

L'incredibile sito geologico di Dallòl, in Dancalia

Luca Lupi

Centro di Documentazione e Studi sulla Dancalia Italiana, Pontedera (PI)
www.danalia.it, info@danalia.it

Introduzione

L'Afar è una regione desertica e depressa, di forma triangolare (per questo è chiamata anche Triangolo dell'Afar), che si estende per 150.000 km² a cavallo di Etiopia, Eritrea e Gibuti e che è delimitata ad ovest dalla scarpata dell'Altopiano Etiopico (per circa 520 km), ad est dal Mar Rosso (per circa 550 km, dalla penisola di Buri al Golfo di Tagiura), a sud dall'Altopiano dell'Harar (Fig. 1). Essa rappresenta l'area di congiunzione dei sistemi di fratture che hanno originato il Mar Rosso, il Golfo di Aden e la Great Rift Valley africana e che individuano le grandi placche Nubiana, Somala e Araba (Hutchinson & Engels, 1972; Collet *et al.*, 2000; Eagles *et al.*, 2002; Tesfaye *et al.*, 2003; Bonatti *et al.*, 2015; Corti *et al.*, 2015; Bastow *et al.*, 2018) (Fig. 2); inoltre, la regione può essere vista come un "oceano in formazione", dove dal sottostante mantello fuoriescono lave che la riempiono principalmente di rocce effusive basaltiche.

La porzione settentrionale dell'Afar, che si sviluppa per circa 50.000 km² quasi sempre al di sotto del livello del mare, prende il nome di Dancalia (geologicamente parlando si tratta della microplacca *Danakil*). Questa depressione è compresa tra due notevoli scarpate: quella ad ovest è formata ancora dall'Altopiano Etiopico, di origine precambriana e mesozoica, il quale raggiunge e supera la quota di 2000 m; quella ad est dalle Alpi Dancale, le quali "siedono" sul *Danakil Block* e si innalzano a 500-1000 m s.l.m. (Collet *et al.*, 2000).

Anticamente la Dancalia è stata interessata, verso nord, da un braccio del Mar Rosso (Golfo

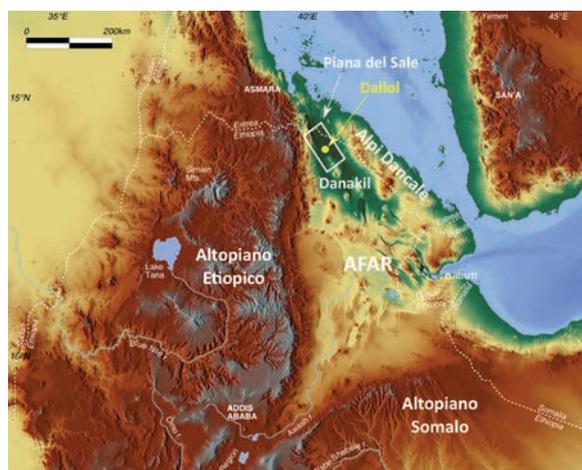


Fig. 1 - Il triangolo dell'Afar nel sistema morfotettonico dell'Africa orientale.

di Zula, Eritrea) che si è "chiuso" più volte; durante l'"isolamento" di questo braccio le alte temperature hanno favorito la deposizione di vere e proprie sequenze evaporitiche (per lo più gesso associato ad anidride, sali di potassio e magnesio, nonché piccole intercalazioni di prodotti vulcanici rimaneggiati). Secondo la letteratura (Lalou *et al.*, 1970; Bonatti *et al.*, 1971; Mitchell *et al.*, 1992; Corti *et al.*, 2015) nell'ambito di tali sequenze sono riconoscibili almeno due cicli marini completi, avvenuti rispettivamente 200000 e 80000 anni fa. Queste evaporiti quaternarie affiorano per circa 600 km² soprattutto a nord dell'Erta Ale (una catena montuosa, lunga circa 95 km e alta fino ai 1031 m dell'Alebbagu, costituita da sette centri vulcanici), dove occupano la depressione posta interamente sotto il livello del mare e chiamata "Piana del Sale" (Figg. 1, 3).

La piana ha una lunghezza massima di circa

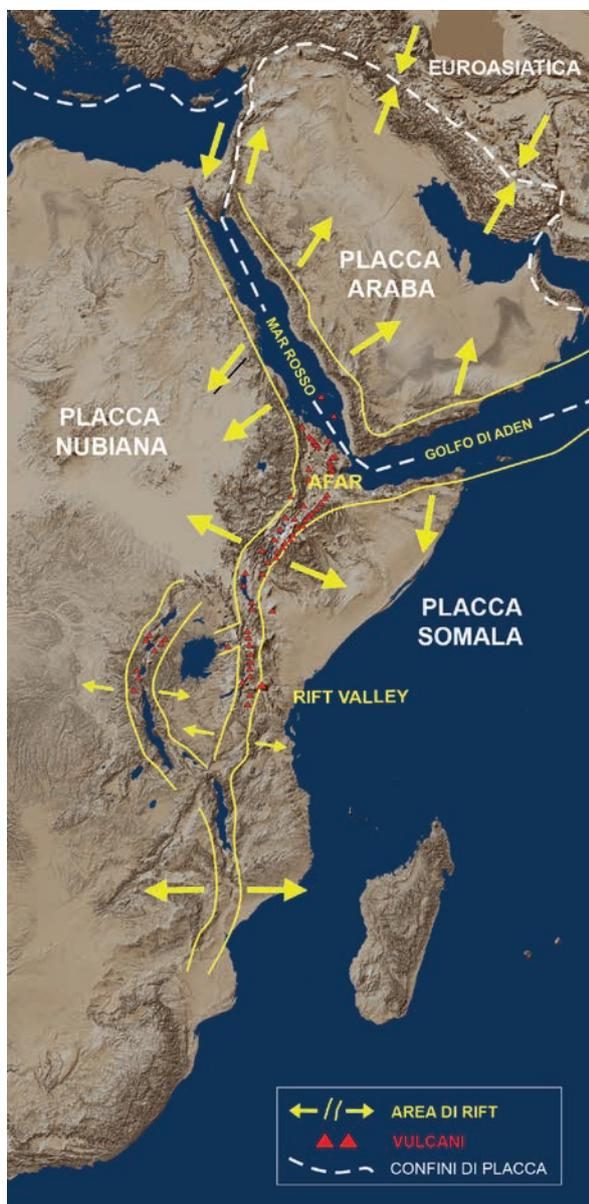


Fig. 2 - Elementi tettonici principali dell'area Africa orientale-Arabia.

100 km (parallelamente alla costa del Mar Rosso) ed una larghezza media di una trentina di chilometri. Lo spessore complessivo dei depositi salini che la caratterizzano è ragguardevole, anche se diversamente stimato: alcuni studiosi ritengono infatti che superi i 1000 m, altri (Holwerda & Hutchinson, 1968) i 3000 m. In prevalenza il sale vi si presenta limpidissimo e cristallino (tanto da dare la completa illusione di un paesaggio ricoperto di neve) oppure grigio, più o meno scuro, per il contenuto in argilla. Al centro della piana si



Fig. 3 - La bianca Piana del Sale, ciò che resta di un antico braccio del Mar Rosso.



Fig. 4 - Immagine dell'isolotto di Dall'ol, al centro della Piana del Sale, catturata dal satellite Sentinel-2 il 3 maggio 2020 (cortesia Copernicus EU Earth observation programme).

erge, come un "isolotto", una cupola o collinetta salina che per le coloratissime manifestazioni superficiali (e non solo) è da considerarsi unica al mondo: quella di Dall'ol (Fig. 4). Il fenomeno che vi si osserva è dovuto sostanzialmente all'interazione tra i sali (arricchiti in potassio, manganese, ferro, magnesio e zinco) ed il magma caldo immediatamente sottostante.

Dal 1911, quando è stata scoperta dagli italiani Adriano e Tullio Pastori, la piana è stata sempre interessata dall'estrazione di sali potassici (oggi

strategici per la produzione di fertilizzanti); dal 2000 fino al novembre del 2020, nonostante la collocazione remota e le altissime temperature, è stata anche mèta di spedizioni scientifiche e di un selezionato turismo naturalista. Attualmente l'accesso alla Piana del Sale è interdetto perché la guerra, tra l'Etiopia e la regione del Tigray, ha coinvolto pesantemente anche la Dancalia.

L'isolotto di Dallòl

A partire da circa 6000 anni fa i depositi di Dallòl hanno subito una spinta verso l'alto, di una trentina di metri (la piana ha una quota media di -120 m s.l.m., mentre il punto più alto del sito tocca quota - 90m s.l.m.), da parte del magma sottostante. L'isolotto, che abbraccia una superficie di 8 km² ed in pianta ha una forma ovale (l'asse maggiore, orientato ENE-OSO, è

lungo circa 5,5 km; l'asse minore è di circa 3 km) (Fig. 5), è costituito essenzialmente da strati sottili (spessi 3-10 cm) di alite (minerale, detto anche salgemma, formato da cloruro di sodio - NaCl) color grigiastro fino a rossastro e da strati centimetrici di argilla finissima rossastra (quelli che corrispondono al periodo delle grandi piogge - da metà giugno a metà settembre - sull'Altopiano Etiopico mostrano uno spessore maggiore rispetto a quelli che sono legati al periodo delle piccole piogge - aprile e maggio -) che si ripetono in alternanza per decine di metri (Fig. 6).

Tali sequenze sono sormontate da un banco di gesso (solfato di calcio biidrato - CaSO₄ 2H₂O) e anidrite (solfato di calcio anidro - CaSO₄), con frammenti di calcari coralliferi, alto mediamente 4 m. Al centro la cupola presenta un nucleo integro e compatto, mentre ai bordi si rinvergono fratture e canali (in alcuni casi veri e propri canyon) dove emergono numerosissimi "rilie-

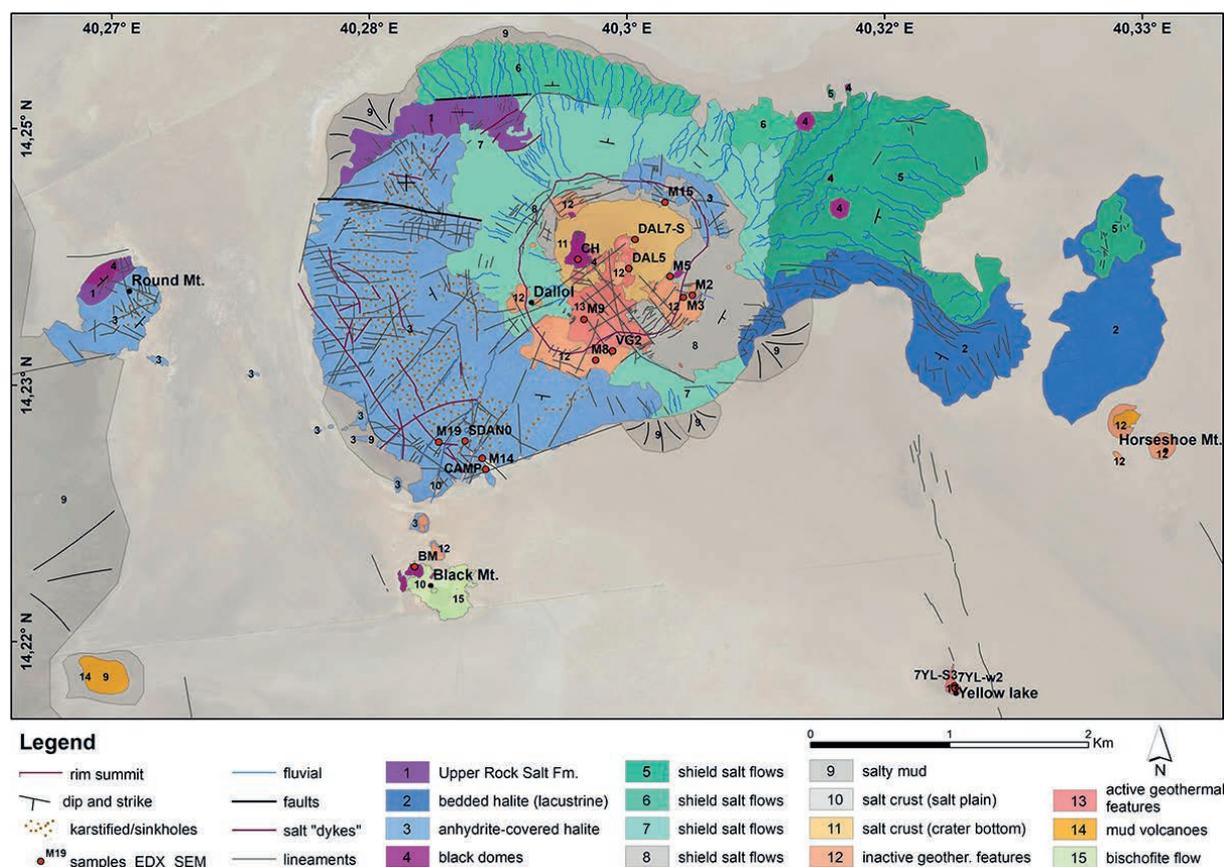


Fig. 5 - Mappa geologica dettagliata della cupola di Dallòl e delle strutture adiacenti (López-García et al., 2020).



Fig. 6 - Sezione alla base di Dallòl dove è ben evidente l'alternanza di strati di sale e argille.



Fig. 7 - Particolari forme che caratterizzano i bordi della cupola di Dallòl.

vi” in posizione più o meno ravvicinata, aventi la forma di torrioni tronco-piramidali, bastioni, muraglie e pinnacoli (Fig. 7). Queste morfologie, che contribuiscono a rendere del tutto particolare il sito, sembrano legarsi all’azione erosiva delle piogge e di altri agenti atmosferici; relativamente alle prime si ricorda, fra l’altro, che scavano veri e propri canali di scorrimento sulla copertura gessosa e che giungono ad asportare gli strati salini più solubili sottostanti.

Per la morfologia e l’attività geotermica sommitale, nonché per la posizione sull’asse centrale della depressione (a sud-est di tale asse sono ubicati i vulcani della catena dell’Erta Ale, il Barowli e l’Alayta ancora attivi, mentre più a nord-ovest si ritrovano il Marahao, l’Alid ed il Jalua ormai estinti), l’isolotto di Dallòl è stato spesso ritenuto un vulcano (si veda in: Edelman *et al.*, 2010; Darrah *et al.*, 2013; Keir *et al.*, 2013; Tadiwos, 2013; Wunderman, 2013; Corti *et al.*, 2015). Tuttavia, occorre notare che non sono mai stati trovati materiali vulcanici sulla cupola, o nelle sue immediate vicinanze, ma solo strati di rocce sedimentarie. Sembra quindi più corretto ritenere che attualmente il Dallòl costituisca una manifestazione proto-vulcanica da mettere in relazione con la serie evaporitica, la tettonica distensiva e l’intrusione magmatica (si veda, ad esempio, López-García *et al.*, 2020); ciò non esclude, comunque, che in futuro la risalita e la fuoriuscita del magma possa originare un vulcano.

Attività geotermica ed idrotermale

La Dancalia è un’area dove non piove quasi mai; il suo clima iper-arido (<200 mm / anno di pioggia), fra l’altro, è caratterizzato dalla temperatura media annuale (34,5 ° C; Pedgley, 1967) più alta del pianeta. La maggior parte dell’acqua infiltratasi in falda, quindi, è da relazionarsi con le precipitazioni che avvengono sull’Altopiano Etiopico e sulle Alpi Dancale. Grazie alle faglie e alle fratture distensive (nelle vicinanze si verificano frequenti terremoti di magnitudo 4,5-5,5) le acque sotterranee, riscaldate dal magma, migrano verso la superficie determinando fenomeni idrotermali (Fig. 8). Anche i fluidi magmatici, caldissimi e ricchi di gas (anidride carbonica - CO₂, anidride solforosa - SO₂ e acido solfidrico - H₂S), risalgono attraverso percorsi simili e al centro dell’isolotto sviluppano un’attività geotermica piuttosto intensa (Holwerda & Hutchinson, 1968; Hovland *et al.*, 2006 ; Franzson *et al.*, 2015 ; Warren, 2015), talvolta accompagnata da esplosioni freatiche (ne sono state documentate due piuttosto forti, nel 1926 e nel 2011). L’interazione tra questi fluidi, le acque sotterranee e l’alite primaria, che costituisce il rilievo Dallòl, genera complessi processi chimici in cui elementi quali il fluoro, il cloro, il bromo e lo iodio sono capaci di combinarsi con i metalli per originare sali aloidi (solubili) privi di ossigeno (Talbot, 2008; Warren, 2015). Tale interazione geochimica,

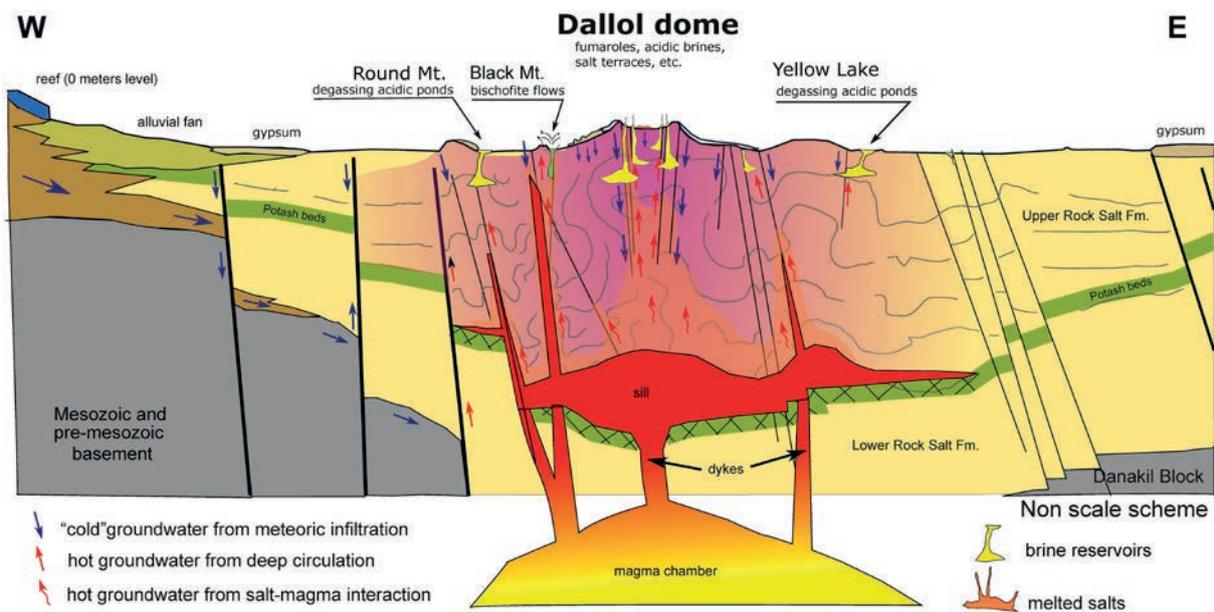


Fig. 8 - Sezione del sistema geologico di Dallòl con schema interpretativo proposto da López-García *et al.* (2020).

ad oggi non del tutto conosciuta, produce in superficie un'incredibile varietà di stagni colorati, con salamoie iperacide e ipersature, fumarole, piccoli *geyser*, depositi salini dalle forme strane e diversissime, singolari *hornitos* (pinnacoli formati per accumulo di materiali incandescenti fuoriusciti da fratture sulle superfici solidificate di colate e laghi di lava) e tante altre manifestazioni idrotermali e geotermiche (si veda più avanti). Nonostante che i depositi delle fumarole offrano ai visitatori una miriade di colori (dal giallo, per la grande quantità di zolfo, al marrone scuro per l'ossidazione del ferro), sono le salamoie delle piscine ad assumere colorazioni che stupiscono e lasciano tutti letteralmente a bocca aperta. Nel punto di fuoriuscita il vapore dell'acqua anossica, iperacida, ipersalina e ricca di ferro, presenta una temperatura dai 100° ai 110 °C con temperature massime di 125\130 °C. Quando l'acqua bollente fuoriesce, la temperatura diminuisce rapidamente causando una sovrassaturazione e una rapida precipitazione di salgemma. Allontanandosi progressivamente dalla sorgente e defluendo nelle vasche, l'acqua riduce grossomodo la sua temperatura fino ai 30°C. Queste acque hanno un pH pari o inferiore a 0 ed una salinità compresa tra il 37% e il 42%. Alte concentrazioni di ferro

disciolto (più di 26 g/l), solfati (~5200 ppm) e cloruri (>200 g/l) contribuiscono alla formazione di idrossicompleksi di ferro colorati, clorocompleksi di ferro e solfati di ferro (per fare un paragone le acque del mare contengono mediamente valori assai più bassi: tracce di ferro, ~2680 ppm di solfati e ~19 g/l di cloruri) (Tab. 1). Da notare che alti valori di tali elementi sono stati rilevati costantemente in più anni di campionamento delle acque (Fig. 9). La variazione dei colori brillanti delle salamoie, dal giallo fosforescente all'arancione ed alle sfumature del blu e del verde, è dovuta all'ossidazione di specie mineralogiche in soluzione come il cloruro ferroso



Fig. 9 - Campionamento di una piscina idrotermale, per ricerche di tipo geochimico, effettuato il 25 aprile 2011 dal Prof. Mauro Rosi dell'Università di Pisa e dallo scrivente su richiesta del Dr. Orlando Vaselli dell'Università di Firenze.

LE SORGENTI IDROTERMALI SONO:

- anossiche (totalmente prive di ossigeno)
- iper-acide (pH<-1,5- 6,0), i valori di pH diminuiscono molto al di sotto dello zero
- iper-saline (da 33% ad oltre 50%, circa 10 volte più salina di acqua di mare)
- iper-termali (da 25° ad alta temperatura > 110 °)
- salamoie contengono valori di Ferro (Fe) > di 26 g / litro

ELEMENTI PRESENTI NELLE ACQUE TERMALI (DATI SVG BULLETTIN 32, APRILE 2003):

Elemento	mg/l
Fe	4900
Mg	3100
Mn	270
Al	160
B	140
Si	130
Ca	125
Zn	48
Cu	2.6
Se	1.9
As	0.5
Hg	2.4x10-3
Ag	2.0x10-3

LE PRINCIPALI FASI MINERALI CHE SI INCONTRANO A DALLÒL (DA LÓPEZ-GARCÍA J. M. ET AL., 2020):

- Alite (cloruro di sodio, NaCl)
- Jarosite (gruppo dell'Alunite $KFe^{3+}_3(SO_4)_2(OH)_6$)
- Ematite (ossido ferrico, Fe_2O_3)
- Akaganeite [ossido di ferro idrato $Fe^{+++}(O,OH,Cl)$]
- altri ossidi di ferro idrati (ossi-drossidi)
- Gesso (solfato di calcio biidrato, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$)
- Anidrite (solfato di calcio anidro, $CaSO_4$)
- Silvite (cloruro di potassio, KCl)
- Carnallite ($KMgCl_3 \cdot 6H_2O$)
- Bischofite ($MgCl_2 \cdot 6(H_2O)$)

LE PRINCIPALI FASI GASSOSE EMESSE DALLE SORGENTI E DALLE FUMAROLE SONO:

- CO_2 (anidride carbonica)
- H_2S (acido solfidrico)
- N_2 (Azoto)
- SO_2 (anidride solforosa)
- tracce di H_2 (Idrogeno)
- tracce di Ar (Argon)
- tracce di O_2 . (Ossigeno)

Tab. I - Caratteristiche geochemiche delle sorgenti termali e delle fumarole. Si veda il testo.

($FeCl_2$) ed il cloruro ferrico ($FeCl_3$). L'acqua che fuoriesce inizia con alte concentrazioni di ferro ferroso (Fe^{2+}) che, a contatto con l'atmosfera, viene lentamente ossidato diventando ferro ferrico (Fe^{3+}); ciò fa sì che il colore dell'acqua delle piscine si sposti gradualmente dal verde brillante al verde scuro, al marrone (Kotopoulou *et al.*, 2019; Fig. 10). Fuori dall'acqua sottili strati di ferro-(ossi)idrossidi e solfati di ferro, precipitati sulle strutture di salemma, conferiscono a queste un aspetto altrettanto colorato. Insomma, nel sito analizzato e nei suoi dintorni è tutta un'esplosione fantasmagorica di colori; sembra proprio che la natura si sia ampiamente sbizzarrita nel dipingere con la sua tavolozza.

A differenza che in altri sistemi idrotermali, dove i colori delle piscine sono generati dall'attività

biologica (per esempio a Yellowstone), in quello di Dallòl la varietà di colori è prodotta dall'ossidazione inorganica delle numerose fasi del ferro. Il sistema Dallòl è caratterizzato da una continua evoluzione

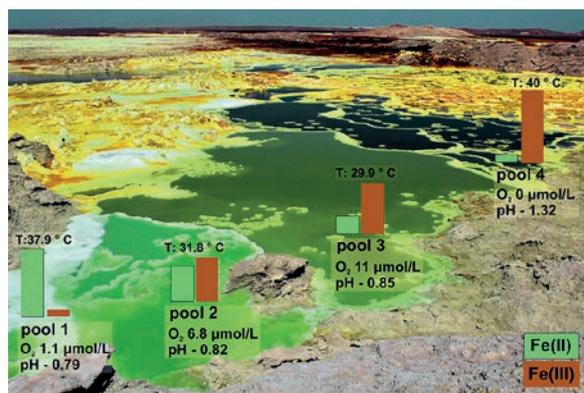


Fig. 10 - Con le condizioni geochemiche (in termini di temperatura, pH, concentrazioni delle fasi ferrose Fe^{2+} e Fe^{3+}) variano anche i colori delle singole pozze di una salamoia.

delle attività idrotermali e geotermiche, per cui modifica le aree delle piscine nel giro di poche settimane o addirittura giorni (nell'arco di pochi giorni, ad esempio, si possono osservare cambiamenti della scala del centimetro nel livello superficiale dei vari laghi acidi). Infatti, quando tali aree si asciugano l'attività geotermica riprende ed i fluidi alimentano di nuovo i bacini; pertanto, le vecchie caratteristiche geotermiche possono riattivarsi e nuovi depositi possono sovrapporsi a quelli antichi, in un ciclo che porta al confinamento dei precedenti punti di emissione isolati.

Le salamoie del campo geotermico ed idrotermale producono condizioni fisico-chimiche (pH, salinità, alta temperatura, mancanza di ossigeno, ecc.) così estreme, e nel loro genere singolari, da rendere assai difficile o impossibile lo sviluppo di forme di vita (Belilla *et al.*, 2019). Ciò fa vedere il sito "poliestremo" di Dallòl, controllato dal Ferro (Kotopoulou *et al.*, 2019), come un posto ideale dove cercare informazioni sui "limiti stessi della vita" attraverso lo studio di organismi (soprattutto batteri) "estremofili" (capaci, cioè, di prosperare in ambienti proibitivi). In proposito si ricorda che Cavalazzi *et al.* (2019) hanno rinvenuto, in diversi luoghi del sistema idrotermale, *phyla* del Regno *Archaea* (il termine significa "batteri antichi") e batteri del tipo in questione e non.

Le morfologie geotermiche ed idrotermali più caratteristiche

Sulla collina di Dallòl, andando dal bordo meridionale verso il centro, le aree geotermiche attive abbracciano una zona molto vasta. In alcuni punti dell'area sommitale, dove l'emissione dei vapori e gas vulcanici è più intensa, si formano vasti campi fumarolici (Fig.11); in altri, invece, si rinvencono molteplici morfologie derivanti dalla precipitazione salina, nelle salamoie troppo saturate, intorno alle sorgenti calde. Qui di seguito ne vengono illustrate alcune tra quelle più rappresentative.

Verso il centro le strutture più comuni sono



Fig. 11 - Campi fumarolici della parte sommitale di Dallòl.

costituite da piccoli (misurano dal centimetro al decimetro) conici di sale, attorno a *geyser* attivi oppure a fumarole, i quali occasionalmente crescono andando a formare camini o pilastri alti fino a 3 m (Figg. 12-13). Intorno alle bocche delle fumarole, che depositano zolfo giallo e arancione in grande concentrazioni, si originano veri e propri pinnacoli di varia altezza; talvolta questi ultimi, per la loro imponenza, si presentano come una sorta di "panettone".

Di solito i conici si raggruppano (Figg. 14-15) e così danno origine a terrazze piatte, associate a salamoie acide (Figg. 16-17) o a terreni a vapore



Figg. 12, 13 - Le strutture coniche multicolori e di varie dimensioni che caratterizzano la sommità di Dallòl.



Figg. 14, 15 - Coni di emissione, pozze e salamoie acide.



Figg. 16, 17 - Terrazze e salamoie.

a seconda che espellano acqua (*geyser*) o gas (fumarole). I terrazzamenti, con le piscine ricche di salamoie iperacide e ipersature, esprimono colorazioni che passano dal giallo intenso (espressione dei composti ricchi in zolfo) all'arancione o al marrone (per le parti più ricche in ferro), fino al verde ed al blu (per le parti più ricche in fluoro e cloro).

Quando si sale verso la sommità della cupola si incontra anche un'area, distante da quella attualmente attiva, dove si rinvengono i resti di emissioni gassose, fumarole e salamoie. In quest'area "antica" sono ancora conservate strutture di sale, perfino imponenti, intorno alle fessure superficiali delle fumarole. Fra quelle più grandi (alte circa 3 m), prodotte anche nell'ambito di *geyser*, sono osservabili morfologie pinnacolari che ricordano gli *hornitos* vulcanici (Figg. 18-19).

All'interno di antiche terrazze di salamoie, ormai svuotate, si trovano due incredibili insiemi di forme. Il primo, ubicato al bordo della sommità di Dallòl, è costituito unicamente da morfologie piatte (altezza limitata ad alcuni centimetri), rotondeggianti (diametro da alcune decine di centimetri fino ad oltre 1 m) e di color biancastro simili alle cappelle dei funghi (Fig. 20). Evidentemente la deposizione in modo radiale dei sali evaporitici intorno ad un punto di emissione,



Figg. 18, 19 - Pinnacoli di sale simili agli *hornitos* vulcanici.

per dare origine a ciascuna “cappella”, deriva da antiche attività di degassamento idrotermale lungo un percorso perfettamente verticale. Il secondo, collocato a pochi metri dal precedente, è invece formato da morfologie rossastre (sali molto ricchi in ferro) ed inclinate dalla stessa parte, che ricordano alcune infiorescenze o i coralli marini. Per queste forme bizzarre, da legarsi ancora al degassamento idrotermale, occorre invocare una deposizione delle particelle saline intorno a punti di emissione orientati.

Un sito da salvare

Per le singolarissime unicità il sito geologico di Dallòl dovrebbe essere ampiamente tutelato. Ancora oggi, invece, è sottoposto a continua



Fig. 20 - Morfologie a fungo.



Fig. 21 - Le rotondeggianti forme di alcuni punti di emissione.

deturpazione per l'estrazione di sali potassici da parte della società mineraria canadese *Allana Potash* (oggi controllata dai Cinesi). In proposito si ricorda che alla Conferenza *Magma Rifting & Active Volcanism*, tenutasi ad Addis Abeba nel gennaio 2012, l'australiana Frances Williams, alcuni geologi inglesi e lo scrivente hanno proposto al governo etiopico la trasformazione del sito in un geo-parco comprendente anche l'area vulcanica dell'Erta Ale (altro luogo unico al mondo per i suoi laghi di lava). Purtroppo, le entrate derivanti da eventuali flussi turistici sono state valutate molto inferiori a quelle garantite dall'estrazione mineraria, per cui la proposta è rimasta lettera morta. Una possibilità ancora aperta, ai fini tutelativi, riguarda l'inserimento del sito nella lista del Patrimonio Mondiale dell'UNESCO. Speriamo che almeno ciò avvenga quanto prima.

Bibliografia

- Barberi F., Borsi S., Ferrara G., Marinelli G., Santacroce R., Tazieff H., Varet J. (1972) - *Evolution of the Danakil depression (Afar, Ethiopia) in light of radiometric age determinations*. J. Geol., 80: 720-729.
- Barberi F. & Varet J. (1970) - *The Erta Ale Volcanic Range (Danakil Depression, Northern Afar, Ethiopia)*. Bulletin Vulcanologique, 34 (4): 848-917.
- Bastow I. D., Booth A. D., Corti G., Keir D., Magee C., Jackson C. A. L., Warren J., Wilkinson J., Lascialfari M. (2018) - *The development of late-stage continental breakup: seismic reflection and borehole evidence from the Danakil Depression, Ethiopia*. Tectonics, 37: 2848-2862.
- Behle A., Makris J., Baier B., Delibassis N. (1975) - *Salt thickness near Dallol (Ethiopia) from seismic reflection measurements and gravity data*. Afar Depress. Ethiopia, 1: 156-167.
- Belilla J., Moreira D., Jardillier L., Reboul G., Benzerara K., López-García J. M., Bertolino P., Lopez-Archilla A. I., Lopez-García P. (2019) - *Hyper diverse archaea near life limits at the polyextreme geothermal Dallol area*. Nat. Ecol. Evol., 3: 1552-1561.
- Bonatti E., Cipriani A., Lupi L. (2015) - *The Red Sea: The Formation, Morphology, Oceanography and Environment of a Young Ocean Basin*. N. M. A. Rasul & I. C. F. Stewart eds. Heidelberg, Springer-Verlag, 29-44.
- Bonatti E., Emiliani C., Ostlung G., Rydell H. (1971) - *Final desiccation of the Afar Rift, Ethiopia*. Science, 172: 468-469.
- Carniel R., Jolis E. M., Jones J. (2010) - *A geophysical multi-parametric analysis of hydrothermal activity at Dallol, Ethiopia*. J. Afr. Earth Sci., 58: 812-819.
- Cavalazzi B., Barbieri R., Gómez F., Capaccioni B., Olsson-Francis K., Pondrelli M., Rossi A.P., Hickman-Lewis K., Agangi A., Gasparotto G., Glamoclija M., Ori G.G., Rodriguez N., Hagos M. (2019) - *The Dallol geothermal area, northern Afar (Ethiopia) - an exceptional planetary field analog on earth*. Astrobiology, 19: 553-578.
- CNR-CNRS Afar Team (1973) - *Geology of northern Afar (Ethiopia)*. Rev. Geogr. Phys. Geol. Dyn., 15: 443-490.
- Collet B., Taud H., Parrot J. F., Bonavia F., Chorowicz J. (2000) - *A new kinematic approach for the Danakil block using a Digital Elevation Model representation*. Tectonophysics, 316: 343-357.
- Corti G., Bastow I. D., Keir D., Pagli C. (2015) - *Rift-related morphology of the Afar Depression*. In: Landscapes and Landforms of Ethiopia, ed. P. Billi, Dordrecht SpringerScience+Business Media, 251-274.
- Darrah T. H., Tedesco D., Tassi F., Vaselli O., Cuoco E., Poreda R. J. (2013) - *Gas chemistry of the Dallol region of the Danakil Depression in the Afar region of the northern-most East African Rift*. Chem. Geol., 339: 16-29.
- Edelmann J. & Roscoe R. (2010) - *Volcano tourism in Ethiopia and the Danakil Rift Zone*. In: Volcano and Geothermal Geotourism, Sustainable Geo-Resources for Leisure and Recreation, P. Erfurt-Cooper & M. Cooper eds, Abingdon, Taylor & Francis, 59-67.
- ERCOSPLAN (2010) - *Technical Report and Current Resource Estimate*. In: Danakil Potash Deposit, Afar State/Ethiopia. Project Reference EGB 08-024, Erfurt ERCOSPLAN.
- ERCOSPLAN (2011) - *Preliminary Resource Assessment Study*. In: Danakil Potash Deposit, Afar State/Ethiopia. Erfurt ERCOSPLAN.
- Franzson H., Helgadóttir H. M., Óskarsson, F. (2015) - *Surface exploration and first conceptual model of the Dallol geothermal area, northern Afar, Ethiopia*. In: Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, 11.
- Gonfiantini R., Borsi S., Ferrara G., Panichi C. (1973) - *Isotopic composition of waters from the Danakil depression (Ethiopia)*. Earth Planet. Sci. Lett., 18: 13-21.
- Holwerda J. G. & Hutchinson R. W. (1968) - *Potash-bearing evaporites in the Danakil area, Ethiopia*. Econ. Geol., 63: 124-150.
- Hovland M., Rueslåtten H. G., Johnsen H. K., Kvamme B., Kuznetsova T. (2006) - *Salt formation associated with sub-surface boiling and supercritical water*. Mar. Pet. Geol., 23: 855-869.
- Hutchinson R. W. & Engels G. G. (1970) - *Tectonic significance of regional geology and evaporate lithofacies in northeastern Ethiopia*. Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci., 267: 313-329.
- Jamtveit B., Svensen H., Podladchikov Y. Y., Planke S. (2004) - *Hydrothermal vent complexes associated with sill intrusions in sedimentary basins*. Geol. Soc. Spec. Publ., 234: 233-241.
- Keir D., Bastow I. D., Pagli C., Chambers E. L. (2013) - *The development of extension and magmatism in the Red Sea rift of Afar*. Tectonophysics, 607: 98-114.
- Kotopoulou E., Delgado Huertas A., Garcia-Ruiz J. M., Dominguez-Vera J. M., Lopez-Garcia J. M., Guerra-Tschuschke I., Rull F. (2019) - *Apolyextreme hydrothermal system controlled by iron: the case of Dallol*

at the Afar Triangle. ACS Earth Space Chem., 3: 90-99. doi: 10.1021/acsearthspacechem.8b00141

López-García J. M., Moreira D., Benzerara K., Grunewald O., López-García P. (2020) - *Origin and Evolution of the Halo-Volcanic Complex of Dallol: Proto-Volcanism in Northern Afar (Ethiopia)*. *Frontiers in Earth Science*, Frontiers Media.

Lupi L. (2009) - *Dancalia. L'esplorazione dell'Afar, un'avventura italiana*. Tagete edizioni\IGM, Pontedera, 1-2.

Lupi L. (2012) - *Afar Region, Dancalia, geological and route map 1: 950.000*. Litografia Artistica Cartografica, Firenze.

Mac Donald G. J. F. (1953) - *Anhydrite gypsum equilibrium relations*. *Am. J. Sci.*, 251: 884-898.

Nobile A., Pagli C., Keir D., Wright T. J., Ayele A., Ruch J., Acocella V. (2012) - *Dike-fault interaction during the 2004 Dallol intrusion at the northern edge of the Erta Ale Ridge (Afar, Ethiopia)*. *Geophys. Res. Lett.* 39: 2-7.

Pedgley D. E. (1967) - *Air temperature at Dallol, Ethiopia*. *Meteorol. Mag.*, 96: 265-270.

Tadiwos C. (2013) - *Dallol volcano and Danakil depression?: earth resources and geo-hazards*. In: *Proceedings of the 24th Colloquium of African Geology and 14th Congress of Geological Society of Africa*, Aveiro.

Talbot C. J. (2008) - *Hydrothermal salt-but how*

much? *Mar. Pet. Geol.*, 25: 191-202.

Tesfaye S., Harding D. J., Kusky T. M. (2003) - *Early continental breakup boundary and migration of the Afar triple junction, Ethiopia*. *GSA Bull.*, 115: 1053-1067.

Varet J. (2010) - *Contribution to favorable geothermal site selection in the Afar triangle*. In: *Proceedings of the ARGEO-C3 Third East African Rift Geothermal Conference*, Djibouti, 139-155.

Varet J. (2018) - *Recent and active units of the Danakil Sea (Dagad Salt Plain) and Afdera Lake*. In: *Geology of Afar (East Africa)*, Cham Springer International Publishing, 205-226.

Warren J. K. (2015a) - *Danakil Potash, Ethiopia: Beds of Kainite/Carnallite, Part 2 of 4*. Technical Report. Adelaide, SA Salt Work Consultants Pte Ltd.

Warren J. K. (2015b) - *Danakil Potash; Ethiopia - Modern Hydrothermal and Deep Meteoric KCl, Part 3 of 4*. Technical Report. Adelaide, SA Salt Work Consultants Pte Ltd.

Warren J. K. (2015c) - *Danakil Potash: K₂SO₄ Across the Neogene: Implications for Danakil Potash, Part 4 of 4*. Technical Report. Adelaide, SA Salt Work Consultants Pte Ltd.

Wunderman R. (2013) - *Report on Dallol (Ethiopia)*. In: *Bulletin of the Global Volcanism Network*, 38, ed. R. Wunderman, (Washington, DC: Smithsonian Institution).