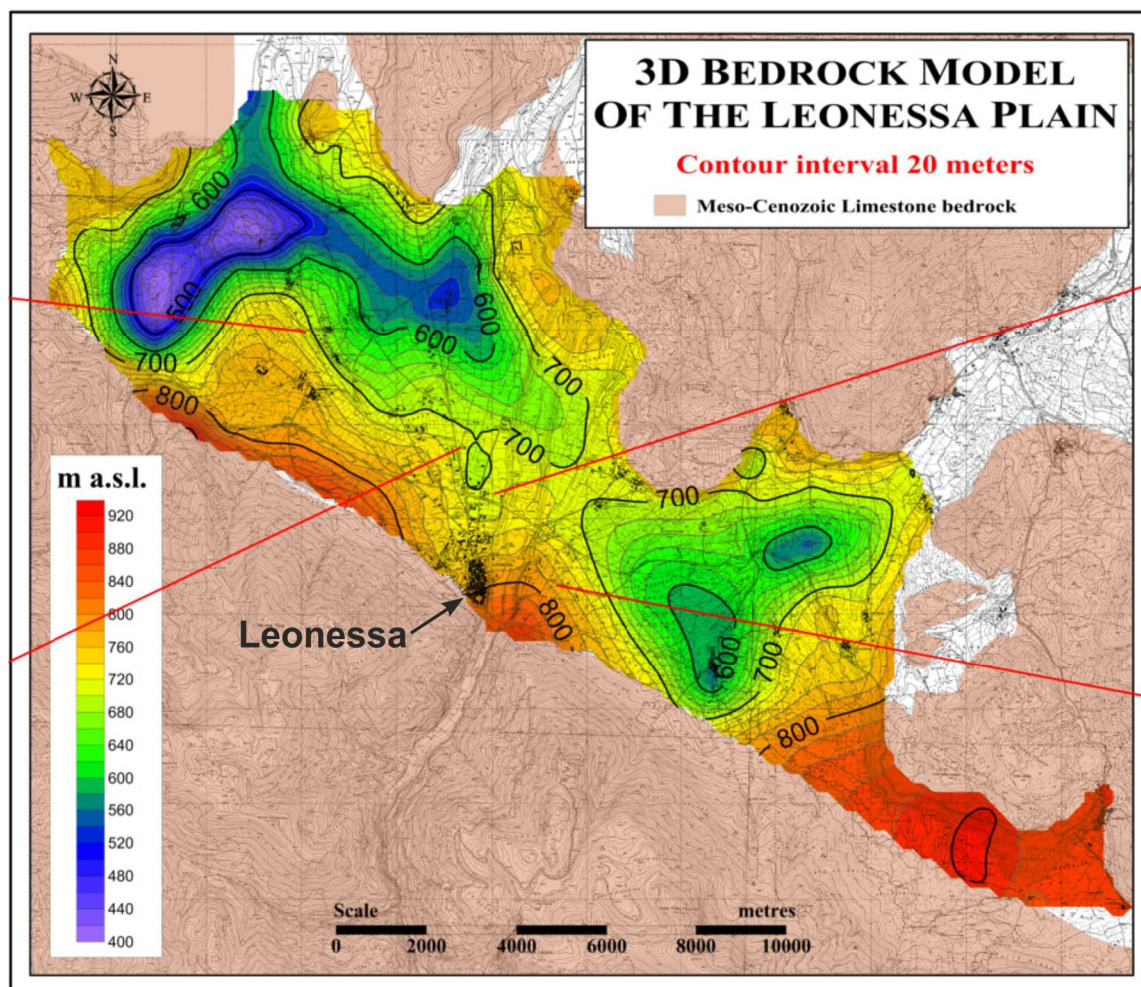


Fig. 7 Modello geologico tridimensionale del bacino di Leonessa realizzato da Skrame et al. (2014).

4) INQUADRAMENTO SISMOTETTONICO REGIONALE E SISMICITA' STORICA

Il bacino di Leonessa si colloca al margine di una delle aree dell'Appennino caratterizzate da un alto tasso di sismicità, interessata da diversi eventi sismici negli ultimi secoli di Magnitudo fino a 6.5-7. La sismicità maggiore della catena appenninica centrale è la manifestazione del regime tettonico attivo estensionale. L'analisi delle serie storiche di dati geodetici testimoniano un tasso di estensione attuale della catena dell'ordine dei 2-3 mm/anno, con un'asse di estensione orientato circa NE-SO (e.g. Devoti et al., 2017). Questo è confermato dai dati di stress attivo definito sulla base dell'analisi dei *breakout* di pozzo (e.g. Montone e Mariucci, 2016), nonché dalla sismicità, con eventi sismici caratterizzati da rotture compatibili con rotture estensionali orientate ortogonalmente all'asse di massima estensione, ovvero NO-SE (e.g. Chiaralune et al., 2017; Hermann et al., 2011; Malagnini e Munafò, 2018; http://www.eas.slu.edu/eqc/eqc_mt/MECH.IT/). Come detto nel paragrafo precedente, l'estensione plio-quadernaria dell'Appennino centrale ha determinato l'attivazione di faglie e sistemi di faglie normali. Alcune di questi sistemi di faglia normali sono ancora attivi e capaci, e sono responsabili della sismicità maggiore che interessa la parte assiale della catena. Questi sono frequentemente formati da più segmenti e rami di faglia, con lunghezze variabili dai 5 km ai 10 km, per lunghezze totali dei singoli sistemi fino a circa 35-40 km, considerati come la manifestazione di sorgenti sismogenetiche potenzialmente responsabili di terremoti di elevata Magnitudo, fino a circa 6.5-7 (e.g. Galadini e Galli, 2000; Boncio et al., 2004; Valentini et al., 2018). I segmenti principali sono orientati parallelamente alla catena, ovvero NO-SE, ed immergono verso SO. In quest'ottica, la faglia di Leonessa, oggetto del presente studio, rappresenterebbe l'unica faglia principale orientata circa ONO-ESE e immergente verso NNE. Ad alcune di queste strutture tettoniche attive sono stati associati i principali eventi sismici che hanno interessato l'Appennino centrale nel corso del passato millennio, attraverso il confronto fra indagini paleosismologiche e la distribuzione del danneggiamento provocato dagli eventi sismici maggiori (e.g. Galli et al., 2008)). In figura 8 sono indicati i principali sistemi di faglia attivi, capaci e sismogenetici (e.g. Galadini et al., 2018, e bibliografia citata nel lavoro) che interessano questo settore di catena appenninica e l'ubicazione degli epicentri (da dati di sismicità storica) dei terremoti principali che hanno interessato l'area.

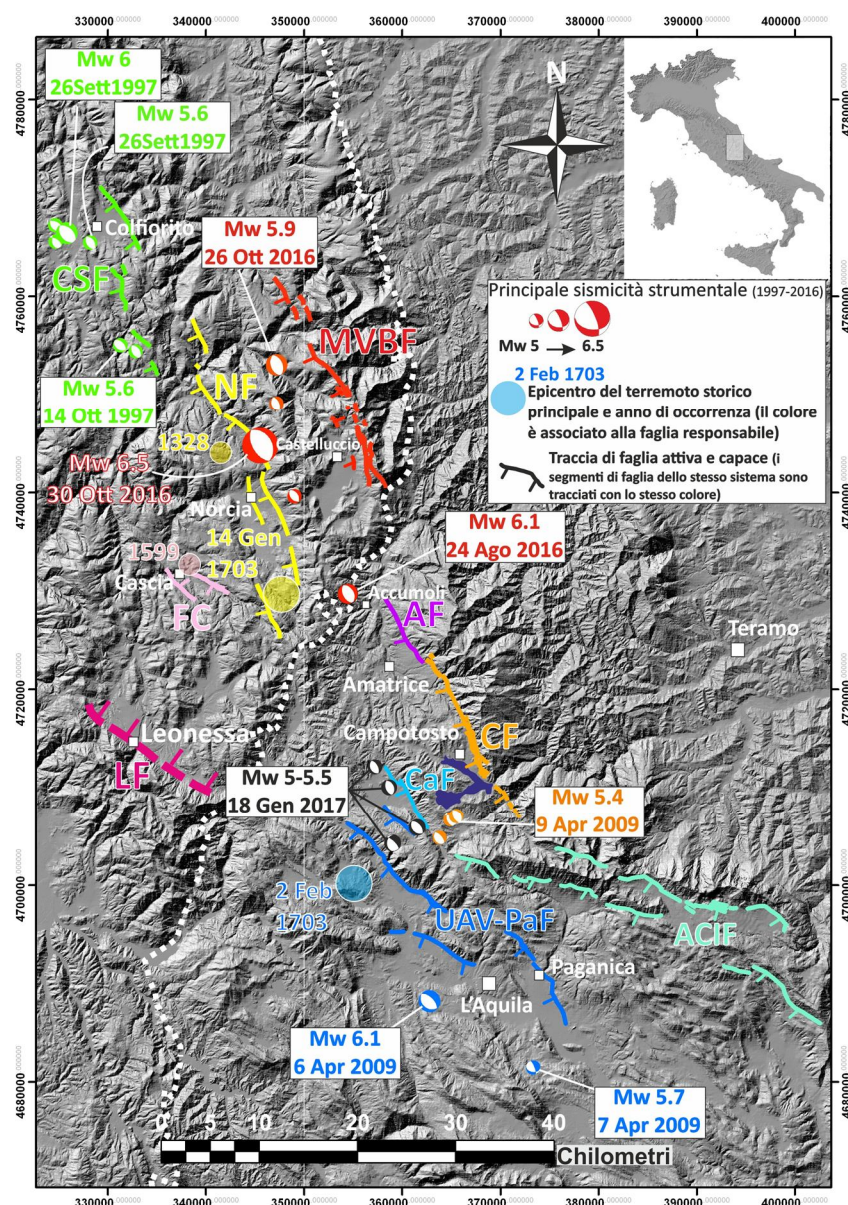


Fig. 8. Schema sismotettonico dell'Appennino centrale (modificato da Galadini et al., 2018), nel quale sono riportati i principali sistemi di faglie attive e capaci, l'epicentro dei principali terremoti storici e quelli strumentali a partire dal 1997, dei quali sono indicati i meccanismi focali. Faglie: faglie dei bacini di Colfiorito and Sellano, CSF; sistema di faglie del M. Vettore–M. Bove, MVBF; sistema di faglie di Norcia, NF; faglia di Cascia, CF; faglia di Amatrice, AF; faglia di Campotosto, CF; faglia di Capitignano, CaF; sistema di faglie dell'Alta Valle dell'Aterno-Paganica, UAV-PF; faglia di Leonessa, LF; Il fronte di sovrascorrimento inattivo "Olevano–Antrodoto–Sibillini" è indicato dalla linea bianca tratteggiata.

L'abitato di Leonessa e tutti i paesi che si trovano all'interno del bacino hanno subito ingenti danni a causa di questi eventi sismici principali. La ricostruzione del campo macrosismico (ovvero, la distribuzione del danneggiamento e la valutazione delle intensità) associato ai vari eventi, incrociata con le informazione geologiche, paleosismologiche, sismologiche, geodetiche e

geofisiche permette di definire in modo abbastanza robusto il quadro sismotettonico della regione. Come si vedrà in seguito, la sequenza sismica dell'Italia centrale del 2016-2017 è l'espressione di tale assetto.

Le informazioni disponibili nei cataloghi sismici storici (Guidoboni et al., 2019; Rovida et al., 2020) sui principali eventi che hanno interessato l'area nel corso dell'ultimo millennio consentono di definire che gli abitati situati nel bacino di Leonessa hanno ricevuto gli effetti di eventi sismici originatisi nell'area nursina, di Cascia, del settore di Amatrice, della zona reatina e aquilana.

Le informazioni disponibili permettono di arrivare alle seguenti interpretazioni sismotettoniche (e.g. Gori et al., 2019, e bibliografia citata nel lavoro) dei diversi eventi sismici:

- 1 Dicembre 1298 (**M** 6.2±0.46):

poche e lacunose risultano al momento le informazioni circa gli effetti di questo evento sismico. Alla località Vetranola, nei pressi di Monteleone di Spoleto, al margine settentrionale del bacino di Leonessa, viene attribuita I 10 MCS, I 9-10 MCS a Poggiobustone, a nord di Rieti, I 8 MCS a Rieti e Spoleto (Fig. 9a). Al momento non sono state formulate ipotesi circa la struttura sismogenetica responsabile di questo evento.

- 1 Dicembre 1328 (**M** 6.5±0.28):

il terremoto ha causato forte danneggiamento nel settore a nord del bacino di Norcia, con intensità epicentrali che hanno raggiunto I 10 MCS in due località (Fig. 9b). La distribuzione del danno suggerisce che questo evento si sia originato nel settore settentrionale dell'area interessata dal sistema di faglie di Norcia (e.g. Galli et al., 2005; 2018), possibilmente a causa dell'attivazione del segmento di faglia più settentrionale del sistema. L'assenza di danni significativi nelle zone distali, nonostante il forte danneggiamento nell'area epicentrale, suggerisce che la stima della Magnitudo associata sia probabilmente sovrastimata. Ad oggi, non sono note informazioni circa danni nell'area del bacino di Leonessa causati dall'evento sismico.

- 6 Novembre 1599 (**M** 6.1±0.24):

la distribuzione del danneggiamento suggerisce che il terremoto si sia originato a ovest di Norcia (Fig. 9c), molto probabilmente nel settore di Cascia, dove è presente una faglia ad attività quaternaria (Fubelli, 2004). Ad oggi, le uniche informazioni note di danni causati dall'evento sismico nella zone di Leonessa riguardano l'abitato di Chiavano, cui viene attribuita I 9 (scala Mercalli-Cancani-Sieberg, MCS), localizzato all'estremo nord del bacino di Leonessa. Recentemente, Galli et al (2019) ipotizzano che tale evento e quello del 1979, descritto più avanti, si siano originati lungo il segmento più meridionale del sistema di faglie di Norcia, costituito dalla faglia normale del M. Alvagnano e dalla porzione sud-orientale della faglia normale che interessa il bacino di Cascia.

- 14 Gennaio 1703 (**M** 6.9±0.1):

è l'evento sismico più energeticamente significativo che ha colpito il settore compreso fra l'Umbria meridionale e il Lazio e Abruzzo settentrionali negli ultimi secoli. La scossa è stata la prima di una delle sequenze sismiche più importanti dell'Appennino centrale, con due scosse principali, di Magnitudo superiore al 6, quella del 14 gennaio, appunto, e quella del 2 febbraio, che ha

interessato il settore aquilano. La distribuzione delle massime intensità, (due località I 11 MCS (Fig. 9d) e le informazioni geologiche e paleosismologiche indicano che il terremoto sia stato generato dalla rottura dell'intero sistema di faglie di Norcia (Galli et al., 2005; 2018). Il terremoto ha causato ingenti danni agli abitati situati all'interno del bacino di Leonessa: I 10 MCS viene attribuita a due località, Albaneto e Ruscio; I 9-10 MCS all'abitato di Terzone; I 9 MCS a Monteleone di Spoleto, Trivio e San Giovenale; I 8 MCS viene attribuita a Leonessa e Sala

- 2 Febbraio 1703 (**M** 6.6±0.1):

l'evento è il più forte registrato storicamente nel bacino dell'Aquila. Il terremoto ha causato ingenti danni a tutti gli abitati dell'alta valle del Fiume Aterno, con quattro località alle quali viene assegnata I 10 MCS (ovvero, Arischia, Pizzoli, Colle e Barete) (Fig. 10a). I dati geologici e paleosismologici finora disponibili indicano che questa scossa, avvenuta a pochi giorni di distanza da quella dell'area di Norcia, sia stata causata dall'attivazione dell'intero sistema di faglie normali attive dell'Alta Valle dell'Aterno-Paganica (e.g. Moro et al., 2002; 2016; Galli et al., 2011). L'evento sismico ha determinato un aumento del grado di danno degli abitati del bacino leonessano. Leonessa stessa arriva a I 10 MCS dopo questo evento.

- 12 Maggio 1730 (**M** 6.0±0.1): le intensità più alte causate da questo evento sono all'interno del bacino di Norcia (11 localities with I 9 MCS). Alcune località nel bacino di Leonessa subiscono danni ma con grado inferiore: Leonessa è classificata con I 8 MCS, Monteleone di Spoleto con I 7 MCS (Fig. 10b). La forte concentrazione degli effetti nell'area nursina suggerisce un'origine locale dell'evento, possibilmente associato all'attivazione di un segmento del sistema di faglie di Norcia (Gori et al., 2019).

- 22 Agosto 1859 (**M** 5.7±0.3):

il danneggiamento causato da questo evento si concentra a pochi km a nord di Norcia (cinque località riportano I 8-9 MCS) (Fig. 10c). Per tale ragione Galadini et al. (1999) ipotizzano che il terremoto sia stato causato dall'attivazione del segmento di Campi del sistema di faglie di Norcia (Maceroni et al., 2019). Non sono noti danneggiamenti agli abitati dell'area di Leonessa.

- 27 Giugno 1898 (**M** 5.5±0.1):

l'evento sismico ha causato effetti soprattutto nella zona di Rieti, con I 8 MCS a tre località, Rieti compresa (Fig. 10d). Nel bacino di Leonessa l'evento ha causato pochi effetti sugli abitati, con I 6-7 MCS attribuiti a Leonessa e Piedelpoggio.

- 16 Novembre 1916 (**M** 5.5±0.1):

l'evento ha causato danni nel settore settentrionale del bacino di Leonessa, dove si sono verificati gli effetti maggiori del terremoto, con due località con I 8 MCS (Trognano e Sant'Angelo) e una località con I 7 (Terzone). Leonessa ha registrato effetti moderati, valutati in I 6 MCS (Fig. 11a).

- 31 Dicembre 1948 (**M** 5.4±0.1):

l'evento ha determinato i suoi maggiori effetti nel settore settentrionale del bacino reatino (Bernardini et al., 2013). Le intensità massime sono state attribuite a due località, Rivodutri e

Apoleggia, pari a I 8 MCS (Fig. 11b). A Leonessa questo evento ha determinato un danneggiamento pari a I 6 MCS.

- 19 Settembre 1979 (**M** 5.8±0.1):

l'evento ha causato danni nel settore a nord del bacino di Leonessa, in particolare nelle zone comprese fra Cascia e Norcia (Fig. 11c). Gli effetti sugli abitati del terremoto sono rappresentati da cinque punti di intensità pari a I 8-9 MCS, localizzati al margine meridionale dell'area nursina, e da venticinque località con I 8 MCS, anche queste principalmente localizzate nell'area a sud di Norcia. All'abitato di Leonessa viene attribuita I 7 MCS. Per tale ragione il terremoto viene attribuito al segmento più meridionale del sistema di faglie normali attive di Norcia (e.g. Galli et al., 2019).

La sequenza sismica del 2016 è l'espressione dell'attuale assetto sismotettonico della regione. Essa è stata infatti determinata dall'attivazione di alcune faglie normali attive, capaci e sismogenetiche già oggetto di studi nel corso dei passati decenni. In particolare, il sistema di faglie del Monte Vettore-Monte Bove, responsabile degli eventi sismici principali della sequenza sismica, era stato oggetto di molti studi a carattere geologico e geomorfologico (e.g. Calamita e Pizzi, 1992; Pizzi et al., 2002; Pizzi e Galadini, 2009), che ne avevano definito l'attività nel corso del Quaternario, fino ad almeno il Pleistocene Superiore-Olocene (Galadini e Galli, 2003), nonché di indagini paleosismologiche (Galadini e Galli, 2003). Queste indagini avevano verificato l'occorrenza di eventi di attivazione della faglia nel corso dei passati millenni, e permesso agli autori di ipotizzare che il sistema di faglie era da considerarsi sicuramente attivo e capace, e potenzialmente responsabile di eventi sismici di Magnitudo fino a circa 6.5. Ipotesi che è stata poi verificata dalla sequenza sismica del 2016, che è stata appunto generata dall'attivazione del sistema di faglie del Monte Vettore-Monte Bove, generando l'evento sismico principale della sequenza il 30 ottobre 2016, di Magnitudo circa 6.5 (e.g. Chiaraluce et al., 2017; Cheloni et al., 2017).

La sequenza sismica del 2016 ha determinato moderati effetti agli abitati del bacino di Leonessa. L'abitato di Leonessa e di Monteleone di Spoleto hanno subito un lieve danno dalla scossa del 24 Agosto 2016 (M_w 6.2), valutato in I 5 scala EMS-98, mentre la scossa del 30 Ottobre 2016 (M_w 6.6) ha aggravato il danneggiamento, determinando I 6 EMS-98 a Leonessa e Terzone (Fig. 11d).

In conclusione, il quadro sismotettonico sopra descritto evidenzia come l'area del bacino di Leonessa, ricada in area epicentrale di terremoti storici al di sopra di **M** 6. Tuttavia non è chiaro se il bacino di Leonessa sia stato sede di eventi sismici maggiori di origine locale in epoca storica (es. il succitato evento del 1298).

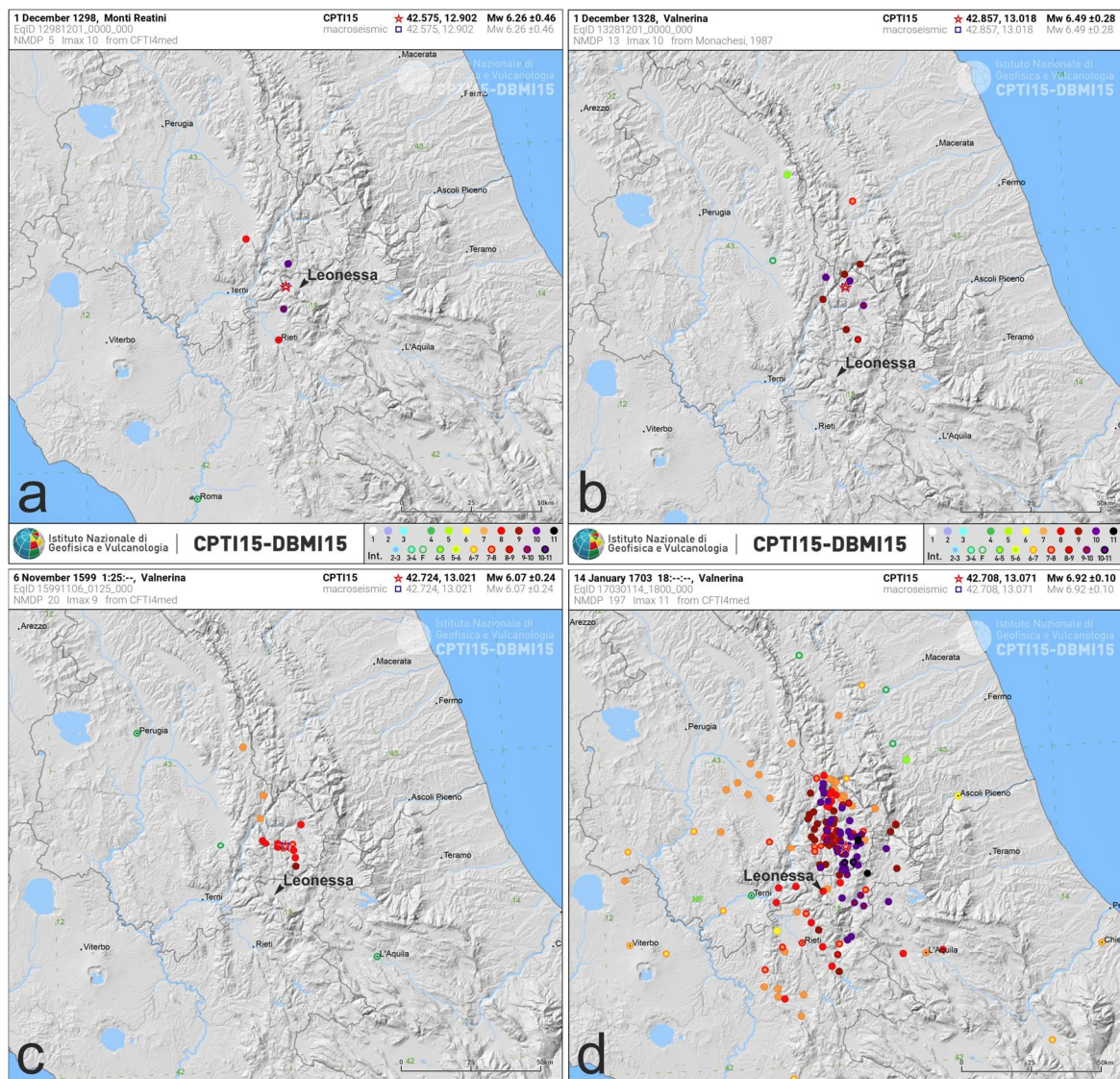


Fig. 9. Distribuzione delle intensità associate agli eventi sismici del a) 1298, b) 1328, c) 1599 e d) 14 Gennaio 1703 (Rovida et al., 2020).

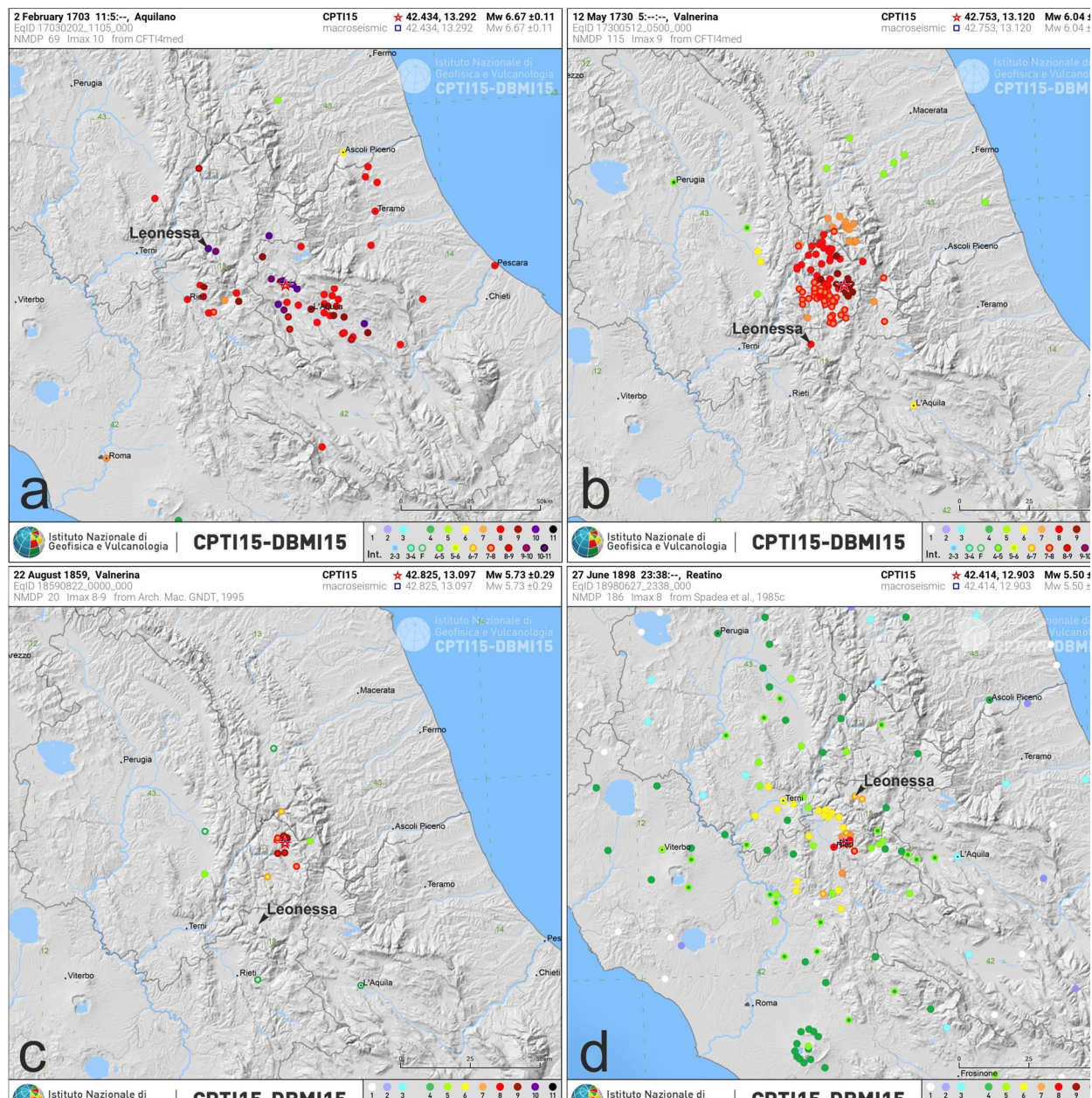


Fig. 10. Distribuzione delle intensità associate agli eventi sismici del a) 2 Febbraio 1703, b) 1730, c) 1859 e d) 1898 (Rovida et al., 2020).

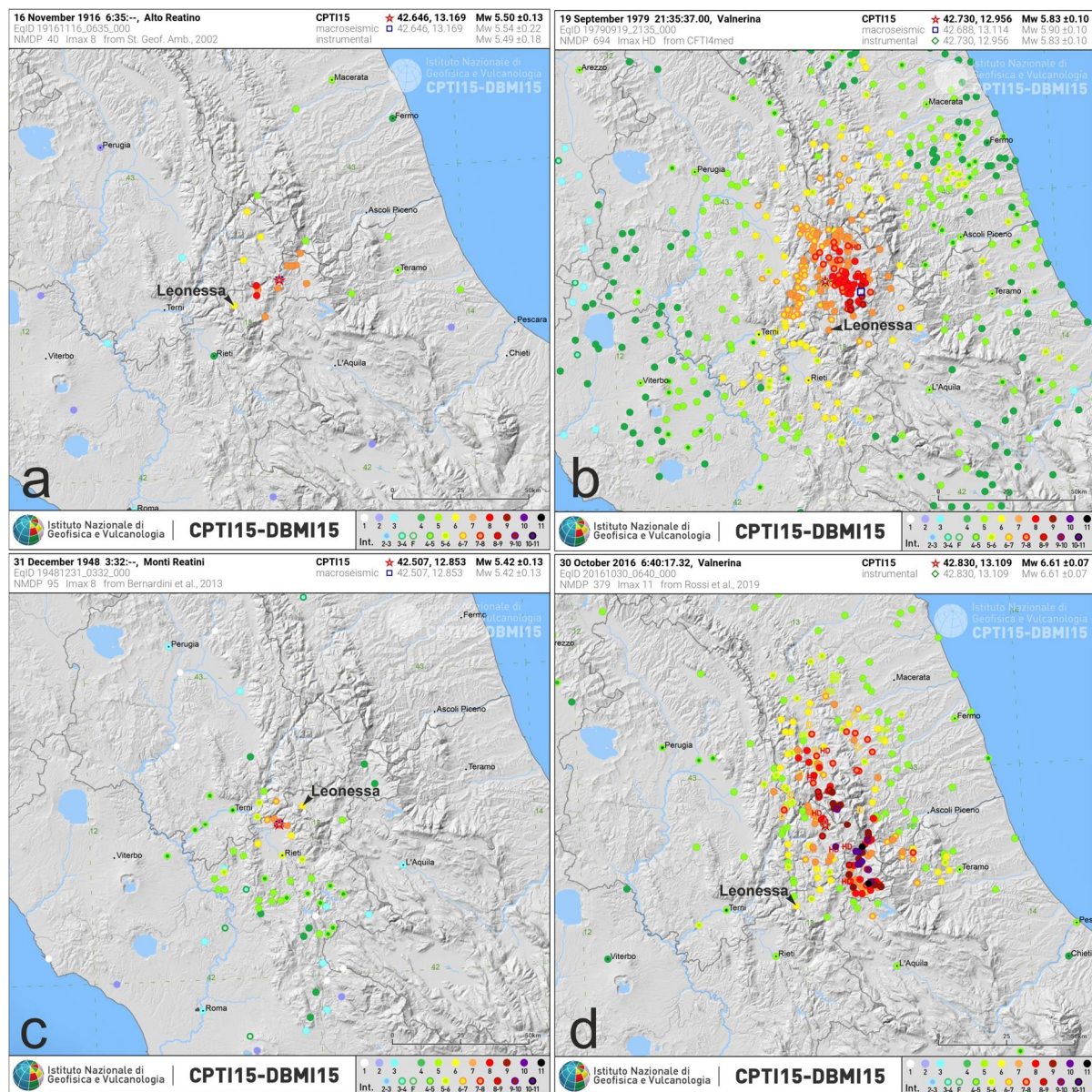


Fig. 11. Distribuzione delle intensità associate agli eventi sismici del a) 1916, b) 1979, c) 1948 e d) 30 ottobre 2016 (Rovida et al., 2020).

5) LA FAGLIA DI LEONESSA: LO STATO DELLE CONOSCENZE SULL'ATTIVITA' QUATERNARIA E TARDO-QUATERNARIA

La cosiddetta faglia di Leonessa è una struttura tettonica estensionale che delimita il margine sud-occidentale del bacino, interessando i settori basali dei rilievi montuosi che delimitano a SSW il bacino. La struttura è indicata nei lavori scientifici e cartografie geologiche disponibili ad andamento generale circa ONO-ESE, immergente verso NNE. Il settore settentrionale del bacino è delimitato da un'altra faglia la cui traccia è ubicata in prossimità dell'abitato di Monteleone di Spoleto (faglia di Monteleone). Questa struttura è riportata da Fubelli (2004) e Fubelli et al. (2008) a direzione circa E-O, immergente verso S. Fubelli (2004) associa alla faglia di Monteleone la brusca variazione nell'assetto fluviale del Fiume Corno, il quale presenta un corso ampio a canali intrecciati (tipo *braided plain*) a sud, in corrispondenza del margine settentrionale del bacino di Leonessa, mentre a nord di Monteleone di Spoleto, il fiume scorre in un *thalweg* fortemente incassato nel substrato carbonatico. Gli autori menzionati non analizzano tuttavia l'attività quaternaria di questa struttura tettonica.

Al fine di ottenere tutte le informazioni ad oggi disponibili circa l'attività quaternaria della faglia di Leonessa, è stata effettuata una raccolta e analisi dettagliata della letteratura scientifica ad oggi disponibile sull'argomento. La faglia di Leonessa è stato oggetto di analisi specifiche, soprattutto a partire dagli anni '90 del secolo scorso. Di seguito vengono esaminati in dettaglio i lavori scientifici che hanno avuto come oggetto più o meno specifico la caratterizzazione dell'attività quaternaria e tardo-quaternaria della struttura tettonica.

Michetti e Serva (1990) nel loro lavoro “*New data on the seismotectonic potential of the Leonessa fault area (Rieti, central Italy)*” esaminano le evidenze di attività quaternaria delle faglia di Leonessa, al fine di caratterizzarne il comportamento cinematico e definirne il potenziale sismogenetico associato.

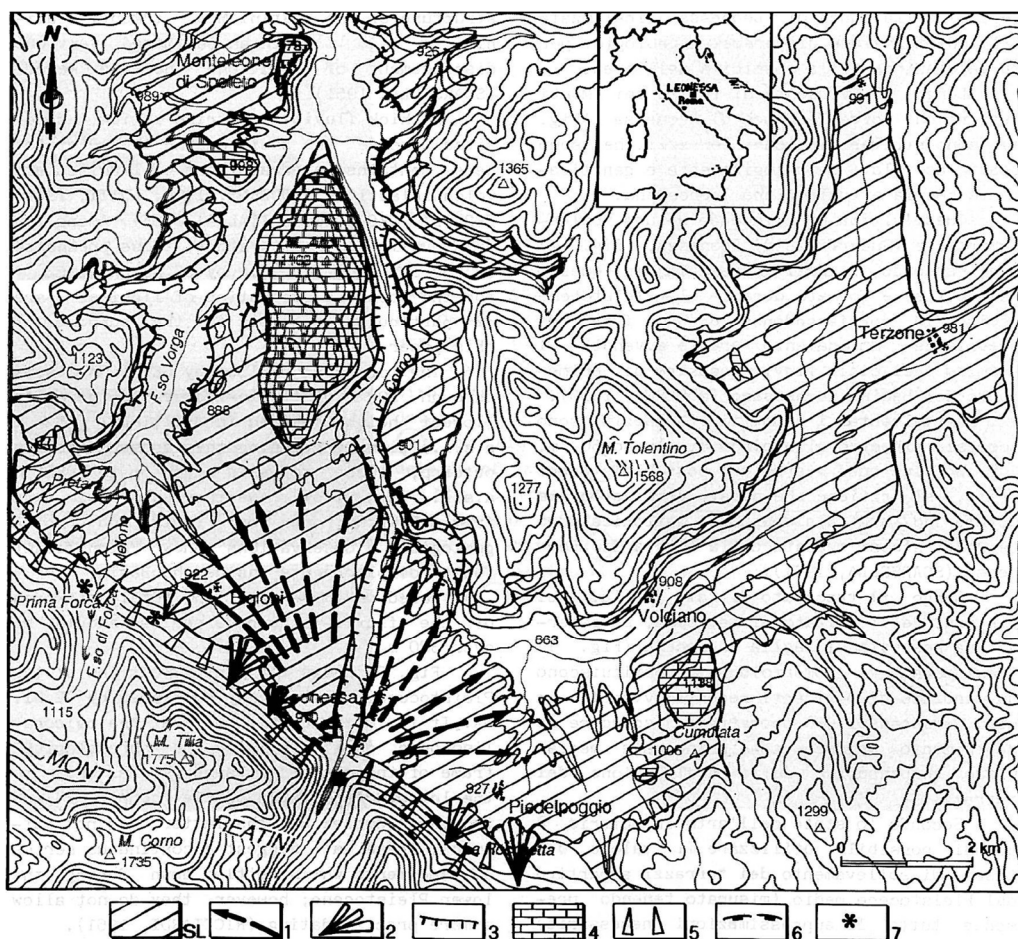


Fig. 12. Schema geomorfologico del bacino di Leonessa di Michetti e Serva (1990). Il versante di faglia è indicato dagli autori con i tringoli (simbolo n.5) mentre il piano di faglia in roccia è indicato dagli autori col simbolo n.6.

Gli autori definiscono la faglia come una struttura tettonica lunga in superficie circa 15-20 km (Fig. 12) e attiva e capace sulla base dei seguenti elementi:

- 1) il piano di faglia in roccia è esposto in alcuni punti alla base della scarpata di faglia scolpita sul substrato carbonatico (Fig. 12 e 13). Tale elemento viene considerato come l'evidenza di ringiovanimento dell'esposizione del piano di faglia causato dai movimenti ripetuti della faglia stessa in tempi recenti.
- 2) l'attività della faglia avrebbe causato la dislocazione dei depositi lacustri del Pleistocene Inferiore-Medio, i quali sarebbero rimasti sospesi rispetto alla così chiamata “superficie di Leonessa”, ovvero la superficie sub-pianeggiante di origine erosiva che domina il paesaggio della piana e che, secondo gli autori, sarebbe da riferire alla sequenza alluvionale del Pleistocene Medio (600-200 ka). Tale differenza di quota fra i sedimenti lacustri al letto della faglia, che gli autori

indicano essere presenti su un terrazzo in località Prima Forca, e la “superficie di Leonessa”, situata al tetto della faglia, sarebbe quindi da riferire al movimento della struttura tettonica (Fig. 14).

3) altri terrazzi, di età però non definita, risulterebbero, secondo gli autori, sospesi al letto della faglia a causa dell’abbassamento relativo del tetto della struttura tettonica. Alcuni di questi terrazzi vengono indicati come superfici di erosione scolpite sul substrato carbonatico al letto della faglia; altri sarebbero invece superfici costituite da depositi di versante (brecce) rimaste sospese sulla succitata “superficie di Leonessa”. In uno schema geomorfologico proposto nell’articolo, Michetti e Serva (1990) (Fig. 14) ipotizzano la dislocazione e trascinamento lungo il piano della faglia di depositi alluvionali, causati dal movimento della faglia stessa.

Le succitate evidenze di attività della faglia proposte hanno permesso agli autori di stimare un tasso di movimento della struttura tettonica dell’ordine di 0.1-0.4 mm/anno, basato sull’altezza del piano della faglia nei punti in cui questo è esposto, e di definire la faglia di Leonessa come l’espressione in superficie di una struttura sismogenetica capace di generare eventi sismici dell’ordine di $M \sim 6.5$.



Fig. 13. Piano di faglia esposto in prossimità dell’abitato di Leonessa (figura 8 di Michetti e Serva, 1990), indicato dalla freccia nera, e considerata dagli autori come l’evidenza di attività recente della struttura tettonica.

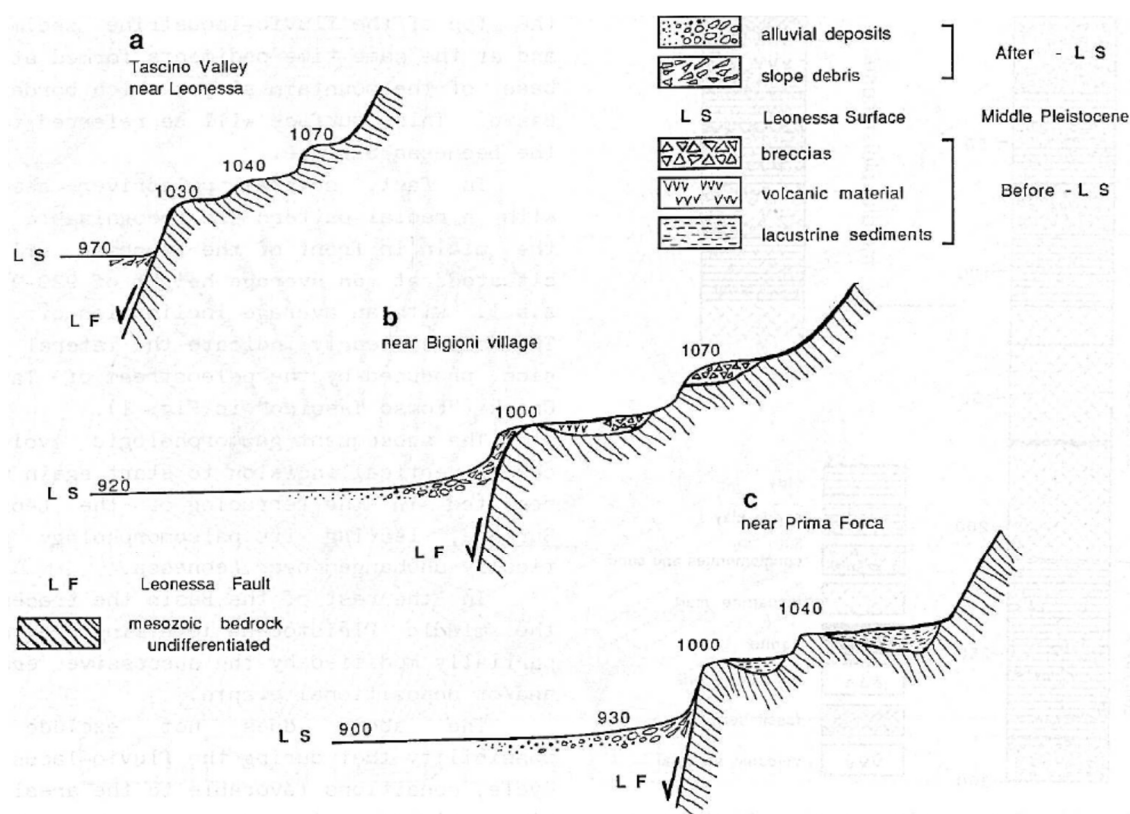


Fig. 14. Schemi morfo-tettonici relativi ad alcuni settori del versante di faglia di Leonessa (figura 3 di Michetti e Serva, 1990), in cui gli autori mostrano terrazzi di accumulo e di erosione che risulterebbero essere stati dislocati e rimasti sospesi al letto della faglia per l'attività della struttura tettonica. Negli schemi proposti vengono anche mostrati depositi alluvionali, correlati alla cosiddetta "superficie di Leonessa", che sarebbero trascinati lungo il piano di faglia.

Cello et al. (1997) nel lavoro "Active tectonics in the central Apennines and possible implications for seismic hazard analysis in peninsular Italy" analizzano un ampio settore dell'Appennino centrale e una serie di faglie estensionali presenti in questo settore, per definirne le caratteristiche strutturali e il comportamento cinematico recente attraverso indagini strutturali e morfo-tettoniche. Fra quelle investigate, gli autori analizzano anche la faglia di Leonessa, che definiscono lunga circa 20 km in superficie. Gli autori inferiscono la riattivazione della faglia sulla base dell'esposizione del piano di faglia in prossimità dell'abitato di Leonessa (Fig. 15), nella stessa zona descritta da Michetti e Serva (1990), e assumendo le loro stesse evidenze di attività per la faglia. Gli autori inoltre propongono che parte della microsismicità registrata nell'area sia da riferirsi alla porzione più profonda della faglia, che raggiungerebbe circa 10 km di profondità.

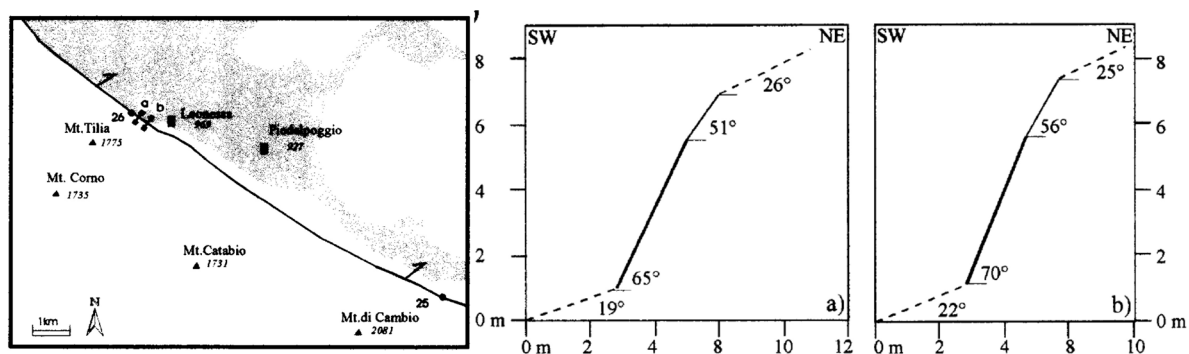


Fig. 15. Mappa semplificata della traccia della faglia di Leonessa (figura 9 di Cello et al., 1997) in cui è indicata l'ubicazione del piano di faglia esposto, appena a NO dell'abitato di Leonessa, e le tracce dei profili topografici, riportati nella figura, effettuati dagli autori attraverso la scarpata di faglia.

Galadini et al. (2000) e (2001) nel lavoro "Stato delle conoscenze sulle faglie attive in Italia: elementi geologici di superficie - Risultati del progetto 5.1.2 "Inventario delle faglie attive e dei terremoti ad esse associabili" e nel lavoro "Major active faults in Italy: available surficial data", rispettivamente, propongono un inventario delle faglie attive alla scale del territorio nazionale, definendo come attive, appunto, quelle faglie per le cui espressioni superficiali sono disponibili dati sull'attività nel Pleistocene Superiore-Olocene. In questo inventario, la faglia di Leonessa è riportata come una struttura per la quale non c'è consenso sulle evidenze di attività recente lungo l'espressione superficiale tra le Unità di Ricerca, venendo per questo mappata in colore giallo (Fig. 16).

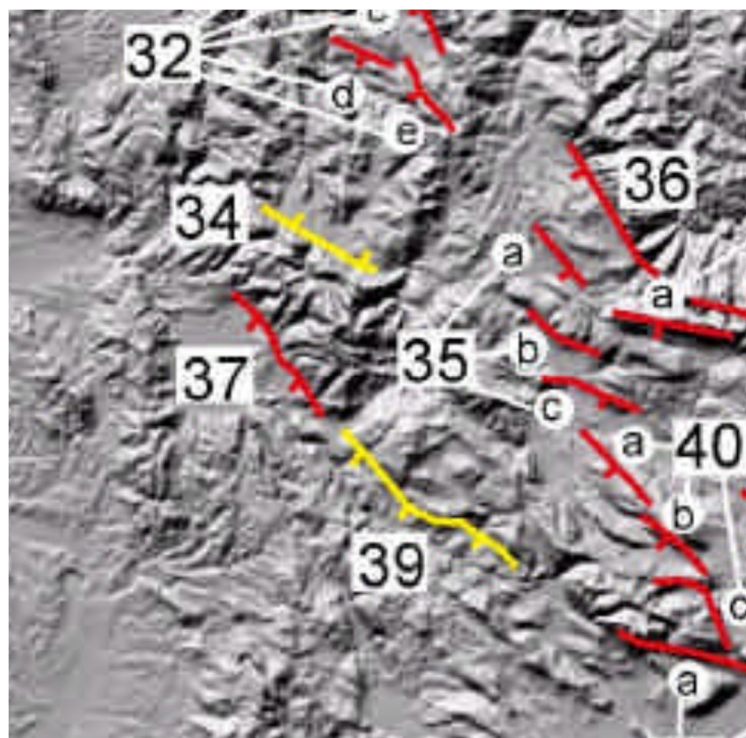


Fig. 16. Carta delle faglie attive dell'Appennino centrale (elementi geologici di superficie) proposta da Galadini et al. (2000). La traccia della faglia di Leonessa è indicata con il n.34 ed è tracciata in giallo, ad indicare che non c'è consenso fra le Unità di Ricerca sulle evidenze di attività recente lungo l'espressione superficiale.

Michetti e Roberts (2004) nel lavoro *“Spatial and temporal variations in growth rates along active normal fault systems: an example from the Lazio–Abruzzo Apennines, central Italy”* analizzano un set di faglie estensionali dell’Appennino centrale che gli autori definiscono come attive, per definirne i rigetti, l’età di inizio dell’attività e il tasso di movimento. Fra queste faglie, gli autori analizzano anche la faglia di Leonessa. Per ciò che riguarda le evidenze di attività, Michetti e Roberts (2004) considerano quelle definite da Michetti e Serva (1990). Inoltre, come elementi morfologici dislocati e altri elementi che suggeriscono l’attività in tempi recenti per la faglia di Leonessa, gli autori considerano i seguenti elementi:

- 1) la faglia ha controllato e controlla lo sviluppo del bacino di Leonessa nel Pleistocene-Olocene, ovvero il bacino è direttamente addossato alla struttura tettonica, che ne ha determinato e ne determina la progressiva apertura.
- 2) la faglia è esposta per un’altezza di 5-8 m (come già definito da Michetti e Serva, 1990, e Cello et al., 1997). L’esposizione del piano di faglia è considerata dagli autori l’evidenza di movimenti recenti (successivi all’Ultimo Massimo Glaciale) della struttura tettonica (Fig. 17).
- 3) La faglia disloca il versante (scarpata di faglia) anche se non sono osservati depositi quaternari dislocati lungo di essa.
- 4) Alla base e a pochissima distanza dal piano principale gli autori propongono la presenza di una scarpata di 50-80 cm di altezza che interessa depositi forse olocenici accumulati alla base della scarpata di faglia in roccia e che propongono essersi formata per azione della faglia.
- 5) La presenza di fasce di licheni lungo il piano di faglia in roccia è ipotizzata essere l’evidenza dell’occorrenza di fagliazione superficiale in tempi recenti.

Sulla base di queste osservazioni e di valutazioni circa i rigetti di lungo termine (gli autori definiscono un rigetto verticale massimo della faglia di Leonessa pari a circa 1 km), Roberts e Michetti (2004) propongono che la faglia si sia attivata a partire da circa 2.5 Ma e che sia caratterizzata da un tasso di movimento massimo di 0.4 mm/anno.

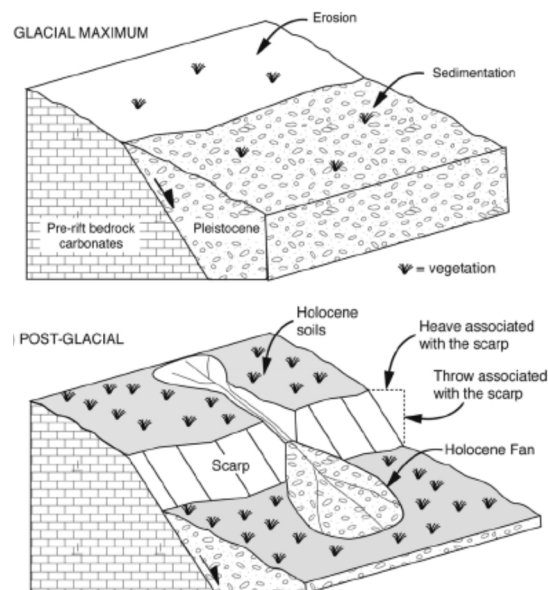


Fig. 17. Schema evolutivo delle scarpate di faglia in roccia durante e dopo l’Ultimo Massimo Glaciale nell’Appennino laziale-abruzzese proposto da Roberts e Michetti (2004). Gli autori considerano che l’esposizione del piano di faglia sia da riferirsi esclusivamente ai movimenti della faglia, con abbassamento relativo del blocco di tetto della faglia rispetto a quello di letto.

Papanikolaou et al. (2005) nel lavoro *“Fault scarps and deformation rates in Lazio–Abruzzo, Central Italy: Comparison between geological fault slip-rate and GPS data”* ri-esaminano le esposizioni del piano di faglia già investigate da Michetti e Serva (1990) e Roberts e Michetti (2004) e propongono stime più accurate del tasso di movimento della faglia considerando l’altezza del piano di faglia esposto, interpretato anche da questi autori come il risultato dell’attivazione della faglia successivamente all’Ultimo Massimo Glaciale (Fig. 18). Papanikolaou et al. (2005) affermano che vi sia una ulteriore scarpata di faglia, parallela a quella principale, ubicata a circa 2 m da questa (Fig. 18).

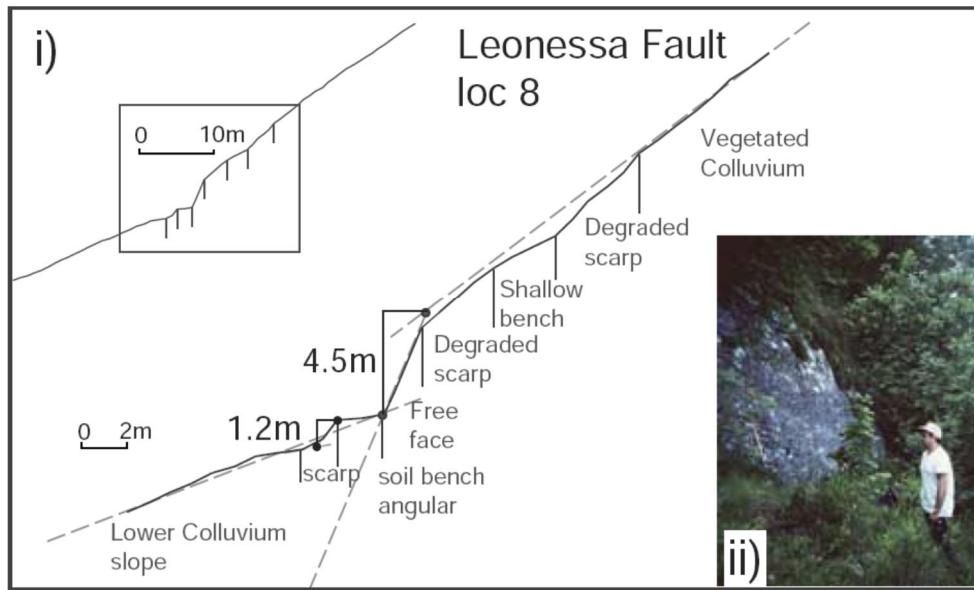


Fig. 18. Profilo topografico attraverso la faglia di Leonessa, nel punto di affioramento del piano di faglia in roccia (figura 2di di Papanikolaou et al., 2005).

Whittaker et al. (2007) nel lavoro *“Contrasting transient and steady-state rivers crossing active normal faults: new field observations from the Central Apennines, Italy”* realizzano un’analisi morfometrica del Fosso Tascino per capire se e come l’attività della faglia di Leonessa abbia influenzato le caratteristiche morfologiche dell’asta fluviale principale. Gli autori considerano le evidenze di attività della faglia e il tasso di movimento di Roberts e Michetti (2004), e basano le analisi morfometriche sull’assunzione che *i)* la cosiddetta “superficie di Leonessa” di Michetti e Serva (1990) sia da riferirsi a circa 0.75 Ma, *ii)* che la faglia abbia iniziato la sua attività da circa 3Ma e *iii)* che sia responsabile di un rigetto estensionale di circa 1000 m. I risultati delle analisi morfometriche suggeriscono agli autori che la faglia sia interessata da un tasso di movimento costante a partire da 0.75 Ma di circa 0.3-0.4 mm/anno, consistente con il tasso di movimento proposto da Roberts e Michetti (2004)

Fubelli et al. (2009) nel lavoro *“Geomorphic signatures of recent normal fault activity versus geological evidence of inactivity: Case studies from the central Apennines (Italy)”* analizzano tutte le evidenze di attività recente della faglia mostrate in tutti i lavori precedenti. In particolare, gli autori mostrano che l’esposizione del piano di faglia (nei punti indicati in tutti i lavori precedenti),

supposta essere indicativa del movimento della struttura tettonica, avviene in modo molto discontinuo alla base del versante e solo in due punti in prossimità dell'abitato di Leonessa, dove fenomeni di erosione superficiale o movimenti gravitativi superficiali (peraltro, indicati nelle cartografie del Piano di Assetto Idrogeologico regionale) coinvolgono i sedimenti accumulati alla base della scarpata di faglia, esumando il piano di faglia (Fig. 19). Quindi, secondo Fubelli et al. (2009) il piano di faglia sarebbe esposto per processi non tettonici. Inoltre, gli autori definiscono che la faglia è suturata da conoidi alluvionali riferibili al Pleistocene Superiore-Olocene (Fig. 20), individuati da Fubelli et al. (2008) e che la superficie sommitale del Sintema di Leonessa di Fubelli et al (2008), corrispondente alla "superficie di Leonessa" di Michetti e Serva (1990), non risulti dislocata rispetto ad un terrazzo erosivo corrispondente individuato all'interno della Vallonina. Infine, gli autori propongono che il terrazzo individuato da Michetti e Serva (1990) e ritenuto essere sospeso al letto della faglia per azione della faglia stessa, sia in realtà una superficie strutturale associata alla Formazione delle "Marne a Fucoidi" del substrato carbonatico e non, quindi, una morfologia erosiva quaternaria dislocata dalla faglia.

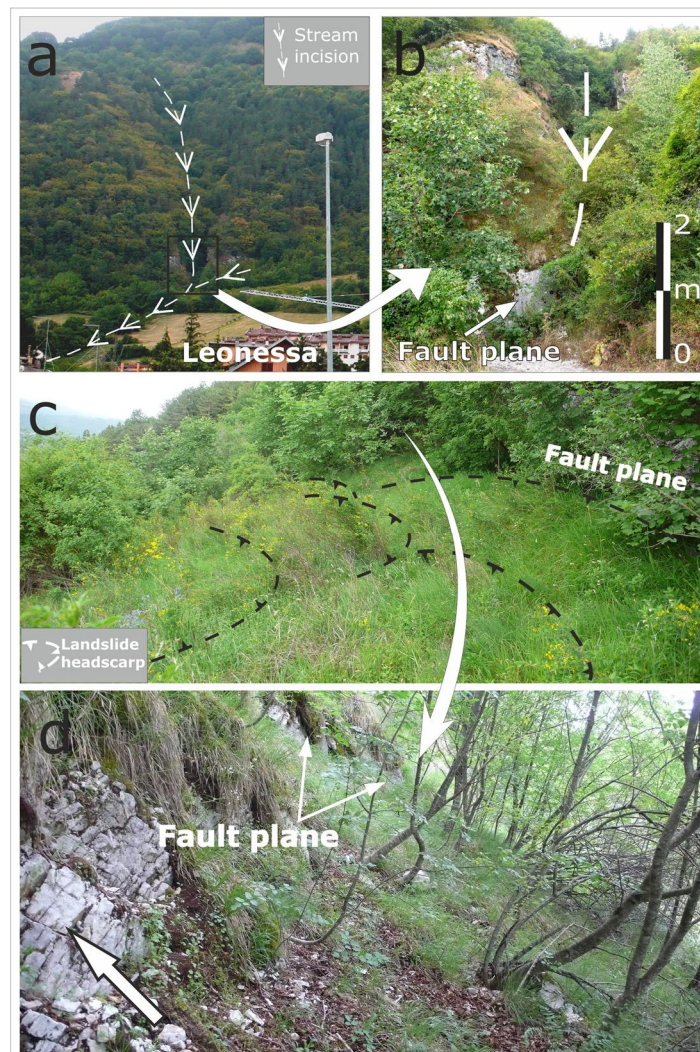


Fig. 19. Evidenze che il piano di faglia di Leonessa sia esposto solo per fenomeni di ruscellamento concentrato e processi gravitativi superficiali che coinvolgono i depositi di versante accumulatisi alla base della scarpata di faglia (figura 9 di Fubelli et al., 2009)

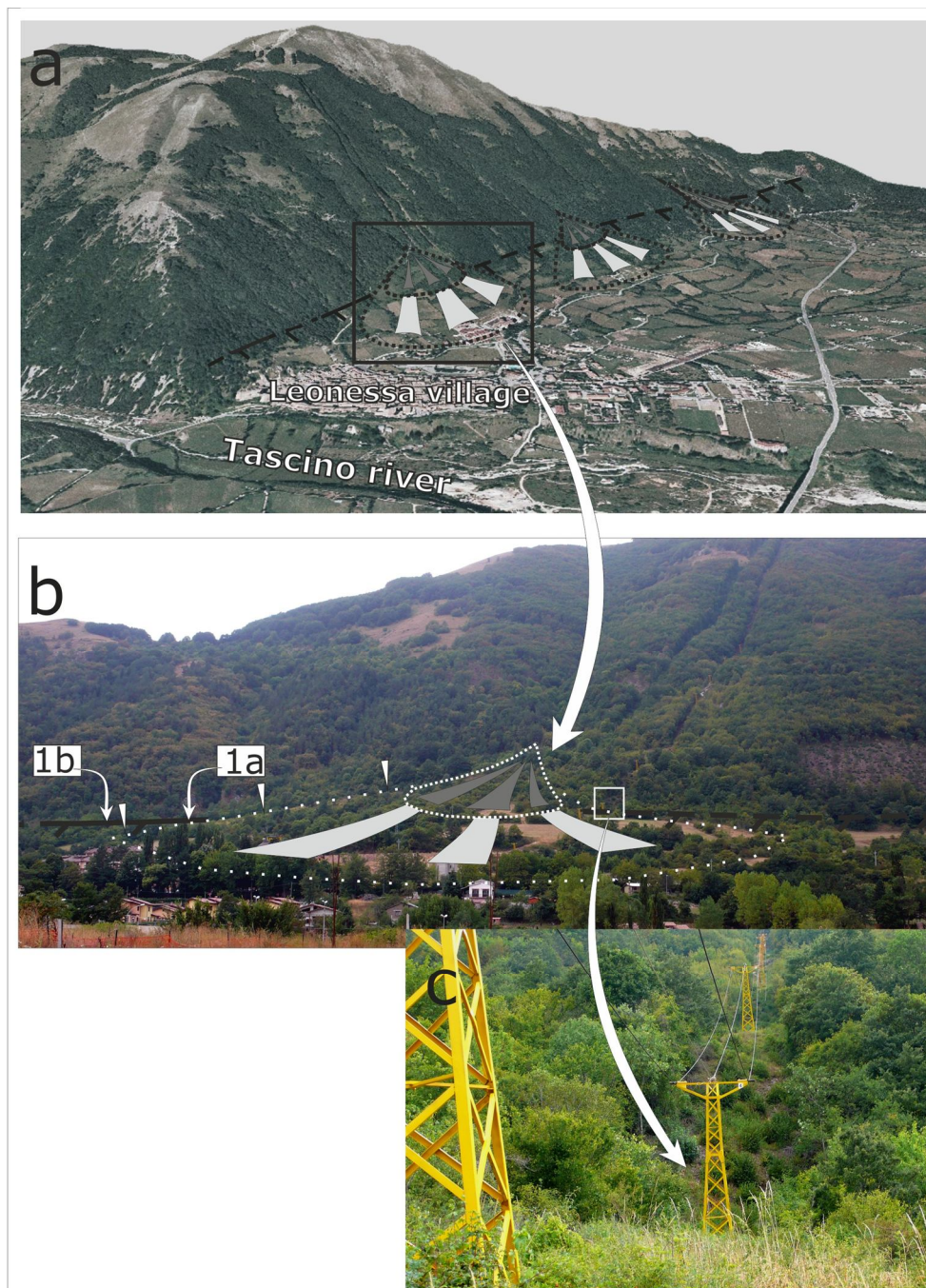


Fig. 20. Evidenze che il piano di faglia di Leonessa è suturato da due ordini di conoide alluvionale riferiti al Pleistocene Superiore-Olocene in prossimità dell'abitato di Leonessa (figura 12 di Fubelli et al., 2009).

Il **Catalogo delle faglie capaci (ITHACA)** dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ITHACA Working Group, 2019), aggiornato a dicembre 2019, riporta la presenza della faglia di Leonessa come faglia normale capace orientata NO-SE e immergente verso NE, composta da due rami paralleli fra loro (uno principale e uno di minor lunghezza), che interessano il margine sud-occidentale del bacino di Leonessa, per una lunghezza superficiale di circa 15 km (Fig. 21).

La faglia mostrerebbe evidenze di attività nel Pleistocene Medio-Superiore, essendo responsabile della dislocazione di depositi e/o morfologie che attesterebbero l'ultima attività in un ambito cronologico compreso fra i 125.000 e 700.000 anni prima del presente. Per ciò che riguarda il consenso sulla capacità, sulla base delle informazioni disponibili, i realizzatori del catalogo definiscono una attendibilità media.

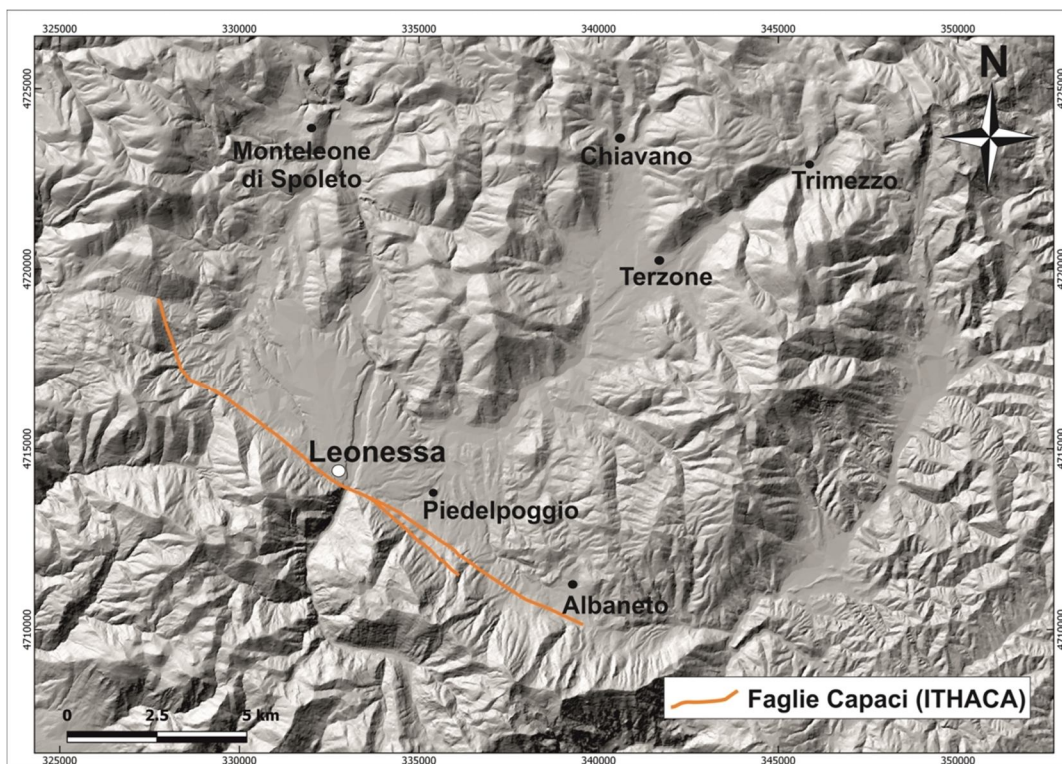


Fig. 21. Modello digitale del terreno dell'area del bacino di Leonessa sul quale è indicata la traccia della faglia capace di Leonessa (linee arancioni) riportata sul Catalogo ITHACA.

Il **Database delle Sorgenti Sismogenetiche Individuali (DISS)** dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (Basili et al., 2008; DISS Working Group, 2018), nella versione aggiornata 3.2.1, indica che l'area del bacino di Leonessa ricade all'interno della Sorgente Sismogenetica Composita (SSC) ITCS037-Mugello-Citta' di Castello-Leonessa (Fig. 22), ad orientazione circa NO-SE ed immergente verso NE. La profondità minima raggiunta da questa SSC è di 0.5 km, mentre la profondità massima è di 8 km. La massima magnitudo attesa da un evento di attivazione, associata a SSC è di M_w 6.2, derivata dalla massima magnitudo attribuita a sorgenti individuali che si collocano all'interno di questa SSC. Nel dettaglio descrittivo associato alla ITCS037, non vengono fornite dai realizzatori del Database informazioni circa l'attività e capacità della faglia di Leonessa, e non è

specificato il rapporto fra la faglia in superficie riportata nella letteratura (e sopra analizzata) e la SSC.

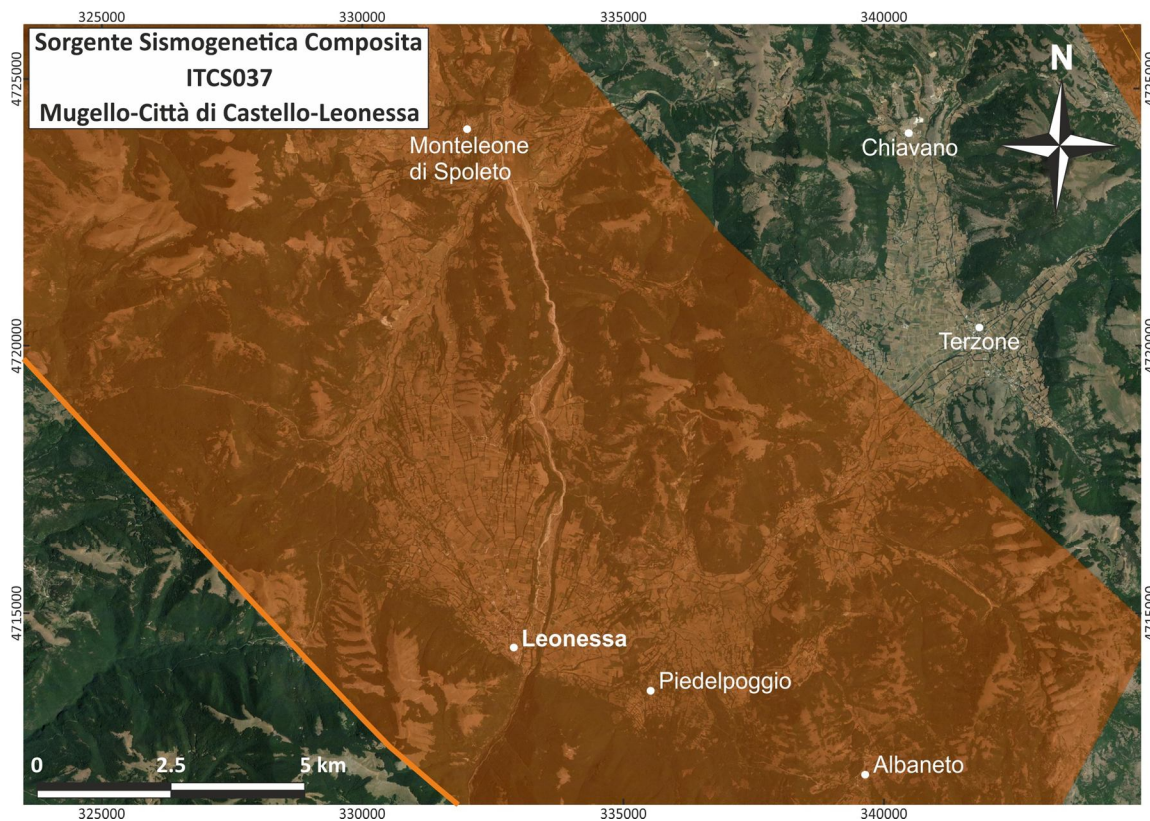


Fig. 22. Immagine satellitare del bacino di Leonessa e settori limitrofi. L'area arancione corrisponde alla porzione della Sorgente Sismogenetica Composita ITCS037 del Database DISS in cui ricade il bacino di Leonessa.

Boncio et al. (2004) nel lavoro *"Defining a model of 3D seismogenic sources for Seismic Hazard Assessment applications: The case of central Apennines (Italy)"* considerano la faglia di Leonessa di classe "C", che include le faglie "dibattute", ovvero considerate attive da alcuni autori, a volte riportate con informazioni quantitative sui tassi di movimento quaternari, o inattive da altri autori. Per tale motivo, Boncio et al. (2004) non definiscono una sorgente sismogenetica per la faglia di Leonessa.

Akinci et al. (2009) nel lavoro *"Effect of Time Dependence on Probabilistic Seismic-Hazard Maps and Deaggregation for the Central Apennines, Italy"*, non riportano la faglia di Leonessa come possibile faglia attiva e sorgente sismogenetica di eventi sismici maggiori.

Valentini et al. (2018) nel lavoro *"Integrating faults and past earthquakes into a probabilistic seismic hazard model for peninsular Italy"* realizzano un catalogo di faglie attive e sorgenti

sismogenetiche per le quali definiscono parametri geometrici e cinematici, e parametri sismotettonici fra i quali la massima magnitudo attesa da ogni singola sorgente sismogenetica e terremoto storico possibilmente associato. Per ciò che concerne la faglia di Leonessa, questa viene considerata dagli autori relativa ad una sorgente sismogenetica lunga circa 15 km, con una profondità minima di 0 km e una massima di 12 km, alla quale viene associato un tasso di movimento compreso nell'intervallo 0.1-0.7 mm/anno. Alla sorgente sismogenetica relativa alla faglia di Leonessa gli autori associano una massima magnitudo attesa da un evento di attivazione pari a $M_W 6.2 \pm 0.3$. Infine, gli autori non associano alla faglia di Leonessa un terremoto storico noto dai cataloghi sismici né un terremoto strumentale significativo.

Per ciò che concerne le stime del tasso di movimento associato alla faglia, Valentini et al. (2018) fanno riferimento ai lavori di Cello et al. (1997), Barchi et al. (2000); Galadini et al. (2000), Papanikolaou et al. (2005) e Roberts e Michetti (2004).

6) ANALISI FOTOGEOLOGICA E INDAGINI GEOLOGICHE DI TERRENO

Al fine di caratterizzare l'assetto strutturale e morfologico dell'area del bacino di Leonessa è stato condotto uno studio aereofotogeologico preliminare. Sono state selezionate le fotografie aeree che mostrano il versante sud-occidentale del bacino di Leonessa, in cui gli studi di Microzonazione Sismica di III livello riportano la traccia di una Faglia Attiva e Capace (FAC).

Sono state visionate le fotografie in bianco e nero realizzate dall'Istituto Geografico Militare (IGM) nell'anno 1954 ed appartenenti a:

- Foglio 139, Strisciata 39, Fotogrammi 1206-1207-1208-1209 alla scala 1:29.000;
- Foglio 138, Strisciata 38, Fotogrammi 2502-2503-2504 alla scala 1:34.000.

Sono in corso di acquisizione i fotogrammi del volo della Royal Air Force (R.A.F) dell'anno 1945, appartenenti a:

- Foglio 139, Strisciata 10, Fotogrammi 21-22-23 alla scala 1:55.000;
- Foglio 139, Strisciata 5, Fotogrammi 6-7 alla scala 1:55.000;
- Foglio 139, Strisciata 6, Fotogrammi 31-32-33 alla scala 1:55.000.

Le fotografie aeree dell'IGM sono state messe a disposizione dal Laboratorio di Cartografia e Fotogeologia (sez. Roma 1) dell'istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) di Roma e sono state consultate mediante l'utilizzo dello Stereoscopio classico modello Wild Aviopret APT2.

La consultazione delle foto aeree è stata uno strumento necessario per l'individuazione e una prima mappatura degli elementi geomorfologici del bacino di Leonessa.

Scarpata di faglia

L'analisi delle fotografie aeree ha permesso di identificare la possibile scarpata di faglia che si estende in maniera discontinua da S di Piedelpoggio fino alla frazione di Villa Carmine a N, con direzione circa NO-SE. Tale scarpata è stata cartografata in corrispondenza delle rotture di pendio lungo la porzione medio-alta dei rilievi del Monte Tilia, di Colle la Croce e di Colle Prato Pecoraro, presentando localmente una geometria segmentata (Fig. 23; Tavola allegata). L'estensione laterale di tale scarpata risulta infatti discontinua in quanto, a luoghi, tende ad interrompersi in corrispondenza di alcuni conoidi alluvionali che si estendono fino alla base del versante, come riportato da Fubelli et al. (2009).

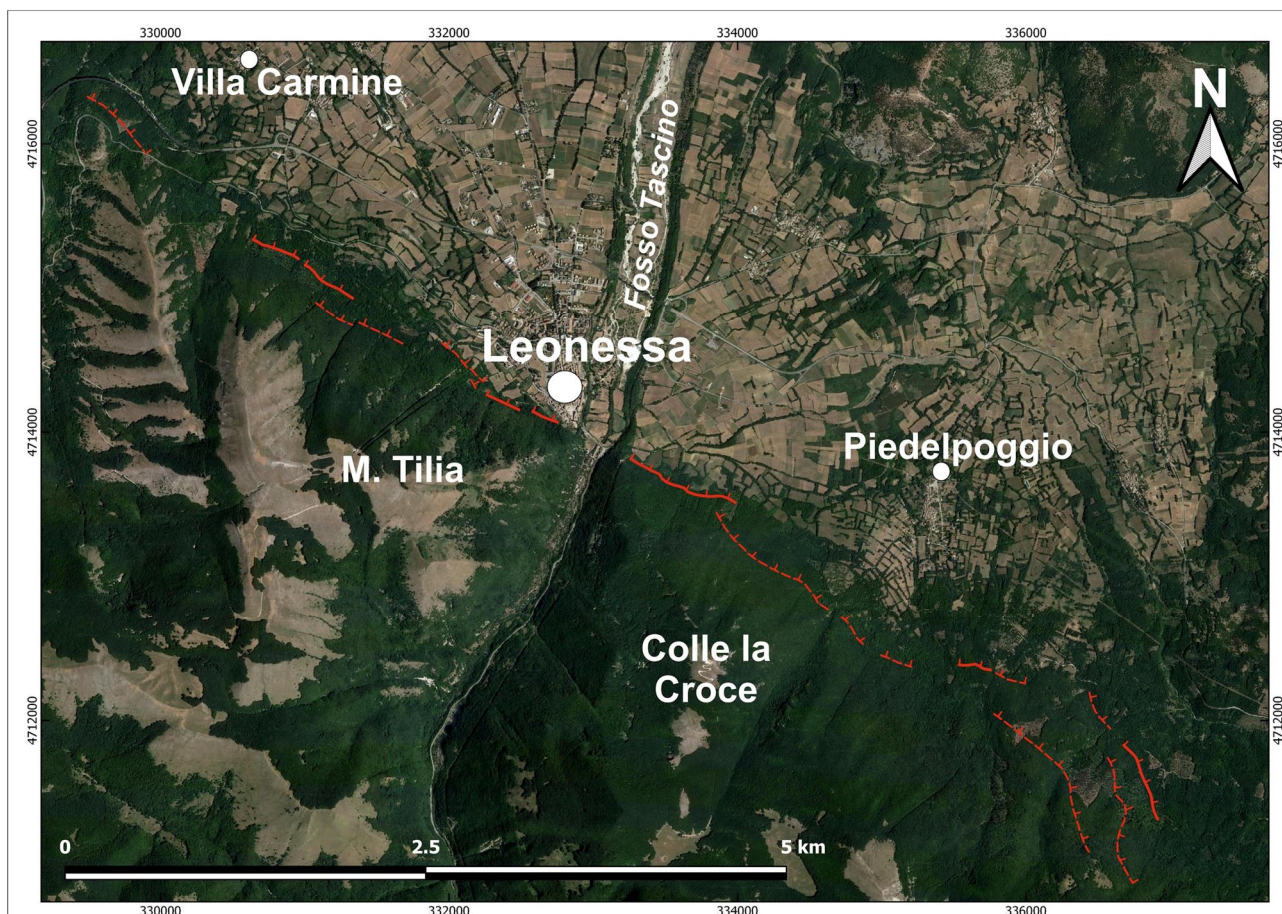


Fig. 23. Dettaglio da immagine satellitare (Google Earth) dell'area analizzata mediante lo studio aerofotogeologico. In rosso a tratto continuo è evidenziata la traccia della possibile scarpata di faglia cartografata a seguito dell'interpretazione delle fotografie aeree; in rosso a tratto discontinuo è evidenziata la traccia della scarpata di faglia cartografata mediante l'utilizzo delle fotografie aeree ma con delle incertezze maggiori riguardo l'ubicazione della stessa.

Conoide alluvionale

Il bacino di Leonessa risulta essere caratterizzato dalla presenza di diversi ordini di conoidi alluvionali, i quali rappresentano la forma deposizionale predominante all'interno del bacino. In particolare, il bacino di Leonessa è caratterizzato dalla grande conoide alluvionale (Sintema di Leonessa di Fubelli et al., 2008) su cui è costruito l'abitato di Leonessa e che si estende fino alla base dei rilievi che bordano il margine nord-orientale del bacino di Leonessa. Le superficie deposizionali dei conoidi alluvionali riconosciute non mostrano, almeno dalla fotointerpretazione, evidenti dislocazioni riconducibili alla presenza di elementi geologici di origine tettonica.

Fenomeni gravitativi

Ulteriori elementi morfologici individuati in quest'area sono quelli appartenenti ai processi gravitativi superficiali. Lungo la porzione sommitale del versante analizzato sono state riconosciute

diverse nicchie e coronamenti di frana. In alcuni casi è stato possibile individuare anche le relative forme di accumulo alla base. La presenza di fenomeni gravitativi è stata riconosciuta anche alla base del versante caratterizzato da locali svuotamenti e diverse forme concave riconducibili all'innescio di frane rotazionali come riportato anche nella cartografia della Microzonazione Sismica di III livello e nella Cartografia PAI:

Scarpate di origine antropica

Infine, fra gli elementi morfologici individuati rientrano quelli di origine antropica. Quest'ultimi si individuano in corrispondenza delle aree coltivate che si estendono per tutta la base del versante, delimitando il perimetro dei terrazzamenti agricoli e modellando localmente la morfologia dei conoidi alluvionali. Tale mappatura è stata realizzata per escludere eventuali scarpate non tettoniche nelle analisi oggetto di tale studio o eventualmente valutarne la sovrapposizione con quelle di origine tettonica.

Al fine di riconoscere possibili elementi tettonici riconducibili alla faglia di Leonessa, cartografata negli studi di Microzonazione Sismica (MZS) come attiva e capace, è stato condotto un rilevamento geologico-strutturale in due siti ubicati rispettivamente a N dell'abitato di Leonessa, all'interno del Fosso della Forcella, e a SE di Piedelpoggio (vedi Tavola allegata).

Settore del Fosso della Forcella

Nell'ottica di individuare possibili evidenze di attività recente della struttura tettonica, è stato effettuato il rilevamento geologico all'interno del Fosso della Forcella, che attraversa la traccia della faglia indicata nella MZS (Fig. 24). Le osservazioni di terreno hanno permesso di individuare in affioramento, sia all'interno dell'incisione che in prossimità della superficie topografica, il substrato carbonatico. Nella cartografia geologica alla scala 1:100.000 del Foglio Geologico d'Italia n.138 "Terni" all'interno del Fosso è indicata la presenza del substrato carbonatico appartenente alla Formazione delle "Marne a Fucoidi". L'analisi paleontologica effettuata su campioni prelevati dagli affioramenti hanno definito che, in realtà, trattasi di substrato appartenente alla Formazione della "Scaglia Bianca" che si colloca nel Cretacico Inf.-Medio (Albiano Sup.-Cenomaniano) per la presenza del fossile guida del genere *Rotalipora*. Questo si presenta micritico, finemente stratificato, con giacitura a franapoggio (N315°,58°; N355°,55°; N350°,65°; N330°,45°) (Fig. 25a) ed inclinazioni via via crescenti spostandosi verso valle (verso NNE). Il substrato è localmente interessato da piccoli piani di taglio a direzione circa NNE-SSO ad alto angolo ma che non determinavano rigetti nel substrato.

Risalendo lungo il Fosso della Forcella, in appoggio sul substrato carbonatico, al tetto e al letto della faglia di Leonessa riportata dalla MZS (Fig. 25b, c) è stata osservata localmente la presenza di un deposito di conoide alluvionale in appoggio sul substrato carbonatico. Il deposito è

caratterizzato da clasti eterometrici da angolosi a sub-angolosi, con alternanza di livelli da clasto-sostenuti a matrice-sostenuti, a giacitura circa sub-orizzontale, debolmente inclinati verso valle (NNE) e con locale embriciatura dei clasti compatibile con una direzione di trasporto del deposito verso NNE. La quota di appoggio della conoide sul substrato carbonatico confrontabile tra tetto e letto della faglia dimostra l'assenza di rigetto verticale riconducibile alla presenza di un'eventuale struttura tettonica estensionale. L'assenza di dislocazioni tettoniche di tipo estensionale, nel settore analizzato, è corroborata dalla presenza della stessa formazione del substrato carbonatico lungo tutto il fosso, la quale mostra una semplice geometria a monoclinale immergente verso NE. Risalendo ancora lungo l'incisione in direzione SW è stato individuato all'interno del substrato carbonatico, al letto della faglia riportata nella MZS, sempre appartenente alla Scaglia Bianca, un elemento tettonico immergente verso NE (Fig. 25d) a cinematica non definita. Anche in questo caso, la presenza della stessa Formazione del substrato carbonatico all'eventuale letto e tetto di questa zona di taglio permette di escludere l'eventuale presenza di un piano di faglia a cinematica estensionale con anche in questo settore. Inoltre, in questo settore, la Scaglia Bianca risulta interessata da pieghe e faglie (Fig. 25e, f, g) inverse a vergenza verso NE. Queste deformazioni di tipo compressivo rappresentano dunque le uniche deformazioni tettoniche significative che interessano il substrato carbonatico.

Tali risultati permettono di escludere in quest'area analizzata la faglia attiva e capace e di ipotizzare una sua eventuale presenza in un settore più a valle del versante che sarà oggetto di studio nella Fase 2 di tale accordo di collaborazione.

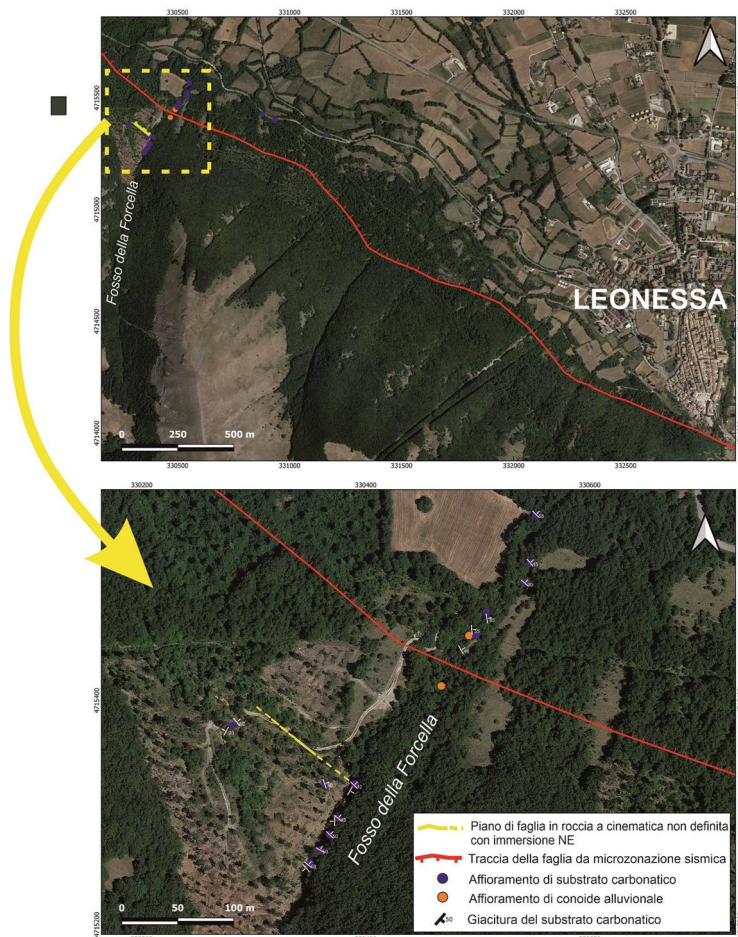


Fig. 24. Dettaglio da immagine satellitare (Google Earth) dell'area di Fosso della Forcella a NO di Leonessa.

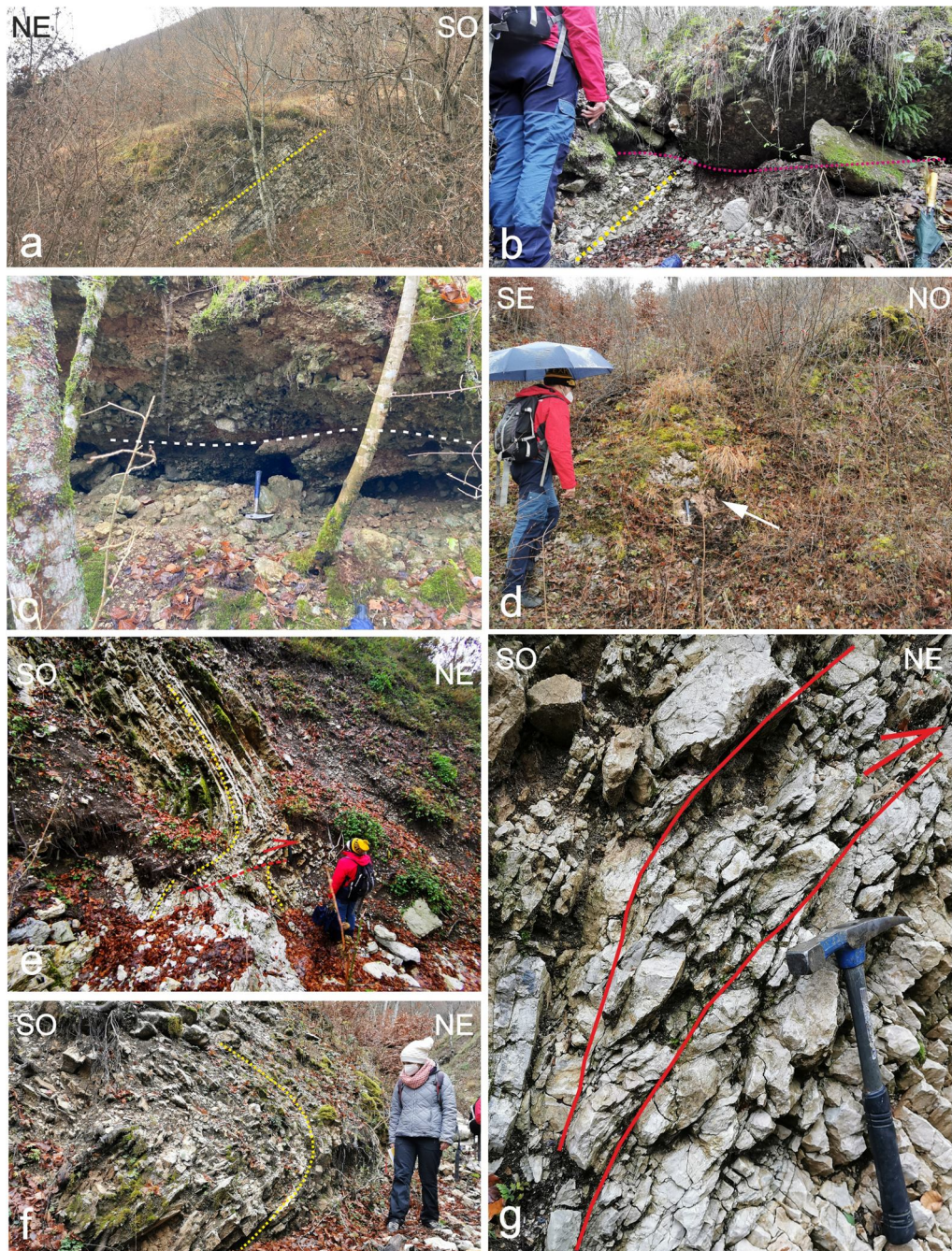


Fig. 25. a) Affioramento di substrato carbonatico lungo il Fosso della Forcella (la giacitura è indicata dalla linea tratteggiata gialla); b) contatto (linea viola tratteggiata) fra il deposito di conoide alluvionale (sopra) e il substrato carbonatico (la giacitura è indicata dalla linea tratteggiata gialla), al tetto della traccia della faglia riportata dalla MZS; c) Conoide alluvionale affiorante al tetto della traccia della faglia riportata dalla MZS (la giacitura è indicata dalla linea tratteggiata bianca); d) piano di taglia ad alto angolo (indicato dalla freccia nera) a cinematica indefinita; e) piega nel substrato carbonatico (marcata dalla linea tratteggiata gialla) e piano di taglia a cinematica inversa (linea rossa tratteggiata) che interessa la Scaglia Bianca; f) piega nel substrato carbonatico (marcata dalla linea tratteggiata gialla) che interessa la Scaglia Bianca; g) piani di taglia a cinematica inversa (linee rosse) che interessano la Scaglia Bianca

Settore a SE del Piedelpoggio

Per verificare la presenza della Faglia Attiva e Capace, riportata dalla MZS, nel settore meridionale del bacino di Leonessa, è stato condotto un rilevamento geologico-strutturale a SE dell'abitato di Piedelpoggio dove la faglia viene indicata a tratto incerto (Fig. 26).

Le indagini di campagna hanno permesso di osservare in questa zona la presenza di un substrato carbonatico a tessitura *grainstone* compatibile con la Formazione del Calcare Massiccio (Fig. 27).

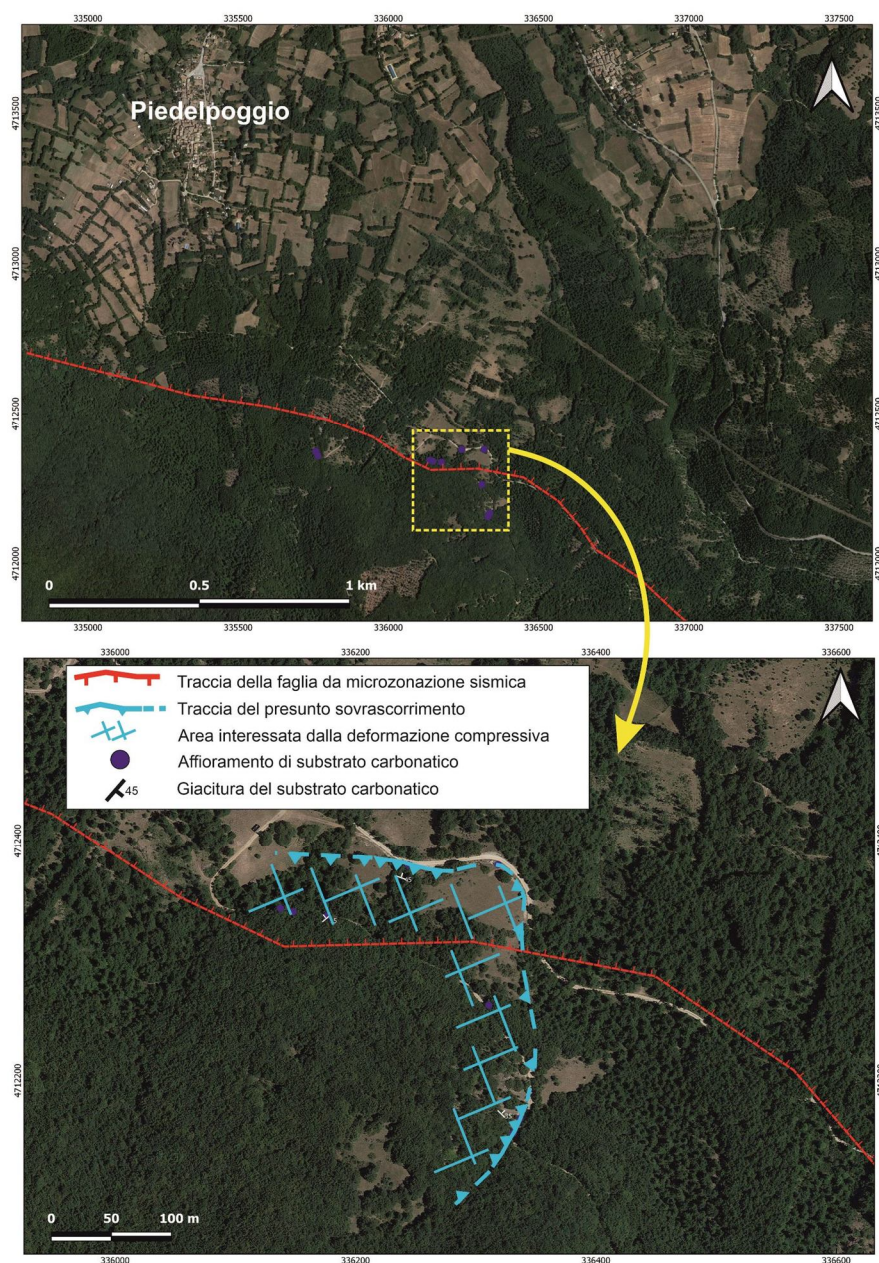


Fig. 26. Dettaglio da immagine satellitare (Google Earth) del settore a SE di Piedelpoggio.

In prossimità dell'ubicazione della traccia di faglia normale cartografata nella MZS, il substrato carbonatico risulta fortemente deformato a causa della presenza di piani di taglio a cinematica inversa a direzione N140°,45° e N190°,30° (Fig. 27). Associati a quest'ultimi, sono stati individuati, inoltre, numerosi piani di taglio a direzione compresa fra N130°,68°; N70°,40°; N130°,55°; N180°,90°; N105°,60° (Fig. 27), compatibili anche questi con una deformazione tettonica compressiva.

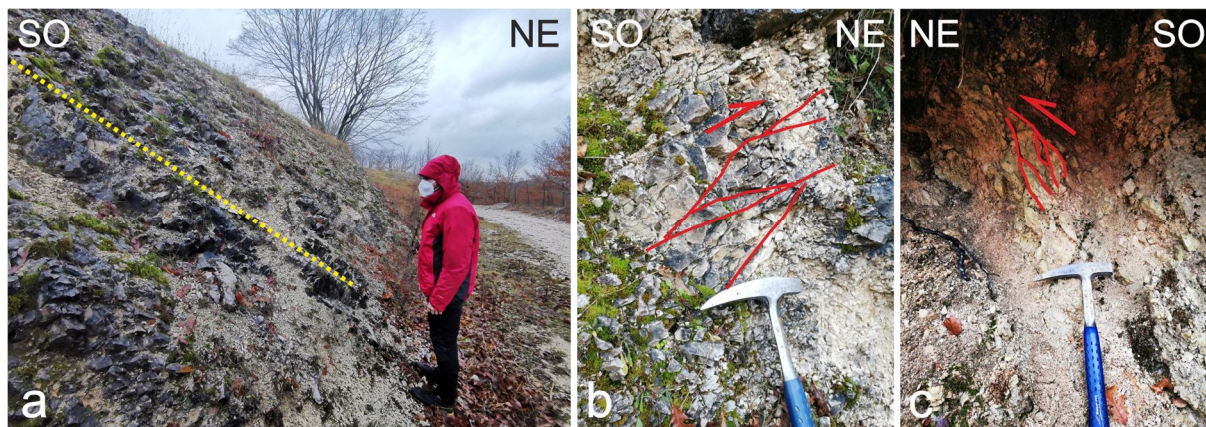


Fig. 27. a) Affioramento di Calcare Massiccio nel settore a SE di Pledelpoggio (la linea gialla tratteggiata indica la giacitura); b) e c) piani di taglio inversi (marcati dalle linee rosse) che interessano il substrato carbonatico.

All'interno della zona di taglio non sono stati rilevati elementi tettonici a cinematica distensiva che abbiano dislocato o che si siano sovrapposti agli elementi inversi sopra descritti.

I dati raccolti permettono, dunque, di escludere anche in quest'area dislocazioni tettoniche associabili alla faglia cartografata nella microzonazione sismica, ipotizzando che la stessa possa localizzarsi in un altro settore rispetto all'attuale traccia, cosa già ipotizzata per il settore a nord del bacino, nell'altro sito investigato.

7) INDAGINI GEOFISICHE: PRIME INDAGINI E RISULTATI

Al fine di investigare il settore interessato dalla presenza dell'eventuale faglia attiva e capace riportata nel settore analizzato, per indagare i possibili contatti stratigrafici verticali e/o orizzontali imputabili ad eventuali dislocazioni tettoniche attribuibili alla Faglia di Leonessa, sono state condotte preliminarmente delle indagini geofisiche in due settori specifici. Il settore di versante in prossimità del centro abitato è stato al momento escluso dalle indagini in quanto interessato dalla movimenti gravitativi (come riportato negli studi di Microzonazione Sismica di III livello e dalla Cartografia PAI) che potrebbero rendere non chiara e non univoca l'interpretazione dei risultati delle indagini geofisiche.

Nel dettaglio, alla fine del mese di Novembre 2020 sono state realizzate due campagne di prospezioni geoelettriche, qui nominate "ERT 1" e "ERT 2", e di rumore sismico ambientale nel settore di esecuzione della ERT 1. La scelta dei siti delle indagini è stata basata sulle conoscenze geologiche disponibili per l'area, inerenti la traccia della faglia di Leonessa, così come riportata negli studi di Microzonazione Sismica di III livello, nel Catalogo delle faglie capaci ITHACA e nelle pubblicazioni scientifiche e cartografie ad oggi disponibili, nonché sull'analisi di dettaglio delle caratteristiche geologico-geomorfologiche e strutturali locali della possibile scarpata di faglia, effettuata mediante indagini di terreno effettuate *ex novo*, coadiuvate dall'analisi aerofotogeologica (come illustrato nel paragrafo precedente).

Di seguito vengono descritte le indagini effettuate finora e i risultati ottenuti.

7.1 Prospezioni geoelettriche

Le prospezioni geoelettriche di resistività si basano, in generale, sugli effetti sotterranei di una corrente elettrica, rilevabili in superficie attraverso misure di differenza di potenziale o intensità di corrente. La Tomografia di Resistività Elettrica (ERT) è una tecnica d'indagine in cui la distribuzione della resistività del sottosuolo viene calcolata attraverso un gran numero di misurazioni fatte dagli elettrodi posti sulla superficie del terreno e allineati lungo un profilo (con interfaccia elettrodica dipendente dalla risoluzione e dalla profondità d'indagine richiesta).

Tra il 23 e il 24 novembre c.a. sono stati eseguiti n. 2 profili di tomografia elettrica con lo scopo di mappare la distribuzione della resistività del sottosuolo lungo sezioni 2D ed identificare l'eventuale presenza di contrasti elettrici sia verticali che sub-orizzontali riconducibili a potenziali strutture tettoniche sepolte. La resistività è una grandezza fisica, misurata in Ωm (ohm * metro), posseduta dai materiali che indica la resistenza incontrata dalla corrente elettrica nell'attraversarli. La distribuzione dei valori di resistività dipende da numerosi fattori sia geologici sia idrogeologici sia geotecnici, come ad esempio variazioni litologiche, differente grado di compattazione dei terreni, porosità e contenuto in acqua.

Le configurazioni elettrodiche adottate per l'acquisizione di dati di resistività elettrica sono il "Dipolo-Dipolo" e il "Wenner-Schlumberger", in modo da risolvere efficacemente sia variazioni verticali che sub-orizzontali ad alta risoluzione e con una profondità di investigazione adeguata al problema in esame. Queste differiscono principalmente in relazione al potere risolutivo,

profondità di investigazione, copertura orizzontale e stabilità del segnale. Il metodo Dipolo-Dipolo, in particolare, ha modesta capacità di penetrazione, bassa risoluzione verticale, ma buona risoluzione orizzontale (capacità elevata nel discriminare strutture verticali come faglie, dicchi, cavità etc.). Infatti, il dispositivo Dipolo-Dipolo è particolarmente sensibile alle strutture verticali al di sotto del centro dello stendimento, pertanto esso risulta essere adeguato al target ricercato, ossia quello di voler individuare strutture che provocano forti discontinuità orizzontali di resistività.

Inoltre, la posizione di ogni elettrodo è stata misurata con un antenna GPS modello S900A della Stonex in connessione RTK, assicurando una precisione del posizionamento e della quota dell'ordine del centimetro.

La tomografia elettrica è stata eseguita lungo due stendimenti (ERT 1, ERT 2, vedi Tavola allegata) nei due siti identificati. I profili sono stati acquisiti mediante un geo-resistivimetro Syscal R2 della IRIS Instruments, equipaggiato con un set di cavi a passo 2 m e un numero massimo di 64 elettrodi in modo da coprire una lunghezza di 126 m per il profilo ERT 1 e di 156 m per il profilo ERT 2. I dati misurati sono stati quindi elaborati utilizzando il software Res2Dinv della Geotomo, in modo da ottenere delle sezioni 2D dove viene mostrata la distribuzione in profondità della resistività elettrica del sottosuolo.

Il profilo ERT 1, del sito 1, orientato circa NE-SO, raggiunge una profondità di investigazione pari a circa 15 m per il metodo Dipolo-Dipolo e circa 25 m per il metodo Wenner-Schlumberger (Fig. 27). La sezione 2D mostra uno strato più superficiale moderatamente resistivo ($Res \cong 200 \Omega m$) e di spessore variabile, pari a circa 5 m nella porzione più a monte del profilo che aumenta quindi verso valle, raggiungendo valori intorno a circa 15 m (Fig. 28). Questo strato passa, più in profondità, ad uno strato a minore resistività ($Res \cong 90 \Omega m$) fino a fondo modello. Tale contrasto di resistività elettrica mostra una chiara geometria sub-orizzontale. In corrispondenza delle progressive 101 e 105 si può notare un passaggio verticale elettrico per i primi circa 5 metri (indicata dalla freccia rossa in Fig. 27). Tale passaggio non è esattamente in corrispondenza della scarpata principale che borda il versante investigato ma è in corrispondenza di una scarpata minore e della traccia della faglia identificata tramite le nuove indagini di terreno (già riportata da Fubelli et al., 2009). In Fig. 27 è stata anche inserita l'intersezione del piano di faglia di Leonessa con la traccia del profilo tomografico.

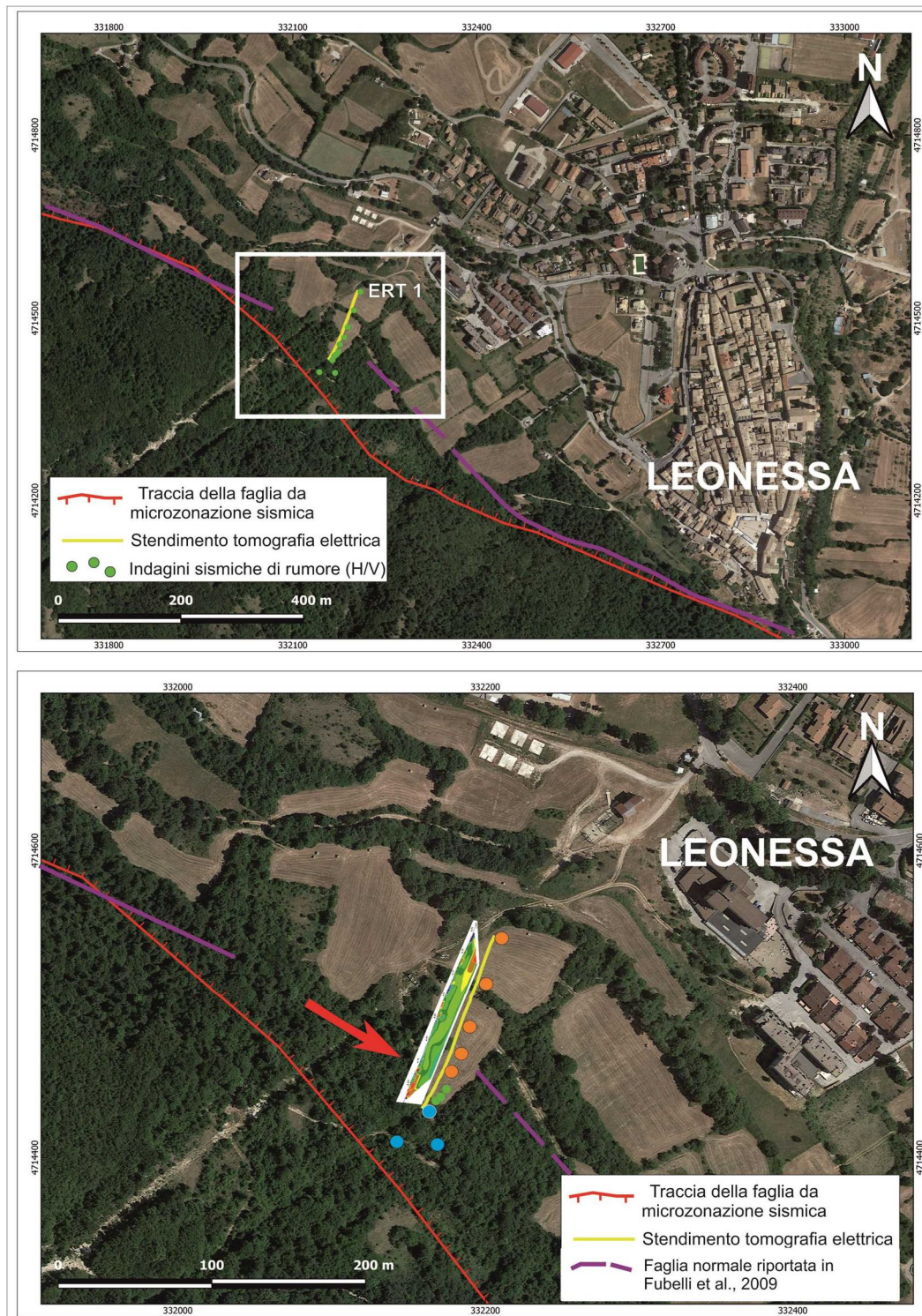


Fig. 27. Posizionamento della traccia della tomografia elettrica ERT1 e delle misure di noise sismico ambientale. Nella figura in basso, i colori dei cerchi distinguono le misure di rumore, descritte nel paragrafo successivo, nella quali i rapporti H/V sono caratterizzati da un picco sotto 1 Hz (cerchi arancioni) e quelli senza picchi a bassa frequenza (cerchi celesti). I cerchi verdi rappresentano le misure di rumore che hanno mostrato un malfunzionamento. La freccia rossa indica la zona di contrasto di resistività.

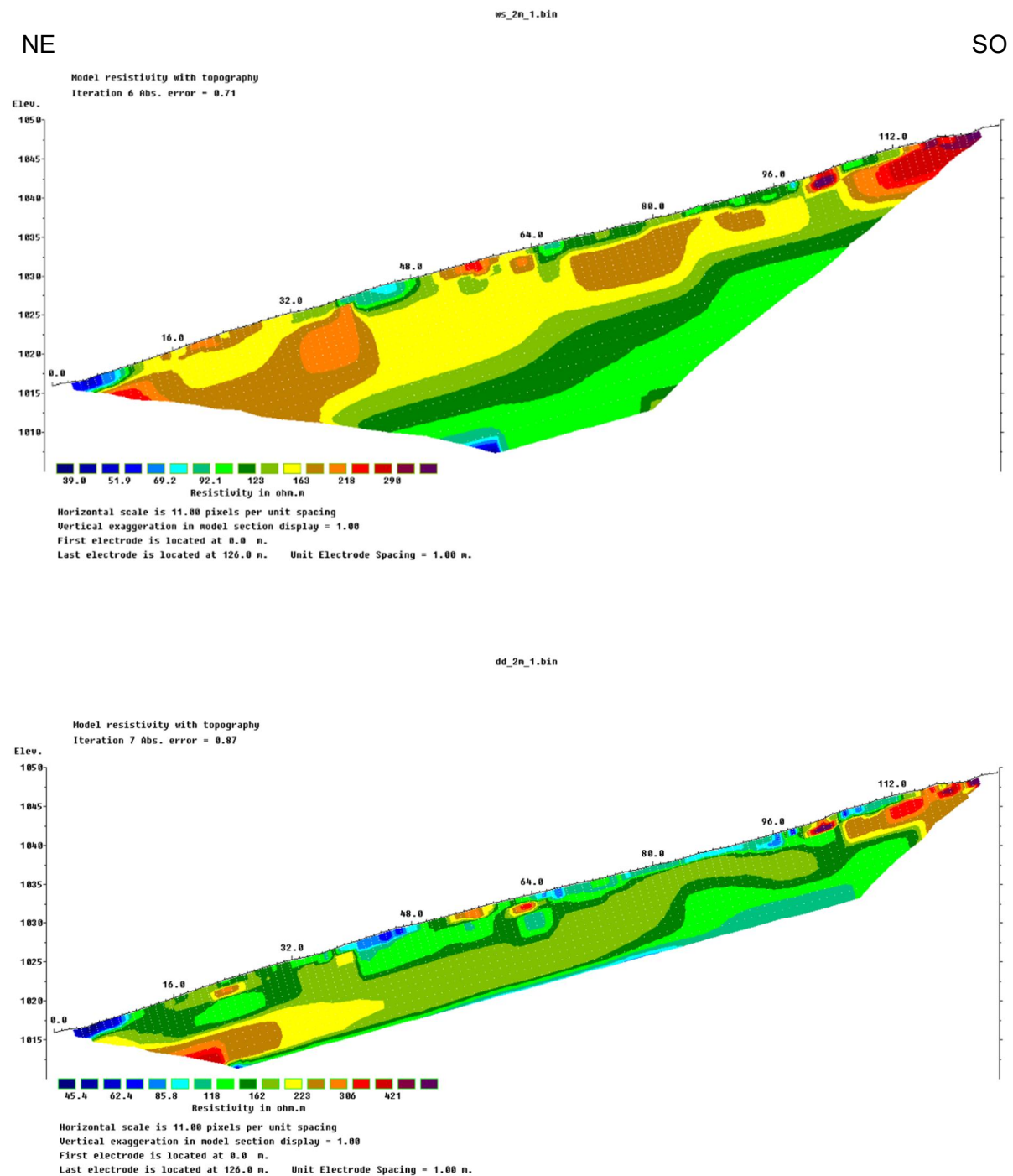


Fig. 28. Profilo di tomografia elettrica ERT1, effettuato con metodo Wenner-Schlumberger, in alto, e con il metodo Dipolo-Dipolo, in basso.

Il profilo ERT 2, orientato anch'esso circa NE-SO, di lunghezza pari a 158 m e posizionato in corrispondenza del piano di faglia in roccia affiorante, raggiunge una profondità di investigazione di circa 15 m per il metodo Dipolo-Dipolo e di 25 m per il metodo Wenner-Schlumberger (Fig. 29, 30).

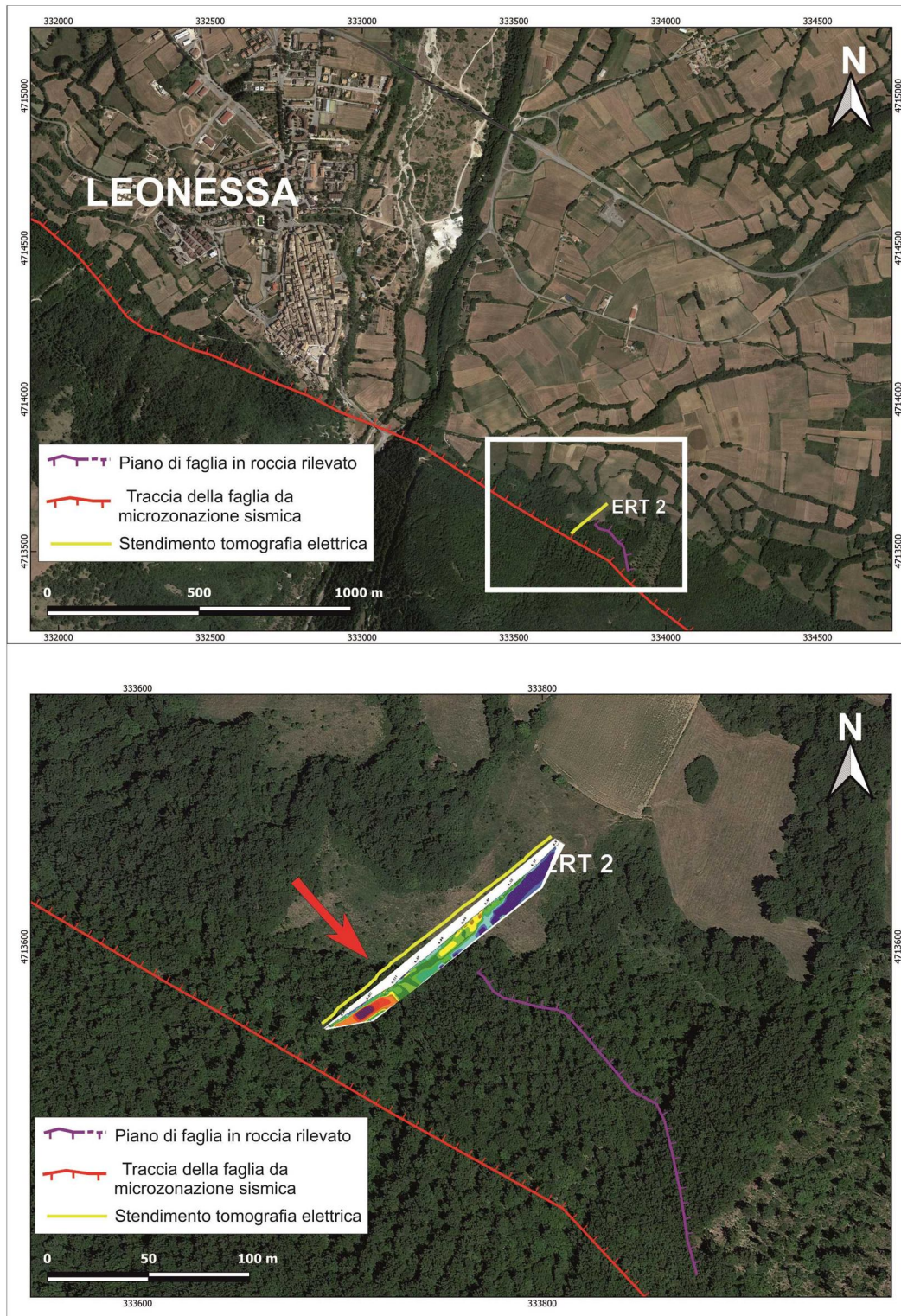


Fig. 29. Posizionamento della traccia della tomografia elettrica ERT2. La freccia rossa indica la zona di contrasto di resistività.

La sezione 2D mostra, alla progressiva 115 m, un contrasto di resistività elettrica abbastanza netto (indicato in Fig. 30 con la freccia rossa) ed evidenziata da uno strato a maggiore resistività ($\text{Res} \geq 2500 \, \Omega\text{m}$) nella porzione del profilo a monte, e da uno strato a minore resistività ($\text{Res} \leq 50 \, \Omega\text{m}$), più a valle. Tale contrasto di resistività elettrica mostra una chiara geometria sub-verticale dove le resistività passano gradualmente da valori bassi a valori superiori ai $2000 \, \Omega\text{m}$ all'interno di una fascia di transizione di circa $15/20 \, \text{m}$ a partire dalla progressiva 100 m nel profilo. Al di sopra dello strato a minore resistività si riconosce uno strato a resistività maggiore ($\text{Res} \cong 350 \, \Omega\text{m}$) con spessore variabile da circa $1 \, \text{m}$ a $5 \, \text{m}$ e che aumenta andando verso monte.

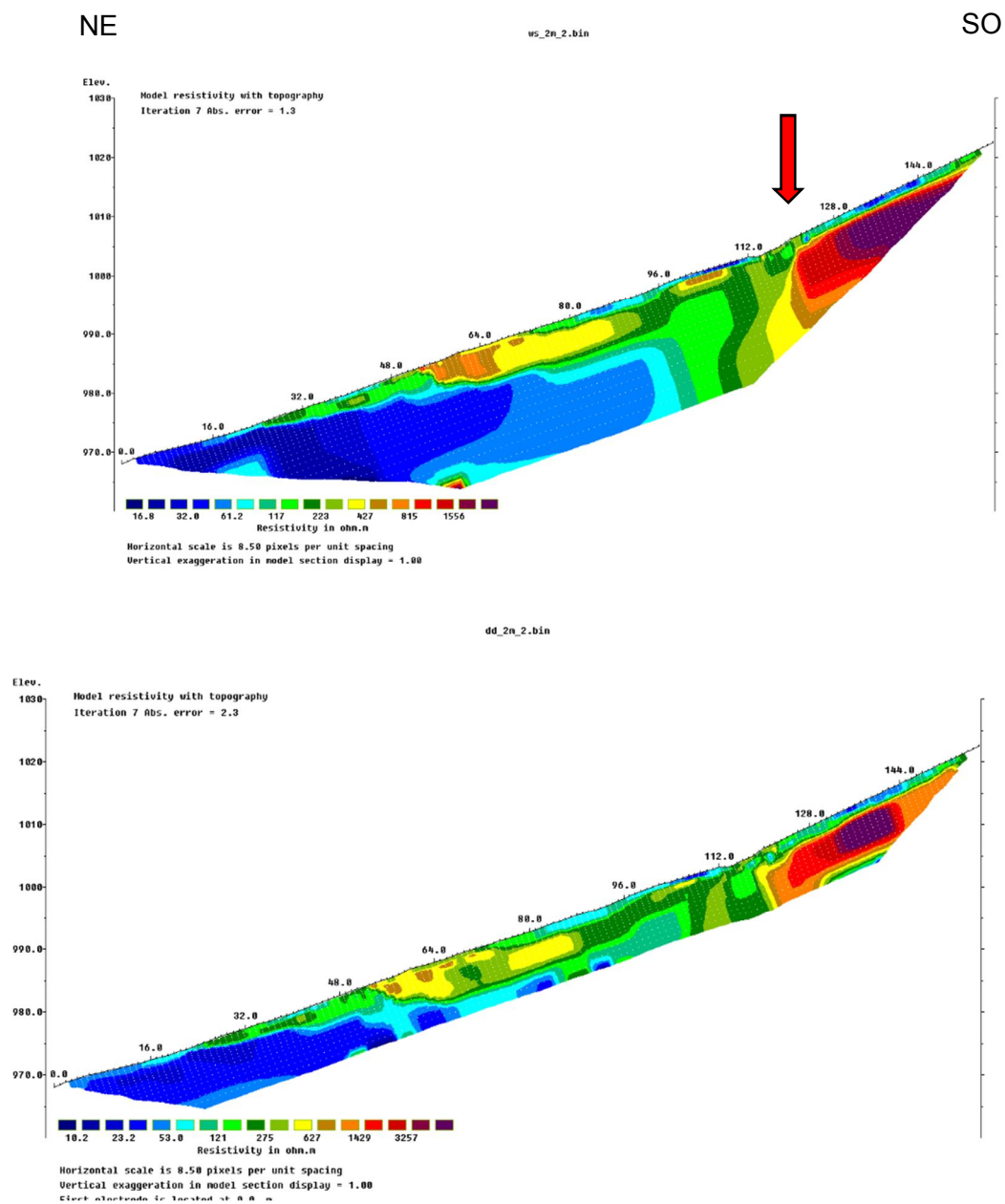


Fig. 30. Profilo di tomografia elettrica ERT2, effettuato con metodo Wenner-Schlumberger, in alto, e con il metodo Dipolo-Dipolo, in basso.

7.2 Misure di rumore sismico ambientale

In aggiunta alle misure geoelettriche, il 23 novembre 2020 sono state eseguite diverse misure di rumore sismico ambientale, con l'obiettivo di stimare le frequenze di risonanza (f_0) dei siti investigati e le loro possibili variazioni. Infatti il valore della risonanza f_0 è un buon *proxy* delle proprietà elastiche del sottosuolo, dipendendo essenzialmente dagli spessori e dalle velocità delle onde di taglio dei terreni sottostanti.

I valori di f_0 vengono dedotti dal picco delle curve H/V (rapporto spettrale tra la componente orizzontale H e la componente verticale V del moto del suolo), che è una tecnica comunemente adottata per gli studi di Microzonazione Sismica, a esempio per la produzione delle mappe di risonanza (f_0).

Lungo la stesa elettrodoica ERT1, sono state condotte 11 misure di vibrazione ambientale, usando due tipi di strumentazione sismica: il primo tipo composto da 6 digitalizzatori Reftek 130 connessi a un velocimetro a 3 componenti Lennartz 5s, il secondo tipo da 5 stazioni all-in-one Terrabot della Sara Electronics con geofoni 3 componenti a 4.5 Hz ad alto guadagno. Le misure di rumore sismico ambientale hanno avuto durata da 50 minuti a 3 ore a seconda del sito con i sensori che, dove possibile, sono stati interrati per garantire un buon accoppiamento con il terreno. Per il calcolo delle curve H/V è stato usato il software Geopsy (www.geopsy.org).

Le misure sono state ubicate seguendo lo stendimento della stesa elettrodoica ERT1 descritte nel paragrafo precedente e il numero dei punti di misura è stato infittito in corrispondenza della possibile scarpata di faglia (Fig. 27 e Fig. 31). La posizione delle misure di rumore è stata ottenuta tramite un'antenna GPS Stonex Rtk, per una precisione del posizionamento dell'ordine del cm.

I risultati in termini di curve H/V sono riportati in figura XX. Oltre alle curve H/V, le figure mostrano gli spettri delle tre componenti del moto (N-S, E-O, Z). I grafici colorati rappresentano le curve H/V direzionali ottenute dopo una rotazione delle serie temporali delle componenti Nord-Sud e Est-Ovest nel piano orizzontale. Le curve H/V direzionali servono per verificare, per ogni frequenza, se il rapporto H/V è costante in ogni direzione orizzontale oppure se assume un valore massimo per una certa direzione. Eventuali effetti di amplificazione lungo una direzione possono realizzarsi in alcune condizioni complesse (es. topografia, fratturazione in zona di faglia/frane), oltre che per la presenza di sorgenti antropiche lungo una certa direzione. La scala dei colori degli H/V direzionali è proporzionale all'ampiezza del rapporto. Per un motivo di chiarezza nella visualizzazione, si è preferito per ogni sito usare una scala di colori proporzionale al valore massimo osservato nel picco H/V.

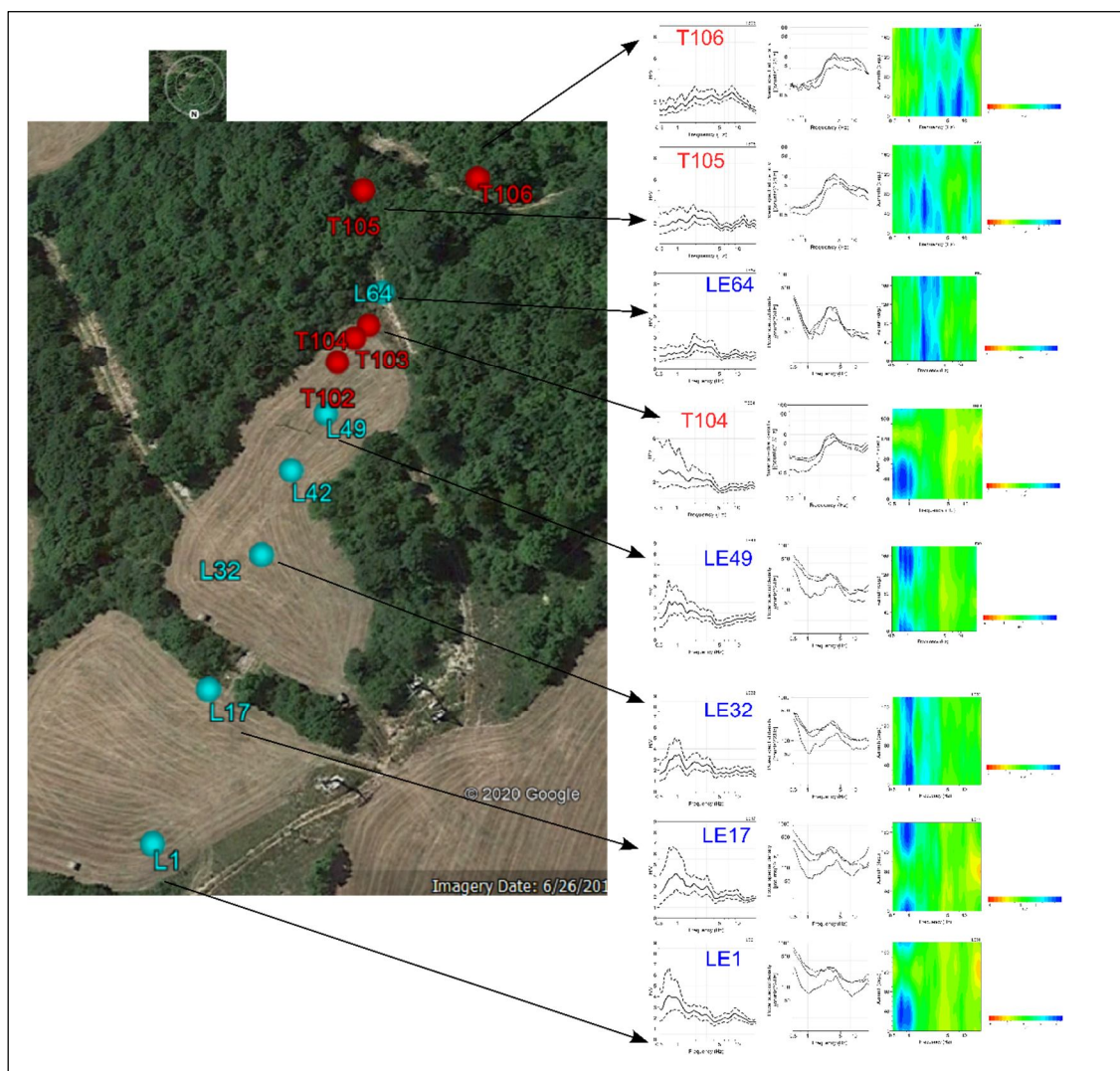


Fig. 31. Dettaglio dell'ubicazione delle misure di noise sismico. I diversi colori dei marker e i codici indicano le due diverse strumentazioni usate in campagna (vedi tabella in Fig. 32). A destra vengono mostrati i rapporti H/V, gli spettri di densità spettrale per le tre componenti del moto e i rapporti H/V direzionali (con la scala dei colori proporzionale alle ampiezze del rapporto H/V)

Procedendo in direzione da NE a SO, quindi salendo di quota (cioè da LE06 a T106), si notano delle differenze nelle curve H/V. I rapporti H/V sono caratterizzati da un picco sotto 1 Hz (più precisamente tra 0.7 e 1 Hz) fino alla misura LE49. Poi procedendo più verso monte, si nota che il picco a bassa frequenza tende a sparire. Infatti le misure LE64, T105 e T106 non presentano risonanze al di sotto di 1 Hz ma nell'intorno dei 2 Hz; anche la curva H/V della misura T104 a bassa frequenza sembra un artefatto strumentale e non un picco “credibile”.

Nome della misura	Latitudine (°)	Longitude (°)
LE01	42.565071	12.955844
LE17	42.564797	12.955723
LE32	42.564546	12.955609
LE42	42.564384	12.955543
LE49	42.564275	12.955457
T102	42.564171	12.955433
T103	42.564124°	12.955389
T104	42.564102	12.955352°
LE64	42.564040	12.955315
T105	42.563853	12.955375
T106	42.563860	12.955060

Fig. 32. Tabella con misure di rumore sismico ambientale. Le sigle “LE” e “T” indicano la tipologia di strumenti usati, Lennartz e Terrabot, rispettivamente. Le misure L42, T102 e T103 hanno mostrato un malfunzionamento in campagna (in grigio in tabella) e non vengono riportate nella figura XXX, né utilizzate per l’interpretazione.

In sostanza, si riconoscono due set di curve H/V caratterizzate dalla presenza o meno di una risonanza al di sotto di 1Hz. La zona di variazione tra i due set è spazialmente delimitata tra la posizione della misura LE49 e quella della LE64. Un picco nell’intorno di 1 Hz è in genere associato in letteratura alla presenza di uno strato sedimentario dell’ordine dei 100 m di spessore. Alcune misure di noise sembrano poi mostrare una certa direzionalità delle curve H/V di non chiara interpretazione in questa fase preliminare.

Le misure di noise si sono rivelate un utile strumento a corredo delle indagini elettriche e delle indagini sul campo, soprattutto per valutare gli elementi di prim’ordine associati alle faglie (dislocazioni e giustapposizioni di contrasti di impedenza in profondità).

8) CONCLUSIONI

La faglia di Leonessa è nota in letteratura come una faglia diretta che delimita a sud-ovest il bacino di Leonessa, situato a nord di Rieti Questa è riportata negli studi di Microzonazione Sismica di III livello come “faglia attiva e capace”. Secondo quanto stabilito dagli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica attualmente vigenti in Italia (Gruppo di lavoro MS, 2008) ed in particolare nelle “Linee Guida per la gestione del territorio in aree interessate da faglie attive e capaci (FAC)” (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2015), è considerata attiva una faglia che si è attivata almeno una volta negli ultimi 40.000 anni (parte alta del Pleistocene Superiore-Olocene), ed è considerata capace una faglia attiva che raggiunge la superficie topografica, producendo una frattura/dislocazione del terreno.

La revisione critica delle informazioni ad oggi disponibili nella letteratura scientifica sull’attività quaternaria e tardo-quaternaria della faglia sono sintetizzabili in quanto segue:

1) le evidenze che vengono portate di attività della faglia riguardano sedimenti e terreni riferiti al Pleistocene Inferiore-Medio (Michetti e Serva, 1990), che non rientrano nell’intervallo di tempo considerato per le FAC nelle succitate Linee Guida, e non sono da riferirsi a evidenze “mostrate” nell’iconografia della pubblicazione di piani di faglia, che dislocano depositi e/o morfologie associate a questo ambito cronologico, bensì sono da riferirsi a schemi interpretativi e, soprattutto, alla presenza del bacino quaternario delimitato verso SO dalla faglia, che ne avrebbe guidato la formazione e permesso il conseguente accumulo dei sedimenti.

2) l’esposizione del piano in roccia in 3) viene ipotizzata da alcuni autori la presenza di una scarpata di faglia, alla base di quella principale, nei pressi dell’abitato di Leonessa, che dislocerebbe sedimenti ipotizzati come olocenici (Papanokolaou et al., 2005). Tuttavia, non viene dimostrata l’origine tettonica di tale scarpata (che, come ipotizzato da Fubelli et al., 2009, potrebbe essere di origine non prevalentemente tettonica) né viene attestata con metodi di datazione assoluta (prescritti dalle Linee Guida) o con altri vincoli cronologici dimostrabili (es. determinazioni archeologiche, paleontologiche, ecc...) l’età olocenica dei terreni eventualmente interessati da detta scarpata.

alcuni settori alla base della scarpata di faglia viene interpretata come l’evidenza dell’attività della faglia negli ultimi 20-25ka (Michetti e Serva, 1990; Cello et al., 1997; Roberts e Michetti, 2004; Papanokolaou et al., 2005). Tuttavia, oltre a non essere annoverato fra gli elementi geologici diagnostici e sufficienti per considerare come attiva e capace una faglia, altri autori (Fubelli et al., 2009) hanno mostrato che l’esposizione locale del piano della faglia di Leonessa, nei punti considerati nei lavori precedenti, avviene per fenomeni erosivi o gravitativi, quindi non imputabili ai movimenti di origine tettonica.

4) Altre evidenze geomorfologiche portate a supporto dell’attività della faglia, come l’analisi morfometrica dell’asta fluviale del Fosso Tascino (Whittaker et al., 2007), non rientrano nei criteri indicati nelle Linee Guida per definire una faglia come attiva e capace, e comunque tali lavori basano l’interpretazione dei risultati sul presupposto dell’attività della faglia dai lavori precedenti.

5) La faglia viene considerata da alcuni autori (Fubelli et al., 2009) come sigillata da depositi e forme riferiti al Pleistocene Superiore-Olocene o comunque con attività nel Pleistocene Superiore-Olocene dibattuta (Galadini et al., 2001).

Nel caso di Fubelli et al. (2009), non vengono comunque forniti elementi cronologici “assoluti” (come prescritto dai criteri definiti nelle Linee Guida) che attestino l’età di questi elementi geomorfologici (conoidi e terrazzi alluvionali) che si sovrappongono alla zona di faglia senza essere interessati da dislocazione tettonica, che sia pari o più antica di 40.000 anni.

Infine, le indagini preliminari condotte nel presente studio ancora non chiariscono l’attività della faglia nel Quaternario e tardo-Quaternario. Le evidenze finora raccolte mostrano che, almeno in alcuni tratti della faglia riportata negli studi di MZS, questa o non è effettivamente presente in quei siti o non mostra evidenze di dislocazione verticali riferibili all’attività recente.

Alla luce di quanto sopra, attenendosi a quanto prescritto dalle Linee Guida, la faglia di Leonessa deve essere considerata non come FAC bensì, allo stato attuale delle conoscenze, come “Faglia Potenzialmente Attiva e Capace” ovvero “Faglia per la quale gli studi dimostrano un coinvolgimento dei terreni del Pleistocene medio-superiore, ma non necessariamente di depositi più recenti di 40.000 anni”.

Di conseguenza, l’attività o non attività negli ultimi 40.000 anni dovrà essere attestata con indagini ulteriori, ovvero da tutte le tipologie di indagine indicate nelle Linee Guida (Tabella A2) come “ind_” da 1 a 4, (in parte già avviate nella FASE 1) da approfondire almeno in parte nella FASE 2 dell’Accordo di Collaborazione, ovvero:

- Ind_1 Analisi aereofotogrammetriche: foto aeree, ortofoto, immagini LiDAR, immagini da satellite
- Ind_2 Rilievi geologici e geomorfologici: rilevamenti di campagna e relativa cartografia
- Ind_3 Indagini geofisiche e geognostiche: ERT, sismica a riflessione e rifrazione, GPR, sondaggi e saggi
- Ind_4 Paleosismologia: Trincee paleosismologiche e datazioni cronometriche dei terreni fagliati

Bibliografia

Aringoli D, Cavitolo P, Farabollini P, Galindo-Zaldivar J, Gentili B, Giano S.I, Lopez-Garrido A.C, M, Materazzi M, Nibbi L, Pedrera A, Pambianchi G, Ruano P, Ruiz-Constan A, Sanz de Galdeano C, Savelli D, Tondi E, Troiani F. (2014) – Morphotectonic characterization of the quaternary intermontane basins of the Umbria-Marche Apennines (Italy). *Rend. Fis. Acc. Lincei* (2014) 25 (Suppl 2):S111–S128 DOI 10.1007/s12210-014-0330-0

Akinci A, Galadini F, Pantosti D, Petersen M, Malagnini L, Perkins D. (2009) – Effect of Time Dependence on Probabilistic Seismic-Hazard Maps and Deaggregation for the Central Apennines, Italy. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 99, 585–610, 2009.

Autorità di Bacino del Fiume Tevere (2012) – Piano stralcio di Assetto Idrogeologico (PAI). Primo aggiornamento adozione definitiva, Relazione.

Basili R, Valensise G, Vannoli P, Burrato P, Fracassi U, Mariano S, Tiberti M.M, Boschi E. (2008) – The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology. *Tectonophysics*; doi:10.1016/j.tecto.2007.04.014

Barchi M, Galadini F, Lavecchia G, Messina P, Michetti AM, Peruzza L, Pizzi A, Tondi E, Vittori E. (eds) (2000) – Sintesi delle conoscenze sulle faglie attive in Italia Centrale: parametrizzazione ai fini della caratterizzazione della pericolosità sismica. CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Roma, 2000, pp 62.

Bernardini F, Castelli V, Camassi R, Caracciolo C.H, Ercolani E. (2013) – A “forgotten” earthquake rediscovered: the 1948-1949 Monti Reatini (central Apennines) seismic sequence. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 54, n. 3, 229-244.

Boncio P, Lavecchia G, Pace B. (2004) – Defining a model of 3D seismogenic sources for Seismic Hazard Assessment applications: The case of central Apennines (Italy). *Journal of Seismology* 8: 407-425, 2004.

Bosi C, Galadini F, Giaccio B, Messina P, Sposato A. (2003) – Plio- Quaternary continental deposits in the Latium-Abruzzi Apennines: the correlation of geological events across different intermontane basins. *Il Quat. (Italian J. Quat. Sci.* 16, 55e76.

Castellari A, Colacicchi R, Praturlon A. (1978) – Fasi distensive, trascorrenze e sovrascorrimenti lungo la 'linea Ancona-Anzio', dal Lias medio al Pliocene. *Geologica Romana*, 17, 161–189.

Carta Geologica d'Italia 1: 100.000 (1955). Cartografia geologica ufficiale, Foglio 139 – L'Aquila. Servizio Geologico d'Italia.

Carta Geologica d'Italia 1: 100.000 (1975). Cartografia geologica ufficiale, Foglio 138 – Terni. Servizio Geologico d'Italia.

Cavinato G.P, De Celles P. (1999) – Extensional basins in the tectonically bimodal central Apennines fold-thrust belt, Italy: response to corner flow above a subducting slab in retrograde motion. *Geology* 27 (10), 955-958.

Cello G, Mazzoli S, Tondi E, Turco E. (1997) – Active tectonics in the central Apennines and possible implications for seismic hazard analysis in peninsular Italy. *Tectonophysics* 272, 43–68.

Cheloni D, De Novellis V, Albano M, Antonioli A, Anzidei M, Atzori S. et al. (2017) – Geodetic model of the 2016 central Italy earthquake sequence inferred from InSAR and GOS data. *Geophysical Research Letters*, 44, 6778–6787. <https://doi.org/10.1002/2017GL073580>.

Cheloni D, Falcucci E, Gori S. (2019) – Half-graben rupture geometry of the 30 October 2016 MW 6.6 Mt. Vettore-Mt. Bove earthquake, central Italy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124. <https://doi.org/10.1029/2018JB015851>

Chiaraluce L, Di Stefano R, Tinti E, Scognamiglio L, Michele M, Casarotti E, et al. (2017) – The 2016 central Italy seismic sequence: A first look at the mainshocks, aftershocks and source models. *Seismological Research Letters*, 88(3), 1–15. <https://doi.org/10.1785/0220160221>

Commissione tecnica per la microzonazione sismica, Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da Faglie Attive e Capaci (FAC), versione 1.0. Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome – Dipartimento della protezione civile, Roma, 2015.

Cosentino D, Cipollari P, Marsili P, Scrocca D. (2010) – Geology of the central Apennines: a regional review. *Journal of the Virtual Explorer, Electronic Edition*, ISSN 1441-8142, volume 36, paper 11.

D'Agostino N, Jackson J. A, Dramis F, Funicello R. (2001) – Interactions between mantle upwelling, drainage evolution and active normal faulting: An example from the Central Apennines (Italy) *Geophys. J. Int.* (2001) 147, 475–497.

Devoti R, D'Agostino N, Serpelloni E, Pietrantonio G, Riguzzi F, Avallone A, et al. (2017) – The Mediterranean crustal motion map compiled at INGV. *Annales de Geophysique*, 60(2). <https://doi.org/10.4401/ag-7059>.

Di Domenica A, Turtù A, Satolli S, Calamita F. (2012) – Relationships between thrusts and normal faults in curved belts: New insight in the inversion tectonics of the central-northern Apennines (Italy). *Journal of structural geology*, 42, 104-117.

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.

Galli P, Galderisi A, Marinelli R, Messina P, Peronace E, Polpetta F. (2019) – A reappraisal of the 1599 earthquake in Cascia (Italian Central Apennines): hypothesis on the seismogenic source. *Tectonophysics* 774 (2020) 228287.

Galli P, Giaccio B, Messina M, Peronace E, Zuppi G.M. (2011) –Palaeoseismology of the L'Aquila faults (central Italy, 2009, Mw 6.3 earthquake): implications for active fault linkage. *Geophys. J. Int.* 187, 1119–1134. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2011.05233.x.

Gori S, Munafò I, Falcucci E, Moro M, Saroli M, Malagnini L, Galadini F. (2019) – Active faulting and seismotectonics in central Italy: Lesson learned from the past 20 years of seismicity. *Engineering clues. Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions – Silvestri & Moraci (Eds)*, 2019 Associazione Geotecnica Italiana, Rome, Italy, ISBN 978-0-367-14328-2

Guidoboni E, Ferrari G, Tarabusi G, Sgattori G, Comastri A, Mariotti D, Ciuccarelli C, Bianchi M.G, Valensise G. (2019) – CFT15Med, the new release of the catalogue of strong earthquakes in Italy and in the Mediterranean area, *Scientific Data* 6, Article number: 80 (2019). doi: <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0091-9>.

ITHACA Working Group (2019). ITHACA (ITaly HAZard from Capable faulting), A database of active capable faults of the Italian territory. Version December 2019. ISPRA Geological Survey of Italy. Web Portal <http://sgi2.isprambiente.it/ithacaweb/Mappatura.aspx>

Moro M, Bosi V, Galadini F, Galli P, Giaccio B, Messina P, Sposato A. (2002) – Analisi paleosismologiche lungo la faglia del M. Marine (Alta Valle dell'Aterno): risultati preliminari. *Il Quaternario – Italian Journal of Quaternary Sciences*, 15(2), 259-270.

Moro M, Falcucci E, Gori S, Saroli M, Galadini F. (2016) – New paleoseismic data across the Mt. Marine Fault between the 2016 Amatrice and 2009 L'Aquila seismic sequences (Central Apennines). *Annals of Geophysics*, 59, Fast Track 5.

Rovida A, Locati M, Camassi R, Lolli B, Gasperini P. (2020) – The Italian earthquake catalogue CPT15. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(7), 2953-2984. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00818-y>

Faluccci E. (2004) – Geologia del Quaternario e geomorfologia del settore occidentale della depressione intermontana di Leonessa (Rieti). Tesi di Laurea Magistrale. Dipartimento di Scienze Geologiche dell'Università degli Studi Roma Tre.

Faluccci E, Gori S, Galadini F, Fubelli G, Moro M, Saroli M. (2016) – Active faults in the epicentral and mesoseismal Ml 6.0 24, 2016 Amatrice earthquake region, central Italy. Methodological and seismotectonic issues. *Annals of Geophysics*, 59(5). <https://doi.org/10.4401/ag-7266>.

Fubelli G. (2004) – Evoluzione geomorfologica del versante tirrenico (Italia Centrale). Ph.D. Thesis, Università degli Studi Roma Tre, Roma.

Fubelli G, Faluccci E, Mei A, Dramis F. (2008) – Evoluzione quaternaria del bacino di Leonessa (Rieti), *Il Quaternario (Ital. J. Quat. Sci.)* 21 (2).

Fubelli G, Gori S, Faluccci E, Galadini F, Messina P. (2009) – Geomorphic signatures of recent normal fault activity versus geological evidence of inactivity: Case studies from the central Apennines (Italy). *Tectonophysics* 476 (2009) 252-268.

Galadini F, Galli P. (2000) – Active tectonics in the Central Apennines (Italy) - Input data for seismic hazard Assessment. *Natural Hazards*, 22, 225-270.

Galadini F, Galli P. (2003) – Paleoseismology of silent faults in the Central Apennines (Italy): the Mt. Vettore and Laga Mts. Faults. *Annals of Geophysics*, Vol. 46, N. 5, October 2003.

Galadini F, Faluccci E, Galli P, Giaccio B, Gori S, Messina P, Moro M, Saroli M, Scardia G, Sposato A. (2012) – Time intervals to assess active and capable faults for engineering practices in Italy, *Engineering Geology* 139–140, 50–65.

Galadini F, Faluccci E, Gori S, Kayen R. E, Zimmaro P, Stewart J. P. (2016) – Chapter 2: Regional faults and seismic source. In P. Zimmaro & J. P. Stewart (Eds.), *Geotechnical Extreme Events Reconnaissance Association Report No. GEER-050* Engineering reconnaissance of the 24 August 2016 central Italy earthquake - version 2 (pp. 32–72). <https://doi.org/10.18118/G61S3Z>

Galadini F, Faluccci E, Gori S, Zimmaro P, Cheloni D, Stewart J. P. (2018) – Tectonic setting of 2016-2017 Central Italy event sequence and observed source characteristics, *Earthquake Spectra* 34, 1557–1583. doi:10.1193/101317EQS204M.

Galadini F, Galli P, Leschiutta I, Monachesi G, Stucchi M. (1999) – Active tectonics and seismicity in the area of the 1997 earthquake sequence in central Italy: A short review. *Journal of Seismology* 3: 167-175, 1999.

Galadini F, Meletti C, Vittori E. (2001) – Major active faults in Italy: available surficial data. *Netherlands Journal of Geosciences/ Geologie en Mijnbouw* 80 (3-4): 273-296 (2001).

Galli P, Galadini F, Calzoni F. (2005) – Surface faulting in Norcia (Central Italy): a “paleoseismological perspective”. *Tectonophysics* 403, 117–130.

Galli P, Galadini F, Pantosti D. (2008) – Twenty years of paleoseismology in Italy, *Earth Science Reviews* 88, 89–117.

Galli P, Galderisi A, Ilardo I, Piscitelli S, Scionti V, Bellanova J, Calzoni F. (2018) – Holocene paleoseismology of the Norcia fault system (central Italy). *Tectonophysics* 754 (2018) 154-169.

Galli P, Galderisi A, Marinelli R, Messina P, Peronace E, Polpetta F. (2019) – A reappraisal of the 1599 earthquake in Cascia (Italian Central Apennines): hypothesis on the seismogenic source. *Tectonophysics* 774 (2020) 228287.

GE.MI.NA, 1963. Ligniti e torbe dell'Italia continentale. ILTE, Torino. 319 pp.

ITHACA Working Group (2019). ITHACA (ITaly HAZard from Capable faulting), A database of active capable faults of the Italian territory. Version December 2019. ISPRA Geological Survey of Italy. Web Portal <http://sgi2.isprambiente.it/ithacaweb/Mappatura.aspx>.

Lotti B, Crema C. (1927) – I terreni mesozoici dell'appennino centrale. Studi sulle rocce di transizione dalla facies umbro-marchigiana a quella abruzzese nella conca di Leonessa. *Boll. R. Uff. Geol.*, 52, Roma.

Maceroni D, Saroli M, Falcucci E, Gori S, Moro M, Galadini F. (2019) – Active faults and related hazards: new insights on the Central Apennine seismotectonics and surface faulting zonation. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, Special Issue 1 (2019) Sapienza Università Editrice. doi: 10.4408/IJEGE.2019-01.S-13.

Malagnini L, Munafò I, (2018) – On the Relationship between ML and Mw in a Broad Range: An Example from the Apennines, Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108 (2), 1018–1024, doi: 10.1785/0120170303

Michetti A.M, Serva L. (1990) – New data on the seismotectonic potential of the Leonessa fault area (Rieti, central Italy). *Rend. Soc. Geol. It.* 13, 37–46.

Montone P, Mariucci M. T. (2016) – The new release of the Italian contemporary stress map, *Geophysical Journal International* 205, 1525–1531.

Papanikolaou I.D, Roberts G.P, Michetti A.M. (2005) – Fault scarps and deformation rates in Lazio–Abruzzo, Central Italy: comparison between geological fault slip-rate and GPS data. *Tectonophysics* 408, 147–176.

Roberts G.P, Michetti A.M. (2004) – Spatial and temporal variations in growth rates along active normal fault systems: an example from The Lazio-Abruzzo Apennines, central Italy. *J. Struct. Geol.* 26, 339–376.

Valentini A, Visini F, Pace B. (2017) – Integrating faults and past earthquakes into a probabilistic seismic hazard model for peninsular Italy. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 17, 2017-2039, 2017. <http://doi.org/10.5194/nhess-17-2017-2017>.

Whittaker A.C, Cowie P.A, Attal M, Tucker G.E, Roberts G.P. (2007) – Contrasting transient and steady-state rivers crossing active normal faults: new field observations from the Central Apennines. *Italy, Basin Research* 19, 529–556.

Galli P. A.C., Giaccio B, Messina P, Peronace E, Zuppi G.M. (2011) – Palaeoseismology of the L'Aquila faults (central Italy, 2009, Mw 6.3 earthquake): implications for active fault linkage. *Geophys. J. Int.* (2011) 187, 1119-1134. doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05233.x.

Moro M, Bosi V, Galadini F, Galli P, Giaccio B, Messina P, Sposato A. (2002) – Analisi paleosismologiche lungo la faglia del M. Marine (alta Valle dell'Aterno): risultati preliminari. *Il Quaternario*, 15(2), 259-270.

Moro M, Falcucci E, Gori S, Saroli M, Galadini F. (2016) – New paleoseismologic data in the sector between the 2016 Amatrice and 2009 L'Aquila seismic sequences (central Apennines): the Mt. Marine Fault. *Annals of Geophysics*, 59.

Rasse M. (1995) – L'Apennin ombrien. Morphogenese d'une dorsale recente, PhD Thesis, Università di Paris IV, Sorbonne, Institut de Geographie, 538 pp.

Ricciardi E. (1965) – Analisi polliniche di una serie stratigrafica dei sedimenti lacustri del Pleistocene inferiore nel bacino di Leonessa (Rieti- Italia Centrale). *Giorn. Bot. Ital.*, 72: 62-82 (1965).

Pizzi A, Calamita F, Coltorti M, Pieruccini M. (2002) – Quaternary normal faults, intramontane basins and seismicity in the Umbria-Marche- Abruzzi Apennine ridge (Italy): contribution of neotectonic analysis to seismic hazard assessment. *Boll. Soc. Geol. It., Spec. Publ.*, 1, 923-929.

Calamita F, Pizzi A. (1992) – Tettonica quaternaria nella dorsale appenninica umbro-marchigiana e bacini intrappenninici associati. *Studi Geologici Camerti*, vol. spec. 1992/1, 17-25.

Skrame K, Di Filippo M, Di Nezza M. (2014) – A Multidisciplinary Approach for the determination of subsurface structure of Leonessa plain (Central Apennines, Italy). 20th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics Athens, Greece, 14-18 September 2014

Tavarnelli E. (1996) – The effects of pre-existing normal faults on thrust ramp development: an example from the Central Apennines, Italy. *Geologische Rundschau* 85, 363-371.

Tavarnelli E. (1999) – Normal faults in thrust sheets: pre-orogenic extension, post-orogenic extension, or both? *Journal of Structural Geology* 21, 1011-1018

Tavarnelli E, Butler R. W. H, Decandia E. A, Calamita F, Grasso M, Alvarez W, Renda P. (2004) – Implications of fault reactivation and structural inheritance in the Cenozoic tectonic evolution of Italy. In U. Crescenti, S. D'Offizi, S. Merlini, & R. Sacchi (Eds.), *The nature and tectonic significance of fault zone weakening*, Special Publications (Vol. 186, pp. 273–286). London: Geological Society.

TAV. LOTTO LEONESSA

FASE 1

