



Dipartimento di Scienze della Terra e dell'Ambiente

Direttore: Prof. S. Seno

Corso di Laurea Magistrale in
Geoscienze per lo Sviluppo Sostenibile

**Valutazione di tecniche di Digital Outcrop Modelling per
studi geomeccanici di affioramenti analoghi: il caso di Jebel
Madar (Oman).**

Relatore:

Prof. Niccolò Menegoni

Tesi di Laurea Magistrale
in Geoscienze per lo Sviluppo Sostenibile
di Mattia Rizzi

Matr. 544492

Anno Accademico 2024/25

Sommario

1. INTRODUZIONE	3
1.1 SCOPO DELLA TESI	4
2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E DEL CONTESTO GEOLOGICO	6
2.1 CONTESTO TETTONICO E GEODINAMICO DELL'OMAN	7
2.2 CONTESTO TETTONICO DI JEBEL MADAR	10
2.3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E STRATIGRAFICO DI JEBEL MADAR.....	12
3. METODOLOGIE	17
3.1 FOTOGRAMMETRIA DA DRONE.....	17
3.2 MAPPATURA DISCONTINUITÀ	19
3.3 ANALISI DELLE ORIENTAZIONI DELLE DISCONTINUITÀ	25
3.4 MAPPATURA 2D DELLE DISCONTINUITÀ.....	27
4. RISULTATI	29
4.1 PRINCIPALI SET DI DISCONTINUITÀ.....	29
4.2 RETRODEFORMAZIONE	40
4.3 GRAFICI A ROSA E DI INTENSITÀ DI FRATTURAZIONE.....	44
5. DISCUSSIONI	46
5.1 PRINCIPALI FAMIGLIE DI DISCONTINUITÀ.....	46
5.2 RETRODEFORMAZIONE	49
5.3 GRAFICI A ROSA E STEREO PLOT: CONFRONTO TRA LA MAPPATURA IN 2D E IN 3D	52
5.4 STUDIO DI AFFIORAMENTI ANALOGHI: POSSIBILI IMPLICAZIONI PER CIRCOLAZIONE FLUIDI E STOCCAGGIO GAS	52
6. CONCLUSIONI	54
BIBLIOGRAFIA	56

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi anni le tecniche di analisi geomeccanica hanno conosciuto un rapido sviluppo anche grazie all'introduzione di nuove tecniche per la mappatura delle fratture e alla disponibilità di software avanzati che consentono di condurre studi geomeccanici da remoto mediante l'impiego di modelli digitali degli affioramenti: i DOMs (Digital Outcrop Models).

I DOMs sono delle rappresentazioni tridimensionali ad alta risoluzione, generate da una nuvola di punti, di superfici geologiche, versanti, fronti di scavo e affioramenti, utili per studi geomeccanici e/o sedimentologici da remoto.

Le nuvole di punti vengono ottenute attraverso l'elaborazione, da parte di software dedicati come Agisoft Metashape, di centinaia di immagini acquisite mediante droni ad alte prestazioni o rilievi laser scanner. Il risultato che si ottiene è un modello digitale tridimensionale e georeferenziato del sito in esame, con risoluzioni che possono raggiungere anche l'ordine di cm/pixel (Birch et al.,2006).

L'utilizzo dei DOMs si sta diffondendo sempre di più in ambito geomeccanico grazie ai numerosi vantaggi che questa tecnologia offre:

- Elevata risoluzione dei modelli digitali generati;
- Possibilità di effettuare misurazioni estremamente precise;
- Fruibilità costante del modello digitale che consente di ripetere le analisi nel tempo;
- Possibilità di osservare e studiare zone pericolose o difficilmente raggiungibili dagli operatori.

L'uso dei DOMs per le analisi geomeccaniche richiede l'utilizzo di un software dedicato, come CloudCompare, che consente la visualizzazione dei modelli e

l'esecuzione di misurazioni geometriche e geomeccaniche, sia manuali che automatiche, attraverso i numerosi strumenti che il software offre. I piani di discontinuità possono essere successivamente esportati come file di testo in formato CSV e importati in software dedicati alle analisi stereografiche, come DIPS o Stereonet, per generare proiezioni stereografiche, osservare la densità di fratturazione in base ai vari set di discontinuità e svolgere analisi di stabilità.

Tale approccio di analisi da remoto, dalla rilevazione fotogrammetrica alla realizzazione delle proiezioni stereografiche, produce caratterizzazioni geomeccaniche complete, accurate e con una copertura dell'affioramento superiore rispetto alle tradizionali analisi in loco.

Questo vantaggio diventa ancora più evidente quando si ha a che fare lo studio di affioramenti analoghi, ovvero affioramenti di formazioni rocciose analoghe per età e condizioni strutturali a reservoir o oggetti di studio nel sottosuolo, dove un'analisi accurata del network di fratture risulta fondamentale per poter comprendere la storia strutturale dell'oggetto di studio (es. reservoir) e della circolazione di fluidi e gas.

Gli affioramenti analoghi risultano fondamentali per lo studio delle network di fratture nel sottosuolo, in quanto le tecniche tradizionali non ne permettono l'identificazione e analisi con la stessa risoluzione e/o la stessa estensione spaziale, quindi coprendo il gap tra osservazioni basate su sismica e log di pozzo.

Per questo motivo in questo lavoro di tesi viene studiato Jebel Madar, affioramento analogo delle maggiori formazioni reservoir dell'Oman: Shuaiba e Natih.

1.1 SCOPO DELLA TESI

Questa tesi ha come scopo principale la realizzazione di analisi geomeccaniche approfondite su vari affioramenti del Jebel Madar, in Oman, dove sono affioranti alcune delle principali formazioni serbatoio di tutto il Medio Oriente. Le analisi sono state eseguite attraverso l'uso dei Digital Outcrop Models (DOMs) e tramite

la mappatura e quantificazione delle discontinuità, delle strutture presenti (faglie e pieghe) e delle loro proprietà, con un l'obiettivo di aiutare le future applicazioni geoenergetiche e di stoccaggio, fornendo una caratterizzazione del network di fratture di qualità superiore rispetto ai metodi tradizionali.

Per effettuare questi studi sull'area di interesse sono stati usati dati ad alta risoluzione acquisiti tramite la tecnica della fotogrammetria da drone e successivamente elaborati con software appositi, come Agisoft Metashape, per creare modelli digitali 3D georeferenziati, dai quali sono stati estratti i principali parametri delle discontinuità presenti (fratture, faglie, superfici di strato). I principali dati estrapolati dai vari modelli sono i piani di discontinuità che, tramite successive analisi stereografiche, hanno permesso una valutazione e la correlazione generale delle discontinuità presenti dell'area, anche in relazione alla litologia.

2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E DEL CONTESTO GEOLOGICO

Jebel Madar è una montagna isolata situata nell' Oman settentrionale (Fig. 1b), 140 Km a SO di Muscat nella zona delle Adam Foothills, a cavallo tra il bacino salino dell'Oman continentale e la linea di sovrascorrimento che segna l'inizio della catena montuosa (Fig. 1a).

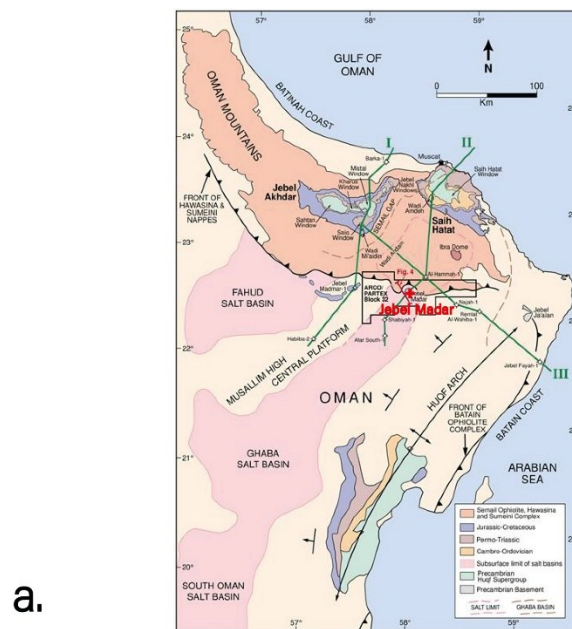


Figura 1: a) Mount et al. 1998: mappa tettonica dell'Oman. b) Vista satellitare di Jebel Madar.

La struttura è un'anticlinale con nucleo salino in profondità (non esposto) che si estende per 5 km in larghezza e 8 km in lunghezza in direzione NE-SO ed ha una grande importanza dal punto di vista geologico in quanto, la risalita del diapiro salino sottostante, ha portato all'esposizione di formazioni rocciose che vanno dall'età triassica a quella cretacea e, in particolare, di alcune delle principali formazioni serbatoio di tutto il Medio Oriente (Claringbould et al.,2013).

2.1 CONTESTO TETTONICO E GEODINAMICO DELL'OMAN

I processi tettonici che hanno interessato l'Oman (Fig. 2) sono molteplici e partono dal Precambriano (Hanna et al.,1990; Loodsveld et al.,1996; Blake et al.,2009):

- Precambriano (700-620 Ma anni fa): un'iniziale fase di accrescimento porta ad un'espansione del blocco arabo con isole e micro continenti che si aggregano lungo l'area orientale dando vita a delle zone di sutura tra il blocco africano e quello arabo.
- Vendiano e Infracambriano (620-608 Ma anni fa): il lungo periodo dominato da un contesto tettonico compressivo è seguito da un breve periodo dove si passa a un contesto tettonico estensionale e si ha la formazione di due zone di rifting in corrispondenza dell'attuale zona continentale orientale dell'Oman.

A partire da 600 Ma anni fa avviene la riattivazione del rifting ed è proprio durante queste 2 fasi distinte di rifting che si formano i bacini salini Abu Mahara e Ara dell'Oman continentale. A questa fase di rifting segue una fase epirogenica (fase di lenti movimenti verticali), che agisce diversamente nelle varie aree dell'Oman determinando la formazione di alti e bassi strut-

turali, e un processo di inclinazione regionale verso NO: questi eventi causano la formazione di zone di deposizione (bassi strutturali) nell'Oman centro-occidentale e zone di erosione (alti strutturali) nell'Oman settentrionale e orientale, in corrispondenza delle attuali coste.

- Permiano superiore (260 MI anni fa): nelle zone a Nord dell'attuale Oman inizia il vulcanismo legato all'apertura della Neo Tetide;
- Triassico superiore-Giurassico inferiore (200 MI anni fa): avviene il collasso dell'alto strutturale settentrionale che funge da spalla di rift e l'area attualmente occupata dalle montagne dell'Oman, a seguito dell'incremento del livello del mare correlato ai processi di disgregazione del Gondwana, viene sommersa. In questa fase i margini dell'Oman sono dei margini passivi e si ha lo sviluppo delle piattaforme carbonatiche;
- Giurassico superiore-Cretacico inferiore (150 MI anni fa): avviene una nuova fase di inclinazione regionale dell'Oman orientale verso Ovest, anche questo processo è correlato alla disgregazione in atto del Gondwana e, in particolare, al distaccamento di India e Madagascar dal blocco africano. Durante questo evento si ha la formazione della crosta oceanica di Masirah;
- Cretacico superiore (110 MI anni fa): in questa fase l'oceano Atlantico si sta aprendo e ciò provoca la progressiva chiusura della Tetide tra il blocco Africa-Arabia e il blocco euroasiatico. Questa compressione NE-SO nell'area porta ad una subduzione intra oceanica e alla conseguente espansione del retroarco dove inizia a formarsi quella che sarà l'ofiolite di Se-mail;

- Cretacico superiore (80 Ml anni fa): la tettonica compressiva in atto porta all'accumulo di sedimenti marini (Hawasina) e ofioliti (Semail) in corrispondenza della zona dove oggi sorge la catena montuosa dell'Oman.
Alla fine del Maastrichtiano lungo il margine settentrionale cessano i processi tettonici che invece continuano lungo il margine continentale orientale, questi processi tettonici ancora attivi sul margine orientale sono dovuti alla genesi del proto Oceano Indiano. Tra Campaniano e Maastrichtiano, infatti, si crea una frattura tra il micro continente delle Seychelles e l'India che porta ad un nuovo evento di vulcanismo (evento vulcanico del Deccan datato 64 Ml anni fa) e si sviluppa una nuova espansione oceanica (attuale dorsale di Carlsberg) che provoca una migrazione verso Nord con rotazione antioraria dell'India;
- Limite Cretacico-Terziario (66 Ml anni fa): i processi tettonici causati dalla tettonica dell'oceano Indiano portano all'obduzione delle ofioliti di Masi-rah sul continente arabo;
- Oligocene-Pliocene (33-5 Ml anni fa): durante l'orogenesi alpina si ha un ulteriore e definitivo sollevamento dei monti dell'Oman.

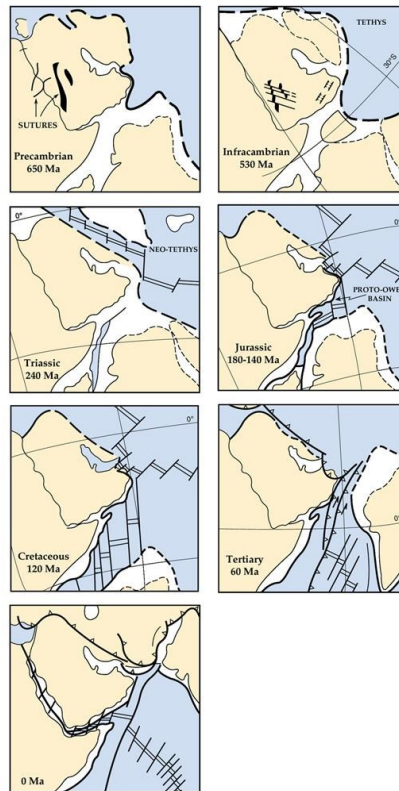


Figura 2- Loosveld et al. 1996: Schema dell'evoluzione tettonica del blocco arabo e dell'Oman.

2.2 CONTESTO TETTONICO DI JEBEL MADAR

Nel paragrafo precedente sono stati elencati tutti gli eventi tettonici che hanno plasmato l'Oman centro-settentrionale (Fig. 3) e, di questi, i processi più importanti che hanno contribuito alla formazione di Jebel Madar sono concentrati a partire dal Cretacico (Claringbould et al.,2013;) e sono i seguenti:

- Aptiano-Albiano: avviene una subduzione intra oceanica correlata alla chiusura della Tetide, dalla quale si originano le ofioliti di Semail tra il Turoniano inferiore e il Santoniano superiore che provoca la rottura basale del bordo settentrionale della piattaforma carbonatica;

- Santoniano-Campaniano: in questa fase avviene il sovrascorrimento del complesso di Hawasina e delle ofioliti di Semail sul continente arabo nella zona Nord-orientale e, in particolare, il complesso di Hawasina raggiunge l'area di Jebel Madar alla fine del Campaniano. Quest'evento provoca la formazione di faglie orientate NE-SO nell'area delle Adam Foothills;
- Maastrichtiano-Paleocene: l'Oman è interessato dall'obduzione delle ofioliti di Masirah sul margine orientale. L'obduzione avviene in direzione ONO ed è causata dal moto transpressivo tra la placca indiana e quella africana;
- Oligocene-Pliocene: avviene un sollevamento compreso tra i 500m e i 2000m dei monti dell'Oman a causa dell'orogenesi alpina in atto. A Sud-Ovest dei monti si forma un bacino di avampaese piegato, di cui fanno parte anche le Adam Foothills, e si ha la riattivazione del bacino salino di Ara a causa del carico litostatico delle montagne in formazione. La riattivazione del bacino salino causa una nuova risalita del sale che porta alla formazione dell'anticlinale a nucleo salino di Jebel Madar.

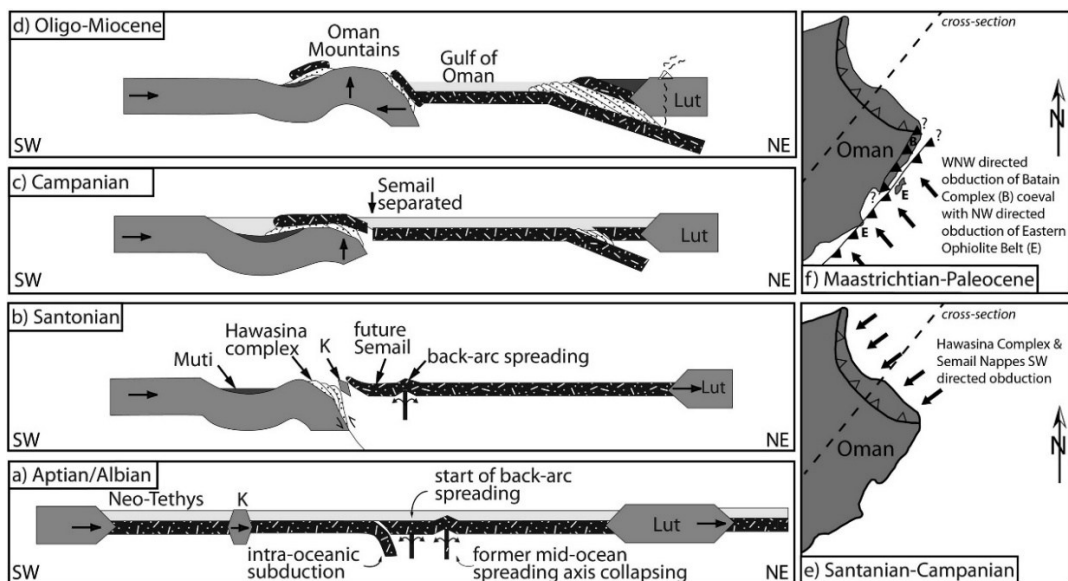


Figura 3- Claringbould et al. 2013: I principali processi tettonici cretacici che hanno portato alla formazione di Jebel Madar

La riattivazione del bacino salino durante l'orogenesi alpina ha provocato l'uplift delle formazioni sovrastanti fino a 500m al di sopra della pianura sottostante. La fratturazione che ha interessato la formazione del duomo e la successiva erosione dello stesso hanno portato all'esposizione di alcune formazioni rocciose, di età comprese tra il Triassico e il Cretacico, tra cui alcune delle più importanti formazioni serbatoio presenti anche in Kuwait, EAU, Arabia Saudita, Iran e Iraq.

2.3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E STRATIGRAFICO DI JEBEL MADAR

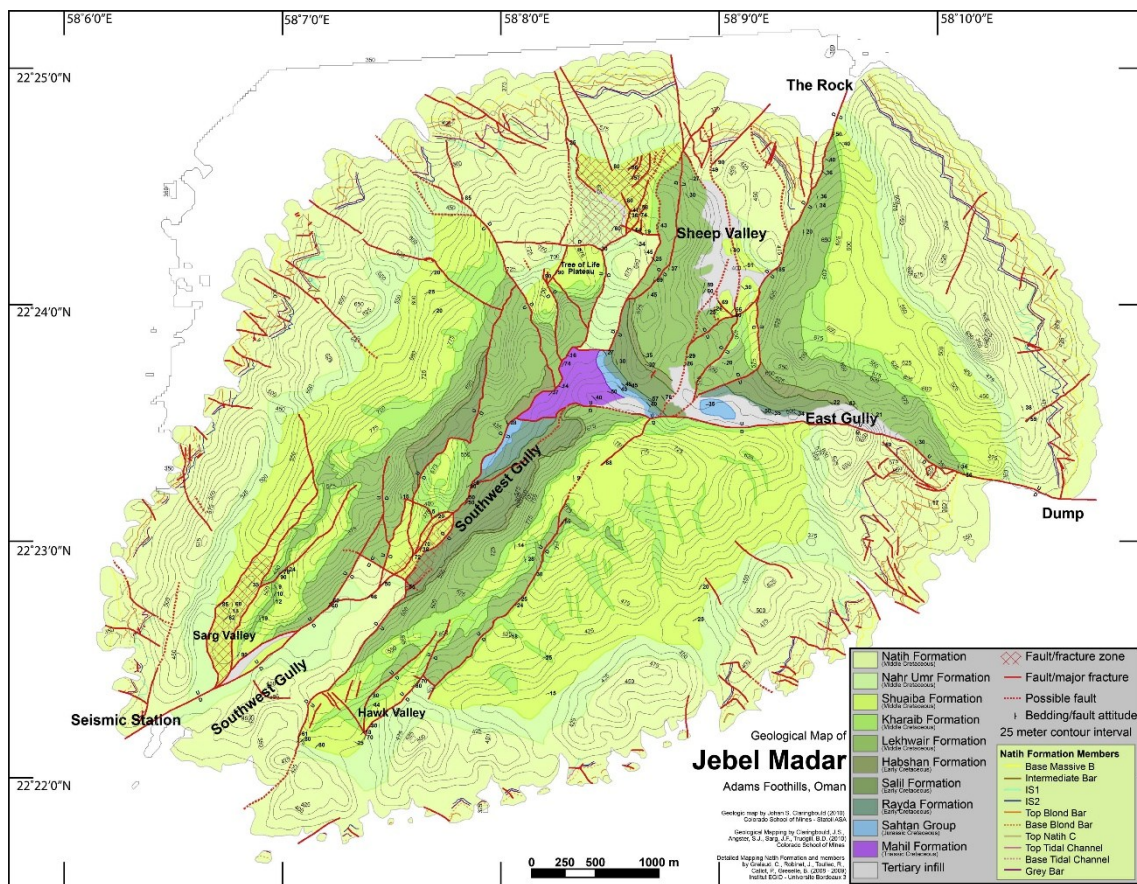


Figura 4- Claringbould et al. 2013: Mappa geologica di Jebel Madar

Le formazioni esposte a Jebel Madar (Fig. 5) spaziano dal Triassico al Cretacico (Jean-Pierre Masse et al.,1998; Frans S.P. van Buchem et al.,2002; Rousseau et al.,2005; Blake et al.,2009; Vandeginste et al.,2013; Vandeginste et al.,2017;) e sono:

GRUPPO AKHDAR

- Mahil (Triassico superiore): rappresenta la base stratigrafica esposta a Jebel Madar. Si individuano 3 litofacies differenti lungo lo spessore della formazione:
 1. Lower Mahil: carbonati basali di piattaforma depositati in mare poco profondo;
 2. Middle Mahil: spessi intervalli di dolomie costituite da wackestone, intervallati da strati di argilliti, e breccie di dissoluzione al tetto;
 3. Upper Mahil: strati spessi di dolomie dominati da grainstones e mudstone bioclastiche;

Queste facies sono tutte correlate ad un ambiente di piattaforma carbonatica poco profonda con eventi di esposizione subaerea;

GRUPPO SAHTAN

Si tratta di un gruppo stratigrafico del Giurassico ed è compreso tra le dolomie triassiche e i calcari cretacici del gruppo Kahmah.

Il gruppo è composto da due differenti formazioni:

1. Mafraq: è la formazione basale del gruppo ed è composta principalmente da arenarie e calcareniti con intercalazioni di siltiti e argilliti, tipiche di un ambiente prossimale;
2. Dhurma: Giace sulle arenarie di Mafraq e mostra il passaggio da un ambiente prossimale a una piattaforma carbonatica di mare poco profondo.

È composta da mudstone e wackestone lagunari alla base e da packstone e grainstone oolitici al tetto;

GRUPPO KAHMAH

- Rayda, Salil e Habshan (Cretacico inferiore): sono le formazioni più antiche del gruppo Kahmah e mostrano una variazione Shallowing upward (Vandeginste et al. 2017) del tipo di sedimenti: si passa dalle limestone di mare profondo della formazione Rayda alle mudstone (calcari scistosi e marne) di ambiente distale della formazione Salil e, infine, al tetto del gruppo troviamo grainstone ooidali e bioclastici e packstone della formazione Habshan;
- Lekhwair (Cretacico inferiore-medio): successione carbonatica del Gruppo Kahmah, costituita da facies più argillose in basso e wackestone, packstone e grainstone bioclastico negli strati superiori (trend cleaner upward), depositata in ambiente di intra piattaforma carbonatica ristretta;
- Kharaib (Cretacico medio): importante successione carbonatica del Gruppo Kahmah, costituita da wackestone e packstone depositati su una rampa carbonatica a basso angolo, che giace sulla formazione Lekhwair;
- Shuaiba (Cretacico medio): è un'importante formazione serbatoio del gruppo Kahmah composta da 2 unità principali:
 1. Unità inferiore a Bacinella-Lithocodium depositata in ambiente di intrapiattaforma;
 2. Unità superiore a rudiste con depositi più argillosi;

GRUPPO WASIA

- Nahr Umr (Cretacico superiore): successione carbonatica con importanti intercalazioni argillose del Gruppo Wasia che sigilla la formazione serbatoio Shuaiba.

A Jebel Madar ha uno spessore di 4m ed è composta da 3 facies principali:

1. Orbitolina Wackestone;
2. Bioclastic Mudstone;
3. Orbitolina Wackestone-Packstone;

- Natih (Cretacico superiore): è la più importante successione carbonatica del Gruppo Wasia e si tratta di una delle più importanti formazioni serbatoio di tutto il Medio Oriente. È composta da 7 facies carbonatiche di ambiente di intra piattaforma (A-G) ed 1 una facies costiera silicoclastica che, a Jebel Madar, sovrasta la formazione. La facies serbatoio più importante è la E, composta grainstone/packstone bioclastici sabbiosi.

Age (Ma)	Period/Epoch	Group	Lithology	Formation	Thickness (m)	
89	Cretaceous	Wasia	[Shallow water limestone]	Natih	175	
94						Turonian
100	Cenomanian					
112	Albian		[Shale]	Nahr Umr	200	
125	Cretaceous	Kahmah	[Shallow water limestone]	Shuaiba	75	
130						Aptian
134						Barremian
140						Hauterivian
146						Valanginian
146	Berriasian		[Deep water limestone]	Lekhwaib Habshan Salil Rayda	400	
200	Jurassic	Sahtan	[Shallow water limestone]	Dhruma Mafraq	150	
251	Triassic	Akhdar	[Dolomite]	Mahil Saiq	200	

[Shallow water limestone]	Shallow water limestone	[Dolomite]	Dolomite	[Shale]	Shale
[Deep water limestone]	Deep water limestone	[Marl]	Marl	[Sandstone]	Sandstone
[Unconformity]	Unconformity				

Figura 5- Claringbould et al. 2013): Colonna stratigrafica delle formazioni affioranti a Jebel Madar.

3. METODOLOGIE

Il lavoro di tesi si è basato sull'analisi dei Digital Outcrop Models (DOMs) di Jebel Madar. Questi sono stati acquisiti, sviluppati e analizzati in un processo diviso in fasi distinte:

1. Acquisizione delle fotografie sul campo tramite la tecnica della fotogrammetria da drone e elaborazione dei DOMs in laboratorio tramite l'utilizzo del software Agisoft Metashape (attività non svolta in questo lavoro di tesi, ma presentata per completezza).
2. Analisi dei DOMs svolte in laboratorio sfruttando software dedicati come CloudCompare e QGIS.

3.1 FOTOGRAMMETRIA DA DRONE

Per generare i modelli digitali 3D degli affioramenti è stata effettuata una spedizione per l'acquisizione dei dataset fotogrammetrici in loco.

L'acquisizione dei dati utili per ricostruire i DOMs è avvenuta adottando l'approccio fotogrammetrico da drone utilizzando due droni DJI Phantom 4Pro.

I voli sono stati eseguiti sia manualmente che in modo automatico (cioè pianificando i voli). I voli effettuati sia manualmente che automaticamente sono stati svolti sulla base delle caratteristiche e delle dimensioni dell'affioramento di cui si vuole creare il DOM, prestando attenzione alle condizioni di luce presenti (cercando di avere quante meno ombre possibili) e mantenendo la velocità di volo ottimale e costante per preservare la buona risoluzione delle fotografie scattate.

Questo ha permesso di acquisire più di 12000 fotografie coprendo un'area di circa 6 km² a differenti risoluzioni: 5mm per i voli manuali ad alta risoluzione e 3 cm

per i voli automatici. Nell'eseguire e/o programmare entrambi i voli si è cercato di mantenere una sovrapposizione delle immagini maggiore all'80%.

In seguito alla fase di acquisizione dei dati, si è proceduto con la fase di elaborazione dei DOMs sfruttando dei software basati sul principio degli algoritmi Structure from Motion (SfM) e Multi-view stereo (Birch et al.,2006; Tavani et al.,2024).

In questo caso è stato utilizzato il software "Agisoft Metashape" che, tramite l'analisi fotogrammetrica delle immagini scattate, riconosce i punti omologhi rappresentati in diverse fotografie e stima le distanze e le posizioni dei punti noti rispetto ai punti di scatto delle fotografie e genera una nuvola di punti che può essere utilizzata per creare una mesh (superficie continua del modello). Infine, il software proietta le immagini scattate sulla nuvola di punti generata così da avere una texture che riveste il modello digitale con lo scopo di ottenere come risultato un modello digitale realistico e coerente alla realtà.

3.2 MAPPATURA DISCONTINUITÀ

CloudCompare è un software open-source che permette di lavorare con le nuvole di punti e mesh 3D, e quindi con i DOMs, consentendo di visualizzarli, analizzarli e di estrarne i dati a seguito dello svolgimento delle analisi (Fig. 6) (Menegoni et al., 2024).

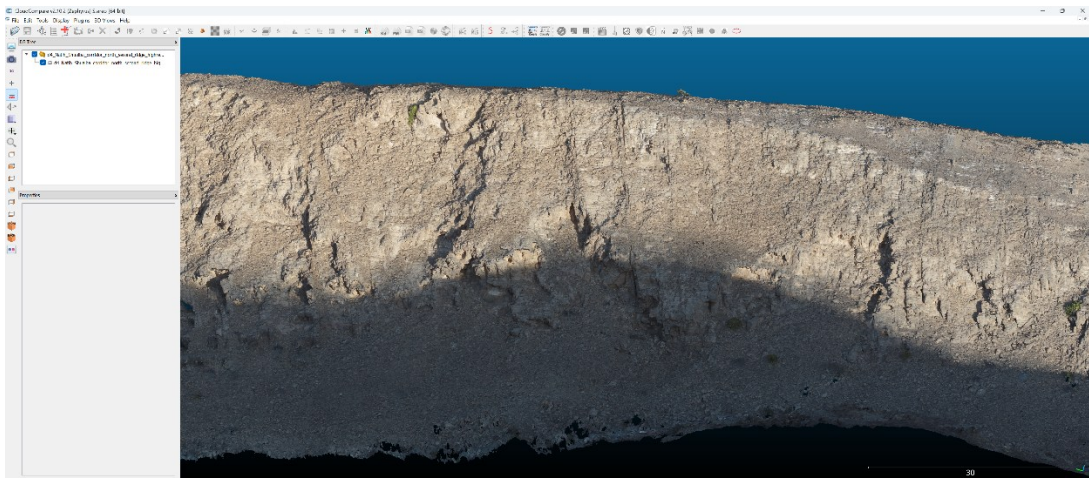


Figura 6: Interfaccia di CloudCompare con un DOM di Jebel Madar caricato.

CloudCompare permette di svolgere una vasta gamma di azioni sui modelli digitali:

1. Visualizzazione dei modelli
2. Taglio di una porzione del modello
3. Analisi geometriche
4. Analisi geomeccaniche
5. Estrazione dei dati

Lo studio condotto nell'ambito della tesi ha riguardato un'analisi geomeccanica di vari affioramenti presenti nella zona di Jebel Madar.

I principali strumenti utilizzati sono stati:

- Trace a polyline by point picking
- Compass → Trace Tool

➤ TRACE A POLYLINE BY POINT PICKING

È lo strumento che permette di tracciare manualmente le discontinuità presenti sull'affioramento (Fig. 7a), il risultato che si ottiene è una polilinea 3D che segue la discontinuità (superficie di strato, frattura, faglia o piega) per tutta la sua estensione (Fig. 7b).

Selezionando la polilinea tracciata e attraverso il comando “Tools → Fit → Plane” (Fig. 8a) viene generato un piano che racchiude la polilinea (Fig. 8b) ottenendo così il piano di discontinuità e la sua orientazione (direzione di immersione/inclinazione);

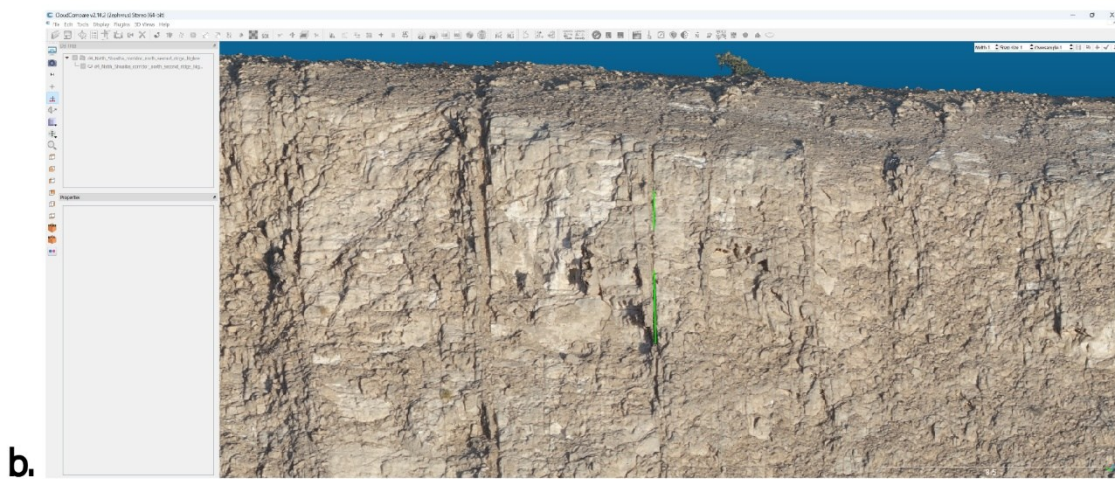
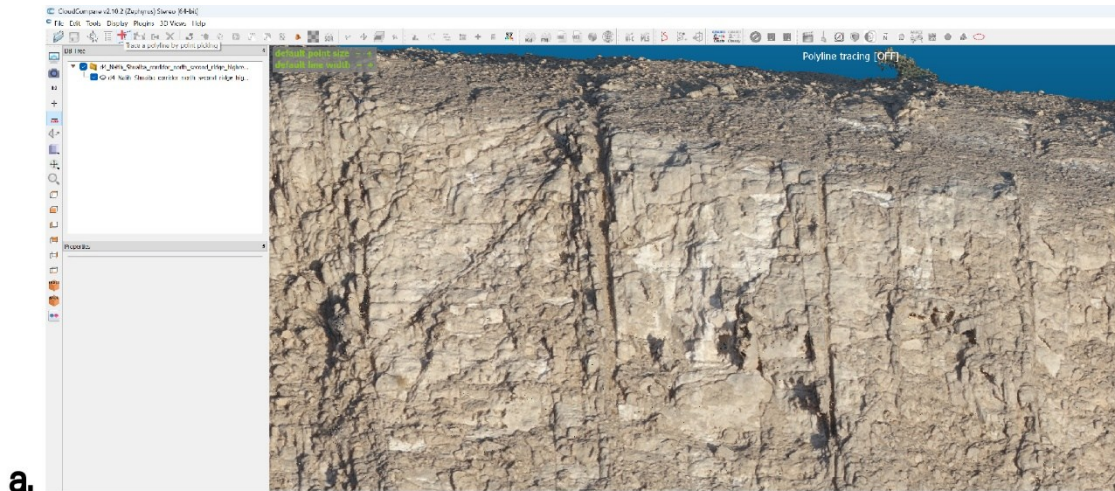


Figura 7: a) Strumento “trace a polyline by point picking” di CloudCompare. b) Traccia della polilinea ottenuta tramite lo strumento apposito.

➤ COMPASS → TRACE TOOL

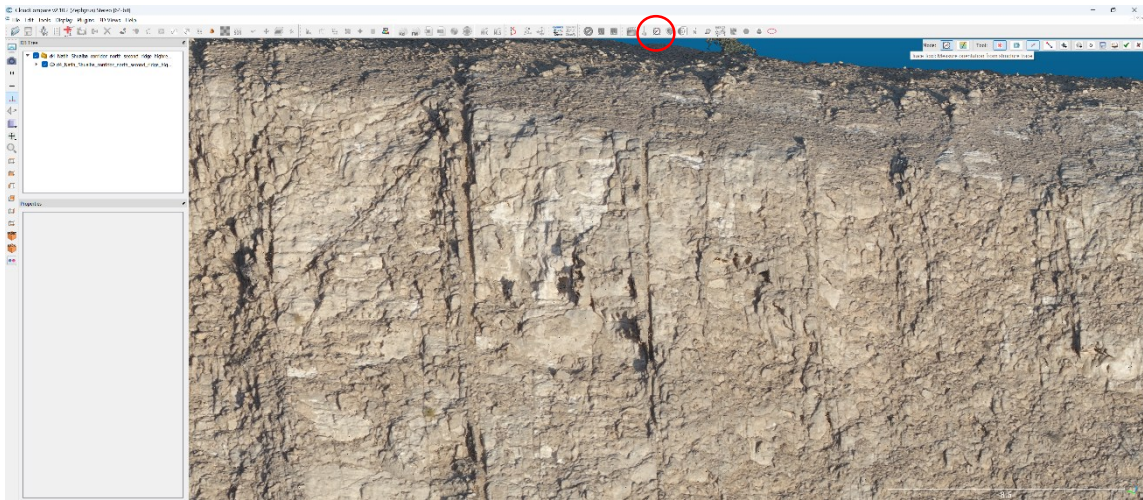


Figura 9: Strumento "Compass" di CloudCompare.

Questo è un metodo semi-automatico per tracciare una polilinea che segue la traccia della discontinuità (Fig. 9). In questo caso si scelgono alcuni punti della discontinuità e il software, in automatico, costruisce una polilinea tra i punti selezionati seguendo la discontinuità (Fig. 10).

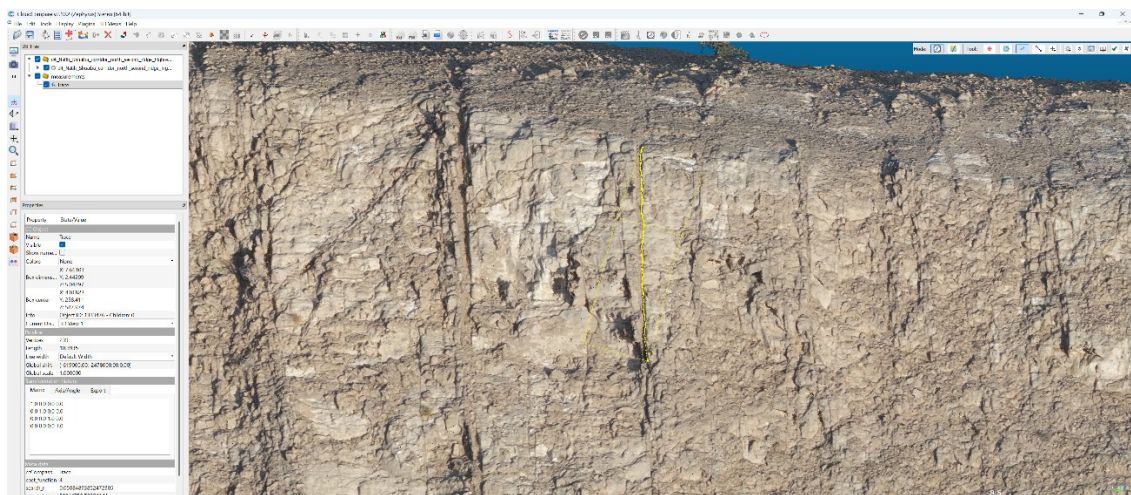


Figura 10: polilinea tracciata in automatico dal software tramite lo strumento "Compass → Trace tool".

Oltre a differenziarsi per il meccanismo con cui viene tracciata la polilinea che segue una traccia di discontinuità, questo comando differisce anche per il metodo di salvataggio della polilinea: in questo caso, prima di procedere con la generazione del piano, è necessario salvare la polilinea in formato Dxf per poi reimportare la polilinea nel software e infine procedere analogamente con quanto fatto con il comando “Trace a polyline by picking point” per generare il piano della discontinuità. Questo è il procedimento corretto per salvare sia il piano che la traccia della discontinuità (Fig. 11).

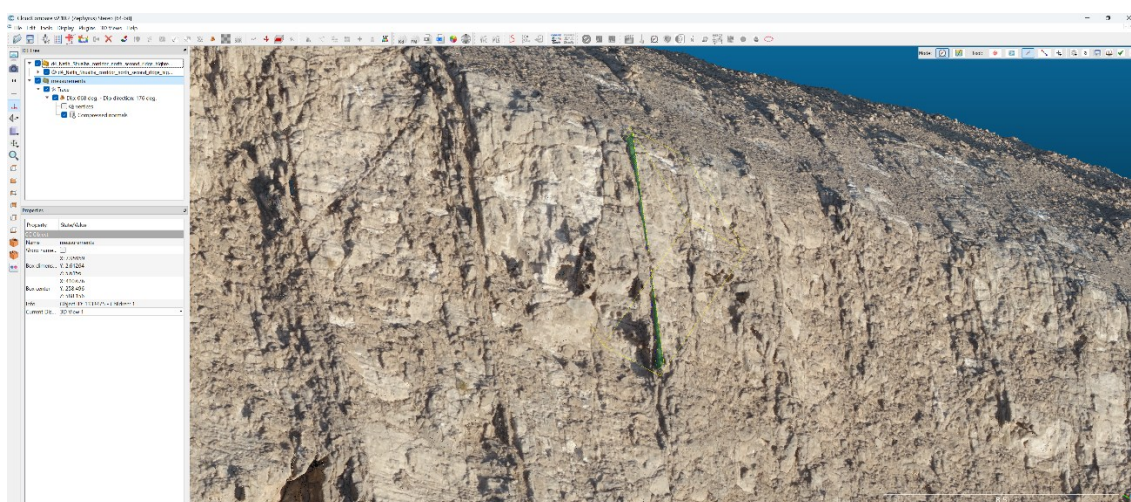


Figura 11: Piano fittato a partire dalla polilinea tracciata con lo strumento “Compass”.

Una volta mappate tutte le discontinuità ed ottenuti tutti i relativi piani, si esportano i dati relativi ai piani di discontinuità selezionando tutti i piani con un click con il tasto destro del mouse sulla cartella che contiene sia le tracce che i piani delle discontinuità e procedendo con il comando → Select children by type and/or name → Plane” e attraverso “Tools → Batch export → Export plane info”.

Il file esportato è un file di testo in formato csv che contiene tutte le informazioni dei vari piani di discontinuità: numero, dimensioni del piano, coordinate ed orientazione.

A questo punto per l'analisi dei dati esportati abbiamo utilizzato un software che permette di lavorare con i dati dei piani all'interno di uno stereonet: Dips.

3.3 ANALISI DELLE ORIENTAZIONI DELLE DISCONTINUITÀ

Per l'analisi delle orientazioni delle discontinuità mappate è stato utilizzato il software Dips. Questo è un software applicativo di Rocscience che permette di effettuare ed analizzare proiezioni stereografiche (comunemente chiamate stereoplot).

Dopo aver importato i dati relativi ai piani di discontinuità all'interno di Dips, abbiamo attivato la visualizzazione della densità dei poli e disattivato la visualizzazione delle tracce ciclografiche dei piani per avere una visione più chiara delle discontinuità dell'affioramento.

Con il comando “Set → Set from Cluster Analysis” sono state circoscritte le aree con maggior densità di poli (Fig. 12a) e il software, in automatico, ha definito il cluster di discontinuità con simile orientazione e calcolato la traccia ciclografica di riferimento. Questi cluster e ciclografiche, generalmente riferiti come “set di discontinuità” e “piani medi del set”, sono poi stati tracciati sullo stereoplot creando una proiezione chiara e leggibile dei principali set di discontinuità dell'affioramento (Fig. 12b).

Per ogni affioramento sono stati generati tre stereoplot: uno contenente il piano medio della stratificazione, uno contenente i piani medi dei principali set di frattura e uno contenente sia i piani medi della stratificazione che dei set di frattura.

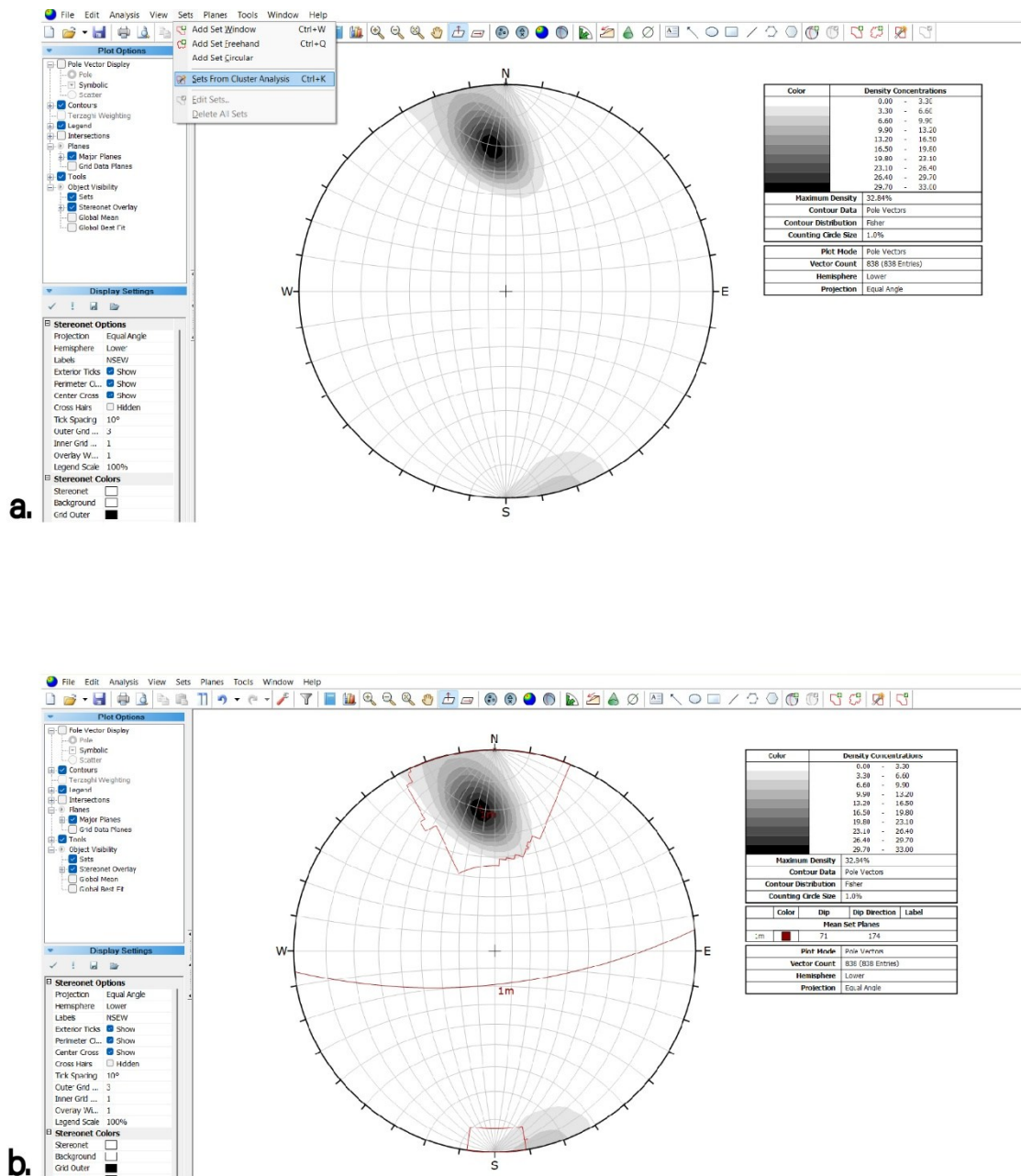


Figura 12: Interfaccia del software DIPS. a) Interfaccia del software DIPS con lo stereoplot della densità dei poli dei piani di discontinuità di un affioramento. b) Stereoplot del piano di riferimento della principale famiglia di discontinuità dell'affioramento.

Parallelamente all'analisi delle orientazioni delle discontinuità è stato eseguito anche uno studio di retrodeformazione. Questa consiste nel riportare la stratificazione

orizzontale, e quindi con un'inclinazione di 0° , per valutare come la possibile rotazione dovuta alle deformazioni (nel nostro caso la piega anticlinale a duomo) abbia cambiato la giacitura dei set di frattura. Questo processo è fondamentale per capire la possibile genesi e il timing dei set di frattura e, quindi, se possono essersi generati prima, durante o dopo la formazione della piega anticlinale a duomo.

Per retrodeformare i piani di discontinuità è stato utilizzato lo strumento “Analysis → Rotate data”: utilizzando questo strumento si apre una finestra che permette di impostare i parametri di rotazione da applicare alla stratificazione scegliendo l'asse di rotazione e di quanti gradi e in che verso farlo rotare per riportarla orizzontale.

Nella casella “Trend” si inserisce la direzione del piano della stratificazione che sarà l'asse di rotazione; nella casella “Plunge” si inserisce 0 in quanto il plunge è l'angolo tra l'immersione di un piano e il piano orizzontale e, infine, nella casella “angle of rotation” si inserisce il valore di inclinazione della stratificazione.

3.4 MAPPATURA 2D DELLE DISCONTINUITÀ

Oltre all'approccio tridimensionale, il lavoro di tesi ha incluso anche un'analisi della fratturazione condotta sul software QGis utilizzando ortofoto ad alta risoluzione di una porzione di Jebel Madar (Fig. 13).

L'area studiata corrisponde ad una valle orientata NO-SE, situata nella zona nord-orientale di Jebel Madar, che comprende i siti C, G e H ed è stata scelta per la presenza delle formazioni Natih e Shuaiba, le principali unità serbatoio affioranti.

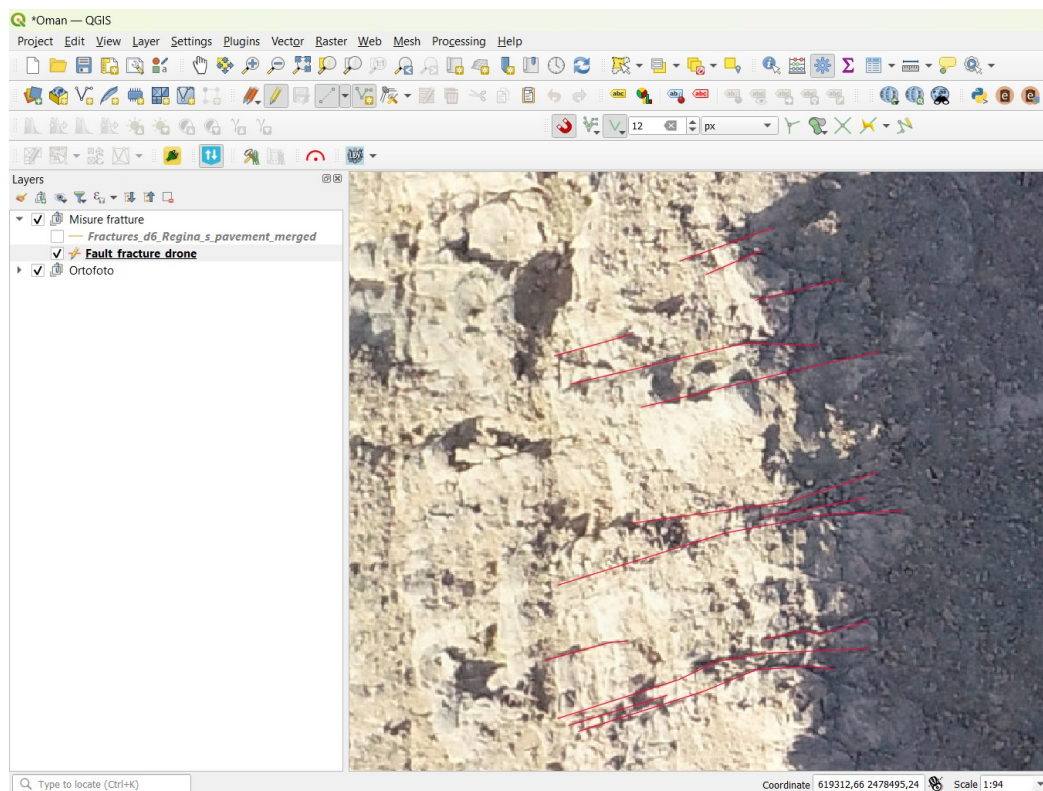


Figura 13: Fase di mappatura 2D della fratturazione svolta sul software QGIS.

Il lavoro svolto su QGIS è iniziato con una prima fase di mappatura delle tracce di frattura sulle ortofoto, seguito dall'analisi delle direzioni preferenziali e dell'intensità di fratturazione mediante specifici plugin che il software offre. Per lo studio delle direzioni di fratturazione è stato utilizzato il plugin “Line Direction Histogram” che permette di generare diagrammi a rosa della distribuzione delle fratture in funzione della loro direzione; tali grafici sono stati confrontati con i risultati delle analisi geomeccaniche tridimensionali svolte sui DOMs della stessa area al fine di verificare la coerenza dei risultati tra i due approcci.

L'intensità di fratturazione è stata invece valutata tramite il plugin “Line density” che consente di calcolare mappe di densità a partire dalle tracce delle fratture fornendo così un quadro più dettagliato della fratturazione nelle formazioni serbatoio Natih e Shuaiba.

4. RISULTATI

Le analisi 2D e 3D dei DOMs hanno avuto come finalità quella di ottenere una visione ampia e completa dei principali set di discontinuità presenti nelle rocce affioranti di Jebel Madar, anche in relazione alla litologia e alla posizione strutturale rispetto alla piega.

Come già detto, oltre ad evidenziare i principali set di discontinuità, è stata eseguita la retrodeformazione dei dati con lo scopo di ricostruire il contesto geologico dell'area prima dell'avvento delle deformazioni occorse con la formazione della piega anticlinale a duomo durante l'orogenesi alpina.

In questo capitolo verranno presentati sia i principali risultati delle analisi geomeccaniche svolte in 3D, come il riconoscimento e la definizione dei principali set di discontinuità su stereoplot, che i risultati derivanti dal lavoro in 2D come i diagrammi a rosa relativi alla direzione dei set di frattura e le mappe di intensità di fratturazione.

4.1 PRINCIPALI SET DI DISCONTINUITÀ

L'analisi geomeccanica svolta durante il lavoro di tesi ha interessato 14 DOMs, provenienti da varie aree del Jebel Madar, per un totale di circa 7050 discontinuità mappate.

Lo studio geomeccanico è stato condotto in 2 fasi distinte: una prima fase dedicata alla mappatura delle discontinuità tramite il software CloudCompare e una seconda fase di analisi dell'orientazione dei piani di discontinuità tramite il software Dips.

Tale approccio ha avuto come scopo quello di identificare i principali set di discontinuità e la loro giacitura per ciascun affioramento: dal software Dips, per ogni

sito, è stato estratto uno stereoplot raffigurante la stratificazione ed i principali set di fratturazione.

La Figura 14 mostra una mappa di Jebel Madar e della posizione degli affioramenti studiati.

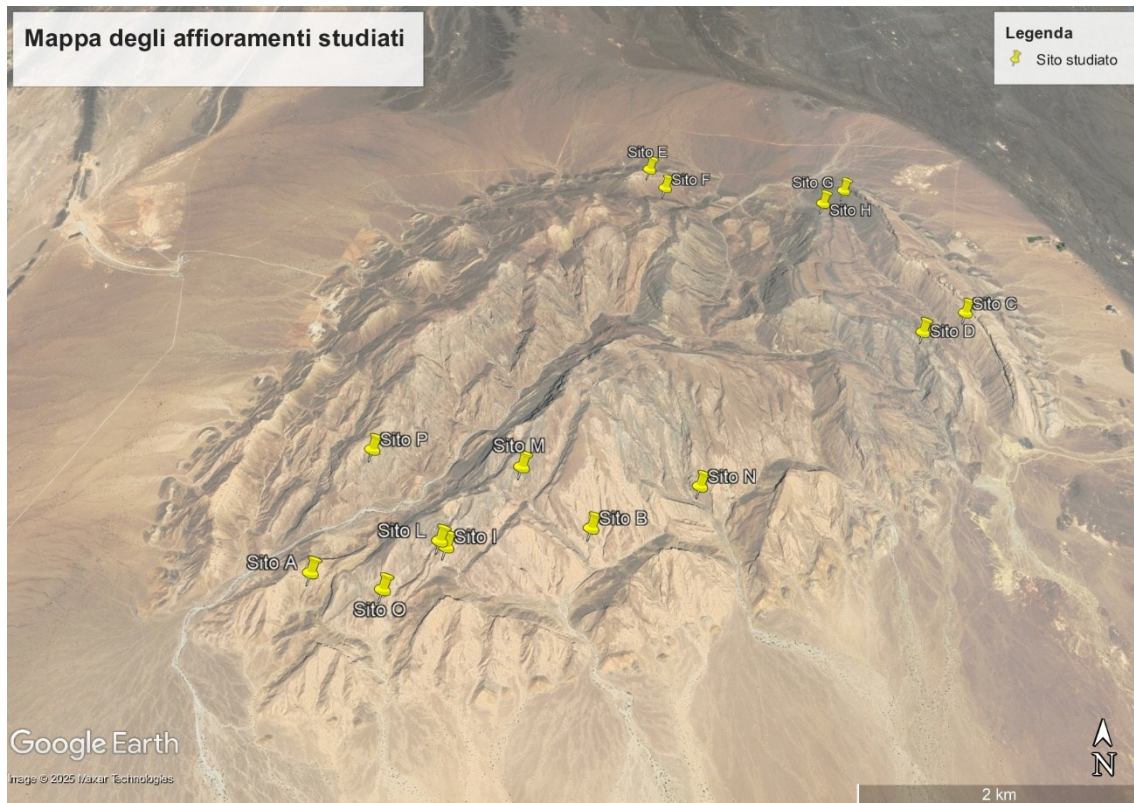


Figura 14: Mappa degli affioramenti di Jebel Madar studiati.

Di seguito sono riportati i principali risultati dell'analisi geomeccanica eseguita, in particolare sono riportate posizione, coordinate e discontinuità rilevate per ogni sito studiato:

- **SITO A**

NOME DEL MODELLO: d1_Horst_circus_highres_translated

POSIZIONE GEOGRAFICA: zona Sud-Ovest di Jebel Madar

COORDINATE: 22°22'17.70"N 58°6'58.39"E

N° DISCONTINUITÀ MAPPATE: 316

FORMAZIONE: Natih/Shuaiba

OSSERVAZIONI: stratificazione con giacitura 197°N 9° e due set di frattura con giaciture 298°N 77° e 40°N 73°.

- **SITO B**

NOME DEL MODELLO: d3_Curiosity_circus_cliff_west_highres_translated

POSIZIONE GEOGRAFICA: zona Sud di Jebel Madar;

COORDINATE: 22°22'30.89"N 58°8'14.45"E

N° DISCONTINUITÀ MAPPATE: 1431

FORMAZIONE: Shuaiba

OSSERVAZIONI: giacitura di 144°N 23° per la stratificazione; i set di fratturazione sono due, perpendicolari tra loro, con giaciture 357°N 72° e 91°N 73°.

- **SITO C**

NOME DEL MODELLO: d3_Natih_Shuaiba_corridor_south_highres_translated

POSIZIONE GEOGRAFICA: zona Est di Jebel Madar

COORDINATE: 22°23'41.43"N 58°10'11.57"E

N° DISCONTINUITÀ MAPPATE: 1190

FORMAZIONE: Natih

OSSERVAZIONI: stratificazione con giacitura $75^{\circ}\text{N } 29^{\circ}$ e due set di fratturazione, perpendicolari tra loro, con giacitura $341^{\circ}\text{N } 84^{\circ}$ $245^{\circ}\text{N } 87^{\circ}$.

- **SITO D**

NOME DEL MODELLO: d3_pavement_Hawar_formation_highres_translated

POSIZIONE GEOGRAFICA: zona Est di Jebel Madar

COORDINATE: $22^{\circ}23'33.20''\text{N } 58^{\circ}9'56.57''\text{E}$

N° DISCONTINUITÀ MAPPATE: 212

FORMAZIONE: Hawar

OSSERVAZIONI: è stata riscontrata una stratificazione con giacitura $70^{\circ}\text{N } 31^{\circ}$, la fratturazione invece presenta due set principali, perpendicolari tra di loro, con giacitura $165^{\circ}\text{N } 84^{\circ}$ e $261^{\circ}\text{N } 76^{\circ}$.

- **SITO E**

NOME DEL MODELLO: d4_Fault_cliff_highres_1_translated

POSIZIONE GEOGRAFICA: zona Nord di Jebel Madar

COORDINATE: $22^{\circ}24'33.99''\text{N } 58^{\circ}8'39.61''\text{E}$

N° DISCONTINUITÀ MAPPATE: 221

FORMAZIONE: Natih

OSSERVAZIONI: giacitura stratificazione $359^{\circ}\text{N } 35^{\circ}$; la giacitura del principale set di fratturazione che è $256^{\circ}\text{N } 83^{\circ}$.

- **SITO F**

NOME DEL MODELLO: d4_Fault_cliff_highres_2_translated

POSIZIONE GEOGRAFICA: zona Nord di Jebel Madar

COORDINATE: 22°24'39.20"N 58°8'34.31"E

N° DISCONTINUITÀ MAPPATE: 297

FORMAZIONE: Shuaiba

OSSERVAZIONI: la stratificazione è rappresentata da tre piani di riferimento con giaciture 52°N 25°, 6°N 27° e 345°N 42°. Il piano dominante, con il maggior numero di misurazioni, è quello a 6°N 27°.

L'analisi della fratturazione invece mostra due set perpendicolari tra loro di giacitura 237°N 80° e 148°N 59°.

- **SITO G**

NOME DEL MODELLO: d4_Natih_Shuaiba_corridor_north_highres_translated

POSIZIONE GEOGRAFICA: zona Nord-Est di Jebel Madar

COORDINATE: 22°24'36.40"N 58°9'41.83"E

N° DISCONTINUITÀ MAPPATE: 220

FORMAZIONE: Natih

OSSERVAZIONI: la stratificazione ha giacitura 48°N 38° ed è presente un set di frattura con direzione 228°N (NE-SO) sub-verticale con giacitura 138°N 89°.

- **SITO H**

NOME DEL MODELLO:

d4_Natih_Shuaiba_corridor_north_second_ridge_highres_translated

POSIZIONE GEOGRAFICA: zona Nord-Est di Jebel Madar

COORDINATE: 22°24'23.80"N 58°9'31.99"E

N° DISCONTINUITÀ MAPPATE: 892

FORMAZIONE: Shuaiba

OSSERVAZIONI: la stratificazione ha giacitura $64^{\circ}\text{N } 33^{\circ}$ e il set di fratturazione ha giacitura $174^{\circ}\text{N } 71^{\circ}$.

- **SITO I**

NOME DEL MODELLO: d5_graben_highres_merged_translated_cliff

POSIZIONE GEOGRAFICA: zona Sud-Ovest di Jebel Madar

COORDINATE: $22^{\circ}22'22.91''\text{N } 58^{\circ}7'35.14''\text{E}$

N° DISCONTINUITÀ MAPPATE: 201

FORMAZIONE: Shuaiba

OSSERVAZIONI: la stratificazione ha giacitura $170^{\circ}\text{N } 18^{\circ}$ ed è presente un solo set di fratturazione con giacitura $38^{\circ}\text{N } 70^{\circ}$.

- **SITO L**

NOME DEL MODELLO: d5_graben_highres_merged_translated_pavement

POSIZIONE GEOGRAFICA: zona Sud-Ovest di Jebel Madar

COORDINATE: $22^{\circ}22'24.19''\text{N } 58^{\circ}7'33.39''\text{E}$

N° DISCONTINUITÀ MAPPATE: 339

FORMAZIONE: Shuaiba

OSSERVAZIONI: il sito consiste in un *pavement*, ovvero pavimento roccioso, con stratificazione di giacitura $173^{\circ}\text{N } 19^{\circ}$ che, come si può notare, è analoga a quella del sito precedente (Sito I): i due siti infatti sono adiacenti e corrispondono rispettivamente ad una parete rocciosa e al *pavement* di un affioramento. La fratturazione invece presenta due set con giacitura $317^{\circ}\text{N } 76^{\circ}$ e $357^{\circ}\text{N } 32^{\circ}$.

- **SITO M**

NOME DEL MODELLO: d5_Kharaib_circus_highres_translated

POSIZIONE GEOGRAFICA: zona Sud-Est di Jebel Madar

COORDINATE: 22°22'42.51"N 58°7'55.03"E

N° DISCONTINUITÀ MAPPATE: 631

FORMAZIONE: Kharaib

OSSERVAZIONI: quest'area presenta una stratificazione con giacitura 170°N 19° e una forte fratturazione. Sono stati rilevati tre set di fratturazione principali: 259°N 86°, 39°N 76° e 320°N 82°.

- **SITO N**

NOME DEL MODELLO: d6_stratigraphic_section_west_manual_highres_translated

POSIZIONE GEOGRAFICA: zona Sud di Jebel Madar

COORDINATE: 22°22'45.11"N 58°8'45.79"E

N° DISCONTINUITÀ MAPPATE: 463

FORMAZIONE: Shuaiba

OSSERVAZIONI: in questo sito è stata rilevata una stratificazione con giacitura 141°N 23° mentre la fratturazione ha giacitura 333°N 73°.

- **SITO O**

NOME DEL MODELLO: d7_Fault_north_camp_highres_translated

POSIZIONE GEOGRAFICA: zona Sud-Ovest di Jebel Madar

COORDINATE: 22°22'13.33"N 58°7'18.43"E

N° DISCONTINUITÀ MAPPATE: 422

FORMAZIONE: Kharaib/Shuaiba

OSSERVAZIONI: l'area studiata consiste in una valle dove sono state mappate le discontinuità sia sulle pareti laterali che sul pavimento roccioso del fondo valle. Dall'analisi geomeccanica è emersa una stratificazione che ha giacitura $192^{\circ}\text{N } 19^{\circ}$ e due set di fratturazione con giacitura $284^{\circ}\text{N } 74^{\circ}$ e $39^{\circ}\text{N } 71^{\circ}$.

- **SITO P**

NOME DEL MODELLO: d7_main_graben_fault_entrance_translated

POSIZIONE GEOGRAFICA: zona Sud-Ovest di Jebel Madar

COORDINATE: $22^{\circ}22'50.70''\text{N } 58^{\circ}7'11.97''\text{E}$

N° DISCONTINUITÀ MAPPATE: 249

FORMAZIONE: Lekhwair/Kharaib/Shuaiba

OSSERVAZIONI: in quest'ultima area studiata la stratificazione ha una giacitura $213^{\circ}\text{N } 12^{\circ}$ ed è presente un solo set di fratturazione sub-verticale con giacitura $44^{\circ}\text{N } 88^{\circ}$.

Nella Tabella che segue (Tab. 1) è rappresentato un riepilogo del numero di discontinuità mappate, della giacitura della stratificazione e dei principali set di fratturazione per ogni sito. Gli stereoplot, elaborati tramite il software DIPS, contenenti i principali set di discontinuità per ogni sito sono riportati nelle Figure 15,16 e 17.

Tabella 1: Tabella riepilogativa dello studio geomeccanico eseguito sui 14 affioramenti di Jebel Madar. Per ogni sito sono riportate: il numero di discontinuità mappate, la formazione affiorante ed i principali set di discontinuità riscontrati.

	N° Discontinuità	Formazione	Giacitura Strat. S0	Giacitura fratt. F1	Giacitura fratt. F2	Giacitura fratt. F3
Sito A	316	Natih/Shuaiba	197°N 9°	298°N 77°	40°N 73°	-
Sito B	1431	Shuaiba	144°N 23°	357°N 72°	90°N 73°	-
Sito C	1190	Natih	75°N 29°	341°N 84°	245°N 87°	-
Sito D	212	Hawar	70°N 31°	165°N 84°	261°N 76°	-
Sito E	221	Natih	359°N 35°	256°N 83°	-	-
Sito F	297	Shuaiba	6°N 27°	237°N 80°	148°N 59°	-
Sito G	220	Natih	48°N 38°	138°N 89°	-	-
Sito H	892	Shuaiba	64°N 33°	174°N 71°	-	-
Sito I	201	Shuaiba	170°N 18°	38°N 70°	-	-
Sito L	339	Shuaiba	173°N 19°	317°N 76°	-	-
Sito M	631	Kharaib	170°N 19°	259°N 86°	39°N 76°	320°N 82°
Sito N	463	Shuaiba	141°N 23°	333°N 73°	-	-
Sito O	422	Kharaib/ Shuaiba	192°N 19°	284°N 74°	39°N 71°	-
Sito P	249	Lekhwair/ Kha- raib/Shuaiba	213°N 12°	44°N 88°	-	-

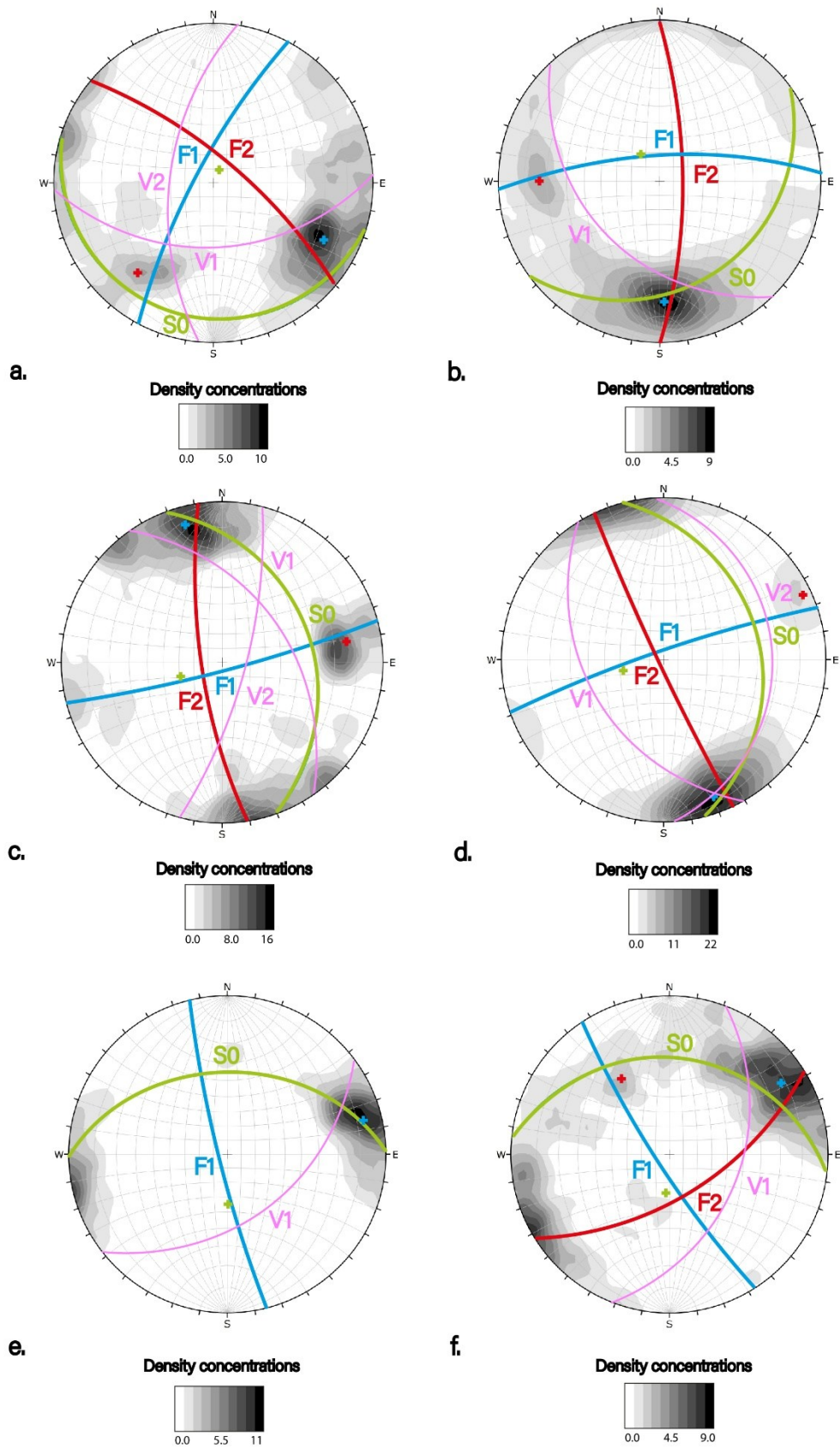


Figura 15: Stereoplots estratti dal software DIPS che mostrano le principali famiglie di discontinuità e le giaciture dei versanti dei siti A (fig. 15a), B (Fig. 15b), C (Fig. 15c), D (Fig. 15d), E (Fig. 15e) ed F (Fig. 15f).

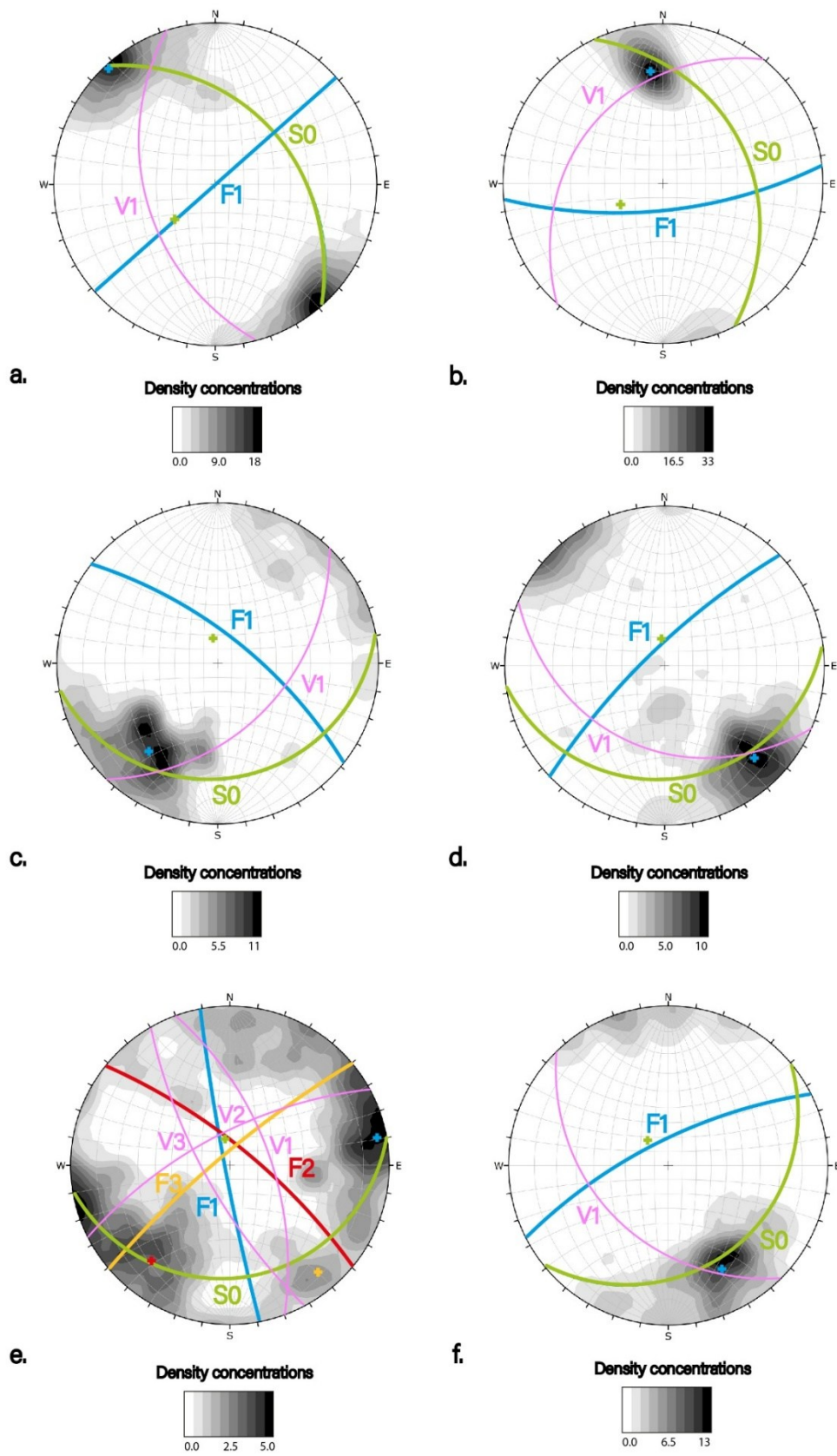


Figura 16: Stereoplot estratti dal software DIPS che mostrano le principali famiglie di discontinuità e le giaciture dei versanti dei siti G (fig. 16a), H (Fig. 16b), I (Fig. 16c), L (Fig. 16d), M (Fig. 16e) ed N (Fig. 16f).

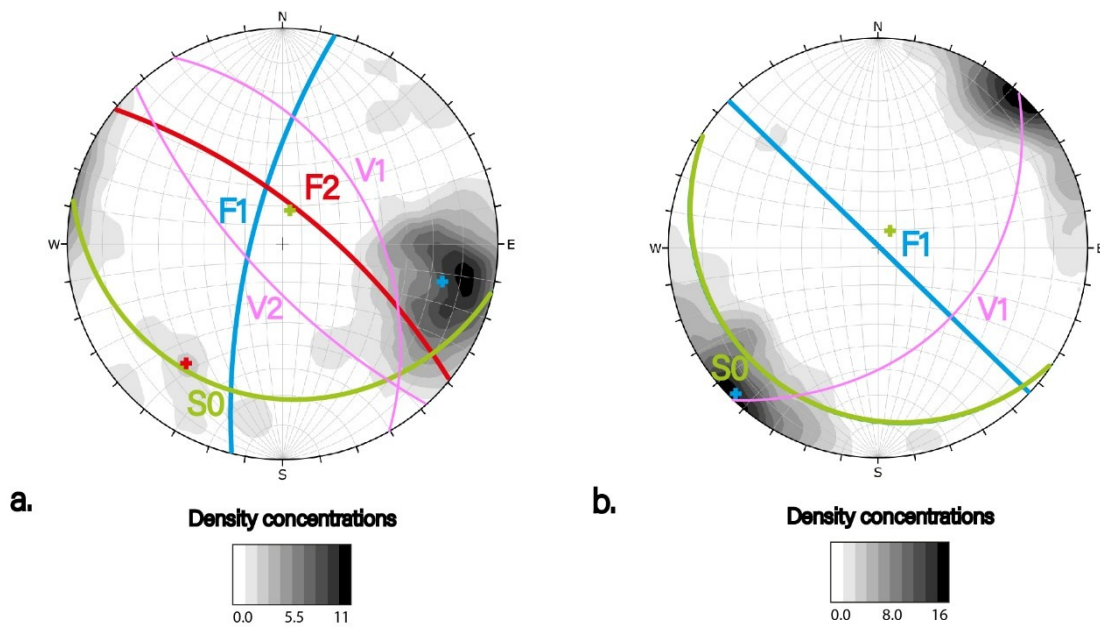


Figura 17: Stereoplot estratti dal software DIPS che mostrano le principali famiglie di discontinuità e le giaciture dei versanti dei siti O (fig. 17a) e P (Fig. 17b).

4.2 RETRODEFORMAZIONE

Oltre ad aver analizzato i dati derivanti dalla mappatura delle discontinuità con il fine di riconoscere i principali set di discontinuità per ogni affioramento, abbiamo retrodeformato i dati in modo da simulare l'ipotetica l'orientazione delle discontinuità prima della formazione dell'anticlinale a duomo. Nelle Figure 18, 19 e 20 sono riportati i risultati del processo di retrodeformazione.

La Tabella 2 mostra, per ogni sito studiato, il confronto tra le giaciture dei principali set di fratturazione prima e dopo aver retrodeformato i piani di discontinuità derivanti dall'analisi geomeccanica degli affioramenti.

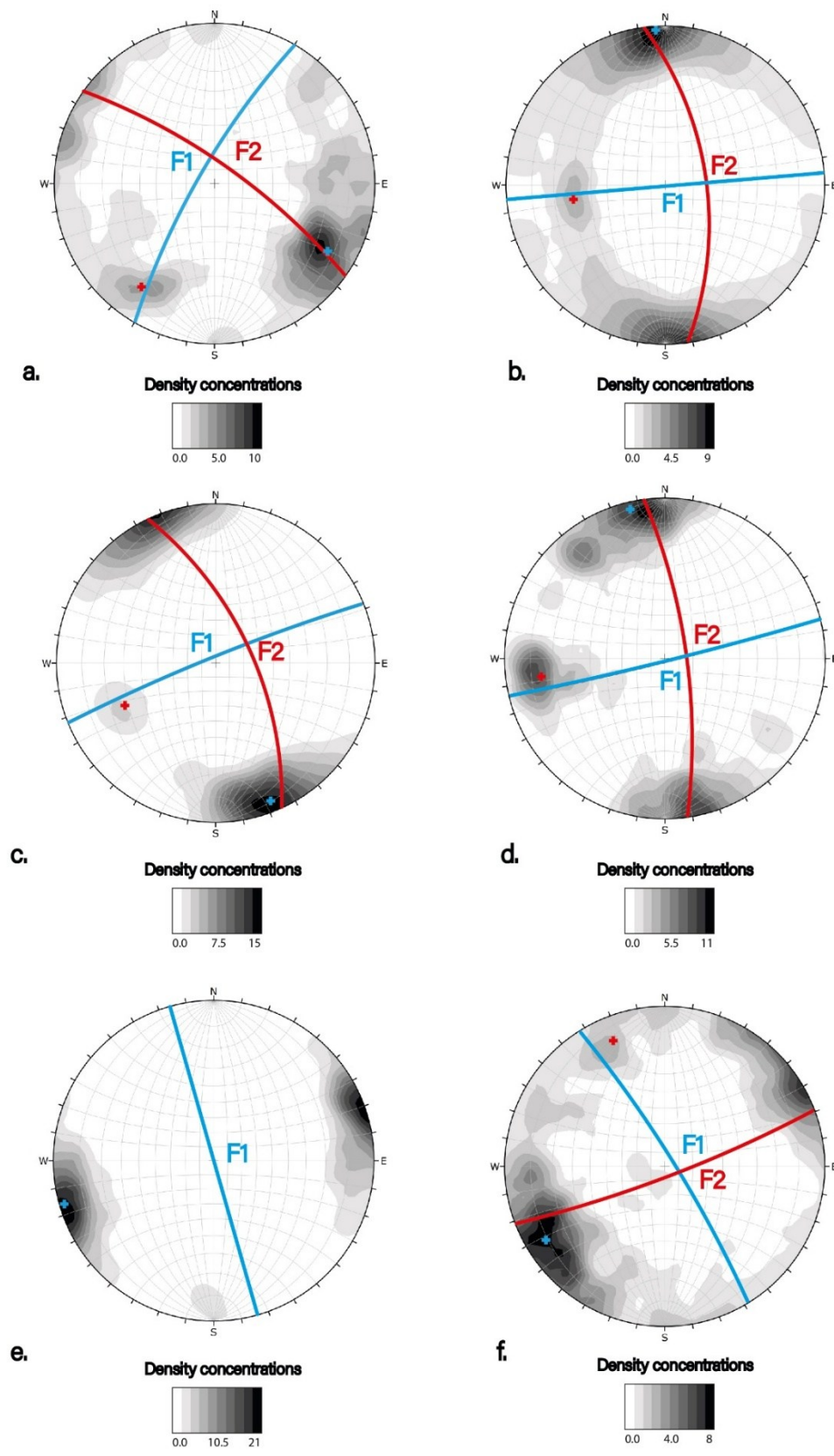


Figura 18: Stereoplot estratti dal software DIPS che mostrano l'orientazione dei principali set di fratturazione dopo aver effettuato il processo di retrodeformazione. Gli stereoplot fanno riferimento ai siti A (fig. 18a), B (Fig. 18b), C (Fig. 18c), D (Fig. 18d), E (Fig. 18e) ed F (Fig. 18f).

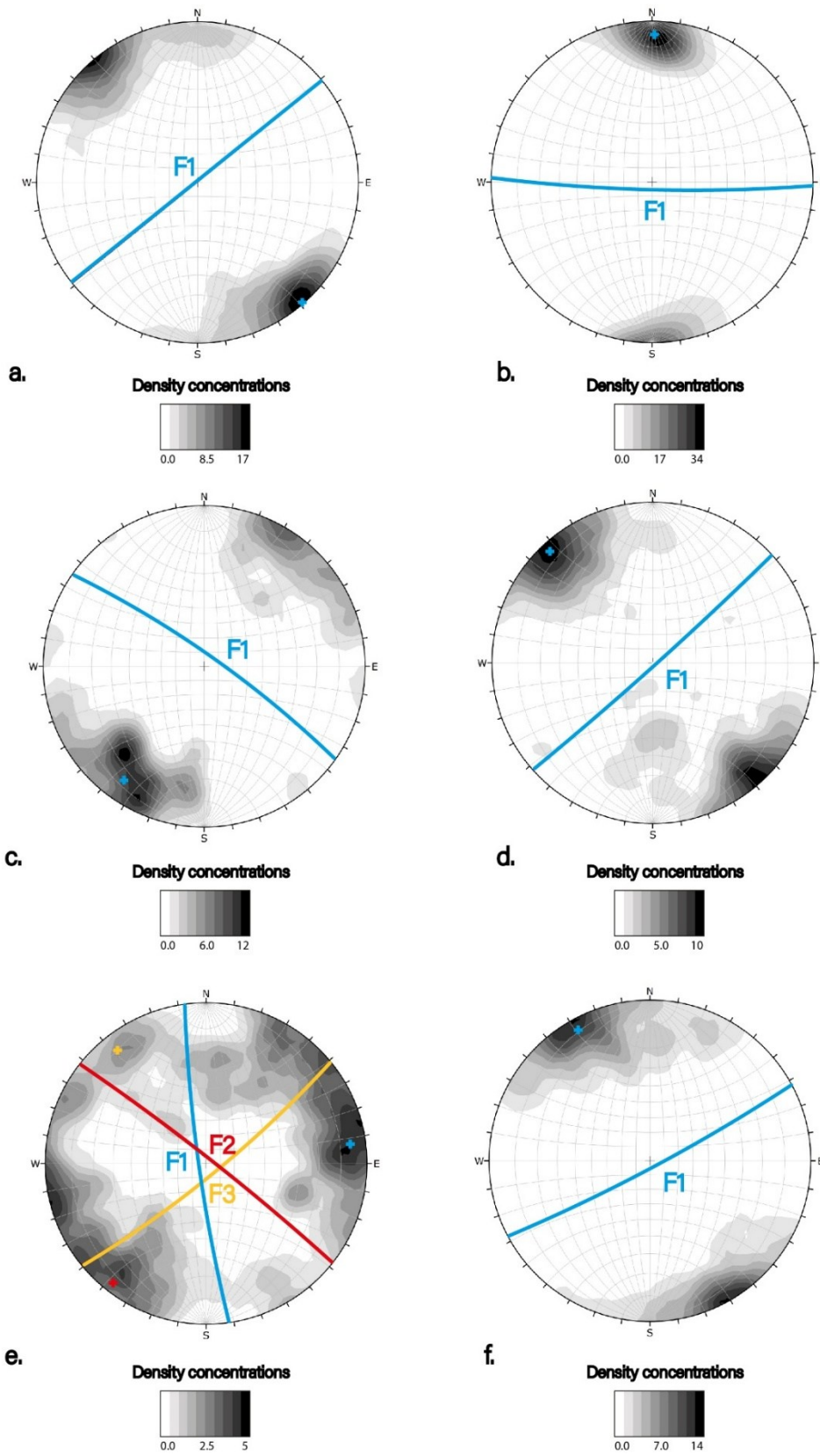


Figura 19: Stereoplot estratti dal software DIPS che mostrano l'orientazione dei principali set di fratturazione dopo aver effettuato il processo di retrodeformazione. Gli stereoplot fanno riferimento ai siti G (fig. 19a), H (Fig. 19b), I (Fig. 19c), L (Fig. 19d), M (Fig. 19e) ed N (Fig. 19f).

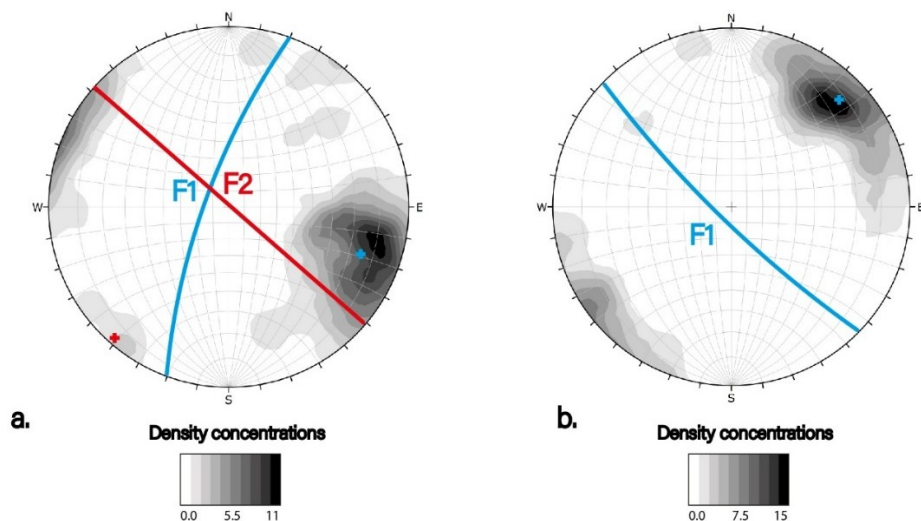


Figura 20: Stereoplot estratti dal software DIPS che mostrano l'orientazione dei principali set di fratturazione dopo aver effettuato il processo di retrodeformazione. Gli stereoplot fanno riferimento ai siti O (fig. 20a) e P (Fig. 20b).

Tabella 2: Tabella riepilogativa dello studio geomeccanico e di retrodeformazione eseguito sui 14 affioramenti di Jebel Madar. Per ogni sito sono riportate le giaciture dei principali set di fratturazione prima e dopo aver effettuato la retrodeformazione.

	Giacitura frattura- zione F1	Giacitura Frattura- zione F2	Giacitura Frattura- zione F3	Giacitura fratturazione F1 retrode- formata	Giacitura fratturazione F2 retrode- formata	Giacitura fratturazione F3 retrode- formata
Sito A	298°N 77°	40°N 73°	-	300°N 79°	35°N 76°	-
Sito B	357°N 72°	90°N 73°	-	175°N 89°	82°N 61°	-
Sito C	341°N 84°	245°N 87°	-	338°N 86°	65°N 64°	-
Sito D	165°N 84°	261°N 76°	-	166°N 87°	82°N 75°	-
Sito E	256°N 83°	-	-	74°N 89°	-	-
Sito F	237°N 80°	148°N 59°	-	58°N 83°	159°N 82°	-
Sito G	138°N 89°	-	-	320°N 90°	-	-
Sito H	174°N 71°	-	-	181°N 85°	-	-
Sito I	38°N 70°	-	-	35°N 82°	-	-
Sito L	317°N 76°	-	-	138°N 87°	-	-
Sito M	259°N 86°	39°N 76°	320°N 82°	262°N 85°	38°N 87°	141°N 82°
Sito N	333°N 73°	-	-	152°N 85°	-	-
Sito O	284°N 74°	39°N 71°	-	290°N 75°	41°N 88°	-
Sito P	44°N 88°	-	-	224°N 81°	-	-

4.3 GRAFICI A ROSA E DI INTENSITÀ DI FRATTURAZIONE

Come spiegato nel capitolo delle metodologie (vedi capitolo 3), oltre all'approccio tridimensionale per mappare le discontinuità, è stata eseguita la mappatura della fratturazione di una valle nella zona Nord-orientale di Jebel Madar, con l'approccio bidimensionale tramite il software QGIS, sfruttando le ortofoto della zona con risoluzione 3,5 cm/pixel.

Terminata la fase di mappatura delle fratture, tramite l'utilizzo del plugin "Line Direction Histogram", sono stati generati dei grafici a rosa che mettono in relazione la direzione della fratturazione con la frequenza.

Vengono mostrati nella seguente figura (Fig. 21) i tre grafici: la prima immagine (Fig. 21a) è relativa al versante Est della valle in esame (luogo del sito G), la seconda immagine (Fig. 21b) mostra il grafico relativo al versante Ovest (luogo del sito H) e, infine, il terzo grafico (Fig. 21c) è relativo al versante Est della zona meridionale della valle (sito C).

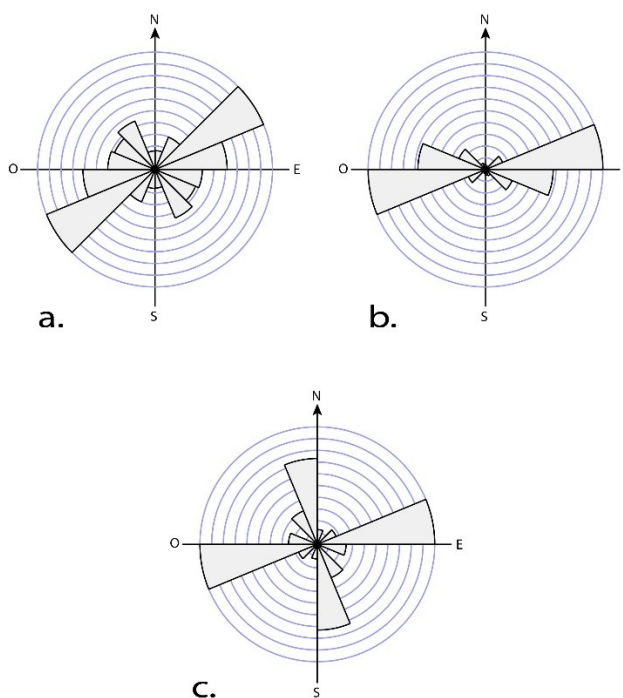


Figura 21: Grafici a rosa degli affioramenti G (Fig. 21a), H (Fig. 21b) e C (Fig. 21c). Nei grafici sono messe in relazione le direzioni delle fratture con la loro frequenza.

Con il plugin “Line Density” sono stati ricavati i grafici di intensità di fratturazione dei vari affioramenti (Fig. 22):

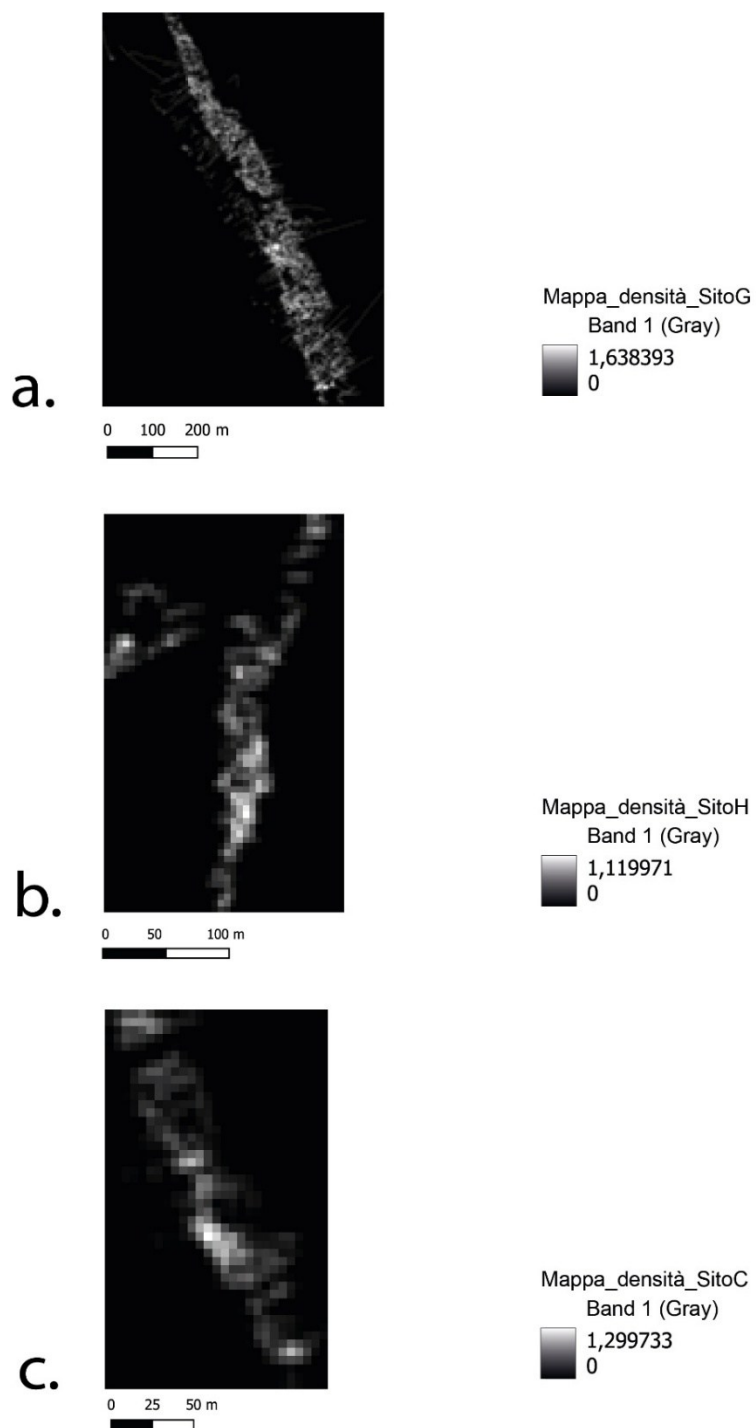


Figura 22: Mappe di densità di fratturazione dei siti G (Fig. 22a), H (Fig. 22b) e C (Fig. 22c).

5. DISCUSSIONI

I risultati ottenuti dall'analisi geomeccanica svolta, sia con l'approccio tridimensionale che bidimensionale, su Jebel Madar, forniscono preziosi spunti sull'utilità dell'utilizzo dei DOMs per lo svolgimento di studi geomeccanici da remoto, sul contesto tettonico dell'area e sulle formazioni serbatoio affioranti.

5.1 PRINCIPALI FAMIGLIE DI DISCONTINUITÀ

L'analisi geomeccanica e la successiva analisi stereografica condotta su 14 affioramenti di Jebel Madar hanno evidenziato un trend decrescente dell'inclinazione della stratificazione procedendo dai fianchi esterni verso il nucleo della piega, assetto tipico delle pieghe a duomo, e la presenza ricorrente di sistemi di fratturazione ad alto angolo con direzioni NE-SO e NO-SE, spesso ortogonali tra loro, N-S e E-O.

Come evidenziato dalle Figure 15, 16 e 17, è comune a quasi tutti gli affioramenti il pattern di fratturazione: si nota la presenza di due famiglie di discontinuità ad alto angolo siti A, B, C, D, F e O. Questa situazione è analoga, seppur non visibile dalla Figura 16, nei siti I ed L, che in realtà costituiscono un unico affioramento in cui sono stati studiati separatamente il *pavement* e la parete rocciosa.

Nei siti E, G, H, N e P, invece, è stato rilevato un solo set di fratture, ma ciò è probabilmente dovuto all'orientazione dei versanti in quei siti: nei siti precedentemente citati, il numero e/o l'orientazione dei versanti degli affioramenti permettevano di osservare 2 set di frattura, mentre in questi 5 affioramenti è presente un solo versante con giacitura parallela al secondo set di frattura, rendendolo non visibile e quindi non mappabile.

Il caso opposto si verifica nel sito M: l'affioramento si sviluppa lungo 3 versanti quindi sono visibili, a differenza degli altri 13 casi, 3 set di fratture.

Un ulteriore aspetto emerso osservando la mappa geologica di Jebel Madar e i risultati degli studi stereografici eseguiti è l'influenza dei principali lineamenti tettonici: negli affioramenti situati nelle vicinanze delle principali faglie che attraversano l'area (A, B, E, F, I, L, M, O e P) si sono sviluppati set di fratture con direzioni parallele alle faglie stesse, evidenziando una forte influenza dei principali lineamenti tettonici sulla fratturazione dell'area.

Osservando la Figura 23 si può osservare quanto appena affermato.

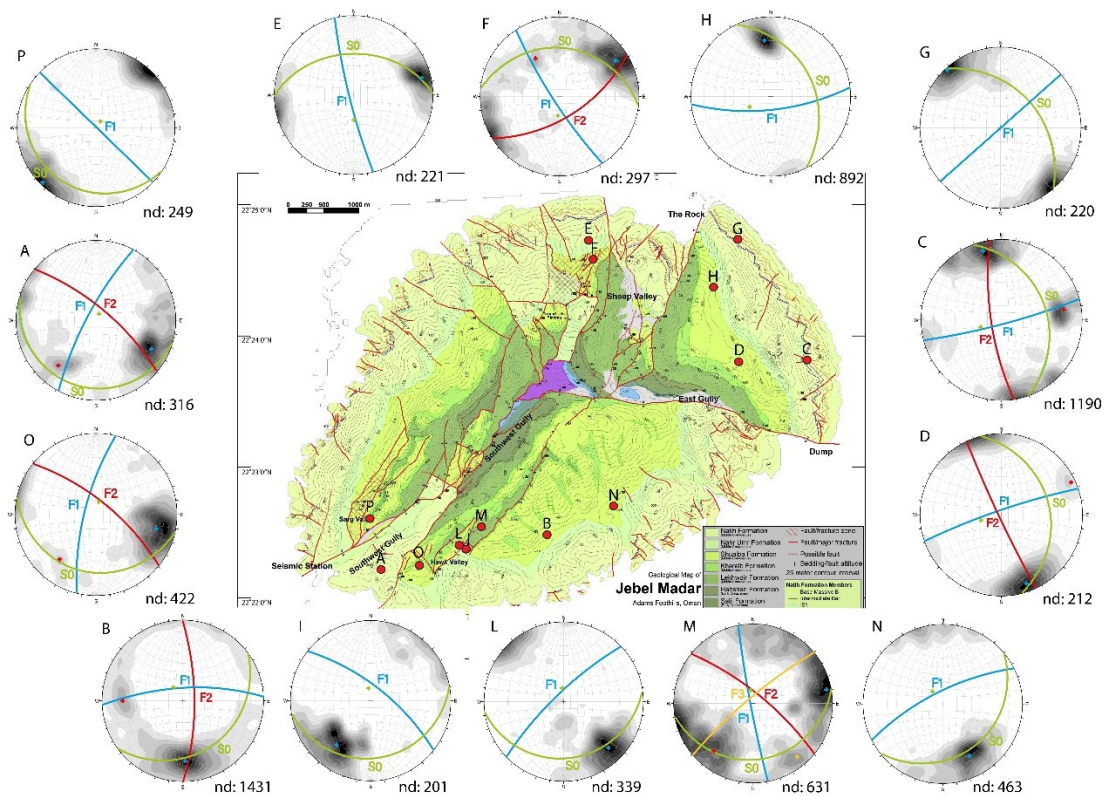


Figura 23: Mappa geologica di Jebel Madar con gli stereoplot relativi agli affioramenti studiati. L'immagine mostra la correlazione tra i principali sistemi di faglie e le famiglie di frattura presenti.

Come spiegato da Claringbould et al.,2013, l'attuale pattern di fratturazione di Jebel Madar è il risultato dei tre grandi eventi tettonici cretaci (obduzione delle

ofioliti di Semail, obduzione delle ofioliti di Masirah e orogenesi alpina) e della formazione dell'anticlinale.

Durante l'obduzione delle ofioliti di Semail, quella delle ofioliti di Masirah e la successiva orogenesi alpina si è sviluppato un contesto tettonico regionale compressivo che ha provocato la formazione e la successiva riattivazione di faglie NE-SO, che hanno guidato la risalita del diapiro salino, e E-O (durante l'obduzione delle ofioliti di Semail è avvenuta una prima fase di doming mentre durante l'orogenesi alpina è avvenuta la riattivazione del bacino salino e la formazione della piega a duomo). A causa di questi eventi si è sviluppata una compressione a livello locale, dovuta alla spinta verso l'alto del diapiro salino, che ha portato alla formazione della piega a duomo con la comparsa di locali sforzi tensili. Questa estensione locale, dovuta allo sviluppo della piega, ha portato alla formazione di fratture radiali e concentriche rispetto al centro della struttura e perpendicolari tra loro. Le fratture radiali sono osservabili nei siti A (F1), B (F2), C (F1), D (F1), E (F1), G (F1) e L (F1), mentre le fratture concentriche sono osservabili nei siti A (F2), B (F1), C (F2), D (F2) e I (F1).

Anche le fratture dei siti N (F1) e P (F1) sono state interpretate come fratture concentriche, ma dagli stereoplot le fratture radiali non sono visibili perché orientate parallelamente ai versanti degli affioramenti e quindi non sono state mappate.

I pattern di fratturazione presenti nei siti H, M e O, in accordo con l'orientazione regionale degli stress durante gli eventi tettonici citati, sono stati interpretati come risultato di questi eventi compressivi. Per associare i set di frattura di questi siti all'evento tettonico che li ha generati abbiamo sfruttato gli stereoplot delle discontinuità retrodeformate.

Non è stato possibile invece attribuire i set di fratture del sito F né alla formazione della piega e né agli eventi tettonici regionali precedenti a causa dell'incoerenza tra il pattern di fratturazione e l'orientazione degli stress durante questi

eventi, per questo motivo si ipotizza che la causa sia dovuta alla vicinanza del sito a faglie che potrebbero aver influito sulla fratturazione.

5.2 RETRODEFORMAZIONE

Di seguito (Fig. 24) è riportata un'immagine riepilogativa che mostra la mappa geologica di Jebel Madar con gli stereoplot delle discontinuità a seguito del processo di retrodeformazione.

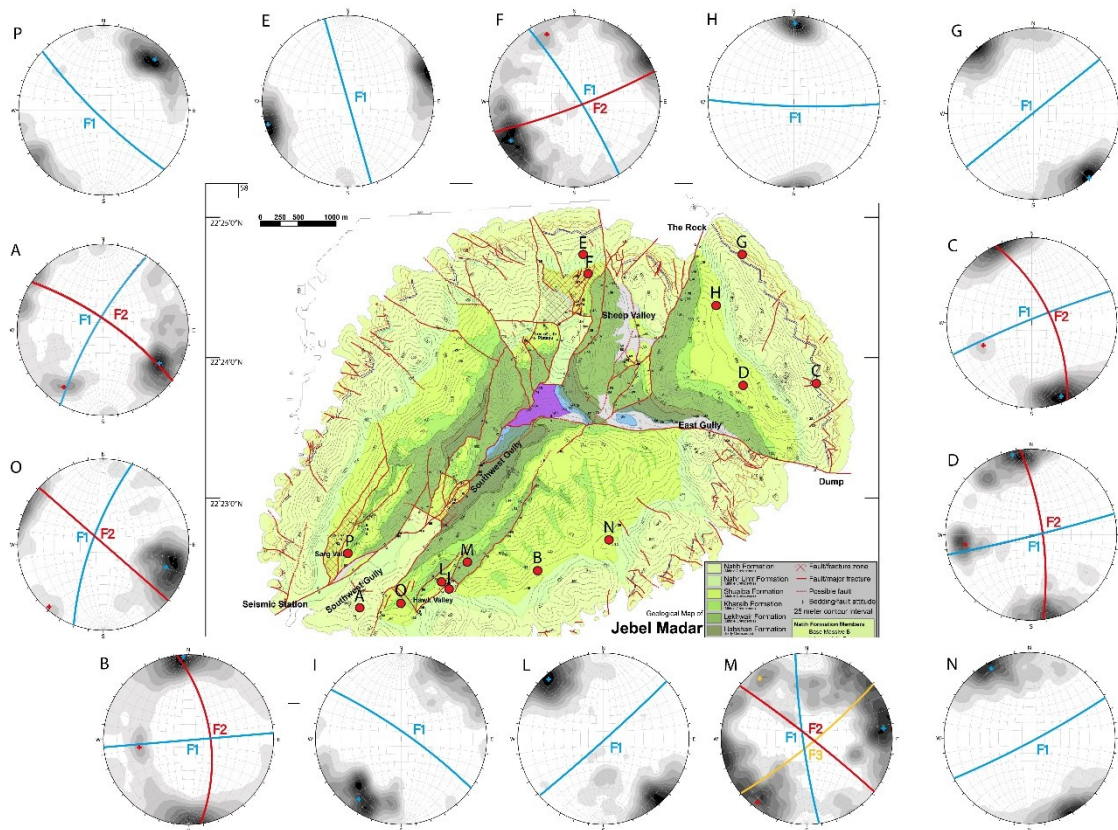


Figura 24: mappa geologica di Jebel Madar con gli stereoplot derivati dal processo di retrodeformazione

Come anticipato nel paragrafo precedente (capitolo 5.1), per associare le fratture dei siti H, M e O all'evento tettonico regionale che le ha generate, ci siamo serviti degli stereoplot delle discontinuità retrodeformati.

Osservando gli stereoplot retrodeformati dei siti H, M e O si può notare che i set di fratture appaiono più inclinati delle discontinuità attuali e ciò è dovuto al fatto che, quando uno strato viene ruotato (come nel nostro caso durante la formazione dell'anticlinale) le fratture sub verticali già presenti ruotano insieme ad esso e appaiono meno inclinate; ciò conferma che quelle fratture si sono formate prima della rotazione degli strati, avvenuta durante lo sviluppo della piega, e quindi prima dell'orogenesi alpina.

Osservando l'orientazione del versante in Figura 16b, ipotizziamo che il set di fratture non visibile del sito H abbia direzione N-S o NNE-SSO e che formi un angolo acuto con il set visibile F1; questa configurazione, in accordo con l'orientazione degli stress regionali durante l'obduzione di Semail (σ_1 che agisce in direzione NE-SO e σ_3 perpendicolare ad esso), ci suggerisce che le fratture del sito H siano la testimonianza di questo evento tettonico.

Nel sito O osserviamo due set di fratture, con direzioni NNE-SSO e NO-SE, che formano tra loro un angolo acuto. Questo pattern è tipico di fratture formatesi durante un evento tettonico compressivo che è stato identificato, in accordo con le direzioni degli stress σ_1 (NO-SE) e σ_3 (NE-SO), come quello dell'obduzione delle ofioliti di Masirah.

Anche nel sito M si osservano angoli acuti tra i tre set di fratture: l'interpretazione che è stata data, considerando le direzioni dei set di fratture e l'orientazione degli stress tettonici durante i vari eventi, è che F1 e F3 siano il risultato dell'obduzione delle ofioliti di Semail mentre F2 si è formata più tardi durante l'obduzione delle ofioliti di Masirah.

La Tabella che segue (Tab. 3) sintetizza le interpretazioni fatte sulla genesi dei vari set di frattura nei diversi affioramenti.

Tabella 3: Tabella riepilogativa dei set di frattura rilevati nei vari siti e dell'interpretazione dei processi che li ha generati.

	F1	F2	F3
Sito A	Sviluppo piega	Sviluppo piega	-
Sito B	Sviluppo piega	Sviluppo piega	-
Sito C	Sviluppo piega	Sviluppo piega	-
Sito D	Sviluppo piega	Sviluppo piega	-
Sito E	Sviluppo piega	-	-
Sito F	Influenza di faglie prossimali	Influenza di faglie prossimali	-
Sito G	Sviluppo piega	-	-
Sito H	Obduzione ofioliti di Semail	-	-
Sito I	Sviluppo piega	-	-
Sito L	Sviluppo piega		-
Sito M	Obduzione ofioliti di Semail	Obduzione ofioliti di Masirah	Obduzione ofioliti di Semail
Sito N	Sviluppo piega	-	-
Sito O	Obduzione ofioliti di Masirah	Obduzione ofioliti di Masirah	-
Sito P	Sviluppo piega	-	-

5.3 GRAFICI A ROSA E STEREOPLOT: CONFRONTO TRA LA MAPPATURA IN 2D E IN 3D

Uno degli scopi della tesi è stato quello di valutare l'efficacia degli studi geomeccanici eseguiti attraverso l'uso dei Digital Outcrop Models.

Per verificare la correttezza dei risultati dell'analisi geomeccanica svolta in 3D è stata eseguita la mappatura della fratturazione di tre siti utilizzando l'approccio 2D con il software QGIS.

Il confronto tra le direzioni dei set di frattura ottenute dai DOMs nei siti G, H e C (Fig. 15 e Fig. 16) e quelle ottenute dalla mappatura svolta sulle ortofoto (Fig. 21) mostra una totale coerenza dei risultati ottenuti e conferma la validità dell'uso DOMs per lo studio geomeccanico che, anzi, spesso è più preciso in quanto in 3D è possibile caratterizzare in maniera più completa la geometria delle discontinuità.

5.4 STUDIO DI AFFIORAMENTI ANALOGHI: POSSIBILI IMPLICAZIONI PER CIRCOLAZIONE FLUIDI E STOCCAGGIO GAS

Le analisi geomeccaniche svolte sull'affioramento analogo di Jebel Madar sono state cruciali per comprendere le implicazioni del network di frattura sulla circolazione dei fluidi all'interno delle varie formazioni cretache dell'Oman.

Le formazioni più fratturate sono risultate essere la Shuaiba e la Natih, dove è presente una forte fratturazione sub-verticale ed ortogonale alla stratificazione in grado di connettere verticalmente ed anche lateralmente i membri serbatoio (es. Natih C, D e E) e lungo la quale è più probabile che ci sia circolazione di fluidi (es. idrocarburi, gas).

Nella zona Nord-orientale di Jebel Madar, le formazioni Natih e Shuaiba appaiono estremamente fratturate nonostante non ci siano grandi faglie nelle vicinanze, ed è in quell'area che abbiamo svolto la mappatura della fratturazione in 2D.

Tramite un plugin del software QGIS abbiamo ricavato i grafici di intensità di fratturazione per i siti G, H e C (Fig. 22): dai grafici si osserva una forte fratturazione in entrambe le formazioni ma è la formazione Natih ad essere più fratturata. Probabilmente la maggior fratturazione è legata alla sua posizione strutturale: essendo posizionata nella zona più esterna della struttura è sottoposta al più alto stress tensile.

Il lavoro di tesi ha permesso, inoltre, di ottenere un importante dataset delle fratture che potrebbe essere sfruttato attraverso il software Move per approfondire gli studi sulla possibile circolazione dei fluidi e sullo stoccaggio di gas all'interno di queste formazioni.

I piani di frattura mappati potrebbero essere importati all'interno del software e, tramite il modulo "Stress Analysis", potrebbero essere valutati i parametri di:

- **SLIP STABILITY**: probabilità di riattivare un piano di frattura a causa dello stato di stress del reservoir, utile per identificare le possibili fratture nelle quali possono circolare fluidi (Critically stressed fractures theory, Zoback, 2010);
- **DILATION TENDENCY**: probabilità che una frattura si apra sotto l'azione del campo di stress del reservoir, utile per identificare le possibili fratture aperte nelle quali possono circolare fluidi o essere stoccati gas;
- **SLIP TENDENCY**: analisi della pressione dei pori necessaria per riattivare una faglia/frattura preesistente, fondamentale per lo studio della stabilità e del rischio sismico indotto da stoccaggi di CO₂.
- **FRACTURE STABILITY**: analisi della pressione dei pori necessaria per fratturare la roccia intatta, necessaria per comprendere il comportamento

fragile delle rocce dovuto all'iniezione di fluidi e gas e valutare la sicurezza delle cap rock.

Da questi parametri basati sui dati DOMs di affioramenti analoghi, come quello di Jebel Madar, possono essere effettuate caratterizzazioni sullo stato e la stabilità del reservoir e sulla sua capacità di essere usato per geostoccaggi. Questo potrebbe essere uno spunto per successivi lavori più approfonditi a riguardo.

6. CONCLUSIONI

Questo lavoro di tesi nasce con lo scopo di dimostrare l'efficacia dell'utilizzo dei Digital Outcrop Models (DOMs) nell'esecuzione di studi geomeccanici da remoto di affioramenti analoghi e per approfondire le conoscenze geologico-strutturali di Jebel Madar.

L'analisi svolta sui 14 DOMs ha permesso di identificare un reticolo di discontinuità dominato da 4 principali set di fratture sub-verticali con direzioni NE-SO e NO-SE, perpendicolari tra loro, N-S e E-O.

L'attuale pattern del network di fratture dipende soprattutto dalla formazione della piega a duomo avvenuta principalmente durante l'orogenesi alpina: il contesto tettonico compressivo, sviluppatosi a causa dell'orogenesi alpina in corso e a causa della spinta dovuta alla risalita del diapiro salino, ha portato alla formazione della piega e con essa si è sviluppato localmente un regime estensivo. Gli sforzi tensili dovuti allo sviluppo della piega hanno portato alla formazione di fratture, radiali e concentriche alla struttura, che possiamo osservare nei siti A, B, C, D, E, G, I, L, N e P (Fig. 23).

I set di frattura dei siti H, M e O (FIG. 23) sono stati invece interpretati come il risultato degli sforzi compressivi dovuti agli eventi tettonici regionali, in quanto mostrano dei pattern coerenti alle direzioni di compressione regionali.

La retrodeformazione delle orientazioni delle fratture mostra che i set dei siti H, M e O, quando retrodeformati, appaiono più verticali rispetto alle condizioni odierne. Ciò potrebbe indicare che questi set di fratture si sono formati prima della rotazione degli strati, avvenuto durante lo sviluppo della piega, e sono quindi riconducibili agli stress tettonici compressivi legati dalle obduzioni delle ofioliti di Semail (siti H e M, set coniugati F1-F3) e Masirah (siti M e O, set coniugati F2-F1) (Fig. 24).

Le formazioni Natih e Shuaiba sono state studiate più nel dettaglio ed emergono come le formazioni più fratturate dove l'elevata intensità di frattura, soprattutto ortogonale alla stratificazione, può aumentare la permeabilità secondaria e permettere la circolazione dei fluidi al loro interno.

Il confronto tra i risultati della mappatura in 3D e in 2D ha dimostrato l'affidabilità delle tecniche 3D basate sui DOMs per quanto concerne gli studi geomeccanici e ha mostrato una migliore caratterizzazione geometrica delle fratture.

In sintesi, questo studio dimostra come i DOMs siano un ottimo strumento sfruttabile per le analisi geomeccaniche, implementando e offrendo una visione più approfondita del contesto tettonico-strutturale dell'area. Inoltre, offre un importante dataset sfruttabile per analisi più approfondite, tramite il software Move, sul possibile impiego come sito di stoccaggio gas degli analoghi in sottosuolo.

BIBLIOGRAFIA

1. Birch, J. S. (2006). Using 3DM Analyst mine mapping suite for rock face characterization. *Laser and photogrammetric methods for rock face characterization*, 15.
2. Blake, B. L. (2009). Fracture heterogeneity in the Natih E Formation, Jebel Madar, Oman.
3. Claringbould, J. S., Hyden, B. B., Sarg, J. F., & Trudgill, B. D. (2013). Structural evolution of a salt-cored, domed, reactivated fault complex, Jebel Madar, Oman. *Journal of Structural Geology*, 51, 118-131.
4. Hanna, S. S. (1990). The Alpine deformation of the central Oman Mountains. *Geological Society, London, Special Publications*, 49(1), 341-359.
5. Loosveld, R. J., Bell, A., & Terken, J. J. (1996). The tectonic evolution of interior Oman. *GeoArabia*, 1(1), 28-51.
6. Masse, J. P., Borgomano, J., & Al Maskiry, S. (1998). A platform-to-basin transition for lower Aptian carbonates (Shuaiba Formation) of the northeastern Jebel Akhdar (Sultanate of Oman). *Sedimentary Geology*, 119(3-4), 297-309.
7. Menegoni, N. (2024, luglio 29). Mapping discontinuities on 3D Digital Outcrop Model and calculate volume of blocks with CloudCompare. Zenodo.
8. Mount, V. S., Crawford, R. I., & Bergman, S. C. (1998). Regional structural style of the central and southern Oman Mountains: Jebel Akhdar, Saih Hatat, and the northern Ghaba Basin. *GeoArabia*, 3(4), 475-490.
9. Rousseau, M., Dromart, G., Garcia, J. P., Atrops, F., & Guillocheau, F. (2005). Jurassic evolution of the Arabian carbonate platform edge in the central Oman Mountains. *Journal of the Geological Society*, 162(2), 349-362.
10. Tavani, S., Corradetti, A., Mercuri, M., & Seers, T. (2024). *Virtual outcrop models of geological structures*. Società Geologica Italiana.
11. van Buchem, F. S., Pittet, B., Hillgärtner, H., Grötsch, J., Al Mansouri, A. I., Billing, I. M., ... & van Steenwinkel, M. (2002). High-resolution sequence stratigraphic architecture of Barremian/Aptian carbonate systems in northern Oman and the United Arab Emirates (Kharaiib and Shu'aiba formations). *GeoArabia*, 7(3), 461-500.
12. Vandeginste, V., John, C. M., & Manning, C. (2013). Interplay between depositional facies, diagenesis and early fractures in the Early Cretaceous Habshan Formation, Jebel Madar, Oman. *Marine and Petroleum Geology*, 43, 489-503.
13. Vandeginste, V., Stehle, M. C., Jourdan, A. L., Bradbury, H. J., Manning, C., & Cosgrove, J. W. (2017). Diagenesis in salt dome roof strata: Barite-calcite assemblage in Jebel Madar, Oman. *Marine and Petroleum Geology*, 86, 408-4

14. Zoback, M.D (2010). Reservoir geomechanics. Cambridge university press (Cambridge).

