

STUDIO DEI PROCESSI VULCANO- TETTONICI ATTIVI NELLA REGIONE DI AFAR, ETIOPIA



Escursione interdisciplinare del Dottorato di Ricerca in Scienze della Terra

A cura dei dottorandi partecipanti all'attività di terreno

Febbraio 2019

Dottorandi (cicli XXXII e XXXIII):

Dott. Manuel Curzi
Dott. Danilo D'Angiò
Dott.ssa Lucilla Fabrizi
Dott.ssa Stefania Franchini
Dott.ssa Giulia Iacobucci
Dott. Beniamino Mecozzi
Dott. Marco Mercuri
Dott. Javad Rouhi
Dott.ssa Roberta Ruggieri
Dott.ssa Giulia Salari
Dott. Daniel Tentori

Docenti accompagnatori:

Prof. Giovanni B. Andreozzi
Prof. Eugenio A. Carminati
Prof. Danilo M. Palladino
Prof. Fabio Trippetta

INDICE

<i>Introduzione.....</i>	<i>1</i>
<i>Primo giorno: arrivo in Etiopia – Awash.....</i>	<i>5</i>
<i>Secondo giorno: Awash – Alalo Bed.....</i>	<i>8</i>
<i>Terzo giorno: Alalo Bed – Lago Afrera – Erta Ale (campo base)</i>	<i>11</i>
<i>Quarto giorno: Erta Ale.....</i>	<i>14</i>
<i>Quinto giorno: Erta Ale – Ahmed Ela</i>	<i>21</i>
<i>Sesto giorno: Ahmed Ela – Dallol – Ahmed Ela – Assabole.....</i>	<i>24</i>
<i>Settimo giorno: Assabole – Makallè</i>	<i>34</i>
<i>Ottavo giorno: Makallè – Lalibela</i>	<i>39</i>
<i>Nono giorno: Lalibela.....</i>	<i>41</i>
<i>Decimo giorno: Addis Ababa, Museo Nazionale dell’Etiopia</i>	<i>49</i>
<i>Conclusioni.....</i>	<i>51</i>
<i>Bibliografia.....</i>	<i>52</i>

Introduzione

Questa relazione ripercorre le principali tappe dell'escursione interdisciplinare in Etiopia, dal 18 al 27 Febbraio 2019, nell'ambito del Dottorato di Ricerca in Scienze della Terra (Sapienza Università di Roma). I costi dell'escursione sono stati co-finanziati da fondi Sapienza di Funzionamento del dottorato e dal Progetto MIUR "Dipartimento d'Eccellenza 2018-2022".

L'escursione ha permesso di studiare i processi vulcano-tettonici attivi nella regione della Dancalia (Depressione dell'Afar, Etiopia nord-orientale), legati al processo di assottigliamento crostale (*rifting*) connesso all'allontanamento tra le placche araba, africana e la microplacca somala.

Vulcani, faglie, mineralizzazioni connesse a fluidi idrotermali e vaste distese di sale sono alcune tra le espressioni di tale processo geodinamico osservate durante le varie tappe dell'escursione e che verranno di seguito descritte.

La *Rift Valley Africana* è una lunga frattura della crosta terrestre e rappresenta la fase embrionale della formazione di un nuovo oceano. A grande scala, essa inizia in Turchia e Siria, prosegue lungo il Golfo di *Aqaba* nel Mar Rosso e poi entra nel continente africano in corrispondenza del territorio *Afar*, meta del nostro viaggio, determinando il punto più basso dell'Africa, il lago *Karum* (-155 m), con la sua immensa distesa salina.

Come è possibile osservare in Figura 1, la *Rift Valley* nella regione etiopica è denominata Main Ethiopian Rift (MER) e si sviluppa in direzione NE-SO per circa 500 km, dalla depressione dell'*Afar* (a Nord) fino alla regione dei laghi *Abaya* e *Chamo* (a Sud). In tale porzione, la *Rift Valley* con un'ampiezza media di 80 km separa l'altopiano etiopico ad ovest da quello somalo ad est (Fig. 1-A). Tali altopiani, corrispondenti a imponenti edifici vulcanici, raggiungono quote generalmente maggiori dei 2000-2500 m sul livello del mare e sono caratterizzati da numerose incisioni vallive di fiumi. Dalle quote elevate degli altopiani si passa al fondovalle della *rift valley* e alla depressione dell'*Afar* attraverso imponenti scarpate di origine tettonica. Questi dislivelli possono raggiungere e superare i 2500 m, come ad esempio nel caso della grande scarpata che separa l'altopiano etiopico dalla depressione dell'*Afar*, a nord-est di Addis Ababa, dove in pochi chilometri si passa dai 3000-3500 m circa dell'altopiano a quote inferiori ai 1000 m per scendere poi a quote sotto il livello del mare nella regione della Dancalia (<http://ethiopianrift.igg.cnr.it>).

La parte settentrionale del MER corrisponde alla depressione dell'*Afar*, denominata anche come depressione della Dancalia. Questa ampia zona triangolare fa da raccordo tra la *rift valley* africana e i bacini oceanici del Mar Rosso e Golfo di Aden, in corrispondenza della quale tre placche tettoniche (placca somala, placca arabica e la placca africana) si incontrano e formano

una giunzione tripla rift-rift-rift, l'unica presente sulla terraferma. I dati GPS mostrano una divergenza relativa delle tre placche: rispetto alla placca arabica, la placca africana e quella somala si allontanano in direzione SE-NW di circa 4-7 mm/anno; mentre la placca arabica si allontana rispetto al sistema Africa-Somalia di circa 15-20 mm/anno (Corti et al., 2015).

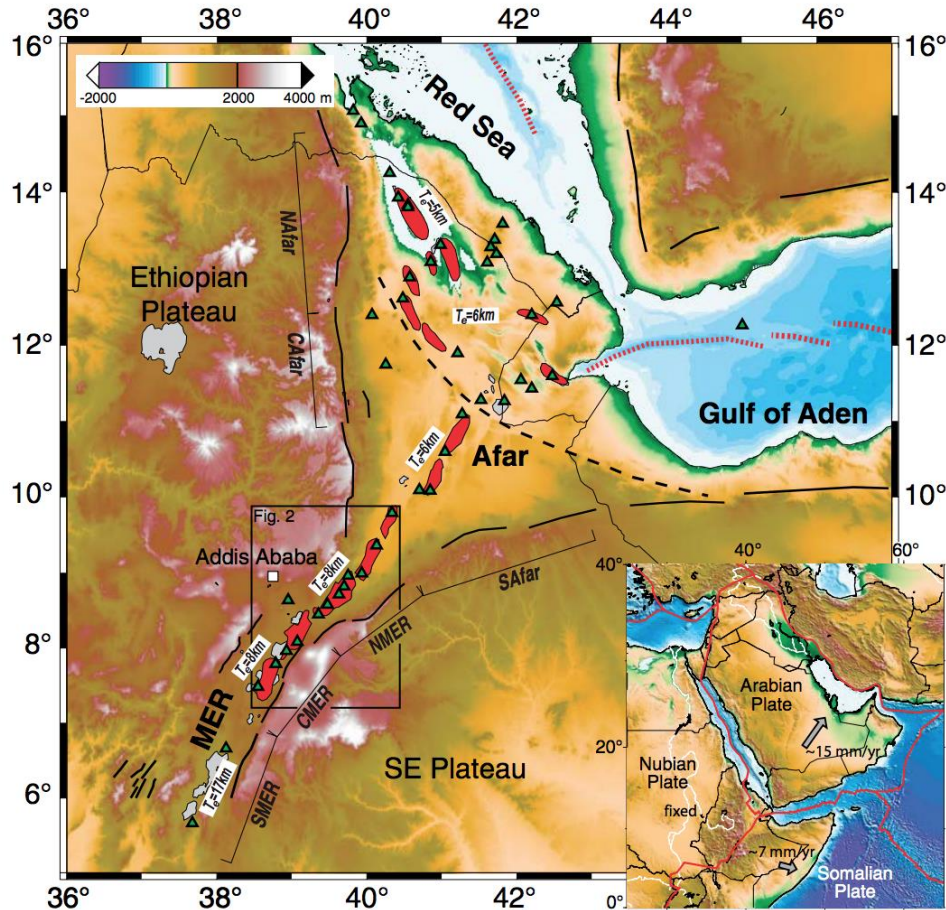


Fig. 1-A – Mappa tettonica del Main Ethiopian Rift (MER) e della depressione di Afar (Corti et al., 2015).

I processi dell'attività vulcanica e tettonica, connessi alla fase di *rifting* continentale, hanno determinato condizioni favorevoli allo sviluppo della vita umana e contemporaneamente alla preservazione di resti fossili animali e vegetali. Infatti, in molte località della *rift valley* etiopica sono stati rinvenuti resti di parti scheletriche e di evidenze culturali di ominidi (Fig. 1-B). Per tale motivo la *rift valley* etiopica è stata definita come “culla dell'umanità”, ossia il luogo in cui si è evoluta e diversificata la nostra specie negli ultimi milioni di anni. Il cambiamento climatico degli ultimi 10 Ma, legato secondo alcune teorie al sollevamento dell'altopiano etiopico, ha determinato una trasformazione del paesaggio da ambienti di tipo foresta ad ampie savane, a cui è seguita l'evoluzione delle forme più primitive di ominidi in forme sempre più evolute fino all'*Homo Sapiens*.

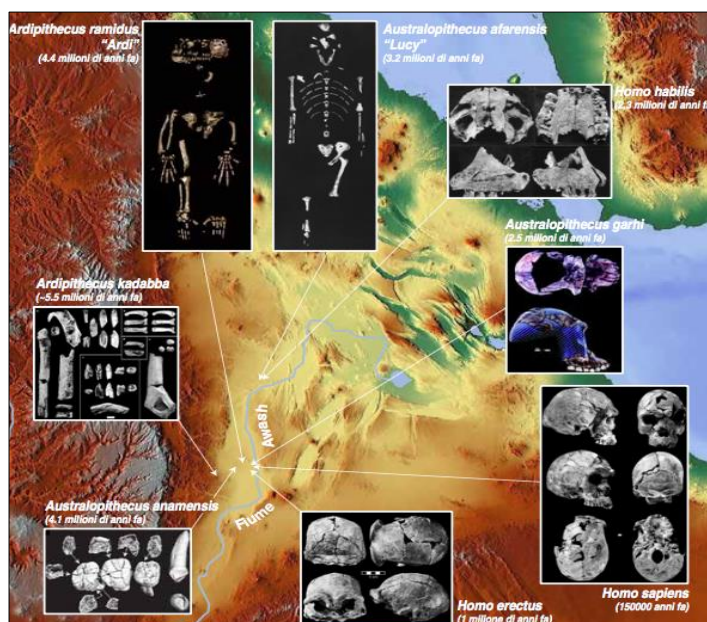


Fig. 1-B – Mappa dei principali ritrovamenti di ominidi nell’Afar (Corti e Manetti, 2012).

In Figura 2 viene riportata la mappa degli spostamenti effettuati durante l’attività di terreno nell’Etiopia orientale, dall’arrivo ad Addis Ababa fino a Lalibela per chiudere poi su Addis Ababa.

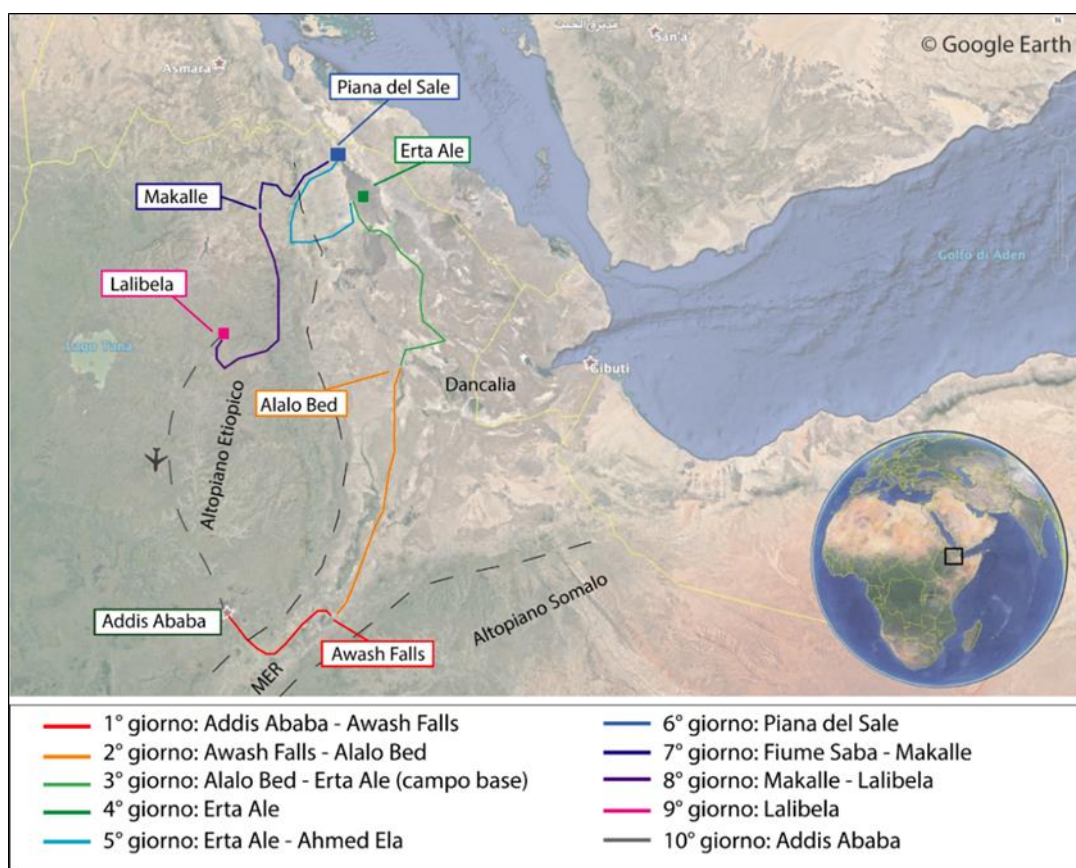


Fig. 2 – Tappe del percorso effettuato durante l’attività di terreno.

Durante il percorso gli aspetti geologici si sono fusi con quelli culturali, in quanto dopo aver raggiunto la giunzione tripla rift-rift-rift nei pressi di Alalo Bed, aver attraversato la regione desertica della Dancalia ed essere risaliti sull'altopiano etiopico a Makallè, l'escursione è proseguita con le visite del sito di Lalibela, patrimonio UNESCO, dove le rocce vulcaniche sono state scavate e trasformate in un imponente luogo di culto, e del Museo Nazionale di Addis Ababa, dove sono conservati i resti dei primi ominidi (tra cui la famosa "Lucy").

Primo giorno: arrivo in Etiopia - Awash

Il viaggio è iniziato ad Addis Ababa a bordo di cinque fuoristrada verso il parco Nazionale dell'Awash.

In breve tempo è stata raggiunta la prima sosta, nella città di Debre Zeyit, caratterizzata da numerosi centri vulcanici prodotti da una recente attività freatomagmatica. Questi sono allineati in direzione NE-SW, parallelamente alle grandi faglie bordiere del *rift*. Tale attività vulcanica ha dato origine a *maar* (morfologie caratterizzate da un cratere a fondo depresso rispetto al piano campagna, generalmente occupato da un lago, circondato da un anello di tufo poco rilevato). Dalla strada principale n. 4, che collega la capitale alla *Rift Valley*, sono facilmente raggiungibili i laghi vulcanici all'interno della città di Debre Zeyit. In particolare, sono stati visitati il lago Bishoftu (Fig. 3) e il Lago Verde (Fig. 4).



Fig. 3 – Maar di Bishoftu, all'interno dell'abitato di Debre Zeyit.



Fig. 4 – Il Lago Verde (Green Lake) occupa uno dei numerosi maar presenti nel campo vulcanico di Debre Zeyit.

Entrambi i laghi sono ospitati in tipiche strutture di tipo *maar-tuff ring*, che sono il risultato di singoli eventi eruttivi, nel corso dei quali il magma relativamente mafico in risalita ha interagito con

acque di falda, determinando il carattere esplosivo delle eruzioni. Sullo sfondo di entrambi i laghi è possibile osservare coni di scorie, legati allo stesso tipo di magma da cui i *maar* hanno avuto origine, ma originatisi da un'attività di tipo hawaiano-stromboliano con trascurabile grado d'interazione tra magma e acqua. Questi laghi sono il miglior esempio di *maar* nella zona. In particolare, la bellezza del Lago Verde è determinata dal colore delle sue acque e dalla presenza di numerosi fenicotteri rosa al suo interno.

Continuando sulla strada n. 4 è stato possibile ammirare il complesso vulcanico di Kone, caratterizzato dalla presenza di prodotti riolitici e trachitici, colate di lava trachitica all'interno della caldera stessa, coni di scorie basaltiche e di pomici (Fig. 5).

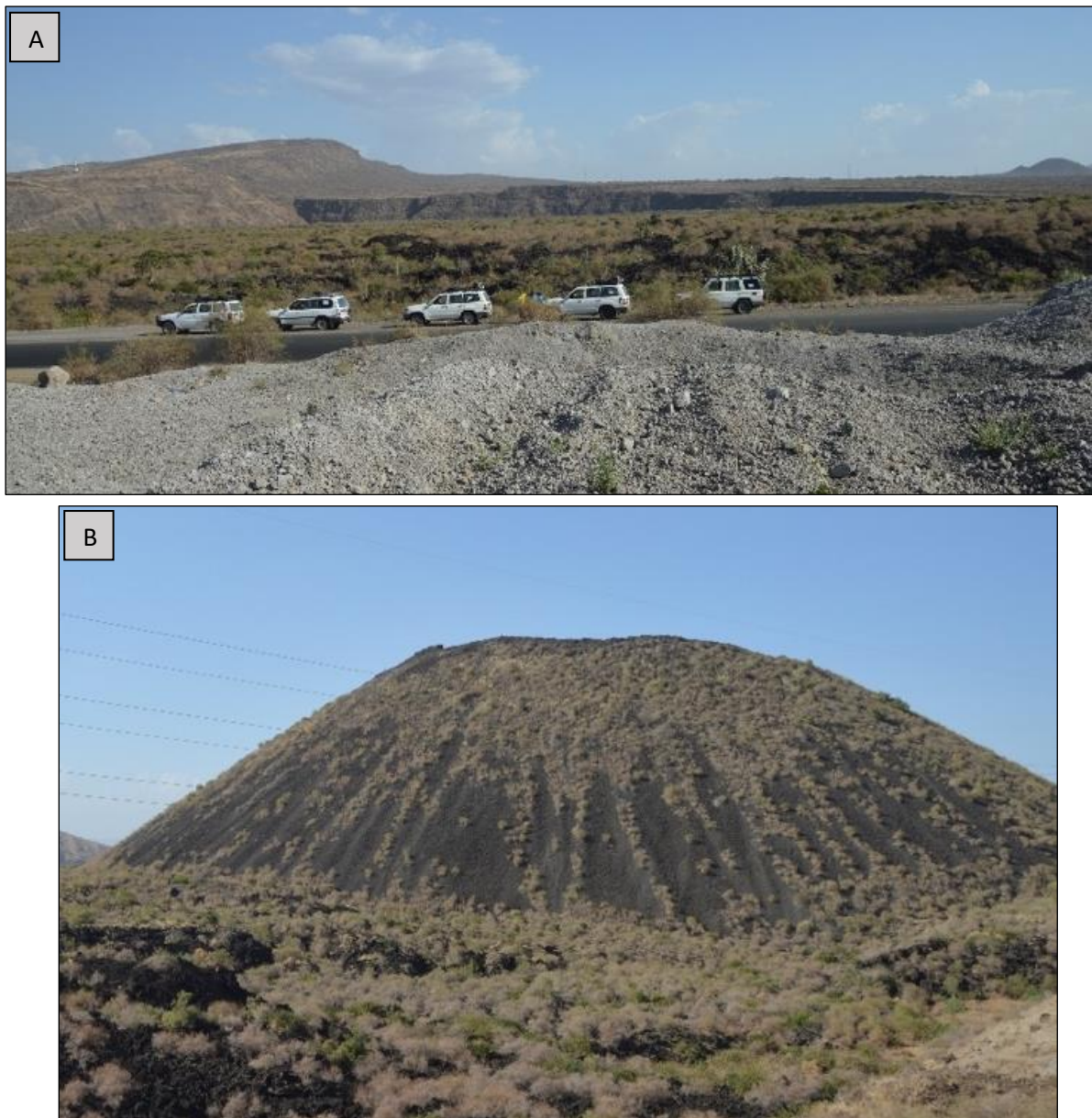


Fig. 5 – Parte settentrionale del *Main Rift etiopico*. A) Bordo della caldera del vulcano Kone, che si chiude lateralmente. B) Cono di scorie in prossimità della caldera di Kone.

Il viaggio è continuato nel pomeriggio all'interno del parco Nazionale dell'Awash, dove è stato possibile osservare alcuni animali che vivono nell'area protetta della savana, quali gnu, gazzelle, scimmie orici e coccodrilli alla base delle splendide cascate (Fig. 6). Il parco è attraversato dall'omonimo corso d'acqua, il fiume Awash, che dall'area a ovest di Addis Abeba scorre verso la depressione dell'Afar fino a sfociare nel lago Abbe al confine tra Etiopia e Gibuti.

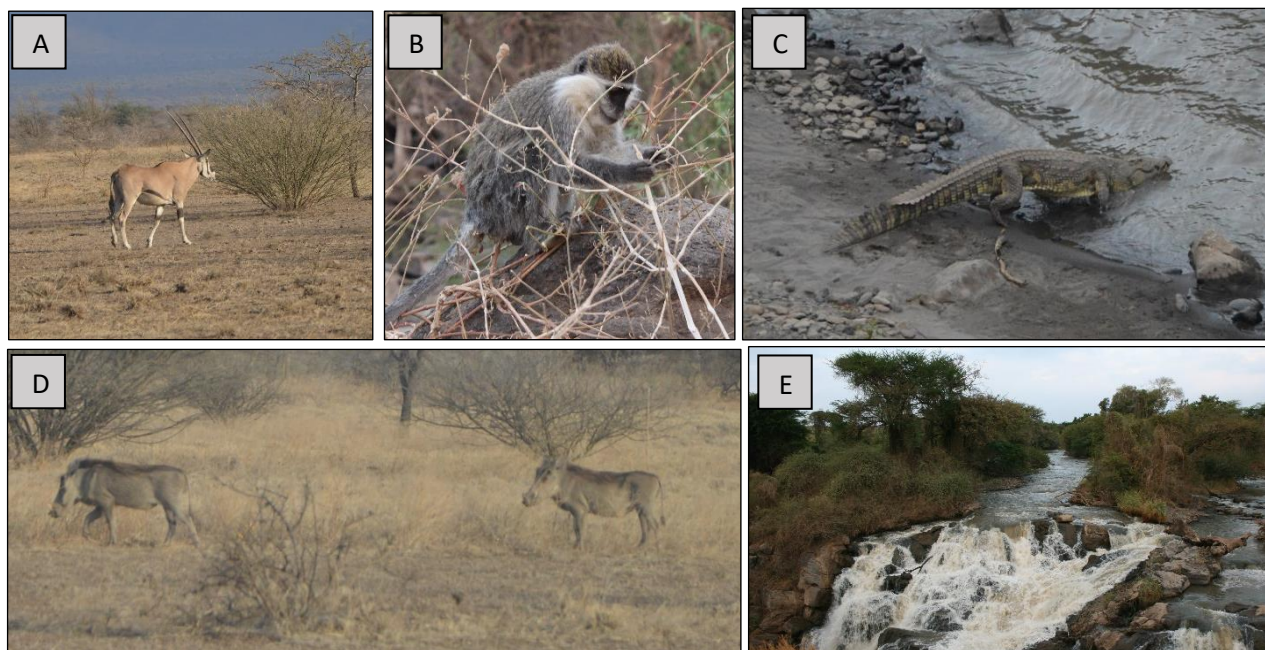


Fig. 6 – Alcuni animali osservati all'interno del Parco Nazionale dell'Awash (A, B, C, D) e le cascate dell'omonimo fiume che attraversa la riserva protetta (E).

Secondo giorno: Awash - Alalo Bed

Il secondo giorno viene intrapresa la strada diretta verso Semera, per poi raggiungere Alalo Bed. Il percorso scende progressivamente di quota verso la depressione della Dancalia, zona abitata dal popolo dei pastori Afar. Gli Afar (“libero” nella lingua locale) da sempre vivono indipendenti a fianco dell’impero etiopico, sono pastori nomadi, allevatori di dromedari e capre e la loro principale fonte di reddito consiste dei compensi percepiti dal commercio del sale che estraggono dalla Dancalia. Lungo il tragitto, a pochi chilometri da Alalo Bed, si passa a qualche chilometro da Hadar, la località nei pressi della quale nel 1974 è stata scoperta Lucy, il primo reperto di *Australopithecus afarensis*, oggi conservato nel museo nazionale di Addis Ababa (visitato durante l’ultimo giorno di escursione).

Osservazioni effettuate durante il percorso permettono di riscontrare come l’allineamento degli apparati vulcanici e degli elementi tettonici risulti coerente con l’orientazione NE-SW del *Main Ethiopian Rift* che, in questa regione, divide l’altopiano somalo da quello etiope. Scendendo nella depressione dancala, ampi gradini morfologici alti da decine a centinaia di metri permettono di osservare la spessa ed estesa serie di lave basaltiche stratoidi (con subordinati prodotti a composizione acida) di età Pliocene-Pleistocene inferiore (4-1 Ma). Degno di nota è l’affioramento riportato in Figura 7 in cui sono evidenti colate laviche sovrapposte e in cui si possono osservare alcuni tra i caratteri geneticamente legati alla messa in posto di colate basaltiche. In dettaglio, sono evidenti i livelli basali autobrecciati originati per l’attrito con il substrato dove gli sforzi di taglio erano elevati e le vescicole isorientate e concentrate nella parte alta del flusso, dove si concentrava la degassazione. Nella porzione sommitale di ciascuna colata è presente una superficie scoriacea e a blocchi, originata per il rapido raffreddamento, su cui si sviluppa il suolo che mostra gli effetti termici al passaggio della colata lavica superiore. Evidente è anche la fratturazione colonnare, prodotta dal raffreddamento delle lave basaltiche e sviluppata con andamento perpendicolare rispetto al substrato su cui scorreva la lava.

Arrivati ad Alalo Bed, in corrispondenza del Graben di Tendaho e della giunzione tripla rift-rift-rift, si osservano alcune tra le manifestazioni idrotermali più famose nell’Afar: *geysers*, sorgenti termali, fumarole, piccoli vulcani di fango e depositi idrotermali localizzati alla base di una scarpata di faglia estensionale (Fig. 8 A-C), a testimonianza del controllo tettonico sul sistema idrotermale. Grazie all’elevato flusso di calore e all’intensa fratturazione (parametri geneticamente connessi all’estensione crostale est africana e all’assottigliamento litosferico) Alalo Bed è considerato il secondo sito con maggior potenziale geotermico all’interno della regione dell’Afar (Kalberkamp et al., 2010; Varet et al., 2012).

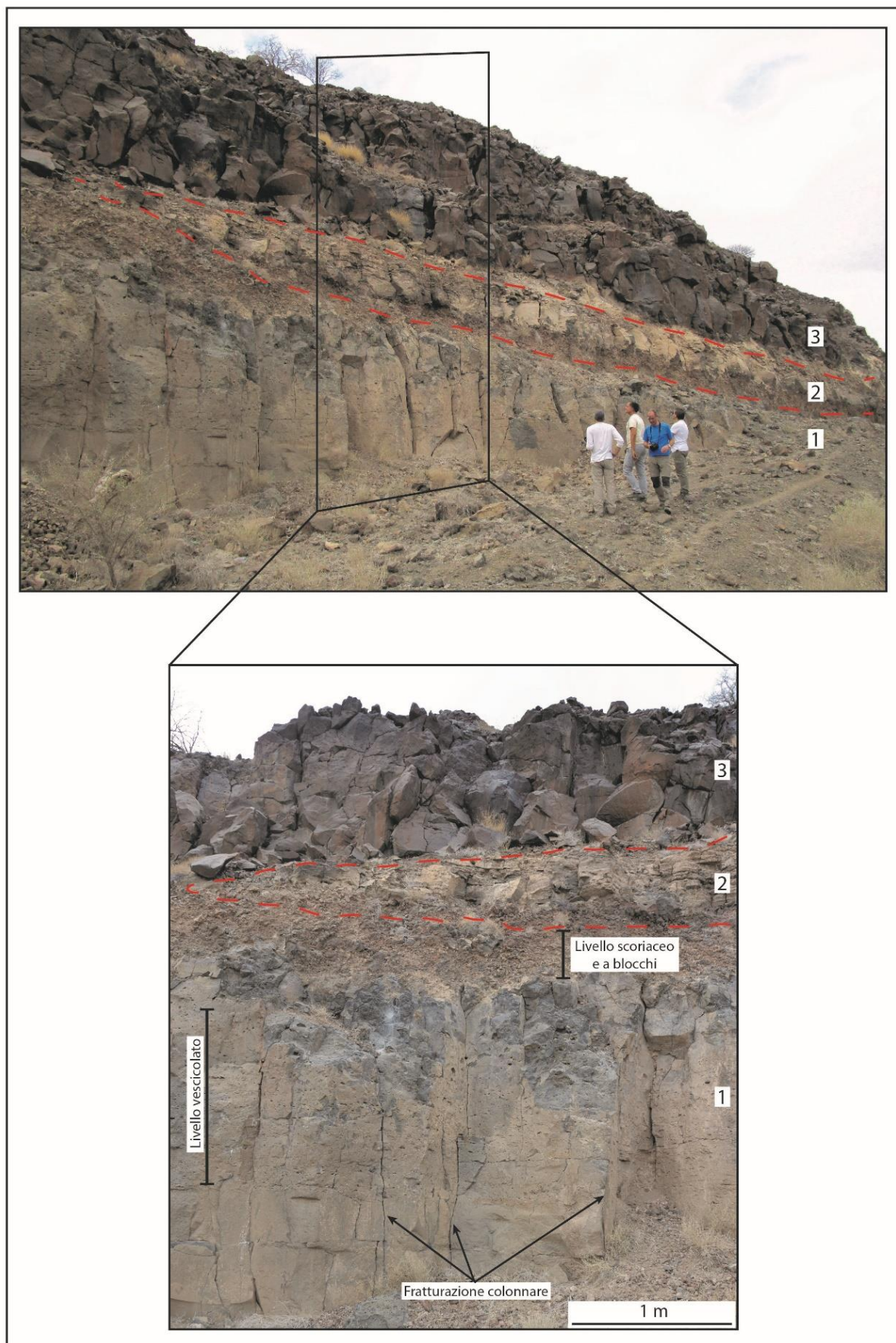


Fig. 7 – Tre colate laviche sovrapposte (numerate da 1 a 3 dal basso verso l’alto). In basso il dettaglio degli elementi osservati (vedi testo per i dettagli). Da notare che la seconda lava basaltica si chiude verso sinistra a formare una geometria lobata.

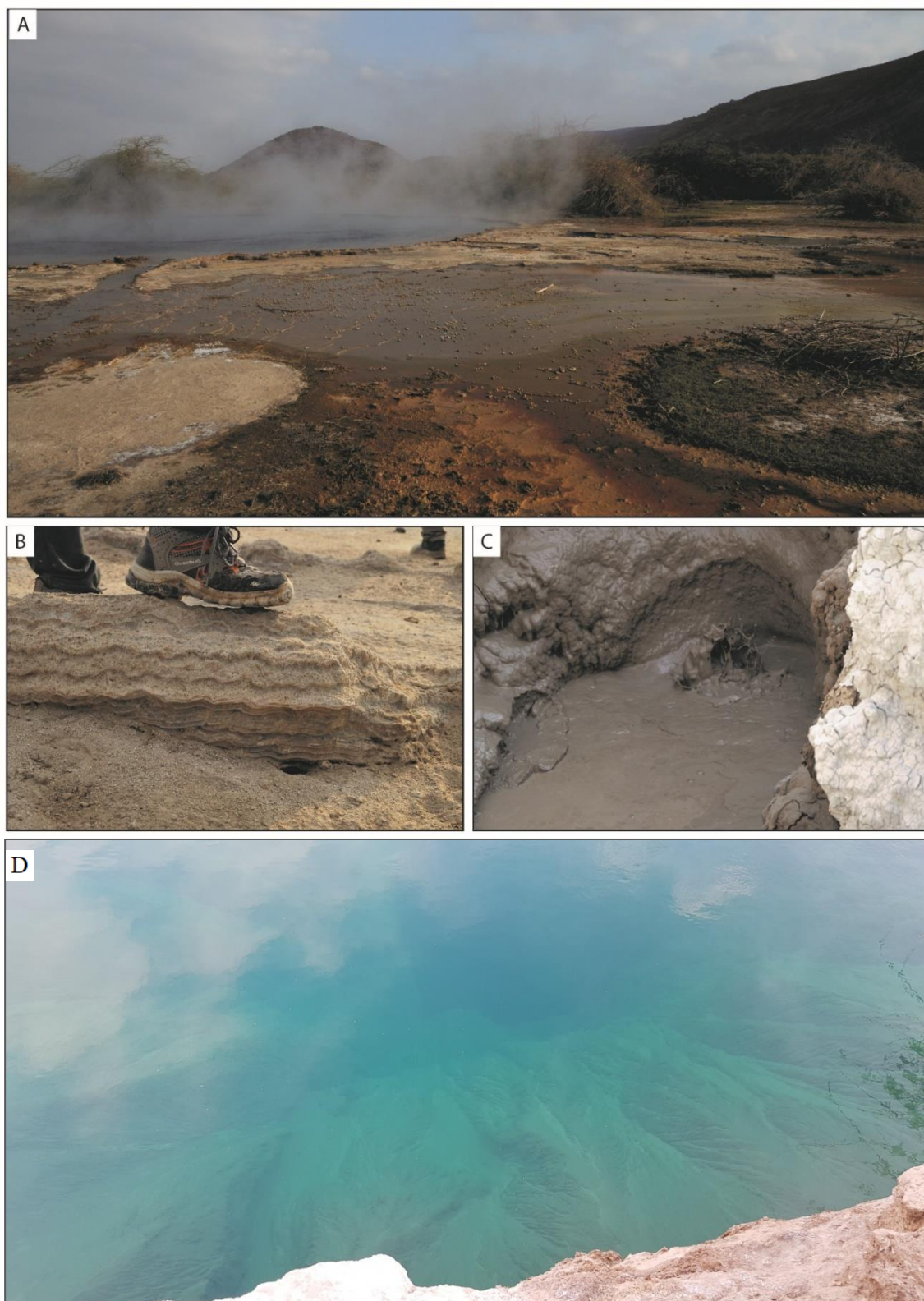


Fig. 8 – Manifestazioni idrotermali ad Alalo Bed. A) Sorgenti termali, fumarole e geyser. Da notare che il ripido rilievo morfologico sulla destra in foto corrisponde ad una faglia e che quindi gli elementi strutturali dell'area veicolano in modo determinante i fluidi caldi. B) Depositi idrotermali organizzati a bande. C) Dettaglio di un piccolo vulcano di fango. D) Piscina idrotermale con acqua a 80 °C.

Terzo giorno: Alalo Bed – Lago Afrera – Erta Ale (campo base)

Dopo una breve passeggiata sulle dune sabbiose e pietrose della zona desertica nei pressi di Alalo Bed, si riparte in direzione del Lago Afrera, noto anche come Lago Giulietti, in onore dell'esploratore italiano Giuseppe Maria Giulietti che venne ucciso in queste aree nel 1881.

Prima di raggiungere le sponde del suddetto lago, uno stop intermedio permette di apprezzare il drastico cambiamento del paesaggio circostante: la totale assenza di vegetazione e le condizioni di resistasia consentono di apprezzare le morfostrutture principali. A circa quota 0 m s.l.m., scarpate di faglia alte diverse decine e centinaia di metri iniziano a cambiare trend, abbandonando quello NE-SW del Main Rift Etiopico ed iniziando ad isorientarsi secondo il trend regionale NW-SE del Mar Rosso. Inoltre, un terzo trend regionale orientato parallelamente al Golfo di Aden ENE-WSW rende la depressione dell'Afar il punto triplo di congiunzione dei tre trends. (Fig. 9)



Fig. 9 – Primo stop a quota 0 m s.l.m. nel deserto roccioso. Le frecce indicano le scarpate di faglia ravvicinate e orientate secondo il trend regionale del rift del Mar Rosso.

La foto di figura 9 permette inoltre di apprezzare il deserto roccioso che caratterizza i primi chilometri della depressione: estese colate basaltiche, localmente a blocchi, e l'assenza totale di ostacoli consente al vento di esercitare l'azione erosiva al massimo in funzione della propria energia. Le azioni di deflazione e corrasione eolica hanno generato la superficie smussata dei blocchi visibile in fig. 9. Lungo il tragitto è stato inoltre possibile apprezzare le tipiche capanne del popolo Afar ed i loro cimiteri (Fig. 10), costruiti con i materiali disponibili in quest'area: pietre e pellame.



Fig. 10 – Cimitero Afar.

La presenza dominante di distese basaltiche è imputabile ai numerosi centri eruttivi che si aprono lungo il percorso seguito. Una seconda sosta permette di apprezzare le tipologie dei vulcani che hanno contribuito alla messa in posto di queste colate: vulcani a scudo con versanti poco pendenti mostrano, non raramente, la presenza di centri secondari “parassitari” manifestati come coni di scorie (Fig. 11).

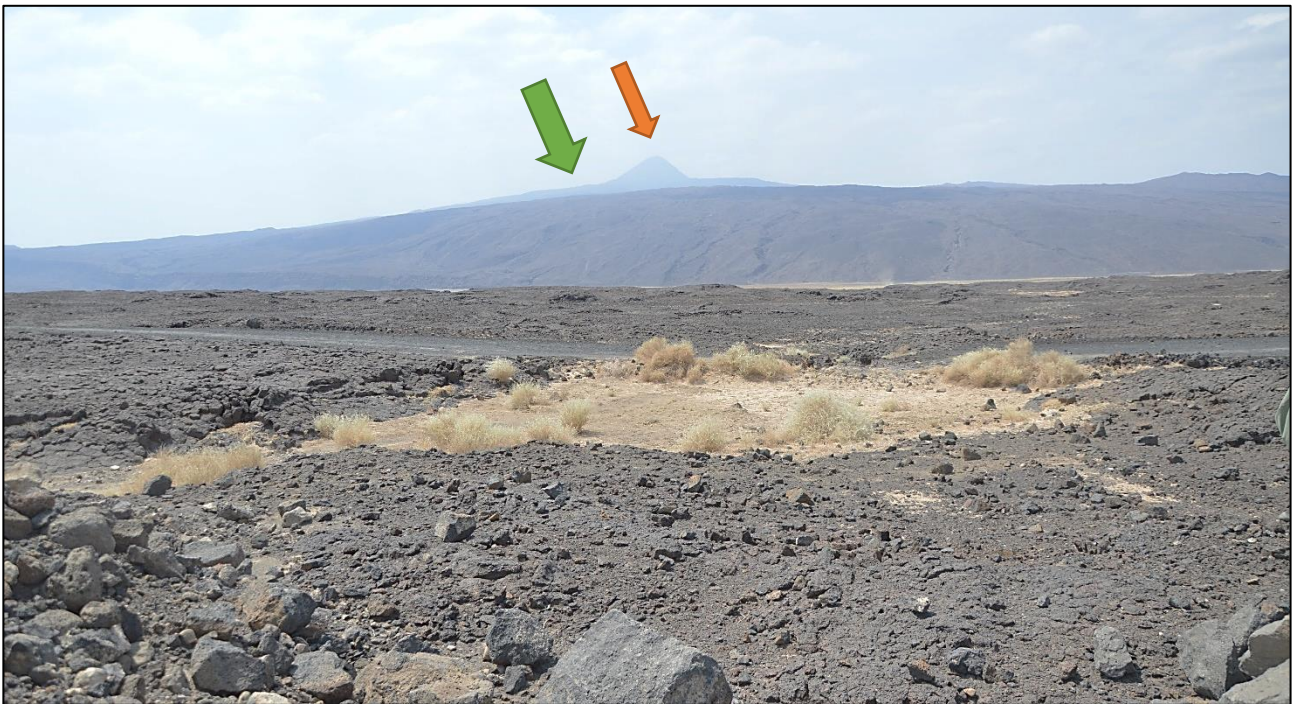


Fig. 11 – Uno dei centri eruttivi: la freccia verde indica il vulcano a scudo le cui pendici ospitano un centro eruttivo secondario, indicato dalla freccia arancione.

Proseguendo lungo chilometri di colate laviche, a quota -102 m s.l.m. si arriva sulle sponde del Lago Afrera (Fig. 12): un lago salato ai bordi del quale si susseguono vasche per l'estrazione del sale. Questo lago costituisce un bacino endoreico per gli attuali corsi d'acqua della regione, che precedentemente ospitava un mare.



Fig. 12 – Il Lago Afrera e le sue saline.

Un ultimo stop, prima di intraprendere gli ultimi chilometri di fuoristrada che condurranno al campo base dell'Ertà Ale, viene fatto in un ambiente desertico differente rispetto a quanto finora osservato. La presenza di dune e di rari palmizi caratterizza il deserto sabbioso, sul cui fondo è stato possibile apprezzare resti di bivalvi e gasteropodi, testimoni dell'ambiente marino passato (Fig. 13 A e B).



Fig. 13 – Deserto sabbioso. A) Resti di bivalvi e gasteropodi. B) La freccia arancione indica un cono di tufo da attività idromagmatica.

Quarto giorno: Erta Ale

La salita sull'Erta Ale prevede un percorso di circa 10 km con un dislivello di 400 metri. (Figg. 14, 15).



Fig. 14 – Percorso per arrivare alla cima dell'Erta Ale. Si noti la lava scoriacea (denominata aa) e a blocchi nella parte in alto a destra della foto.



Fig. 15 – Portatori Afar locali lungo il percorso per la salita dell'Erta Ale.

L'Erta Ale fa parte di una catena di vulcani che comprende, da Nord a Sud, le cime di Alu, Dalaffilla, Borale Ale, Erta Ale, Alebbagu e Hayli Gubbi (Figg. 16, 17). Sono vulcani a scudo, di grandi dimensioni e con versanti poco pendenti, spesso caratterizzati da ampie depressioni calderiche sommitali. Sono di bassa elevazione (tra i 430 m e i 1030 m s.l.m) e si può notare come

l'allineamento dei punti di emissione in direzione NW-SE segua la direzione della tettonica regionale del rift (Da Acocella, 2006).

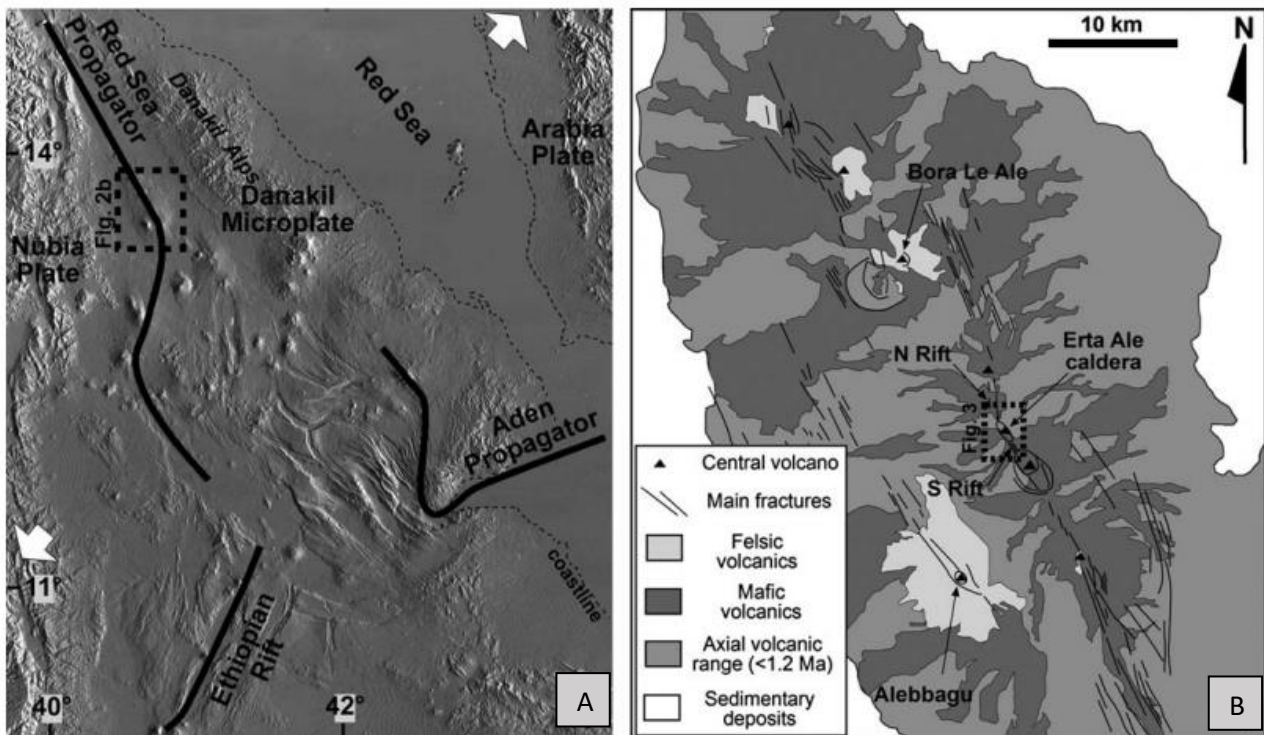


Fig. 16 – A) inquadramento tettonico della regione dell'Afar (le frecce indicano il movimento relativo della placca africana e della placca arabica. B) schema strutturale della parte centrale della catena dell'Erta Ale (Acocella, 2006).

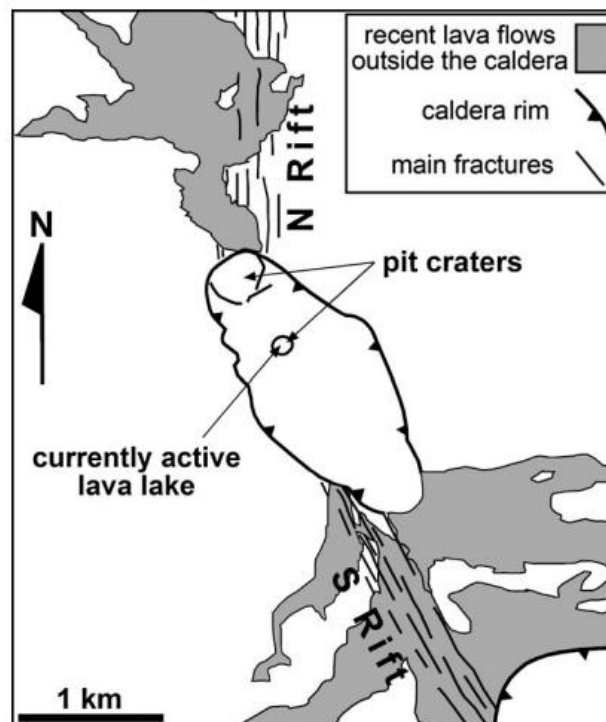


Fig.17 – Principali elementi tettonici della caldera dell'Erta Ale (Acocella, 2006).

La lava dell'Erta Ale (il vulcano più attivo di Etiopia) è di tipo basaltico e risulta quindi molto scura e fluida. Le composizioni relativamente povere in silice e le elevate temperature di scorrimento portano ad una bassa viscosità e la lava è perciò capace di percorrere lunghe distanze. Strutture caratteristiche di queste composizioni sono inoltre le lave a corde e i tunnel lavici (Fig. 18).

La lava a corde (*pahoehoe*, in hawaiano), indicativa di un tipo di lava molto fluida, si forma a seguito di un raffreddamento differenziale: la parte superficiale solidifica più rapidamente, mentre la parte sottostante della colata risulta invece ancora molto calda e fluida continuando facilmente a scorrere e portando alla formazione di increspature, ondulazioni e “corde” sulla superficie superiore ancora plastica (Fig. 19).

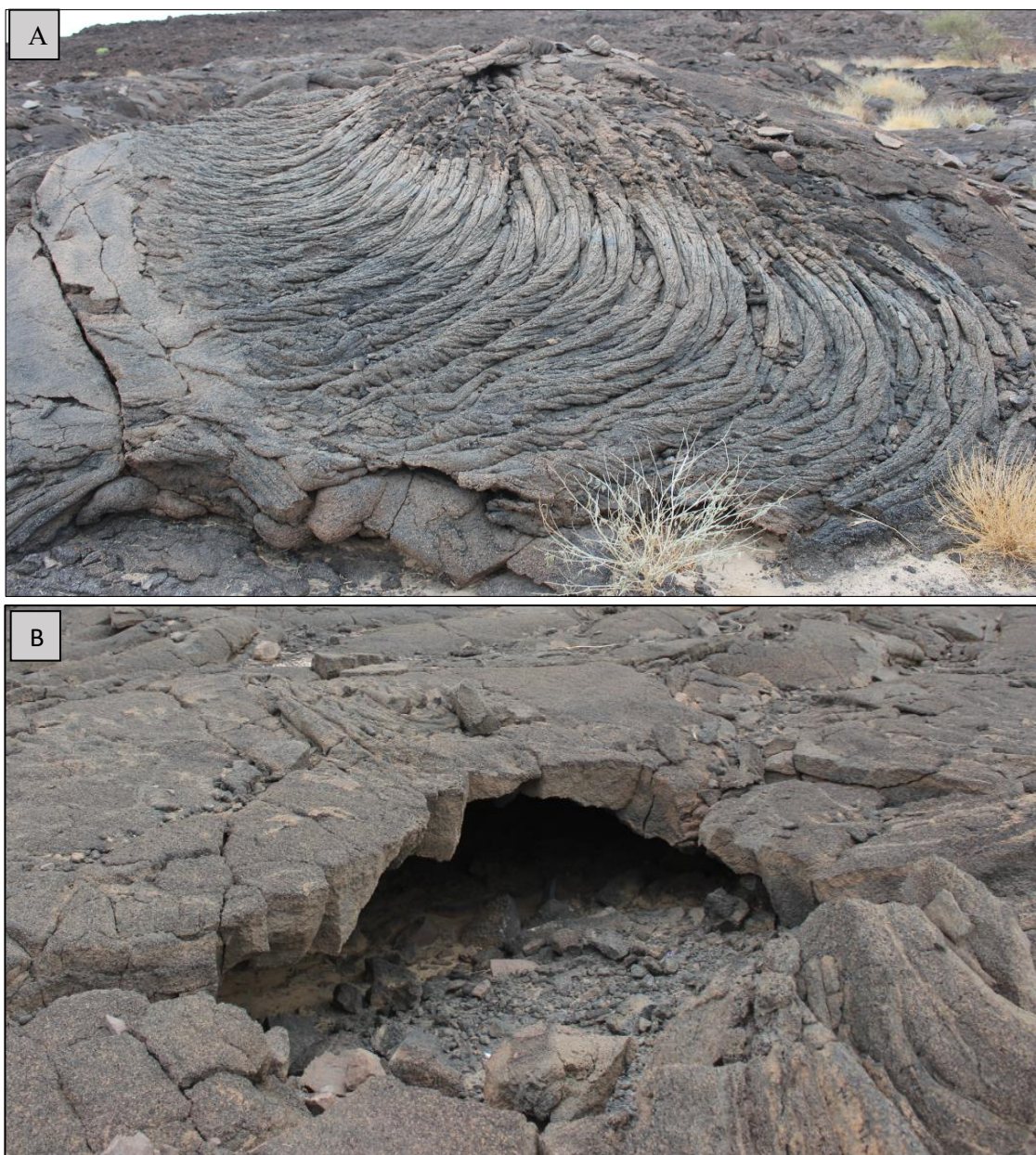


Fig. 18 – A) Lava a corde e B) Tunnel lavici.



Fig. 19 – Lava pahoehoe con tipiche increspature legate alla grande fluidità e al veloce raffreddamento.

Tali condizioni possono portare anche allo sviluppo di “tunnel” lavici (Fig. 18 B), al cui interno è presente lava che riesce a scorrere per lunghe distanze e ad alta temperatura, protetta dallo strato più superficiale ormai solidificato che inibisce la dispersione del calore. Ciò porta le colate vulcaniche a ricoprire vaste aree (Fig. 20) e a formare le morfologie dei vulcani a scudo.



Fig. 20 – Colate di lava pahoehoe all'interno della caldera dell'Erta Ale.

Sul campo, anche se più raramente, sono state osservate lave scoriacee (*aa*, in hawaiano; Fig. 13) e a blocchi. Vicino al punto di emissione, infatti, le colate formano strutture a corde in quanto sono più calde e presentano minor viscosità. Col procedere della distanza la lava man mano si raffredda e diventa più viscosa, fino ad arrivare a risentire del forte attrito col substrato che porta ad un'autobrecciatura dello strato basale. Questo cambio di reologia porta quindi ad una risposta non più plastica della lava, che inizia a rompersi formando veri e propri blocchi di lava spigolosi.

In prossimità della caldera invece sono stati osservati i *capelli di Pele* (dal nome della dea hawaiana del fuoco Pele), ossia sottili filamenti di vetro che si sono formati in seguito alle esplosioni delle piccole bolle di gas.

Il vulcano Erta Ale è noto in particolare per il lago di lava permanente ospitato in uno dei due *pit crater* all'interno della depressione calderica sommitale, a circa 80 m di profondità dal bordo del cratere. Tuttavia, dopo la recente apertura di una frattura laterale, a seguito di una migrazione del magma (Fig. 21), il livello del lago di lava è sceso di molti metri venendo celato alla vista quasi totalmente dai fumi che rimangono intrappolati all'interno della bocca (Figg. 22, 23).



Fig. 21 – Foto da satellite della caldera dell’Erta Ale e delle nuove fratture a SE. Credits NASA.gov (Gennaio 2017).



Fig. 22 – Veduta panoramica (sopra) e particolare del bordo (sotto) del cratere dell'Erta Ale.



Fig. 23 – Vista dell'interno del cratere vulcanico dell'Erta Ale da cui è visibile il lago di lava sceso di livello.

Quinto giorno: Erta Ale – Ahmed Ela

Dal campo base dell'Erta Ale si intraprende il viaggio che permetterà di raggiungere a fine giornata il villaggio di Ahmed Ela, nei pressi della piana del sale.

L'itinerario prevede una iniziale salita verso l'altopiano in direzione W fino al villaggio di Abala, per poi scendere nuovamente verso il triangolo dell'Afar seguendo una direzione NNE.

Il tragitto permette di osservare le litologie affioranti sulla spalla occidentale del *rift* (altopiano etiopico). Sporadicamente affiorano rocce antichissime (~ 800 milioni di anni) attribuibili al basamento tardo Proterozoico, strutturatosi durante l'orogenesi Panafricana. Al di sopra del basamento poggiano in *unconformity* le litologie appartenenti al ciclo sedimentario alpino. Nel dettaglio si incontrano per gran parte del viaggio calcari e, subordinatamente, arenarie di età giurassica. I calcari si presentano ben stratificati con frequenti intercalazioni marnose e abbondante presenza di brachiopodi. Questi sono spesso interessati da intrusioni magmatiche (dicchi e sill, anche detti filoni strato) a composizione basica e faglie con rigetti massimi di pochi metri. Un affioramento particolarmente degno di nota è quello riportato in Figura 24, dove si può apprezzare un'intrusione basica all'interno dei calcari giurassici. Tale intrusione si sviluppa sia ortogonalmente che parallelamente alle superfici di strato, formando rispettivamente dei dicchi e dei filoni strato (Fig. 24 A). Seguendo il filone strato verso destra si può apprezzare la sua terminazione laterale (Fig. 24 B). In prossimità di quest'ultima è possibile osservare un piegamento simmetrico degli strati posti al di sopra e al di sotto del filone strato. Tale piegamento è avvenuto a causa della pressione esercitata dalla propagazione laterale del filone sulle rocce circostanti. Pochi metri a sinistra della terminazione del filone si può apprezzare come il filone strato venga dislocato da una faglia diretta che ne ribassa la parte destra di circa un metro (Fig. 24 B). La geometria delle faglie coniugate e del dicco suggerisce una tettonica estensionale orientata NE-SW. In particolare, il dicco risulta parallelo ad un set di fratture subverticali orientate circa NW-SE, ovvero perpendicolari alla direzione di estensione lungo il *rift* del Mar Rosso. Pertanto, la coesistenza di faglie ed intrusioni ignee rappresenta l'evidenza che la fase di *rifting* si è manifestata attraverso l'azione di processi sia vulcanici che tettonici.

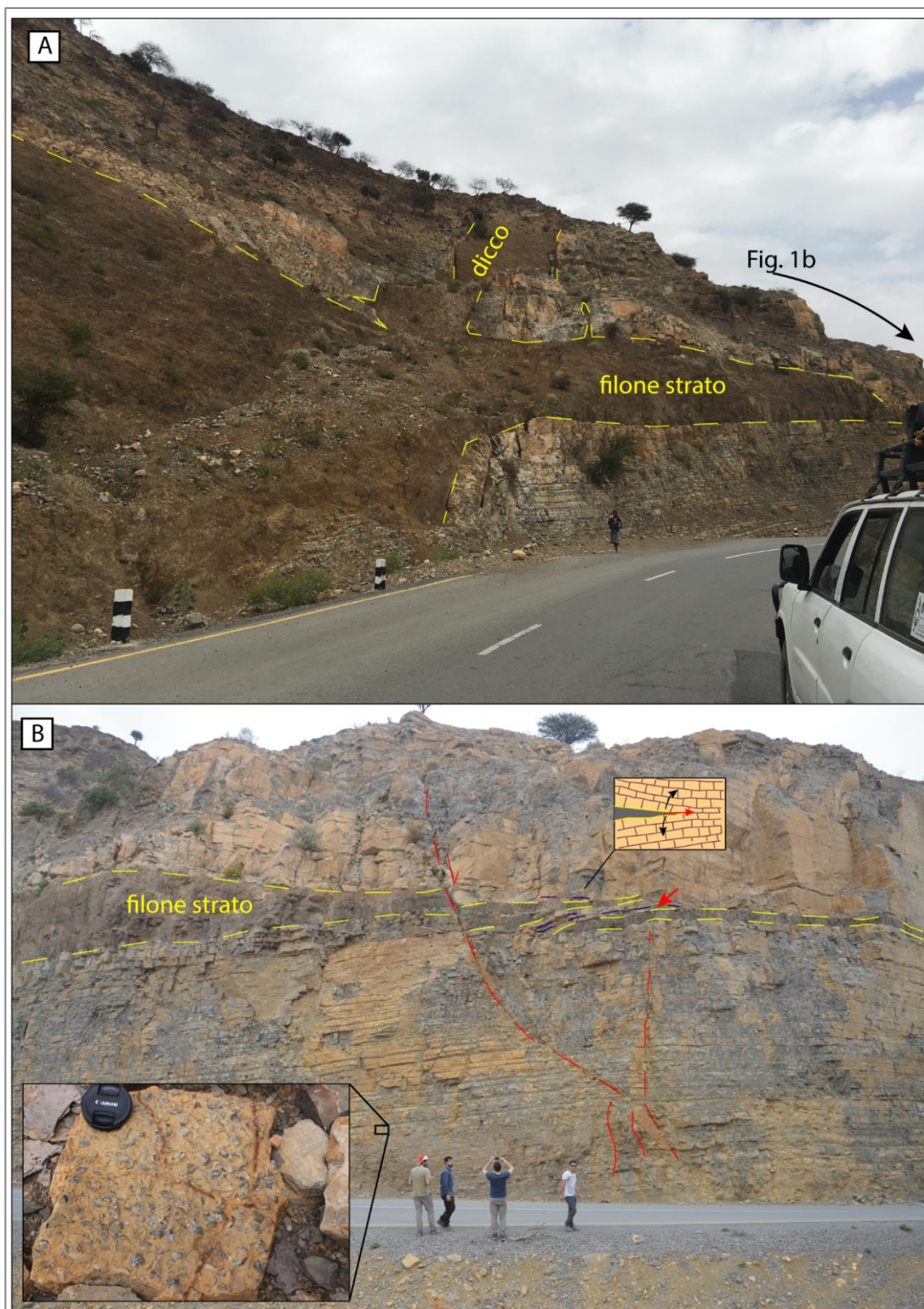


Fig. 24 – Interazione tra attività ignea e tettonica legata al rifting del Mar Rosso in un affioramento di calcari giurassici. I calcari, ricchi in brachiopodi (inserto in Fig. B), sono pervasi da intrusioni ignee basiche sia ortogonali che parallele alla stratificazione (A) e coesistono con faglie estensionali (B). Il piegamento simmetrico degli strati in prossimità della terminazione del filone strato è dovuto alla pressione esercitata dall'intrusione magmatica sugli strati durante la messa in posto (schema in alto a destra in Fig B).

A fine giornata si raggiunge il villaggio di Ahmed Ela, collocato quasi all'estremità settentrionale della depressione dancala e nei pressi della piana del sale. Qui le carovane di dromedari (Fig. 25) e muli arrivano ogni giorno dall'altopiano etiopico per tornare la sera con il loro carico di pani di sale.



Fig. 25 – Carovana di dromedari presso Ahmed Ela.

Sesto giorno: Ahmed Ela - Dallol - Ahmed Ela - Assabole

Il sesto giorno di viaggio, partendo dal villaggio di Ahmed Ela, collocato all'estremità nord della depressione dancale, è stato possibile raggiungere l'estesa piana di sale che si estende fino al confine con l'Eritrea. Si accede alla piana superando un check-point presso cui vengono imposti dazi commerciali alle carovane di dromedari e muli che arrivano ogni giorno dall'altopiano etiopico.

La piana di sale si estende per 8000 km² (circa 6 volte l'estensione del comune di Roma) in un'area depressa e allungata in direzione NW-SE, la cui formazione è direttamente legata all'estensione e all'assottigliamento crostale connesso alla fase di *rifting* del Mar Rosso (Binega, 2005). Tale zona, nel corso del Quaternario è stata periodicamente allagata dalle acque del Mar Rosso: le continue ingressioni e regressioni del mare (l'ultima circa 30000 anni fa) unite alla forte evaporazione dell'area, hanno permesso lo sviluppo di un esteso ambiente di *sabkha*, in cui si sono depositati ingenti spessori di evaporiti (superiori a 900 m, Barberi e Varet, 1970; Varet, 2010; Varet et al., 2012). Le sequenze evaporitiche sono caratterizzate dall'alternanza di strati di sali precipitati a seguito dell'evaporazione dell'acqua marina, tipicamente gesso, anidrite e halite (salgemma), che nelle porzioni più superficiali appare anche in forma cristallina (Fig. 26).



Fig. 26 - Cristalli di halite (salgemma) cresciuti all'interno delle fratture dei blocchi di evaporiti.

Attualmente l'ingressione del Mar Rosso è impedita dalla presenza delle Alpi dancale e da rilievi vulcanici in corrispondenza del golfo di Zula.

In Figura 27 è possibile osservare l'estensione della piana e l'effetto congiunto dato dall'essiccamento, responsabile della tipica fessurazione poligonale, e dalla risalita di sali, che porta alla formazione dei bordi rilevati. Tali bordi sono dei “muretti” effimeri, poiché vengono successivamente attaccati dall'azione combinata del termoclastismo e dell'aloclastismo.



Fig. 27 – Veduta della piana del sale.

Parte della piana è sfruttata dalle popolazioni Afar locali per l'estrazione del sale, che viene cavato, sagomato in blocchi e venduto ai carovanieri che ripartono la sera stessa risalendo il corso del fiume Saba in direzione di Berhale, dove venderanno il loro carico (Fig. 28).



Fig. 28 – Estrazione, sagomatura e trasporto dei blocchi di sale.

All'interno della piana del sale si erge la collina di Dallol, chiamata anche "collina degli spiriti", la quale è alta 50 m e ampia 8 km² ed ha origine sedimentaria. In lingua Afar, Dallol significa “disciolto”, in riferimento alle molte sostanze acide qui disciolte in acqua. Questa zona desertica e

desolata (Fig.29) vanta la temperatura media annua più alta della Terra ed è conosciuta per le sue formazioni geologiche e mineralogiche di eccezionale impatto visivo.

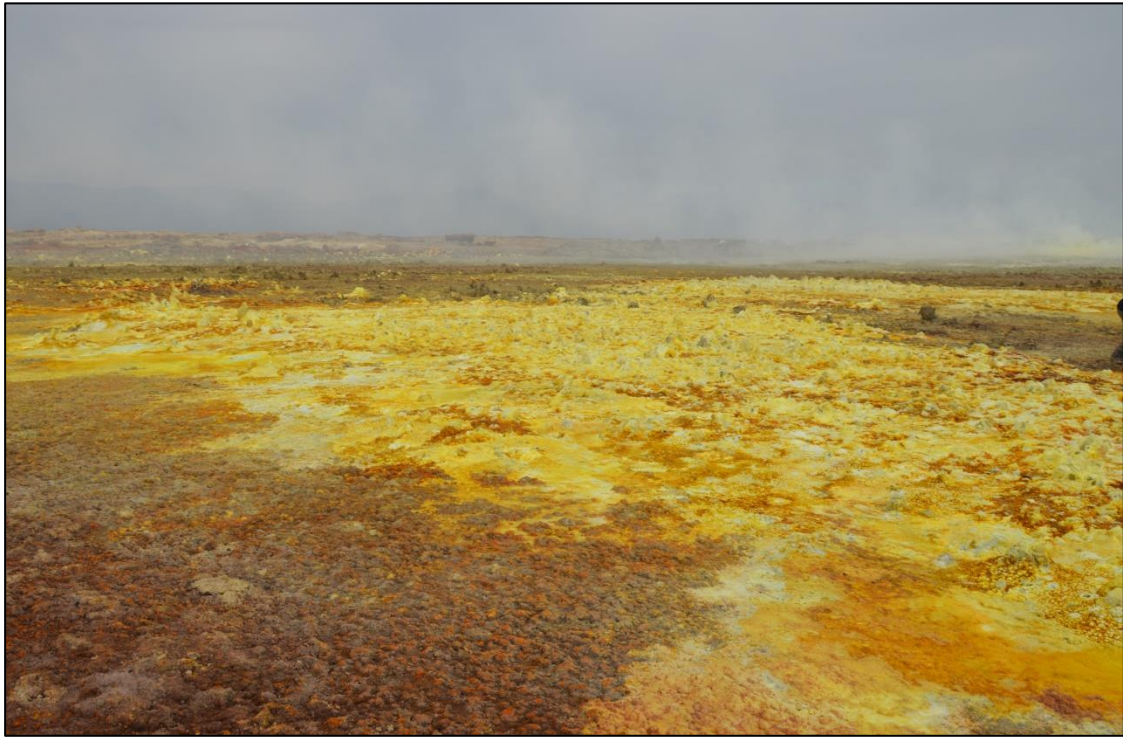


Fig.29 – Veduta della regione arida di Dallol.

Nell'area si possono osservare, in particolare, tre tipologie di strutture principali: gli hornitos di sale, le manifestazioni circolari e le piscine acide. Gli hornitos (Fig.30) sono colonne di circonferenza variabile che si formano come deposizione salina di un flusso ascendente supersalino; spesso si trovano in gruppo e con un'altezza simile, probabilmente dovuta all'equilibrio idrostatico del sistema sottostante.

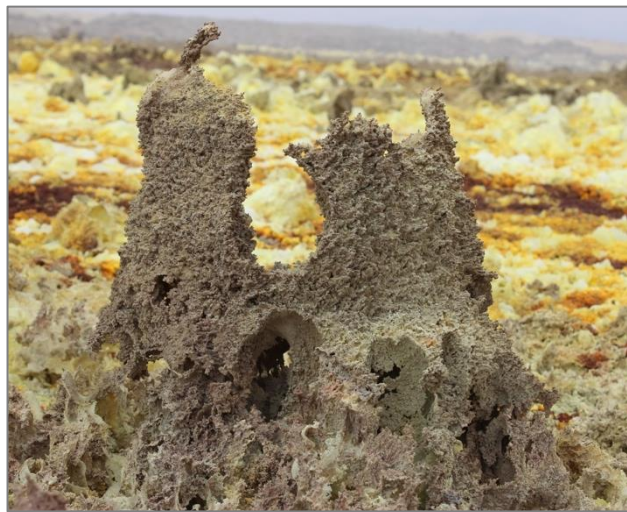


Fig. 30 – Hornitos di sale.

Le manifestazioni circolari (Fig.31) presentano un diametro variabile da pochi metri a oltre cento metri, e sono controllati da episodi di deposizione seguiti da essoluzione e disintegrazione, dovuti all'abbassamento della falda freatica e all'aumento del flusso di vapore/gas.



Fig. 31 – Manifestazioni circolari di concrezioni minerali (fiori di sale).

La terza tipologia di struttura sono le piscine acide (Fig. 32) nelle quali si hanno fluidi derivanti da una miscela di acque sotterranee e risalite di flussi geotermici.



Fig. 32 – Piscine acide di Dallol.

Lo scenario che si apre salendo sulla collina è molto suggestivo, vasche a terrazzamenti gialle e verdi fosforescenti di acidi (Fig. 33), delimitate da cornici di cristalli di halite e zolfo (Fig. 34) e concrezioni di evaporiti si alternano a piccoli geyser (le cui emissioni sono tossiche) e a formazioni arancio, rosse e marroni a forma di spugna denominate fiori di sale. Nella parte centrale, collinette di zolfo e *hornitos* di cloruri e solfati (Fig. 35) bordano le piscine di acque acide verdi e azzurre (il

cui pH può essere addirittura inferiore a zero, come riportato da Franzson et al., 2015) a loro volta sormontate da cascate bianche di carbonati che emettono zampilli con intermittenza di pochi secondi.

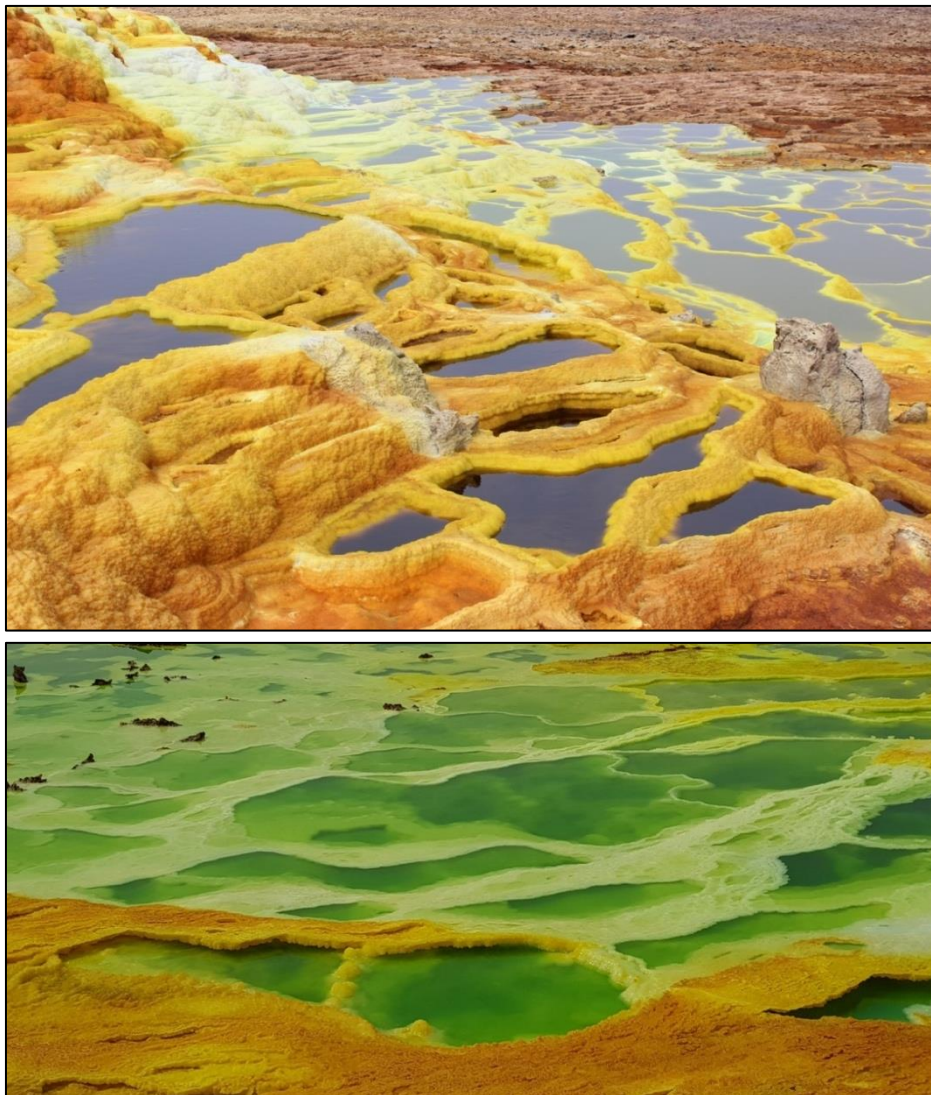


Fig. 33 – Terrazzamenti di piscine acide con ossidazione delle acque maggiore (sopra) e minore (sotto).



Fig. 34 – Distesa di zolfo a Dallol.

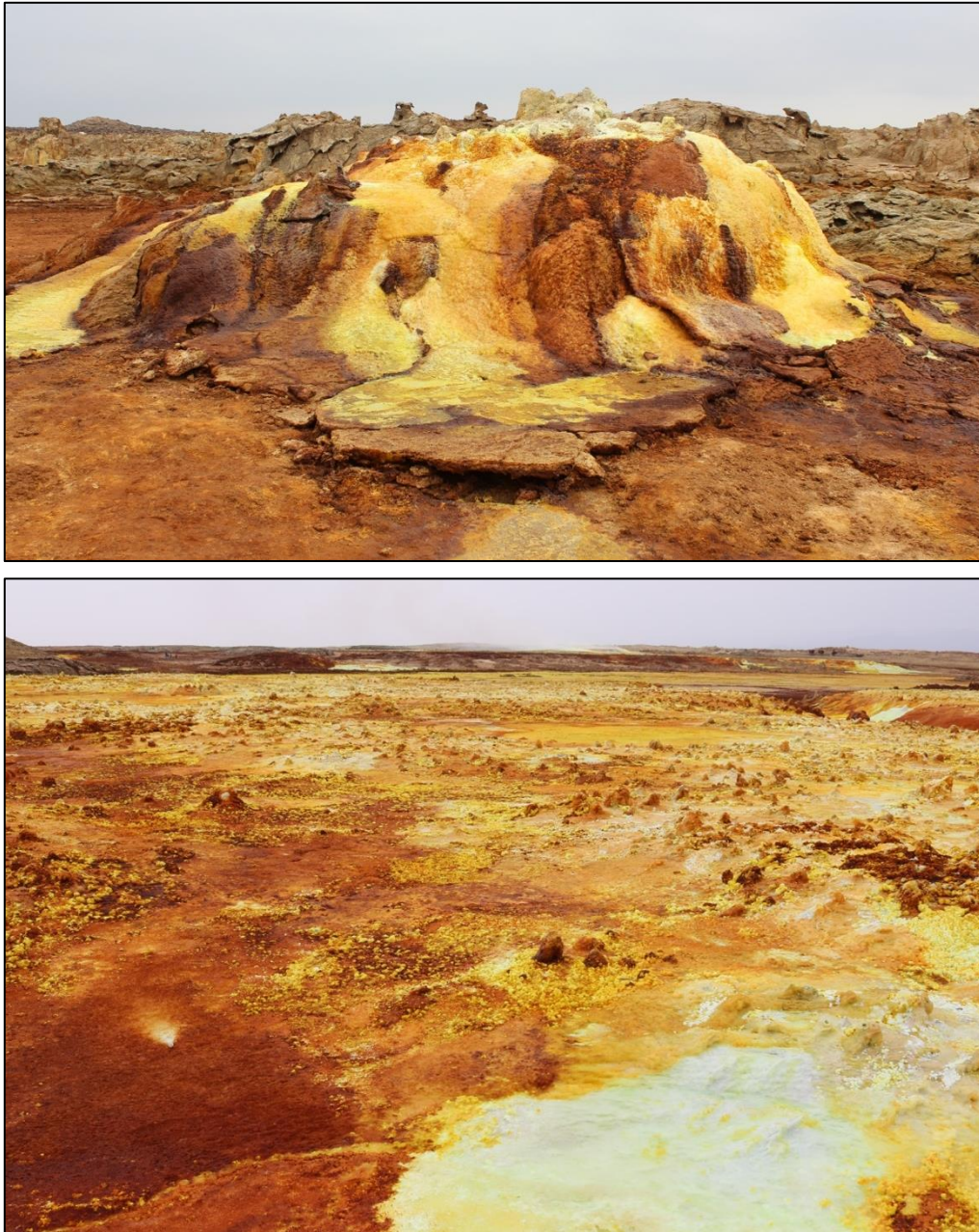


Fig. 35 – Collinetta di zolfo (sopra) e terreno arido ricoperto di hornitos di cloruri e solfati (sotto).

Il sito geotermico di Dallol si trova in mezzo alla piana del sale a circa -100 m s.l.m. e si estende in direzione E-W, perpendicolare all'asse del *rift*.

L'ambiente in cui è posizionato questo sito mostra una complessa relazione tra la spessa successione di evaporiti della piana del sale, una fonte di calore sottostante e le acque meteoriche, che origina un reservoir geotermico con temperature superiori a 280 °C e fluidi supersalini che emergono con temperature fino a 110 °C (Franzson et al., 2015). Per quanto riguarda l'età di questo sito, i vincoli vengono posti dall'ultima trasgressione del Mar Rosso, risalente a 30.000 anni fa.

Le concrezioni multicolore di sali si sviluppano come risultato dell'attività idrotermale. L'acqua calda e le fumarole, la cui temperatura può raggiungere anche 120°C, depositano i solfati di Ca, Na, K e Fe anidrite, thenardite, jarosite e i cloruri di Na, K, Mg halite, silvite, bischofite, carnallite, oltre agli ossidi e idrossidi di Fe ematite, magnetite e akaganeite, creando una vasta gamma di colori dei suoli nei siti di emissione, dal nero al blu al verde in condizioni riducenti, al giallo e rosso e marrone dopo l'ossidazione. Le sorgenti e le fumarole sono allineate in direzione NNE, anche se le posizioni dei punti di sfiato cambiano nel tempo a causa della deposizione dei sali che va ad ostruire i condotti.

La collina di Dallol più che una vera cupola di sale probabilmente è il risultato di un sollevamento verticale dovuto ad un'intrusione magmatica profonda, ipotesi confermata sia dagli strati orizzontali esposti che da dati geofisici (magnetici e gravimetrici) che mostrano un corpo magmatico, probabilmente basaltico, a pochi chilometri di profondità, sotto la base dei sedimenti. In realtà nell'area non sono stati trovati prodotti vulcanici, infatti le rocce vulcaniche più vicine si trovano a sud del lago Assale, a circa 30 km da Dallol.

A causa della ricchezza di cloruro di potassio, sodio e magnesio, l'area di Dallol è stata in passato oggetto di sfruttamento minerario. Qui infatti esiste una sorta di città fantasma: il sito estrattivo di potassio. L'impianto di estrazione del potassio costruito dall'Italia in epoca coloniale venne abbandonato negli anni trenta, ma venne riutilizzato dagli americani negli anni cinquanta, come base scientifica e militare. Il tutto venne poi abbandonato negli anni sessanta. Resti dell'insediamento sono ancora visibili con intelaiature di ferro corrose e arrugginite. Le acque superficiali di Dallol hanno una salinità molto elevata e un pH che varia da moderatamente acido ad estremamente acido.

Dal 2013 l'area di Dallol viene studiata da un team di scienziati che studiano aree della Terra che potrebbero rappresentare analoghi di Marte. In particolare, nel 2017 si sono scoperti in quest'area dei batteri "poliestromofili", i quali sono capaci di adattarsi ad ambienti ad acidità estrema e a temperatura e salinità elevate. Riscendendo la collina di Dallol ci si reca a visitare le colonne di Dallol (Fig. 36); torri saline di decine di metri di altezza, isolate dalle rare piogge in strati con sottili intercalazioni argillose. Si tratta infatti di varve, cioè di una ripetizione ritmica di sedimenti clastici stagionali, che si sono depositati in ambiente marino o lacustre. In particolare, si tratta di strati di anidrite e halite alternati a strati di argille, che si trovano alla sommità delle colonne e che gli conferiscono queste particolari forme. Sono quindi dei giganteschi pinnacoli di sali solidificati su un terreno scosceso e aspro che in alcuni punti assume la forma di lame taglienti di sale.



Fig. 36 – Le colonne di Dallol.

In questa zona si trovano anche due laghi; il lago giallo e il lago nero. Nel lago giallo (Fig. 37) l'acqua ribolle costantemente, per effetto dei gas (principalmente CO_2 e SO_2) sprigionati dal sottosuolo, ed è di aspetto oleoso. Intorno al lago, vi sono depositi salini multicolore alternati a piccole sorgenti calde e mini-geyser. L'acqua del lago è ancora salata, ma meno calda (temperature di circa $50\text{-}55^\circ\text{C}$) e meno acida (pH circa 2) rispetto a quella delle piscine di Dallol.



Fig. 37 – Lago giallo.

Nel lago nero (Fig. 38) si ha invece acqua acida più scura e con temperature di circa 70°C , al cui interno si ha una gran percentuale di cloruro di magnesio. Intorno al lago c'è un suolo formato da concrezioni saline in cui si aprono improvvisamente piccole voragini gorgoglianti di acqua acida.



Fig. 38 – Lago nero.

Dopo aver visitato Dallol, ci si sposta verso il lago Karum (o lago Assal; Fig. 39), dove si raggiunge la maggiore depressione della Dancalia etiopica: -116 m sotto il livello del mare. Il lago è caratterizzato da elevata salinità ed alimentato dai corsi d'acqua Didic, Ala, Rira Guddy e Ragali (Munzinger, 1869). In Figura 40 è possibile notare come la forte evaporazione porti alla formazione di incrostazioni e accumuli salini nelle porzioni più superficiali del lago.



Fig. 39 – Vista del lago Karum.



Fig. 40 – La forte evaporazione che si verifica nella zona del lago Karum porta alla formazione di grandi distese caratterizzate da incrostazioni e accumuli salini (sopra) ricoperte da un sottilissimo velo d'acqua su cui è facile camminare per lunghi tratti (la foto in basso è stata scattata dall'interno del lago).

Settimo giorno: Assabole - Makalle

Il sesto giorno di escursione si conclude con l'arrivo ad Assabole e pernottamento all'uscita dello spettacolare canyon del fiume Saba. Il fiume nei mesi meno piovosi è percorso dalle carovane di dromedari e muli che trasportano il carico di sale in direzione di Berhale, luogo di scambio situato sull'altopiano etiopico. Al risveglio, siamo condotti dalla guida e dal capo villaggio (molto attento a salvaguardare il proprio territorio) per un breve trekking nel canyon del fiume Saba. Il fiume Saba, come la maggior parte dei corsi d'acqua che tagliano perpendicolarmente la scarpata Occidentale dancala e dell'Afar, è un corso d'acqua intermittente che trasporta il suo carico solido per lo più nelle stagioni piovose, durante le quali si concentrano le maggiori piene fluviali che trasportano il materiale sedimentario più grossolano (ghiaie, ciottoli e massi). In Figura 41 è ben visibile in letto del Fiume Saba caratterizzato da canali di tipo *braided* costituiti da materiali grossolani (ghiaie, ciottoli e massi) e barre sabbiose. Lungo le pareti del canyon affiora una successione di depositi sabbiosi e conglomeratici (Fig. 41) di età Pleistocenica anch'essi riconducibili ad un sistema fluviale di tipo *braided* incisi dal Fiume Saba in tempi recenti, dislocati da faglie prevalentemente estensionali a basso rigetto.

Terminato il trekking si risale l'altopiano attraverso la strada che da Assabole porta a Makelle. Passando per Berhale si taglia perpendicolarmente la scarpata dancala dove affiora la successione che caratterizza il margine occidentale del Rift Etiopico. Le unità che affiorano sono quelle riconducibili al basamento cristallino Precambriano, alla successione sedimentaria Mesozoica dell'Arenaria di Adigrat e dei Calcari di Antalo e ai prodotti basaltici del vulcanismo Cenozoico (Trap Series). In particolare, nella zona di Berhale affiorano le unità superiori del basamento cristallino composte da rocce di basso grado metamorfico in contatto diretto e angolare con l'arenaria di Adigrat (Triassico Superiore-Giurassico Medio; Enkurie, 2010), su cui si appoggia la successione carbonatica di rampa omoclinale dell'Antalo Limestone (Giurassico Superiore; Bosellini et al. 1997) (Fig. 42 A,B). La successione terrigena di età Mesozoica che affiora al di sopra del basamento metamorfico Neoproterozoico è caratterizzata da depositi arenacei con stratificazione incrociata a grande scala che sono riconducibili ad un sistema da continentale subaereo a estuarino a dominante tidale che evolve verso l'alto ad un complesso di barriera-laguna (Fig. 42 C,D). Questi sistemi deposizionali si sarebbero sviluppati a seguito di un relativo innalzamento del livello del mare e conseguente ingressione marina all'interno di una depressione strutturale. I sovrastanti Calcari di Antalo testimoniano un'ulteriore fase di trasgressione marina. Durante il Cretaceo Inferiore si depositano, in discordanza angolare al di sopra dei calcari di Antalo,

le arenarie di ambiente continentale dell'Amba Aradam a loro volta suturate dai prodotti vulcanici di età Eocene-Oligocene conosciuti come Trap Series (o Serie dei trappi).

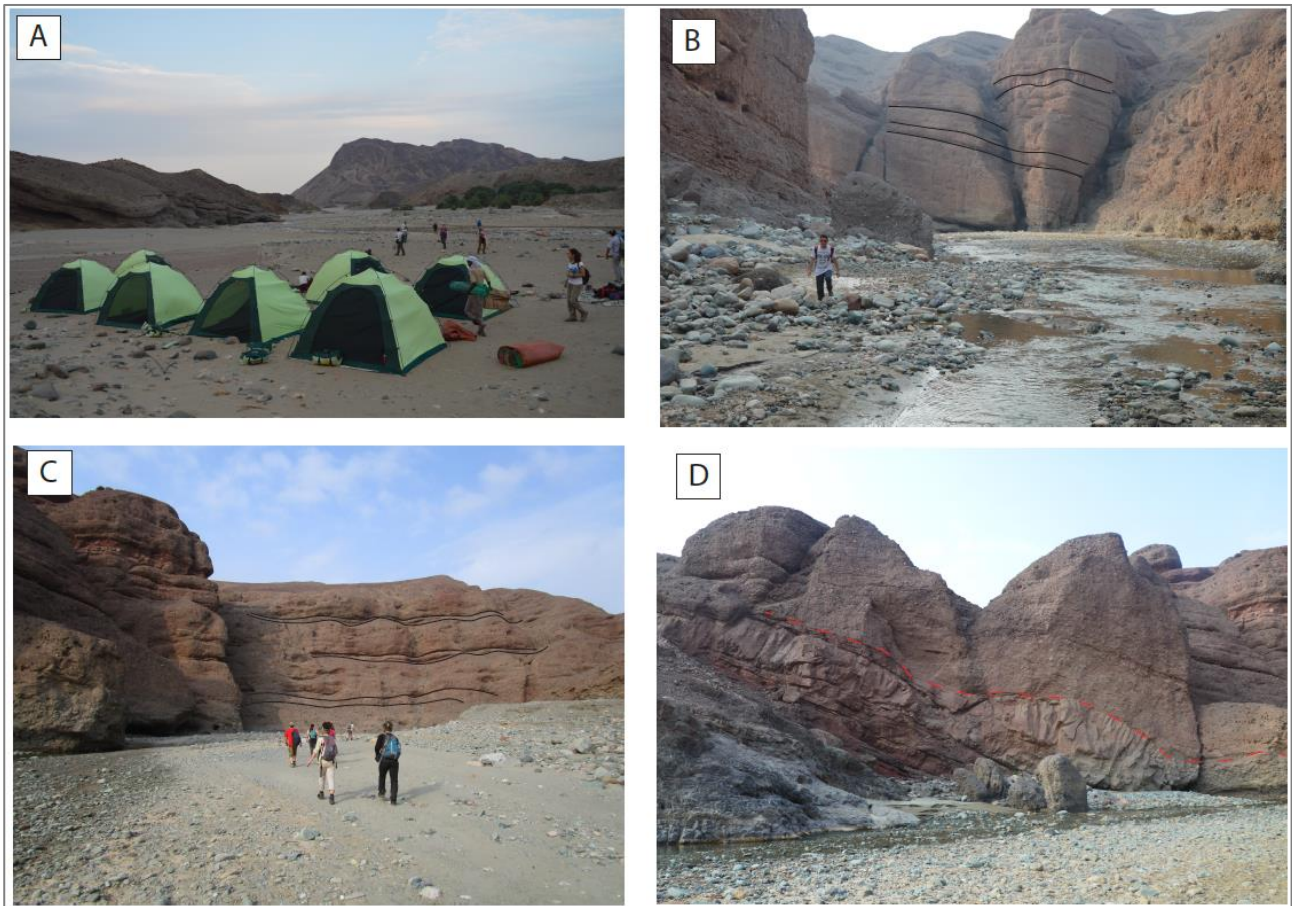
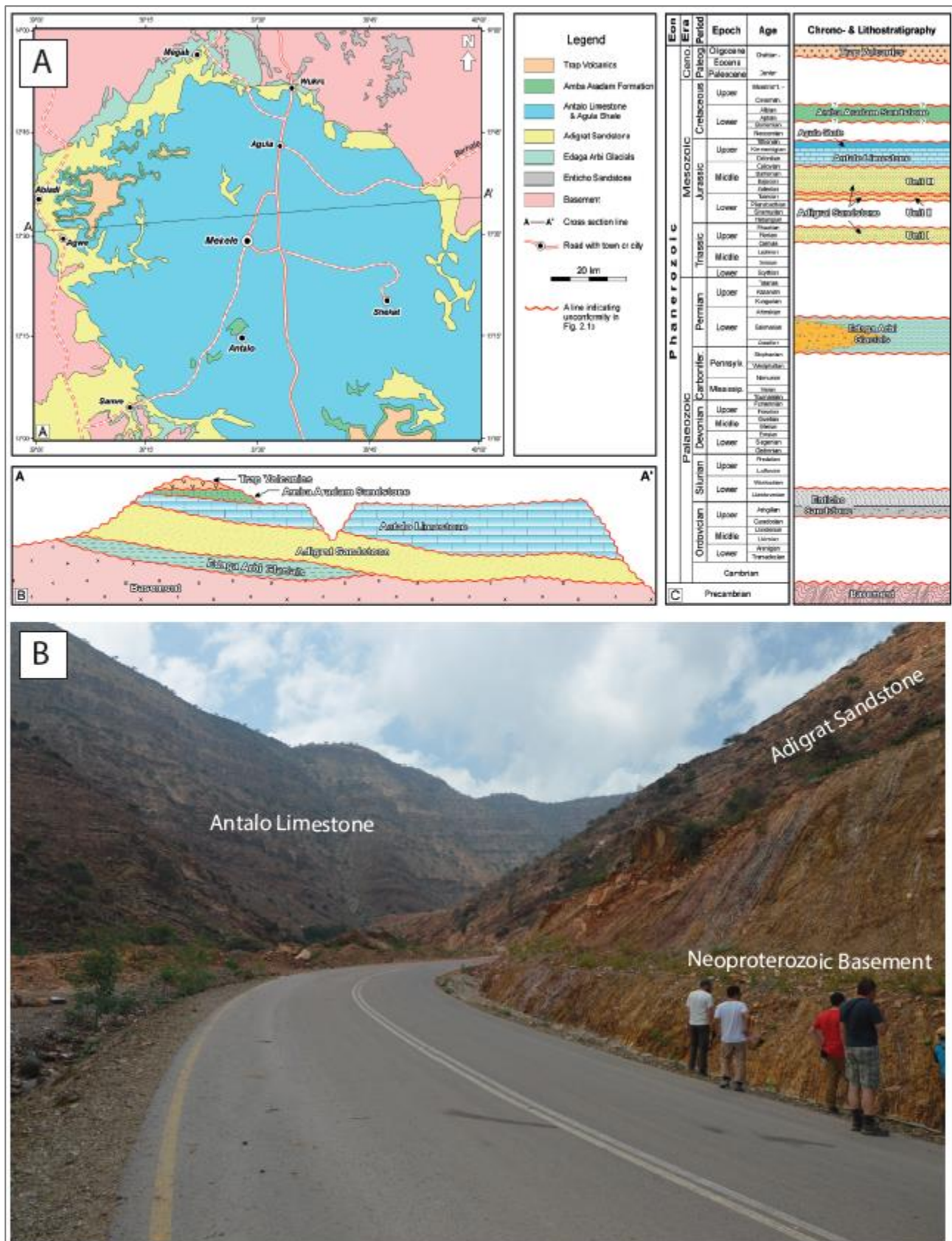


Fig. 41 – Canyon del fiume Saba: (A) Campo base; (B) Caratteristiche morfologiche principali di un sistema fluviale attuale di tipo braided. Da notare la presenza di canali, barre sabbiose e barre ciottolose; (C) Evidenziate dal line-drawing alcune unità schiacciate e allungate composte da forme canalizzate a conglomerati e barre sabbiose tipiche di un sistema braided ad alta energia. Si possono notare diverse unità che corrispondono a eventi deposizionali legati a piene fluviali; (D) Si noti la superficie basale erosiva canalizzata prodotta da flussi ad alta energia.



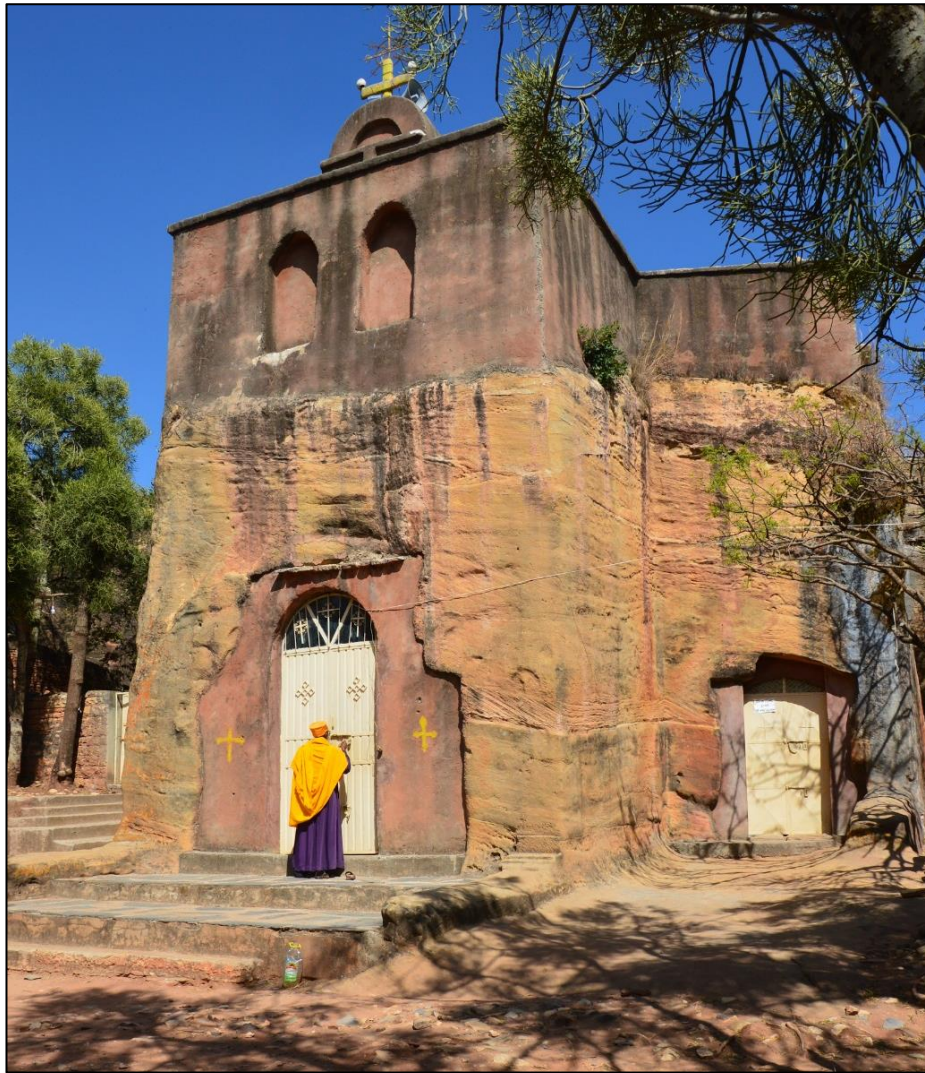


Fig. 43 – Un monaco si accinge ad aprire la porta della chiesa Wukro Chirkos. È visibile la colonizzazione biologica (licheni e piante erbacee) presente sulla facciata.



Fig. 44 – Decorazioni interne della chiesa di Wukro Chirkos su cui sono visibili i danni meccanici a pitture e bassorilievi, nonché gli annerimenti dovuti probabilmente al fumo delle candele: (A) dipinti murali; (B) bassorilievi dipinti.

Ottavo giorno: Makallè – Lalibela

L'ottavo giorno è stato principalmente incentrato sul trasferimento dalla città di Makallè, situata nella regione del Tigray, verso la città di Lalibela, collocata nella regione degli Amhara. Il percorso della giornata è stato di oltre 300 km in direzione sud, attraversando creste e vallate dell'altopiano etiope con un continuo saliscendi (fino a quota 3000 m s.l.m.), in parte su strada asfaltata e in parte su sterrato.

Dal punto di vista geologico si assiste al passaggio da una successione di calcari, marne e argilliti giurassiche alla serie dei trappi di età Oligocenica-Miocenica, che affiorano distintamente sui rilievi montuosi già poche decine di km dopo aver lasciato Makallè e caratterizzano il paesaggio sino all'arrivo a Lalibela.

La serie dei trappi è caratterizzata da una tipica morfologia a gradoni (Fig. 45) dove l'erosione differenziale mette in risalto l'alternanza fra una sequenza di grandi espandimenti basaltici intervallati a litotipi più facilmente erodibili dagli agenti morfogenetici, rappresentati da paleosuoli o rocce sedimentarie (Fig. 46). La genesi dell'estesa provincia ignea etiope viene connessa all'azione di un plume di mantello profondo, responsabile della messa in posto delle grandi coltri laviche basaltiche, le quali sono coeve con il sollevamento dell'area, avvenuto a partire da circa 30 Ma (tardo Oligocene-Miocene), precedendo la fase di estensione crostale e di rifting (Hoffman et al., 1997).



Fig. 45 – Veduta della serie dei trappi costituenti l'altopiano etiope fra Makallè e Lalibela.



Fig. 46 – Fessurazione colonnare di uno degli espandimenti basaltici costituenti la serie dei trappi.

Lasciando la città di Makallè è possibile osservare coltivazioni di teff, cereale alla base della dieta etiopica, con cui viene prodotta l'enjera tipicamente consumata durante i pasti. La strada prosegue poi verso sud, passando per il lago Ascianghi (Fig. 47). Nell'ultima parte del viaggio si passa attraverso i villaggi degli Agaw con le caratteristiche case in legno o più raramente in pietra e il tetto in paglia. Presso Lalibela affiorano estesamente le serie dei trappi cui sono associati depositi ignimbrici.



Fig. 47 – Vista del lago Ascianghi.

Nono giorno: Lalibela

Il nono giorno del viaggio ha permesso di apprezzare un'altra sfaccettatura delle Scienze Geologiche, ovvero l'impiego di materiale lapideo per la realizzazione di opere d'arte. La giornata è stata dedicata alla visita della città santa etiope di Lalibela, famosa in tutto il mondo per le sue 11 chiese rupestri, riconosciute patrimonio dell'Umanità (UNESCO) nel 1978 e meta di pellegrinaggio per i cristiani copti dal XII secolo.

Secondo l'UNESCO il complesso delle chiese rupestri di Lalibela rappresenta: "un risultato artistico unico, nell'esecuzione, nelle dimensioni e nella varietà e audacia della loro forma". L'eccezionalità del posto è confermata anche dalla sopravvivenza della sua funzione originaria come luogo di culto, testimoniando la continuità e la conservazione del patrimonio immateriale legato alle pratiche sociali e religiose.

La costruzione delle imponenti chiese è attribuita al re d'Etiopia Gebre Mesqel Lalibela e ai suoi discendenti della Dinastia Zaguè (XII-XIII sec. D.C.), che si proposero di ricreare nella città di Roha una "Nuova Gerusalemme", dopo che le conquiste musulmane avevano impedito i pellegrinaggi dei cristiani etiopi in Terra Santa. Per questa ragione, numerosi toponimi locali assunsero nomi biblici, come ad esempio il torrente locale ridenominato come Giordano.

Roha assunse il nome odierno di Lalibela e rimase capitale del Regno d'Etiopia dal tardo XII al XIII sec. D.C., prosperando dopo il declino dell'impero di Aksum. L'intera Lalibela offre una testimonianza eccezionale della civiltà medievale e post-medievale dell'Etiopia, non unicamente grazie alle undici chiese, ma anche della vita nei villaggi (Fig. 48).



Fig. 48 – Case tradizionali di Lalibela (tukul).

Sono infatti perfettamente integri i tukul, le tradizionali case a pianta circolare a due piani con scale interne e tetti di paglia, alcune delle quali ancora abitate.

Nella mattinata è stato visitato il gruppo di chiese poste a nord del torrente: Bete Medhane Alem (Casa del Salvatore del Mondo) che dotata di 5 navate è probabilmente la più grande chiesa monolitica del mondo (Fig. 49), Bete Maryam (Casa di Maria) l'unica a possedere un porticato esterno e ricche decorazioni pittoriche all'interno (fig. 50), Bete Maskal (Casa della Croce), Bete Dangal (Casa delle Vergini), Bete Mikael (Casa di Mikael) e Bete Golgotha (Casa del Golgota) dove sono riprodotte la tomba di Cristo, la tomba di Adamo, la culla della Natività e gli apostoli (Fig. 51). Infine è stata raggiunta Bete Giorgis, la più finemente realizzata e probabilmente la più recente delle chiese, che si erge isolata dalle altre ma collegata da un sistema di trincee (Fig. 52).



Fig. 49 - Facciata della chiesa Bete Medhane Alem, la più imponente delle undici chiese rupestri.

Il pomeriggio è stato dedicato alla visita delle chiese a sud del torrente: Bete Emanuel (Casa di Emmanuel) in stile axumita, Bete Mercurios (Casa di San Mercoreo), Bete Abba Libanos (Casa degli Abati Libanos) santuario ipogeo, Bete Gabriel e Raphael (Casa di Gabriel e Raphael) e la più piccola Bete Lehem (Casa del Santo). Tutti gli edifici sono stati concepiti fin dall'inizio come luoghi di culto, solamente per Bete Mercoreos e Bete Gabriel e Rafael si ipotizza un cambio d'uso da residenza reale a chiesa.



Fig. 50 – A sinistra si può osservare il soffitto dipinto della chiesa Bete Maryam. Le decorazioni pittoriche di questa chiesa sono particolarmente ricche e rappresentano vari motivi geometrici (croci greche, svastiche, stelle, rosette), animali (colombe, fenici, pavoni, cammelli) e scene della vita di Cristo e di Maria tratte dai Vangeli. A destra un sacerdote etiope copto, in abiti tradizionali.



Fig. 51 – Bassorilievi dipinti rappresentati gli apostoli racchiusi in nicchie, all'interno della chiesa Bete Golgotha, piccola cappella non accessibile alle donne. Nella figura a destra sono evidenti i danni meccanici causati dal microclima e da altri fattori che hanno determinato il distacco della parte superficiale.



Fig. 52 – La chiesa di Bete Giorgis, ricavata scavando un unico blocco monolitico di roccia piroclastica.

Le chiese sono state scavate nella roccia viva in un'unica collina di roccia tufacea scoriacea che si estende lungo una direzione est-ovest. Sono identificabili due diversi litotipi: una roccia tufacea rossastra con venature biancastre e una di colore più scuro. Secondo alcuni studi, le rocce hanno mostrato proprietà meccaniche diverse, ma presentano una mineralogia simile (Renzulli et al., 2011; Schiavon et al., 2013). I blocchi sono stati ulteriormente scalpellati, formando i vari piani, tetti, porte, finestre, colonne, etc.

Il sistema architettonico è stato ulteriormente completato con un ampio sistema di canali di drenaggio, trincee e passaggi cerimoniali, come aperture per grotte eremitiche e catacombe. Bete Maryam, Bete Medhane Alem, Bete Emanuel e Bete Giorgis sono strutture propriamente monolitiche, ricavate da un unico blocco di roccia (Fig. 52). Le altre chiese, Bete Maskal, Bete Dangal, Bete Golgotha, Bete Gabriel e Rafael, Bete Marcurios e Bete Abba Libanos, sono state ricavate in scogliere verticali, a partire da ingrandimenti di caverne o cave preesistenti (Fig. 53).

Le decorazioni sono principalmente costituite da bassorilievi, solamente alcune presentano dipinti murali, che mostrano una realizzazione semplice con uno strato preparatorio sottile, applicato direttamente sulla pietra (Fig. 54). In molte aree i dipinti mostrano un elevato stato di degrado, con grandi lacune nello strato pittorico che in alcune zone arriva ad impedire la lettura dell'opera.



Fig. 53 – La chiesa Bete Abba Libanos, ricavata da una rientranza nella parete rocciosa. È visibile una crepa che si estende dal lato sinistro in alto e si propaga verso il lato destro, indizio di un danno di tipo strutturale. I pilastri in acciaio sorreggono la copertura installata a fini conservativi.



Fig. 54 – Dipinto murale nella chiesa di Bete Mercurios, sono evidenti le lacune che lasciano esposto lo strato preparatorio.

Nel corso del tempo agenti atmosferici (sicidità, sole, vento, etc.) hanno influito sul degrado meccanico delle rocce, ampliandone le fratture e le discontinuità naturali individuabili sulle facciate (Fig. 55). Sono visibili anche segni di instabilità strutturale. Molto evidente è l'attacco biologico

delle superfici, colonizzate da licheni e patine biologiche (Figg. 55 e 56), che costituiscono una potenziale minaccia per l'integrità della superficiale della pietra, causando attacchi di tipo chimico e stress-fisico meccanici. La porosità naturale delle rocce di cui sono costituite le chiese, unita ai fenomeni meteorologici delle stagioni delle piogge, può accelerare le tipologie di degrado individuate. In alcune chiese sono state installate coperture, alcune sorrette da pilastri in acciaio (come quelli visibili in Figura 53, della chiesa Bete Abba Libanos), altre, meno invadenti, in legno, che generano un notevole impatto visivo che stravolge la natura del luogo, a fronte di una protezione comunque parziale.

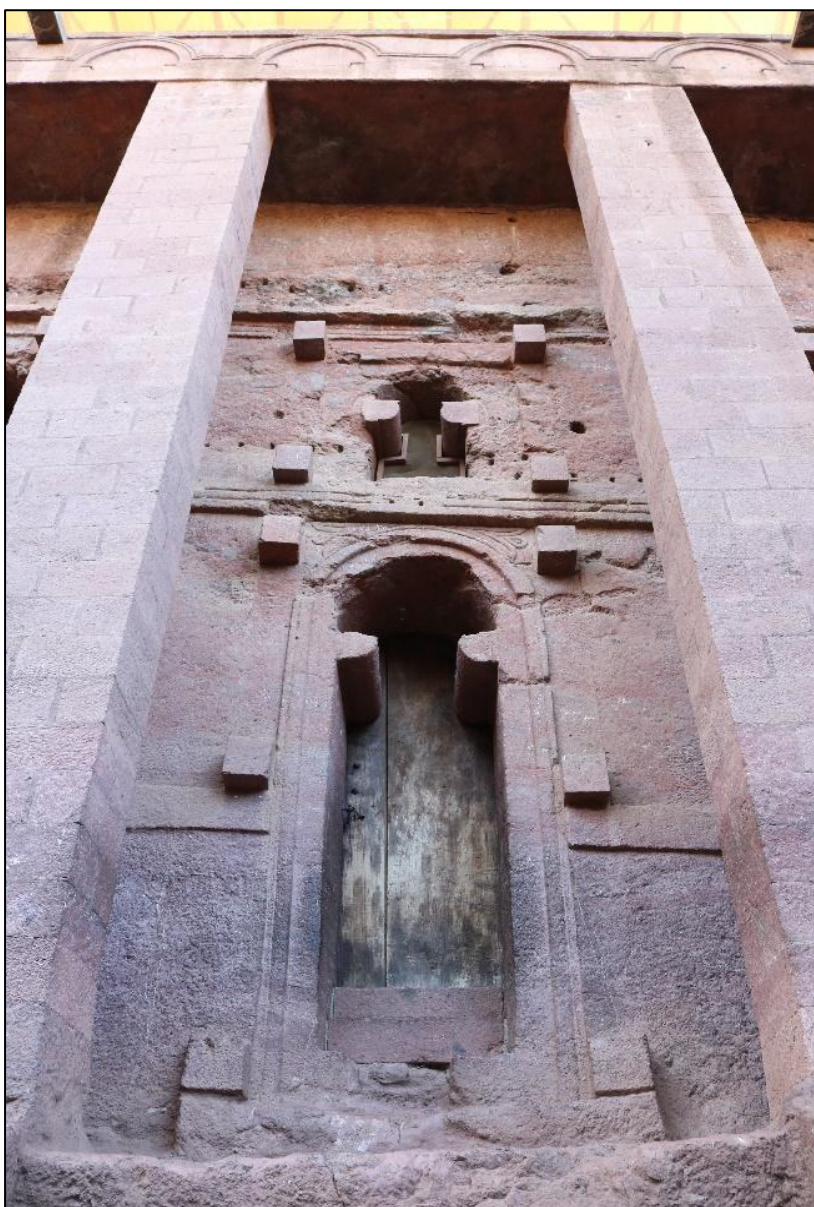


Fig. 55 – Facciata della chiesa Bete Medhane Alem, dove il degrado meccanico della roccia ha portato alla caduta di frammenti di roccia dalla facciata e il conseguente danno alle decorazioni in bassorilievo.

Il flusso dei turisti e dei pellegrini all'interno delle chiese non è regolato in alcuna maniera; il controllo degli ingressi e del tempo di visita potrebbe essere un primo efficace accorgimento in favore della tutela di questi luoghi. La divisione tra la zona delle chiese e la restante parte della città non è chiaramente distinguibile, mentre il controllo è affidato unicamente alle guide locali.

L'istituzione di una zona cuscinetto tra i monumenti e l'abitato sarebbe un altro importante provvedimento necessario a distinguere nettamente l'area del parco da quella fruibile per lo sviluppo urbano.



Fig. 56 – Colonizzazione lichenica che attornia una finestra del lato sud dell'edificio di Bete Giorgis.

Decimo giorno: Addis Ababa, Museo Nazionale dell’Etiopia

Durante l’ultimo giorno, dopo essere tornati ad Addis Ababa, è stato visitato il Museo Nazionale dell’Etiopia (Fig. 57). Il percorso espositivo abbracciava un lungo arco temporale, dalla Preistoria al tempo moderno. Di particolare rilevanza scientifica risultano essere i due ominidi rinvenuti nella depressione dell’Afar. Il primo reperto (purtroppo non esposto) rappresenta uno scheletro rinvenuto in connessione anatomica nel 1992-1993 da Tim White nel sito di Asa Koma (valle del medio Awash), attribuito alla specie *Ardipithecus ramidus* e vissuto circa 4.4 Ma. Questo eccezionale ritrovamento rappresenta l’olotipo di questa specie e un tassello fondamentale per lo studio dell’evoluzione umana, essendo una delle prime testimonianze di forme che si collocano alla base della linea evolutiva del genere *Homo*.



Fig. 57 – Pannello orientativo del Museo Nazionale Etiope.

Il secondo reperto, esposto nelle vetrine del museo, è lo scheletro n. AL-288-1, comunemente conosciuto come Lucy (Fig. 58). Grazie a centinaia di frammenti ossei è possibile osservare oltre il 40% dello scheletro di un esemplare di una femmina attribuito a *Australopithecus afarensis*. La scoperta avvenne nel 1974 nella località di Hadar (valle dell’Awash) dal paleontologo Donald

Johanson. La completezza e l'ottima preservazione di AL-288-1, rendono Lucy un vero e proprio tesoro per i paleoantropologi, i quali hanno identificato una serie di caratteri morfologici affini al genere *Homo*, come la postura bipede, seppur ancora facoltativa, e una capacità cranica maggiore rispetto ad altri primati, sebbene ancora ridotta rispetto a quella del genere *Homo*.



Fig. 58– AL-288-1, *Australopithecus afarensis* (Lucy) rivenuto nella località di Hadar, nella valle dell'Awash.

Conclusioni

L'escursione didattica svolta in Etiopia ha permesso lo studio della conformazione geomorfologica e vulcano-tettonica di un'area interessata da un processo di *rifting* crostale attivo e sede dell'unica giunzione tripla rift-rift-rift affiorante sulla terra emersa (tutte le altre conosciute sono sottomarine). Durante l'escursione sono stati percorsi più di 2000 km, attraversando il contesto geologico e culturale dell'Etiopia ed esaminando il cambiamento delle caratteristiche morfologiche del paesaggio connesse alle vicende vulcano-tettonico-stratigrafiche di un'ambiente che, a partire dagli ultimi 30 Ma, è caratterizzato da una forte estensione crostale. In particolare, è stata percorsa la valle del *rift* etiopico da nord a sud, ovvero spostandosi da aree in cui il processo di *rifting* è meno sviluppato (in cui risulta caratterizzato da grandi scarpate di faglia che bordano un'area depressa), verso la zona della Dancalia, in cui il processo di estensione crostale è più maturo (in cui si sviluppa anche una fagliazione interna all'area depressa) e testimoniato da numerosi centri vulcanici, fra i quali spicca l'Ertà Ale, nonché dalla presenza di aree depresse sin al di sotto del livello del mare, quali la piana del sale.

La conformazione geologico-strutturale ha favorito lo sviluppo di ambienti e biomi tra i più diversificati esistenti sulla Terra, passando da aeree propriamente desertiche ad aree di foresta pluviale, accompagnate da un deciso cambiamento faunistico e vegetazionale.

Infine, è stato possibile anche approfondire sia gli aspetti paleoantropologici, legati alla numerosa presenza di scavi in cui sono stati rinvenuti alcuni fra i resti più antichi e importanti di ominidi appartenenti al genere *Homo*, fra i quali Lucy, sia gli aspetti culturali caratterizzanti la storia e il patrimonio archeologico etiopico, esemplificati dalle chiese rupestri di Lalibela.

Bibliografia

- Barberi, F., Varet, J. (1970). The Ertale Volcanic range (Danakil depression) Northern Afar, Ethiopia. *Bull. Volc.* 34, 848-917.
- Binega, (2006). Chemical analysis of the assale (Ethiopia) rock salt deposit. *Bull. Chem. Soc. Ethiop.* 2006, 20(2), 319-324.
- Bosellini, A., Russo, A., Fantozzi, P.L., Assefa, G. and Solomon, T. (1997). The Mesozoic succession of the Mekele outlier (Tigre province, Ethiopia). *Memorie di Scienze Geologiche*, 49, pp.95-116.
- Corti, G. e Manetti P. (2012). *Geologia e paesaggi della Rift Valley in Etiopia*.
- Corti, G., Agostini, A., Keir, D., Van Wijk, J., Bastow, I. D., & Ranalli, G. (2015). Magma-induced axial subsidence during final-stage rifting: Implications for the development of seaward-dipping reflectors. *Geosphere*, 11(3), 563-571.
- Enkurie, D.L. (2010). Adigrat sandstone in Northern and Central Ethiopia: stratigraphy, facies, depositional environments and palynology. PhD thesis dissertation.
- Franzson, H., Helgadóttir, H.M., Óskarsson, F. (2015). Surface Exploration and First Conceptual Model of the Dallol Geothermal Area, Northern Afar, Ethiopia. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*.
- Hoffman, Courtillot, Féraud, Rochette, Yirgu, Ketefo, Pik, (1997). Timing of the Ethiopian flood basalt event and implications for plume birth and global change. *Nature*, 389, pp. 838–841.
- Kalberkamp, U. (2010). Magnetotelluric Surface Exploration at Tendaho, Afar (Ethiopia). Federal Institute for Geosciences and Natural resources (BGR), Hannover, Germany.
- Munzinger, (1869). Narrative of a Journey Through the Afar Country. *The Journal of the Royal Geographical Society of London*, Vol. 39 (1869), pp. 188-232.
- Renzulli, A., Antonelli, F., Margottini, C., Santi, P., Fratini, F. (2011). What kind of volcanite rock-hewn churches of the Lalibela UNESCO's world heritage site are made of? *J Cult Herit* 12(2):227–235.
- Schiavon, N., De Caro, T., Kiros, A., Caldeira, A.T., Parisi, I.E., Riccucci, C., Gigante, G.E. (2013). A multianalytical approach to investigate stone biodeterioration at a UNESCO world heritage site: the volcanic rock-hewn churches of Lalibela, Norther Ethiopia. *J Appl Phys A* 113(4):843–854.
- Varet, J. (2010). Contribution to favourable geothermal site selection in the Afra triangle. *Third East African Rift Geothermal Conference*.
- Varet, J., Chernet, T., Woldetinsae, G., & Arnason, K. (2012, November). Exploring for Geothermal Sites in Northern and Central Afar (Ethiopia). In *Proceedings of the 4th African Rift Geothermal Conference*. Nairobi, Kenya (pp. 21-23).