

Ghiaccio, Acqua e Fuoco. I *lava tubes* come paesaggi sulla Terra e nello Spazio

Francesco Axel Pio Romio

Dipartimento di Architettura, DA, Università degli Studi di Ferrara, Italia
francescoaxelpio.romio@unife.it

Abstract

Molti paesaggi vulcanici sono caratterizzati dalla presenza di particolari formazioni geologiche nascoste, denunciate in superficie solo da minime espressioni topografiche o collassi, conosciute come '*lava tubes*' o '*pyroducts*'. Tali grotte sono state utilizzate dalle civiltà del passato, come gli Anasazi ed i Nativi delle Hawaii, con diverse finalità tra cui l'estrazione di risorse come acqua o ghiaccio, capace di conservarsi anche in climi aridi per la capacità isolante delle pareti basaltiche di questi ambienti ipogei. A partire dalle informazioni acquisite con le missioni Apollo, gli scienziati hanno evidenziato e poi confermato l'esistenza di lava tubes sulla Luna e Marte potendo garantire anche in tali condizioni estreme, una concreta possibilità della presenza di ghiaccio stabile al loro interno. Dati i costi del carico trasportato (i.e. *payload*) dal nostro pianeta verso questi altri corpi celesti, e i rischi connessi, le future missioni dovranno quindi fare uso estensivo delle risorse disponibili localmente, secondo il paradigma del '*In Situ Resource Utilization*' (ISRU) che conferma la rilevanza dello studio dei *lava tubes* come i 'prossimi paesaggi estrattivi'. A questo scenario di utilizzo, si aggiungono solide ipotesi di ricerca che lo descrivono come gli ambienti più adatti a supportare la colonizzazione extraterrestre secondo configurazioni più vicine alla dimensione paesaggistica che a quella, fino ad oggi dominante, di macro o microstrutture architettoniche assemblate tra loro. In questa prospettiva, il parallelismo tra antiche pratiche di sfruttamento dei paesaggi ipogei, attuali strategie di rigenerazione dei paesaggi estrattivi e futuri progetti per abitare e trarre risorse dai *lava tubes* extraterrestri mette al centro della '*space architecture*' il progetto di paesaggio per la sua capacità di creare e gestire nuove ecologie, ambienti e contesti adatti alla vita umana.

Many volcanic landscapes are characterized by the presence of peculiar hidden geological formations, revealed on the surface only by subtle topographic expressions or collapses, known as 'lava tubes' or 'pyroducts.' These caves were used by past civilizations, such as the Ancestral Puebloans (Anasazi) and the Native Hawaiians, for various purposes, including the extraction of resources like water or ice, which could be preserved even in arid climates thanks to the insulating capacity of the basaltic walls of these subterranean environments. Since the Apollo missions, scientists have highlighted and later confirmed the existence of lava tubes on the Moon and Mars, where they may also offer a concrete possibility of stable ice preservation under extreme conditions. Given the high costs of transporting payloads from our planet to these other celestial bodies, and the associated risks, future missions will therefore need to make extensive use of locally available resources, following the paradigm of 'In Situ Resource Utilization' (ISRU), which underscores the relevance of studying lava tubes as the 'next extractive landscapes.' Alongside this scenario of resource use, solid research hypotheses also describe them as the most suitable environments to support extraterrestrial colonization, according to configurations closer to a landscape dimension than to the, until now, dominant conception of macro- or micro-architectural structures assembled. From this perspective, the parallel between ancient practices of exploiting subterranean landscapes, current strategies for regenerating extractive landscapes, and future projects for inhabiting and extracting resources from extraterrestrial lava tubes places the landscape project at the center of 'space architecture' for its capacity to create and manage new ecologies, environments, and contexts suitable for human life.

Keywords

Tunnel lavici; Paesaggi planetari; Ghiaccio; Estrazione di risorse; Insediamenti spaziali;
Lava tubes; Planetary landscapes; Ice; Resources extraction; Space settlements

Received: October 2025 / Accepted: February 2026 | © 2026 Author(s). Open Access issue/article(s) edited by RI-VISTA, distributed under the terms of the CC-BY-4.0 and published by Firenze University Press. Licence for metadata: CC0 1.0. DOI: 10.36253/rv-18676

Planetary landscapes

Da tempi immemori, la poesia, le arti e la scienza hanno immaginato e rappresentato Marte e la Luna: immagini lunari furono descritte già da Saffo e Plutarco, che vi si figuravano territori e possibili civiltà lontane (Loske, 2024). Pittori romantici come l'americano Ralph Albert Blakelock ne fecero il soggetto lontano dei propri dipinti, Jules Verne, Georges Méliès e H.G. Wells dei propri racconti, narrandone a loro volta superfici immaginarie e popolate da esseri bizzarri. Nel lasso di tempo tra l'invenzione del telescopio e della fotografia, generazioni di scienziati, tra cui Galileo, ne hanno invece osservato i crateri, cercando di catturare le loro osservazioni con il disegno (Fig.1).

Nel 1994, Ronald Greeley, professore dell'Arizona State University e geologo planetario della NASA, pubblicò una delle sue opere più note: *Planetary Landscapes* (Greeley, 1994). Nel volume, lo scienziato descrisse accuratamente le varie forme e i processi geomorfologici che hanno modellato e caratterizzato diversi corpi planetari del Sistema Solare. Nei decenni precedenti, la nuova prospettiva acquisita grazie all'esplorazione spaziale aveva portato l'umanità ad un salto di scala dal quale non poteva più tornare indietro, rappresentata perfettamente nel cortometraggio *Powers of Ten* (Eames, Eames, 1977). Infatti, già dalle prime immagini scattate dall'orbita bassa terrestre e in particolare con l'immagine *Blue Marble*, la prima e l'unica fotogra-

fia fino ad ora scattata da un umano che ritragga la Terra nella sua interezza (Castro, 2023), la coscienza ecologica e la percezione dei paesaggi terrestri erano cambiate. L'osservazione dall'esterno del pianeta, sospeso sullo sfondo cosmico, aveva consentito alla popolazione terrestre di percepire la Terra come sistema complesso, che si autoregola, e dove tutto è interconnesso, portando all'affermazione di una scala di paesaggio, non più locale o regionale, ma planetaria (Clément, 2008). Di conseguenza, Greeley, nel descrivere i paesaggi planetari del Sistema Solare con una visione scientifica degli stessi, in cui ogni elemento concorre alla loro definizione, riunisce la rappresentazione di luoghi osservati, immaginati e virtualmente trasformati dalla cultura umana con i loro paesaggi naturali reali.

Anni prima però, quando l'Apollo 11 atterrò sulla Luna il 20 luglio 1969, si era verificato un altro grande cambiamento. L'umanità infatti cessò di fare esperienza diretta solo dei paesaggi del proprio pianeta, iniziando a confrontarsi anche con quelli di altri corpi celesti. Le immagini di questo mondo argenteo e silenzioso, inviate a Terra dagli astronauti, mostravano impronte, bandiere, esperimenti scientifici, porzioni di lander lunari che hanno trasformato permanentemente la superficie di un corpo planetario privo dell'azione degli elementi e di vita che potessero, nel tempo, degradarli e cancellarli (Fig.2).

All'interno della varietà dei paesaggi planetari della Luna e di Marte, resta tuttavia un ambito dove nessuna sonda, nessun occhio e nessun uomo si sono ancora spinti: le grotte.

Lava tubes sulla Terra, Luna e Marte

Sin dalla preistoria, gli esseri umani hanno utilizzato le grotte come rifugi, abitazioni e aree di stoccaggio. Queste, a seconda che si siano formate insieme alla roccia ospitante o all'interno di rocce già consolidate, vengono classificate rispettivamente come primarie o secondarie. Tra le prime rientrano i *lava tubes* (Kempe, 2019), storicamente detti *pyroducts* (Coan, 1844), definiti da Halliday (2004, p. 1624) come “condotti di lava coperti da un tetto solido, attivi, drenati o ostruiti”, e presenti unicamente in regioni caratterizzate da attività vulcanica presente o passata. Essi si originano principalmente in lava di composizione basaltica, permettendole di scorrere per lunghe distanze sotto una crosta solidificata (Guest et al., 1980; Peterson et al., 1994). Una volta conclusa l'eruzione, i condotti risultanti sono spesso visibili in superficie attraverso i crolli del tetto, noti come *skylights*, *pukas* alle Hawaii o *jameos* nelle Canarie (Kempe, 2019; Sauro et al., 2020) (Fig.3).

Le prime descrizioni di tunnel lavici compaiono tra il XVIII e XIX secolo nei resoconti di viaggiatori e naturalisti che documentarono grotte in Islanda, Canarie ed Etna (Hartung, 1857; Ólafsson et al., 1978; Ólafsson, Pálsson, 1772; Sartorius Von Waltershausen, 1880). Altri rendiconti coevi riguardano Azzorre, Mauritius, Réunion e Hawaii (Halliday, 2004b; Jaggar, 1921; Whitney, Honolulu, 1893). L'interesse scientifico per queste strutture geologiche crebbe però negli anni '60, quando le missioni Ranger e Lunar Orbiter della NASA mostrarono strutture geologiche lunari, *lunar rilles*, simili ai *lava tubes* terrestri (Greeley, 1971b; Kuiper et al., 1966; Oberbeck et al., 1969) (Fig.3), stimolando studi comparativi su campi lavici di varie aree del mondo (Greeley, 1971c, 1971a; Greeley, Hyde, 1972; Hatheway, Herring, 1970).

Negli ultimi due decenni, immagini ad alta risoluzione e tecniche di telerilevamento hanno ravvivato l'interesse e consentito l'identificazione di centinaia di possibili ingressi al sottosuolo lunare e marziano (Cushing, 2012; Cushing, Okubo, 2017; Wagner, Robinson, 2014, 2021). Gravimetria e radar hanno confermato la presenza di grandi vuoti sotterranei (Chappaz et al., 2017; Kaku et al., 2017; Zhu et al., 2024) e la prima evidenza diretta di un possibile condotto lunare largo oltre 200 m al di sotto dello *skylight* lunare di Mare Tranquillitatis (Carrer et al., 2024). Infatti, se sulla Terra i tunnel lavici non superano i 40 m di larghezza e raggiungono massimo 47 km di lunghezza, come nel caso di Kazumura (Allred et al., 1997), sulla Luna potrebbero raggiungere diametri fino a 900-1.000 m e su Marte circa 400 m, a causa della minore gravità, della diversa reologia e dei più alti tassi di effusione della lava (Blair et al., 2017; Bunnell, 1991; Keszthelyi, 1995; Sauro et al., 2020).

Pratiche culturali ed estrattive nei lava tubes Terrestri

Diverse evidenze archeologiche mostrano che i *lava tubes* furono utilizzati dall'uomo almeno dal 7.000-8.000 BP, come documentato in Vietnam e in Idaho (Henrikson, 2003; Phúc et al., 2018; S et al., 2022). Romio e Lobosco (2025) hanno raccolto nell'*Atlas of Lava Tube Uses* il più ampio insieme di funzioni ad oggi conosciute, per cui queste grotte sono state usate da diverse popolazioni nel mondo, tra cui: abitazioni, rifugi temporanei o fortificati, depositi, luoghi di sepoltura, spazi rituali e risorse vitali come acqua e ghiaccio.

Acqua

In contesti aridi come l'Etna, le Hawaii, le Canarie e la Giordania, diversi tunnel lavici sono stati utilizzati per la raccolta di acqua. Infatti, grazie alla porosità del basalto e alle fratture di raffreddamento presenti sulla superficie di pareti e tetto, l'acqua piovana riesce ad infiltrarsi e a provocare stillicidio. Durante i



Fig. 1 – Da sinistra a destra: schizzi lunari di Galileo Galilei (1861), *Moonlight* di Ralph Albert Blakelock (1885-1889), illustrazione di Gustav Doré nel libro *Adventures du Baron Münchhausen* (1862) di Rudolph Eric Raspe, immagine lunare dell'Imbrium Basin, catturata dall'equipaggio dell'Apollo 16. AS 16-1412 (1972) (crediti e fonti: Galileo Galilei, Ralph Albert Blakelock, Gustav Doré, NASA).

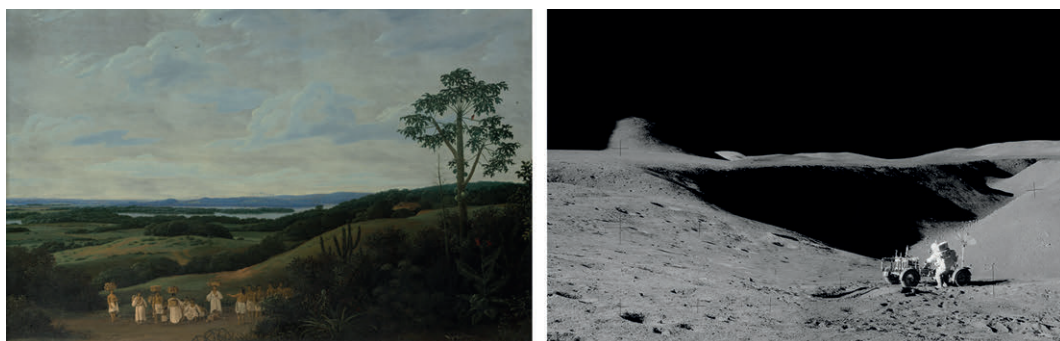


Fig. 2 – Da sinistra a destra: paragone tra il paesaggio del Brasile, all'inizio della sua colonizzazione, e le prime esplorazioni lunari delle missioni Apollo. *Paesaggio brasiliano* di Frans Post (1650) e foto dell'astronauta Dave Scott a Hadley Rille, sito di atterraggio dell'Apollo 15, scattata dal collega e pilota del modulo lunare James Irwin (NASA, 1971) (crediti e fonti: Frans Post, dalla collezione The Met Fifth Avenue Gallery 638 – prima immagine– e NASA, seconda immagine).

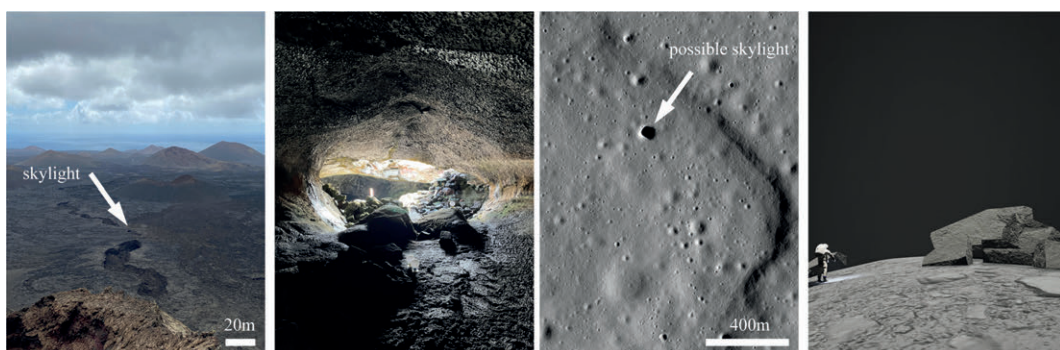


Fig. 3 – Da sinistra a destra: lava tube di Montaña Rajada a Lanzarote e vista dall'interno del condotto sotto il primo ingresso skylight della Cueva de Los Naturalistas a Lanzarote. *Lunar Rille* e *Marius Hills Pit*, un possibile skylight di lava tube lunare, e una rappresentazione del grande condotto che si ritiene si estenda al di sotto della superficie (crediti e fonti: l'autore – prima, seconda e quarta immagine – NASA, terza immagine).



Fig. 4 – Da sinistra a destra: ingresso ai rami sud della Grotta Intraleo, dallo skylight di ingresso. Stillicidio presente nei rami sud, con percolazioni costanti. Frammenti di ceramica probabilmente utilizzati per la raccolta dell'acqua. In questi rami, dove la grotta è prevalentemente e costantemente bagnata (sono state effettuate due visite nel 2024, a luglio e novembre la situazione era analoga) (crediti e fonte: l'autore).

mesi estivi, il fenomeno è accentuato dalla condensa generata dall'aria calda proveniente dall'esterno, che entra attraverso gli skylight e si raffredda rapidamente. Un esempio è la Grotta di Monte Intraleo sull'Etna, un tubo lavico con uno sviluppo di 300 m vicino al comune di Adrano (Licitra, Santi, 1999): l'ingresso serviva come rifugio pastorale, mentre i frammenti ceramici nei rami più profondi e bagnati testimoniano pratiche di raccolta idrica (Priolo, n.d.; Sartorius Von Waltershausen, 1880) (Figg.4, 5).

Nelle Hawaii, i *lava tubes* furono invece centrali per la sopravvivenza delle popolazioni native delle aride pianure di Puna e Ka'u di Big Island. Dopo il 1988, ricerche archeologiche hanno documentato la presenza di pratiche di raccolta dell'acqua in grotte come Calabash e Hilina Pali Petroglyph (Martin, 1991). In particolare, l'Ainahou Cave System mostra prove di un utilizzo protrattasi fino al XX secolo, con contenitori che vanno dalle conchiglie e zucche utilizzate dalle popolazioni native alle moderne bottiglie, lattine e barili. Caratteristica distintiva di alcuni *lava tubes* hawaiani, come la Lua Nunu Makai Cave, è la presenza di ingressi fortificati con aree abitative retrostanti, che suggeriscono accesso ristretto

e controllo politico delle risorse idriche nel sistema di suddivisione territoriale degli *ahupua'a* (Handy, Pukui, 1976; Kempe et al., 2006; Martin, 1996) (Fig. 6). A titolo esemplificativo, Cleghorn e Cox (1976) raccolsero acqua di stillicidio da quattro grotte in un giorno, ottenendo 630 ml di acqua potabile.

Ghiaccio

Se è vero che l'acqua ricavata dai tunnel lavici dell'Etna e delle Hawaii è stata vitale per le popolazioni di questi luoghi, anche il ghiaccio ebbe altrettanta importanza in altri luoghi del mondo. Esempi rilevanti di queste pratiche provengono da Oregon, Nuovo Messico, Idaho e dalla Sicilia.

In Oregon, presso la città di Bend, *lava tubes* come Arnold Ice Cave, Pictograph Cave e Charcoal Cave furono utilizzati dalle popolazioni indigene sin dal 4000 BP, sia come rifugi che come fonti di ghiaccio perenne e che, in alcuni casi, continuarono ad essere sfruttate successivamente dai coloni fino a tempi recenti. La conservazione del ghiaccio era infatti garantita dalle proprietà isolanti del basalto, dallo spessore del tetto e dall'orientamento degli ingressi (Creeley, 1971a; Halliday, 1952; Petrie, 1997).

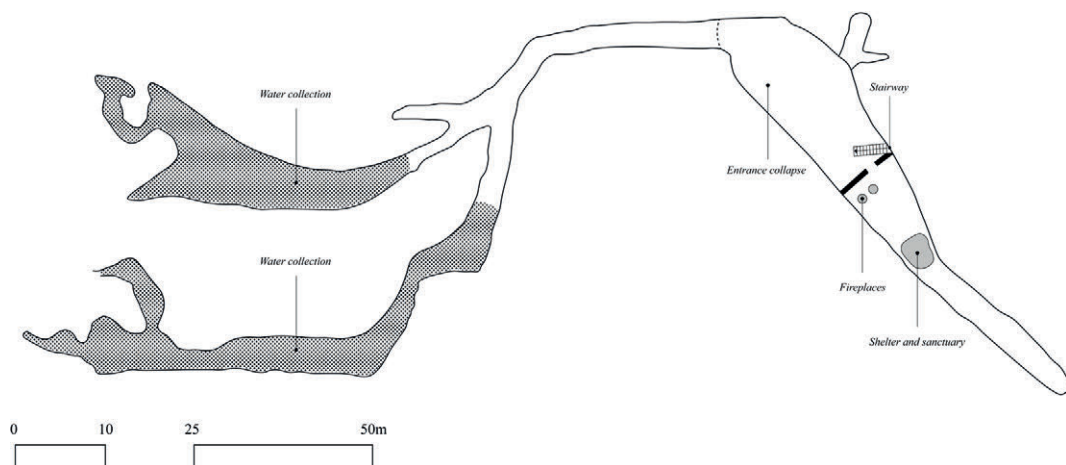


Fig. 5 - Rilievo della Grotta di Monte Intraleo, ridisegnato dall'autore sulla base del rilievo originale, con l'aggiunta di informazioni relative agli usi (crediti: Fanciulli, F., Fazio, V., Gulli, G., Martinico, F. 1982; fonte: *Dentro il Vulcano*, Centro Speleologico Etneo, 1999)

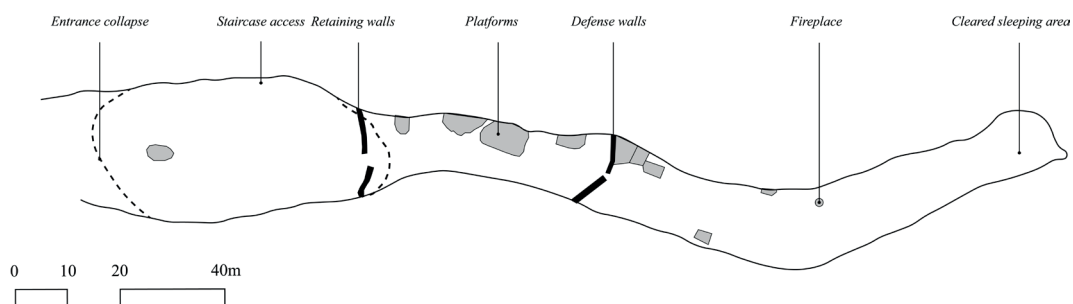


Fig. 6 - Rilievo della Grotta Lua Nunu Makai, ridisegnato dall'autore dal rilievo originale (crediti: Kempe, S., Henschel, H.V., Stanckiewicz, P., 2000; fonte: Kempe et al., 2006).

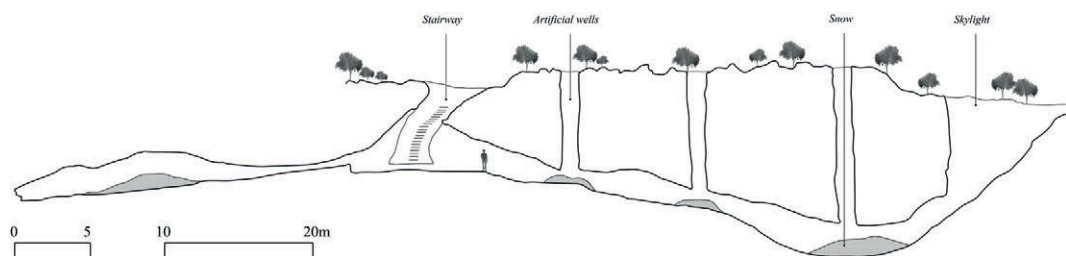


Fig. 7 - Rilievo della Grotta della Neve, ridisegnato dall'autore dal rilievo originale (crediti: Barone, N., Di Paola, A Fanciulli, F., Marino, A., Maugeri, R., 1988; fonte: *Dentro il Vulcano*, Centro Speleologico Etneo, 1999).

In New Mexico invece, all'interno dell'El Malpais National Monument, sono noti 94 *lava tubes* con ghiaccio stagionale o perenne (Onac et al., 2020), unica risorsa idrica permanente del *malpais* (Powers, Orcutt, 2005). Recenti studi mostrano che i nativi usarono molti di tali tunnel lavici per ricavare acqua potabile, scopi domestici e rituali, oltre che come santuari e depositi, già dal 9450 BP (Marinak, 2012; Onac et al., 2020). Una di queste grotte, la Grants Perpetual Ice Cave continuò ad essere sfruttata da operai della rete ferroviaria, fino agli anni '40.

Spostandoci in Idaho, i *lava tubes* contenenti ghiaccio della Snake River Plain furono usati dalle popolazioni locali almeno dal 8000 BP per uno scopo differente: conservare carne di bisonte, la quale si manteneva grazie a temperature stabili di circa 1 °C. Alcune di queste grotte sono la Scaredy Cat, Bobcat e Tomcat (Byers et al., 2016; Henrikson, 2003, 2004). Ogni bisonte forniva infatti circa 354 kg di carne, e questa pratica era un'alternativa più efficiente all'essiccazione. Alcuni studi invece riportano l'utilizzo di queste grotte da parte della popolazione dei Navajo, che le avrebbero usate per conservarvi scorte durante periodi di conflitto con i coloni americani (Willmer, Goodman, 1995).

Infine, sull'Etna, i tunnel lavici furono sfruttati per immagazzinare neve d'inverno e raccogliere ghiaccio d'estate, destinato sia al consumo locale, per granite e sorbetti, che all'esportazione verso Malta. Di proprietà della Curia di Catania, decine di queste grotte furono attive per secoli. In particolare, il commercio della neve prosperò tra XVI e XIX secolo, declinando rapidamente nel XX secolo con l'avvento della refrigerazione. Una di queste, la Grotta della Neve, illustrata anche dal viaggiatore e artista francese Jean-Pierre Houël nel 1782, mostra modifiche come pozzi artificiali e scale, per facilitare lo stoccaggio della neve dalla superficie alla grotta e, viceversa, il trasporto dalla grotta alla superficie (Priolo, 2024; Puglisi, Santi, 1999) (Fig.7).

Fertilizzanti

Spostandoci dalla Sicilia all'Africa Equatoriale, in Kenya tra il 1966 e il 1984 i tunnel lavici furono sfruttati come unica fonte locale di fertilizzante naturale: il guano di pipistrello. Infatti, grandi depositi furono individuati nei primi anni '60 nelle grotte del Monte Suswa e delle North Chyulu Hills (Glover et al., 1964; Williams, 1963). L'estrazione commerciale, condotta da Kenya Guano Ltd., forniva un fertilizzante ricco di nutrienti, molto apprezzato dai coltivatori di caffè intorno a Nairobi e distribuito anche a piccoli agricoltori, circoli di golf e giardinieri (Simons, 1998). All'inizio degli anni '70 l'attività sosteneva la produttività agricola e generava occupazione locale. Inoltre, il valore economico del guano contribuì a proteggere le grotte per quasi due decenni, mentre la Kenya Guano Ltd. finanziò studi scientifici che ampliarono le conoscenze sui tunnel lavici e la loro fauna, promuovendone la conservazione e il turismo speleologico sostenibile (Simons, 1998).

Possibili futuri utilizzi

di *lava tubes* lunari e marziani

Da decenni ormai, numerosi scienziati propongono le grotte e i tunnel lavici come siti per futuri insediamenti, strutture industriali e persino data center sulla Luna e su Marte (Boston et al., 2003; Coombs, Hawke, 1992; Horz, 1985; Pedersen et al., 2024). Le superfici di questi corpi planetari, infatti, a causa della quasi totale mancanza di atmosfera e magnetosfera, sono esposte a radiazioni, micrometeoriti, sbalzi termici estremi (Martin, Benaroya, 2023) e inoltre sono caratterizzate dalla presenza ubiquitaria di regolite, una polvere finissima, abrasiva, elettrostatica e cancerogena (Pohlen et al., 2022). Al contrario, i *lava tubes* offrono protezione naturale, essenziale per astronauti e macchine: potenzialmente lontani dalla regolite (Walden et al., 1998), schermati dalle radiazioni (De Angelis et al., 2002; Naito et al., 2020) e termicamente stabili, con temperature medie vicine a 17 °C presso l'equatore

lunare, rispetto ai 121 °C diurni e -133 °C notturni, e ai -62 °C medi di Marte (Horvath et al., 2022).

Nei paragrafi precedenti abbiamo appreso come, nel contesto terrestre, diverse popolazioni umane abbiano adattato e utilizzato gli ambienti ipogei dei *lava tubes*, di cui hanno sfruttato risorse e proprietà. Cosa possiamo estrarre quindi da quanto narrato che possa essere rilevante per futuri insediamenti lunari o marziani all'interno di tali contesti? Quali le analogie operative, i limiti e i parametri da prendere in considerazione?

Innanzitutto, è interessante osservare che tali popolazioni, seppure localizzate in contesti geograficamente distanti, hanno adottato pratiche simili nell'utilizzo e nella trasformazione dei tunnel lavici. Le sezioni più interne di queste grotte sono state per lo più utilizzate per lo stoccaggio e l'estrazione di risorse – come nel caso delle grotte neviere catanesi o delle grotte dell'Idaho e dell'Oregon – o come aree di fortezze sotterranee, al riparo da possibili pericoli e invasori, come nel caso di alcune grotte hawaiane. Al contrario, le sezioni in prossimità degli ingressi sono state spesso adattate, modificate, come nel caso della Grotta della Neve, per consentire un trasporto più agevole di materiale e persone dall'interno della grotta alla superficie e viceversa, ma anche come luogo di riparo temporaneo, come nel caso della Grotta di Monte Intraleo. Questa tendenza è stata già rilevata da Romio e Lobosco (2025) nell'*Atlas of Lava Tube Uses*, che prende in considerazione gli utilizzi umani di tunnel lavici in Islanda, Giordania, Canarie, Hawaii e altri luoghi del mondo. Nella loro analisi, gli autori evidenziano come, in molti dei casi documentati, le aree adattate ad abitazione sono per lo più collocate in prossimità degli ingressi, ovvero degli *skylights*, sia con che senza la creazione di pareti artificiali per schermare l'apertura dagli agenti atmosferici. Infatti, le zone più interne delle grotte tendono ad essere maggiormente umide e sempre meno illuminate, fino alla totale mancanza di luce a soli alcune decine di metri dall'ingresso.

Nonostante l'origine vernacolare, questi esempi risultano essere in linea con le migliori pratiche di progettazione terrestre in ambito ipogeo, dove il buio, l'umidità, la mancanza di luce naturale, di ventilazione e di contatto/ accesso all'esterno sono considerati tra i principali fattori di stress da mitigare con la progettazione (Debrock et al., 2023). Pertanto, risulta chiaro come questi pattern siano di estrema utilità nell'interpretare come poter adattare questi contesti in ambito lunare e marziano, facendo tesoro di un patrimonio progettuale spontaneo e pragmatico, complementare agli aspetti più geotecnici e ingegneristici, maggiormente investigati (Blair et al., 2017; Chwała et al., 2024a, 2024b, 2025; Li, 2026; Theinat et al., 2020).

A tal proposito, possibili analogie operative potrebbero riguardare lo stabilimento di aree abitative in prossimità degli *skylights*, sia per ragioni di benessere, di sicurezza e logistica, che per la prossimità alle vie di accesso/uscita, permettendo un più agevole trasporto di materiali e macchinari per la costruzione, che in aree lontane dagli ingressi comporterebbe complessità notevoli (Bannova et al., 2025). Queste ultime potrebbero essere invece destinate ad altri utilizzi, come, per esempio, l'estrazione di risorse, lo storage di equipaggiamento, materiale e data-centers. A tal proposito è fondamentale aggiungere alcune considerazioni: la possibile presenza di risorse minerali, ghiaccio d'acqua (Blamont, 2014; Cushing, 2012; Florida, Lee, 2019; Léveillé, Datta, 2010; K. E. Williams et al., 2010) e di tracce di forme di vita presenti e passate (Boston et al., 2003; Léveillé, Datta, 2010). Per tali ragioni, le aree più distanti dagli ingressi, perciò più stabili termicamente e isolate dalla superficie, e dal materiale proveniente da essa, potrebbero risultare allo stesso tempo di altissima rilevanza scientifica (Boston et al., 2003) e preziose per l'estrazione di risorse locali. Perciò, se da un lato queste aree potrebbero configurarsi come paesaggi estrattivi di risorse fondamentali per lo stabilimento di insediamenti, come ghiaccio e minerali, dall'al-

tro potrebbero ospitare ecologie preesistenti di alto valore scientifico da tutelare e studiare. Lo scenario che ne deriva è perciò complesso, in quanto tali futuri paesaggi sotterranei chiamano i progettisti alla necessità di integrazione tra abitazioni, infrastrutture, pratiche estrattive e tutela. Inoltre, come anticipato precedentemente, i *lava tubes* marziani e lunari potrebbero presentare dimensioni che oscillano da paragonabili a quelle terrestri (Bell et al., 2022; Wilson et al., 2025) a diametri interni di centinaia di metri (Sauro et al., 2020). Tali variazioni di scala potrebbero essere ulteriori parametri determinanti da prendere in considerazione per possibili trasformazioni e utilizzi di alcune sezioni, rispetto ad altre (Boston et al., 2003). Inoltre, tali dimensioni consentono di prefigurare spazi che, nonostante siano ipogei e confinati, possano essere considerati alla stregua di spazi aperti, perciò più assimilabili, per l'appunto, alla scala paesaggistica che esclusivamente architettonica. Perciò, in questa fase iniziale di una possibile *Planetary Landscape Architecture*, progettare nell'incertezza diventa essenziale: strumenti come lo Scenario Planning, uniti a modelli di simulazione basati su dati di *lava tubes* terrestri (Romio et al., 2025, 2026) possono sostenere strategie condivise tra agenzie spaziali e stakeholders pubblici e privati, garantendo un equilibrio tra sfruttamento, trasformazione e tutela, mediante l'elaborazione di diversi possibili scenari, a seconda delle possibili condizioni al contorno (Fig.8).

Paesaggi planetari, tra trasformazione e protezione

A Lanzarote, a partire dagli anni '60, l'artista e architetto César Manrique ha trasformato una sezione del *lava tube* La Corona nell'intervento *Los Jameos del Agua*, integrando funzioni culturali e architettoniche – tra cui bar, ristorante e auditorium – e ospitando oggi anche un museo, La Casa de Los Volcanes, all'interno del contesto geologico ed ecologico unico della grotta. Nel 2023, Lanzarote ha ospitato

occasione, durante una visita all'intervento di Manrique, l'autore del presente contributo ha potuto confrontarsi con alcune voci critiche, tra biologi e astrobiologi, nel commentare l'opera. Le opinioni risultavano contrastanti: da un lato veniva sottolineata la trasformazione del paesaggio ipogeo e dell'ecologia preesistente; dall'altro l'intervento era elogiato in quanto limitato a una sola sezione di La Corona e di entità ridotta rispetto all'estensione complessiva del sistema (7,5 km) (Sauro et al., 2020), con la conseguente creazione di un paesaggio ipogeo inedito, dotato di forte identità e valenza culturale per l'isola. L'intervento, insieme all'altra sezione di La Corona accessibile al pubblico (*Cueva de Los Verdes*), permette alla popolazione locale e ai visitatori di fare esperienza diretta di questi paesaggi 'nascosti', della loro bellezza e del loro ambiente peculiare.

Collegando questa esperienza terrestre, unica nel suo genere, ai futuri scenari discussi nel paragrafo precedente (Fig.8), è possibile delineare alcune direzioni per l'utilizzo dei *lava tubes* lunari e marziani. Come nel caso del *lava tube* La Corona, uno stesso tunnel lavico potrebbe comprendere zone dedicate allo sfruttamento, all'insediamento o alla tutela integrale e alla ricerca, in funzione di fattori quali rilevanza scientifica, dimensioni e localizzazione rispetto agli ingressi. Gli stessi parametri potrebbero inoltre orientare scelte a scala più ampia, individuando quali *lava tubes* risultino più vocati a un utilizzo estrattivo, insediativo o di ricerca e tutela. Un simile *framework* consentirebbe ad agenzie spaziali, istituzioni e portatori di interesse pubblici e privati di identificare, mediante criteri condivisi, tipologie di paesaggi caratterizzate da diversi gradienti di protezione e trasformazione, in analogia a quanto avviene sulla Terra, ad esempio, con la *Ramsar Convention on Wetlands* o con la classificazione internazionale delle aree protette dell'IUCN, offrendo anche uno strumento condiviso per guidare lo sviluppo e riconoscere eventuali illeciti o inosservanze.



Fig. 8 – Elaborazione di diversi possibili scenari di utilizzo di *lava tubes* lunari e marziani, tenendo in considerazione i parametri di abitabilità e utilizzo evidenziati dalla ricerca storica, le possibili variazioni di dimensioni interne, e le esigenze di trasformazione e tutela. Scenario A: area interna di un *lava tube*, lontana dagli accessi e ricca di mineralizzazioni secondarie, ghiaccio e tracce di forme di vita. Sezioni di questo genere potrebbero essere lasciate nello stato attuale, destinate unicamente alla ricerca scientifica e protette dal massimo grado di tutela. Scenario B: sezione interna di *lava tube*, ricca di risorse, ma senza la presenza di tracce di forme di vita e selezionata per l'utilizzo estrattivo. Scenario C: area della grotta di grandi dimensioni e localizzata in prossimità dello *skylight*, adattata all'utilizzo abitativo, ma senza trasformazioni radicali dell'assetto attuale. I moduli dell'insediamento sono pressurizzati e collocati all'interno di un tunnel lavico non pressurizzato. Scenario D: contesto analogo allo scenario C, ma con la chiusura dello *skylight* mediante una copertura e pressurizzazione della grotta, al fine di ottenere un ambiente interno vivibile dotato di un'atmosfera in cui poter respirare senza la necessità di utilizzo delle tute pressurizzate al di fuori dell'ambiente costruito. Tali interventi comportano la trasformazione della grotta in un nuovo paesaggio comprendente un insediamento sviluppato, collegamenti con la superficie e le altre aree pressurizzate del *lava tube*. Ricordiamo infatti che alla Luna manca quasi totalmente un'atmosfera, mentre Marte detiene un'atmosfera con una densità inferiore a un centesimo di quella terrestre, composta quasi totalmente di anidride carbonica. Per quanto ancora oggetto di dibattito riguardo la sua fattibilità, la possibilità di pressurizzare sezioni di tunnel lavici è oggetto di studio (Feng et al., 2024; R. P. Martin, Benaroya, 2023; She et al., 2025). Gli scenari presentati non sono esclusivi e possono rappresentare diversi approcci per aree diverse dello stesso *lava tube* o di più grotte (crediti e fonte: Francesco Axel Pio Romio: immagini elaborate con ChatGPT, a partire da modelli 3D elaborati dall'autore).

Se cerchiamo di far dialogare queste idee, con gli strumenti legislativi esistenti, emergono alcune considerazioni interessanti. L'Outer Space Treaty (United Nations, 1967), trattato multilaterale che costituisce la base del diritto spaziale internazionale, e il più specifico Moon Agreement (United Nations, 1979) – concepito in spirito complementare al precedente ma, nella pratica, poco applicato, poiché vincolante per soli 17 Stati contraenti e non adottato dalle principali potenze spaziali (ad es. Stati Uniti, Russia, Cina) – pongono entrambi l'accento sulla necessità di prevenire alterazioni degli equilibri ambientali della Luna e di altri corpi planetari. In particolare, l'articolo 9 del primo e l'art.7, comma 1 del secondo impongono agli Stati parti di adottare misure specifiche per evitare contaminazioni o alterazioni negative derivanti dall'introduzione di materiale di provenienza 'extra-ambientale'. Allo stesso tempo però, l'art.6, comma 2 del Moon Agreement ammette, nel contesto di missioni scientifiche, la raccolta e rimozione di campioni e l'uso di sostanze in quantità appropriate alla missione da parte degli Stati contraenti. Inoltre, l'articolo 4 stabilisce che l'esplorazione e l'uso della Luna debbano svolgersi nell'interesse di tutti i Paesi, con attenzione alle generazioni presenti e future, mentre l'art.7, comma 3 apre alla possibilità di designare aree di particolare interesse scientifico come riserve internazionali, con specifiche misure di tutela da concordare in consultazione con gli organi competenti delle Nazioni Unite. Considerando il quadro descritto, nell'ambito delle prossime esplorazioni potrebbero emergere tensioni tra la tutela di un 'patrimonio' ipogeo, inteso qui come valore ambientale/scientifico dei paesaggi sotterranei, della Luna e di Marte e le possibili necessità di utilizzo e trasformazione legate a obiettivi operativi delle agenzie spaziali statali, senza considerare i possibili interessi commerciali del privato. Infatti, sebbene sia l'*Outer Space Treaty* che il *Moon Agreement* prevedano che eventuali azioni di privati ricadano sotto le responsabilità degli Stati contraen-

ti di appartenenza (art.6 Outer Space Treaty; art.14, comma 1, Moon Agreement), entrambi riflettono un'epoca in cui i principali attori erano soprattutto le agenzie spaziali statali. Al contrario, la partecipazione del settore privato nella nuova corsa allo spazio si prospetta massiccia. In questo senso, gli *Artemis Accords*, promossi dagli Stati Uniti nell'ambito dell'omonimo programma, costituiscono un'intesa politica non vincolante tra Stati che propone principi e buone pratiche per l'esplorazione e l'uso civile di Luna e altri corpi celesti, dichiaratamente in conformità con l'*Outer Space Treaty* e implementabile anche attraverso meccanismi operativi e contrattuali con entità che agiscono per conto dei firmatari. Nella Sezione 10, gli Accords affrontano l'estrazione e l'utilizzo delle risorse del sottosuolo lunare e marziano, considerandole fondamentali per il supporto operativo. Tuttavia, a differenza dell'articolo 11 del Moon Agreement, che qualifica la Luna e le sue risorse naturali come 'patrimonio comune dell'umanità', gli Accordi pongono l'accento sulla conformità con l'Articolo 2 dell'*Outer Space Treaty* (OST), chiarendo che l'attività di estrazione non costituisce, di per sé, una forma di appropriazione nazionale o una pretesa di sovranità sui corpi celesti. Infine, la Sezione 9, la quale riguarda la preservazione dello 'outer space heritage', fa riferimento principalmente ad artefatti di produzione umana, senza includere esplicitamente i paesaggi naturali in tale categoria. Parallelamente, nel 2021, Cina e Russia firmano un memorandum d'intesa nell'ambito del programma International Lunar Research Station (ILRS), anch'esso aperto alla collaborazione con partner internazionali, orientato allo stabilimento di stazioni di ricerca lunari e, nella documentazione programmatica, attento anche all'esplorazione dei *lava tubes*, come previsto nell'ambito della missione ILRS-2. Il contesto risultante, tra trattati internazionali e strumenti più recenti come gli Artemis Accords, non rende ancora pienamente espliciti i confini tra tutela e trasformazione dei paesaggi lunari, sia in

superficie sia nel sottosuolo. Qui, il parallelismo con la Convenzione Europea sul Paesaggio (Council of Europe, 2000) si rivela interessante: seppure in contesti radicalmente diversi, l'immensità dello spazio da un lato, l'Europa dall'altro, dai quadri istituzionali proposti dalla Comunità Europea e dall'ONU emerge l'idea di una responsabilità verso un patrimonio condiviso tra generazioni. La Convenzione Europea però esplicita come tutela e trasformazione possano convivere all'interno di una pianificazione capace di integrare paesaggi naturali e paesaggi produttivi, esito dell'interazione tra uomo e natura, tema che, come abbiamo visto, è affrontato dai trattati menzionati esclusivamente in riferimento alla tutela in generale degli ambienti planetari ed estrazione di risorse per fini scientifici, ma senza affrontare in maniera esplicita quale possa essere la relazione tra queste due operazioni semanticamente contrastanti. In tale prospettiva, come anticipato all'inizio di questa sezione, l'adozione di parametri condivisi, l'identificazione di diverse tipologie di paesaggio, della loro vocazione, e l'istituzione di Piani di gestione 'planetaria' comuni, fornirebbero alle istituzioni, e alla vasta platea di operatori pubblici e privati coinvolti, un'infrastruttura legale chiara e condivisa che consenta un utilizzo selettivo e trasformativo, capace di generare nuovi paesaggi senza sacrificare quelli di interesse scientifico come patrimonio comune dell'umanità.

Riferimenti bibliografici

- Allred K., Allred C., Richards R. 1997, *Kazumura Cave Atlas. Island of Hawai'i*, «Special Publication Hawai'i Speleological Survey», pp. 81.
- Bannova O., Pischult P. K., Stankovic A. 2025, *A Human-Centered Feasibility Analysis of Lunar Lava Tube Architectures*, «Proceedings of the 76th International Astronautical Congress».
- Bell E., Schmerr N., Young K., Esmaeili S., Garry W. B., Jazayeri S., Kruse S., Richardson J., Whelley P. 2022, *Field Mapping and Modeling of Terrestrial Lava Tube Magnetic Anomalies as an Analog for Lunar Lava Tube Exploration and Prospecting*, «Journal of Geophysical Research: Planets», vol. 127(6), e2021JE007140.
- Blair D. M., Chappaz L., Sood R., Milbury C., Bobet A., Melosh H. J., Howell K. C., Freed A. M. 2017, *The structural stability of lunar lava tubes*, «Icarus», vol. 282, pp. 47-55.
- Blamont, J. 2014, *A roadmap to cave dwelling on the Moon and Mars*, «Lunar Science and Exploration», vol. 54(10), pp. 2140-2149.
- Boston P. J., Frederick R. D., Hildreth-Werker V. 2003, *Human utilization of subsurface extraterrestrial environments: Final report*, «KIP Data Sets and Technical Report».
- Bunnell D. 1991, *Calculations of the relative size of lava tubes on the moon. Hawaii: The 6th International Symposium on Vulcanospeleology*, «NSS News», vol. 49(12), 355.
- Byers D. A., Henrikson L. S., Breslawski R. P. 2016, *Holocene cold storage practices on the eastern Snake River Plain: A risk-mitigation strategy for lean times*, «Journal of Anthropological Archaeology», vol. 43, pp. 56-68.
- Carrer L., Pozzobon R., Sauro F., Castelletti D., Patterson G. W., Bruzzzone L. 2024, *Radar evidence of an accessible cave conduit on the Moon below the Mare Tranquillitatis pit*, «Nature Astronomy», vol. 8(9), pp. 1119-1126.
- Castro T. 2023, *Vedere la Terra dallo spazio: tra ragione cartografica e ragione ecologica*, in T. Morawski, M. Vegetti (a cura di), *Earthscapes. Le conseguenze della visione della Terra dallo spazio*, Donzelli Editore, Roma, pp. 33-47.
- Centro Speleologico Etneo. 1999, *Dentro il vulcano: Le Grotte dell'Etna*. Parco dell'Etna, Catania.
- Chappaz L., Sood R., Melosh H. J., Howell K. C., Blair D. M., Milbury C., Zuber M. T. 2017, *Evidence of large empty lava tubes on the Moon using GRAIL gravity*, «Geophysical Research Letters», vol. 44(1), pp. 105-112.
- Chwała M., Komatsu G., Haruyama J. 2024, *Structural stability of lunar lava tubes with consideration of variable cross-section geometry*, «Icarus», vol. 411.

- Chwała M., Komatsu G., Haruyama J. 2024, *Effects of layered roof for stability and exploration of lunar lava tubes*, «Earth and Planetary Science Letters», vol. 643, 118918.
- Chwała M., Bodlak M., Whelley P. 2025, *Stability and Collapse Analysis of Terrestrial Lava Tubes Under Irregular Shapes: Case Study of Skull and Valentine Caves*, «Journal of Geophysical Research: Planets», vol. 130(8), e2025JE009109.
- Cleghorn P. L., Cox D. W. 1976, *Phase I Archaeological Survey of Hilina Pali Petroglyph Cave and Associated Sites*, Hawaii Volcanoes National Park, Hawaii.
- Clément G. 2008, *Il Giardiniere Planetario*, 22 Publishing, Milano.
- Coan T. 1844, *Letter of March 15, 1843, describing the Mauna Loa of 1843*, «The Missionary Herald».
- Coombs C. R., Hawke B. 1992, *A search for intact lava tubes on the Moon: Possible lunar base habitats*, «NASA Johnson Space Center, The Second Conference on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century», vol. 1.
- Cushing G. E. 2012, *Candidate Cave Entrances on Mars*, «Journal of Cave and Karst Studies», vol. 74(1), pp. 33–47.
- Cushing G. E., Okubo C. H. 2017, *Description of the Mars Global Cave Candidate Catalog (MGC3)*, «PDS Archive».
- De Angelis G., Wilson J. W., Cloudsley M. S., Nealy J. E., Humes D. H., Clem J. M. 2002, *Lunar Lava Tube Radiation Safety Analysis*, «Journal of Radiation Research», vol. 43(Suppl), pp. 41–45.
- Debrock S., van Acker M., Admiraal H. 2023, *Design recommendations for sustainable urban underground spaces*. «Tunnelling and Underground Space Technology», vol. 140, 105332.
- Eames C., Eames R. 1977, *Powers of Ten* [Video recording], IBM.
- Council of Europe. 2000, *European Landscape Convention*.
- Glover P. E., Glover E. C., Trump E. C., Wateridge L. E. D. 1964, *The lava caves of Mount Suswa, Kenya*, «Studies in Speleology», vol. 1(1), pp. 51–67.
- Greeley R. 1971a, *Geology of selected lava tubes in the Bend area, Oregon*. State of Oregon Dept. of Geol. and Mineral Ind.
- Greeley R. 1971b, *Lava tubes and channels in the lunar Marius Hills*, «The Moon», vol. 3(3), pp. 289–314, <https://doi.org/10.1007/BF00561842>.
- Greeley R. 1971c, *Observations of actively forming lava tubes and associated structures, Hawaii*, «NASA Technical Memorandum NASA-TM-X-62014».
- Greeley R., Hyde J. H. 1972, *Lava tubes of the cave basalt, Mount St. Helens, Washington*, «Geological Society of America Bulletin», vol. 83(8), pp. 2397–2418.
- Greeley R. 1994, *Planetary landscapes*, Springer Science & Business Media, Berlino.
- Guest J. E., Underwood J. R., Greeley R. 1980, *Role of lava tubes in flows from the Observatory Vent, 1971 Eruption on Mount Etna*, «Geological Magazine», vol. 117(6), pp. 601–606.
- Halliday W. R. 1952, *Lava Caves of Central Oregon*, «National Speleological Society Bulletin», vol. 14, pp. 47–48.
- Halliday W. R. 2004a, *Volcanic Caves*, in J. Gunn (a cura di), *Encyclopedia of caves and karst science*, Routledge, New York, pp. 1624–1633.
- Halliday W. R. 2004b, *Vulcanospeleology: History*, in J. Gunn (a cura di), *Encyclopedia of caves and karst science*, Routledge, New York, pp. 1633–1637.
- Handy E. S., Pukui M. K. 1976, *The Polynesian Family System in Ka'u Hawaii*, Charles E. Tuttle Company, North Clarendon.

- Hartung G. 1857, *Die geologischen Verhältnisse der Inseln Lanzarote und Fuerteventura*: Vol. XV, Allgemeine schweizerische Gesellschaft für die gesammten Naturwissenschaften.
- Hatheway A. W., Herring A. K. 1970, *Bandera lava tubes of New Mexico, and lunar implications*, «Communications of Lunar and Planetary Laboratory», vol. 8(152), pp. 299–327.
- Henrikson L. S. 2003, *Bison Freezers and Hunter-Gatherer Mobility: Archaeological Analysis of Cold Lava Tube Caves on Idaho's Snake River Plain*, «Plains Anthropologist», vol. 48(187), pp. 263–285.
- Henrikson L. S. 2004, *Frozen bison and fur trapper's journals: building a prey choice model for Idaho's Snake River Plain*, «Journal of Archaeological Science», vol. 31(7), pp. 903–916.
- Horvath T., Hayne P. O., Paige D. A. 2022, *Thermal and Illumination Environments of Lunar Pits and Caves: Models and Observations From the Diviner Lunar Radiometer Experiment*, «Geophysical Research Letters», vol. 49(14).
- Horz F. 1985, *Lava tubes-potential shelters for habitats*, «Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century», pp. 405–412.
- Jaggard A. 1921, *Volcanic conditions in February, Activity of Halemauau*, «Monthly Bulletin of the Hawaiian Volcano Observatory», vol. 9, pp. 21–37.
- Kaku T., Haruyama J., Miyake W., Kumamoto A., Ishiyama K., Nishibori T., Yamamoto K., Crites S. T., Michikami T., Yokota Y., Sood R., Melosh H. J., Chappaz L., Howell K. C. 2017, *Detection of Intact Lava Tubes at Marius Hills on the Moon by SELENE (Kaguya) Lunar Radar Sounder*, «Geophysical Research Letters», vol. 44(20), pp. 10,155–10,161.
- Kempe S. 2019, *Volcanic rock caves*, in W.B. White, T. Pipan (a cura di), *Encyclopedia of Caves*, Academic Press, Cambridge (terza edizione), pp. 1118–1127.
- Kempe S., Henschel H.-V., Shick H., Hansen B. 2006, *Archaeology of the Kamakalepo/Waipouli/Stonehenge Area, Underground Fortresses, Living Quarters, and Petroglyph Fields*, «AMCS Bulletin 19/ SMES Boletín 7», pp. 243–252.
- Keszthelyi L. 1995, *A preliminary thermal budget for lava tubes on the Earth and planets*, «Journal of Geophysical Research: Solid Earth», vol. 100(B10), pp. 20411–20420.
- Kuiper G. P., Strom R. G., Le Poole R. S., VIII, A. R. 1966, *III. Interpretation of The Ranger Records*, «Technical Report-Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology».
- Léveillé R. J., Datta S. 2010, *Lava tubes and basaltic caves as astrobiological targets on Earth and Mars: A review*, «Planetary and Space Science», vol. 58(4), pp. 592–598.
- Li L. 2026, *A method for enhancing the structural stability of lunar lava tubes*, «Advances in Space Research», vol. 77(1), pp. 1235–1252.
- Licitra G. M., Santi G. 1999, *La Grotta di Monte Intraleo*, in Centro Speleologico Etneo (a cura di), *Dentro il vulcano. Le grotte dell'Etna*, Parco dell'Etna, Catania, pp. 234–236.
- Loske A. 2024, *La Luna nella Letteratura e nella Narrativa*, in M. Shindell (a cura di), *La Luna*, Giulio Einaudi Editore, Torino, pp. 106–111.
- Marinakos H. A. 2012, *A History of Human Exploration and Occupation of the Lava Caves of the Zuni-Bandera Volcanic Field, New Mexico, USA*, in A. Al-Malabeh (a cura di), *Proceedings of the 15th International Symposium on Vulcanospeleology*, Center of Environmental Studies, Zarka, pp. 87–96.

- Martin J. F. 1991, *Native Hawaiian Water Collection Systems in Lava Tubes (Caves) and Fault Cracks*, in G. T. Rea (a cura di), *Proceedings of the 6th International Symposium on Vulcanospeleology*, National Speleological Society, Huntsville, pp. 10–14.
- Martin J. F. 1996, *Native Hawaiian Collection Systems in Lava Tubes (Caves) and Fault Cracks: Puna - Ka'u Districts, Hawaii*, «Journal of the Speleological Society of Korea», vol. 4, pp. 41–50.
- Martin R. P., Benaroya H. 2023, *Pressurized lunar lava tubes for habitation*, «Acta Astronautica», vol. 204, pp. 157–174.
- Naito M., Hasebe N., Shikishima M., Amano Y., Haruyama J., Matias-Lopes J. A., Kim K. J., Kodaira S. 2020, *Radiation dose and its protection in the Moon from galactic cosmic rays and solar energetic particles: at the lunar surface and in a lava tube*. «Journal of Radiological Protection», vol. 40(4), 947.
- Oberbeck V. R., Greeley R., Quaide W. L. 1969, *On the origin of lunar sinuous rilles*, «Modern Geology», vol. 1.
- Ólafsson E., Eiriksson J., Pálsson B., Schöning G. 1978, *Ferdabók Eggerts Ólafssonar og Bjarna Pálssonar*.
- Ólafsson E., Pálsson B. 1772, *Reise Igiennem Island, Foranstaltet A f Videnskabernes Selskab I Kjøbenhavn*, Jonas Lindgrens, Sorøe.
- Onac B. P., Baumann S. M., Parmenter D. S., Weaver E., Sava T. B. 2020, *Late Holocene droughts and cave ice harvesting by Ancestral Puebloans*, «Scientific Reports», vol. 10(1), 20131.
- Pedersen C. L., Antonic A., Alqaraghuli F. M., Mayes R. E., Thangavelautham J. 2024, *Lunar Lava Tubes for Segmented Base Architecture on the Moon*, «Earth and Space 2024: Engineering for Extreme Environments», pp. 663–675.
- Peterson D. W., Holcomb R. T., Tilling R. I., Christiansen R. L. 1994, *Development of lava tubes in the light of observations at Mauna Ulu, Kilauea Volcano, Hawaii*, «Bulletin of Volcanology», vol. 56(5), pp. 343–360.
- Petrie G. 1997, *Conservation Challenges: Restoration of the Caves of Central Oregon*, «Proceedings of the 1997 National Cave and Karst Management Symposia National Cave & Karst Management Symposia NCKMS», pp.153–156.
- Phúc L. T., Honda T., Tachihara H., Tuất L. T., Thom B. Van, Hoang N., Chikano Y., Yoshida K., Nguyen B. H., Vu P. G. M., Duc T. M., Thai P. H., Sac P. D. 2018, *Lava Caves, Lava Formations And Biological And Archaeological Values Firstly Discovered In Krongno Volcano Geopark, Dak Nong, Vietnam*, in ISV Commission (a cura di), *Proceedings of the 18th International Vulcanospeleology Symposium*, Organising Committee of the 17th International Symposium on Vulcanospeleology for the Commission on Volcanic Caves, Ocean View Hawai'i, pp. 1–10.
- Pohlen M., Carroll D., Prisk G. K., Sawyer A. J. 2022, *Overview of lunar dust toxicity risk*, «Npj Microgravity», vol. 8(1), 55.
- Powers R. P., Orcutt J. D. 2005, *The El Malpais Archeological Survey: Phase I*, «Archeology Program, Cultural Resources Management Division, Intermountain».
- Priolo G. *Scheda Si CT 007: Grotta dell'Intralio*, in Mungibeddu, <<http://www.mungibeddu.it/mungibeddu/schede/007.html>> (08/09).
- Priolo G. 2024, *La lava e la neve: il freddo passato dell'Etna*, «La Rivista Del Club Alpino Italiano», pp. 78–85.
- Puglisi G., Santi G. 1999, *Le Grotte dell'Etna ed i Viaggiatori del Passato: Testimonianze di Viaggio*, in Centro Speleologico Etneo (a cura di), *Proceedings of the IX International Symposium on Vulcanospeleology*, Parco dell'Etna, Catania, pp. 86–104.

- Romio F. A. P. 2022, *Mars Underground: a Landscape Strategy for Long Term Human Colonies on the Red Planet*, «Proceedings of the 73rd International Astronautical Congress».
- Romio F. A. P., Lobosco G. 2025, *Underground landscapes: volcanism, lava tubes, and man*, «Tunnelling and Underground Space Technology», vol. 162, 106618.
- Romio F. A. P., Lobosco G., Sauro F., Pozzobon R., Marraffa A. 2025, *Pyroduct: The First Realistic and Parametric Lava Tube Generator for Earth, Moon, and Mars*.
- Romio F. A. P., Lobosco G., Sauro F., Pozzobon R., Marraffa A. 2026, *Pyroduct: A novel parametric software for the simulation of terrestrial, lunar, and Martian lava tubes*, «Icarus», vol. 447, 116904.
- Sartorius Von Waltershausen W. 1880, *Der Aetna*. Verlag von Wilhelm Engelmann, Leipzig.
- Sauro F., Pozzobon R., Massironi M., De Berardinis P., Santagata T., De Waele J. 2020, *Lava tubes on Earth, Moon and Mars: A review on their size and morphology revealed by comparative planetology*, «Earth-Science Reviews», vol. 209, 103288.
- Simons J. W. 1998, *Guano mining in Kenyan lava tunnel caves*, «International Journal of Speleology», vol. 27(1), 4.
- Sử N. K., Cường N. L., Phúc L. T., Tuất L. T., Đức Th. S. V. T., Vương Th. S. N. T., Hưng L. X., Thảo P. T. P. 2022, *Prehistoric Archaeological Sites in the Krongno Volcanic Caves-Outstanding Historical and Cultural Values*, in T.N. Bach, J. Bush (a cura di), *Proceedings of the 20th International Vulcanospeleology Symposium*, Organising Committee 20th International Symposium on Vulcanospeleology, Gia Nghia City, pp. 14–131.
- Theinat A. K., Modiriasari A., Bobet A., Melosh H. J., Dyke S. J., Ramirez J., Maghareh A., Gomez D. 2020, *Lunar lava tubes: Morphology to structural stability*, «Icarus», vol. 338, 113442.
- United Nations. 1967, *Outer Space Treaty*.
- United Nations. 1979, *Moon Agreement*.
- Wagner R. V., Robinson M. S. 2014, *Distribution, formation mechanisms, and significance of lunar pits*, «Icarus», vol. 237, pp. 52–60.
- Wagner R. V., Robinson M. S. 2021, *Occurrence and Origin of Lunar Pits: Observations from a New Catalog*, «Proceedings of the 52nd Lunar and Planetary Science Conference».
- Walden B. E., Billings T. L., York C. L., Gillett S. L., Herbert M. V. 1998, *Utility of lava tubes on other worlds*, «Workshop on Using In Situ Resources for Construction of Planetary Outposts», pp. 24–25.
- Whitney J. M., Honolulu D. D. S. 1893, *Among the Ancient Hawaiians*, «The International Dental Journal», vol. 14(10), pp. 735–742.
- Williams K. E., McKay C. P., Toon O. B., Head J. W. 2010, *Do ice caves exist on Mars?*, «Icarus», vol. 209(2), pp. 358–368.
- Williams L. A. J. 1963, *Lava tunnels on Suswa mountain, Kenya*, «Nature», vol. 199(4891), pp. 348–350.
- Willmer A. J., Goodman L. J. 1995, *Archaeological Survey along State Road 117, Cibola County, New Mexico*. «Archaeology Notes», 64.
- Wilson L., Head J. W. 2025, *Lunar Lava Tubes: An Assessment of Geometry and Scale on the Basis of Geological Observations and Physical Volcanology*, «Proceedings of the 56th Lunar and Planetary Science Conference».
- Zhu K., Yang M., Yan X. Y., Li W. K., Feng W., Zhong M. 2024, *GRAIL gravity gradients evidence for a potential lava tube at Marius Hills on the moon*, «Icarus», vol. 408, 115814.