

Morfologie pseudocarsiche tra i ghiacci del Sistema Solare

Canali, depressioni doliniformi, sinkhole e rilievi residuali sui corpi ghiacciati del Sistema Solare

Sossio DEL PRETE - Planetario di Caserta - Federazione Speleologica Campana

Lo spazio celeste rappresenta senza dubbio l'ultima frontiera dell'esplorazione umana. Per ora, tuttavia, si è solo iniziato a esplorare il giardino intorno casa e per lo più tramite sonde automatiche che, con i loro apparati tecnologici, ci fanno osservare e studiare gli ambienti e le variegata morfologie dei pianeti del Sistema Solare. Queste indagini hanno aperto nuovi scenari geologici e geografici che hanno permesso di trovare, sulla Luna e su Marte, chiare evidenze di morfologie ipogee sotto forma di tubi di lava. Ma l'acquisizione recente di dati su corpi ghiacciati come comete, lune e pianeti, o di regioni come le calotte polari di Marte, ha permesso di identificare morfologie pseudocarsiche epigee. Nella gran parte dei casi non si tratta di forme generate da qualche processo di solubilizzazione chimica come nel fenomeno carsico, o da crolli di cavità endoglaciali, bensì da un processo fisico di sublimazione in cui il calore e la ridotta o nulla pressione atmosferica portano il ghiaccio solido a trasformarsi direttamente in vapore. Questi fenomeni evidenziano la possibile presenza di contesti speleogenetici legati a processi chimico-fisici assolutamente sconosciuti sulla Terra, i cui meccanismi richiedono ancora approfondimenti e ulteriori dati da future missioni.

Tra i ghiacci di Marte

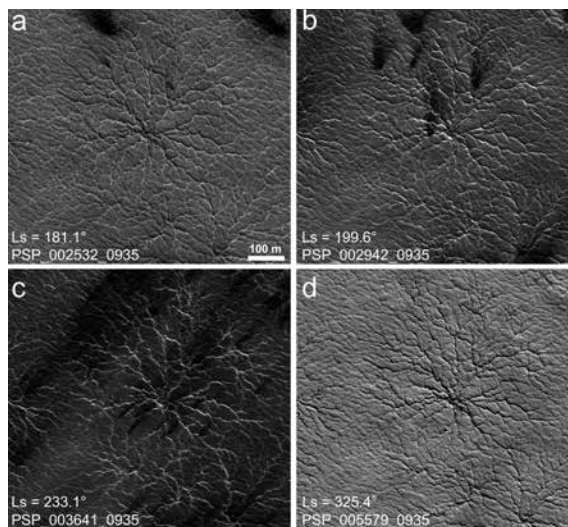
Le calotte polari di Marte sono alcune delle regioni più dinamiche di tutta la superficie del pianeta. A causa dell'inclinazione dell'asse di rotazione e dell'eccentricità dell'orbita, Marte riceve fino al 45% d'irraggiamento solare in meno tra afelio e perielio. Le calotte si espandono e si contraggono in maniera significativa e in inverno si verifica un consistente aumento della massa del volume di ghiaccio. Esse hanno uno spessore di 2-3 km e sono costituite principalmente da depositi stratificati di ghiaccio d'acqua e polvere, mantellati da un sottile strato di ghiaccio di anidride carbonica soggetto a disgelo stagionale.

Le due calotte polari presentano aspetti morfologici molto differenti fra loro; quella settentrionale ha una superficie piatta, butterata e granulosa (*cottage cheese*), quella meridionale presenta superfici più uniformi con presenza di pozzi, canali, depressioni dal fondo piatto e forme residuali tipo *mesa*. Le particolari condizioni atmosferiche nell'area del Polo Sud, inoltre, sono

responsabili di una anomala distribuzione geografica delle precipitazioni nevose causa del decentramento della calotta polare, molto più piccola di quella settentrionale, rispetto al polo geografico.

Le immagini ad alta risoluzione del Mars Orbiter Camera hanno mostrato che le variazioni di temperatura stagionale nelle regioni polari creano paesaggi con una grande varietà di morfologie.

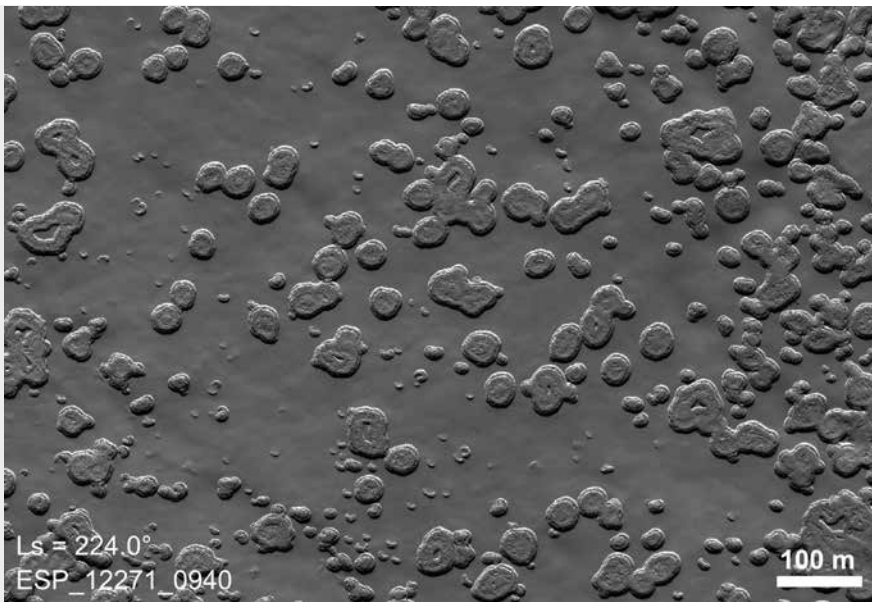
Forme canalizzate sono state osservate nella regione del Polo Sud nota come "criptic region" (regione misteriosa), così chiamata perché sebbene coperta da uno strato di ghiaccio di CO₂ presenta un albedo (la frazione di luce incidente che viene riflessa) molto basso. Queste morfologie, dette "spider" o "aracniformi", mostrano una modesta depressione centrale da cui si diparte una rete di canali ramificati; hanno un diametro di 200-300 m, ma possono variare da poche decine di metri fino al chilometro. I canali sono profondi da pochi decimetri a 1 m e ampi fino a 5 m. Durante la primavera australe in corrispondenza dei canali si osserva la formazione transitoria di depositi di polvere scura concentrati o dispersi a conoide che, riformandosi ogni anno più o meno nella stessa posizione, sembrano indicare un controllo topografico nella loro genesi. Sulla loro origine, s'ipotizzano fenomeni tipo geyser associati alla sublimazione primaverile del ghiaccio di CO₂ che si accumula in inverno nelle regioni polari. Con il sorgere del Sole nel corso della primavera australe, le polveri scure riscaldate dalla luce del Sole "affondano" attraverso lo strato ghiacciato e si accumula-



Nella pagina a fianco: panoramica di un campo di "doline da sublimazione" del Polo sud di Marte nel corso della primavera australe. Si osservano piccole doline a "fagiolo" e doline circolari isolate o coalescenti con o senza torrione all'interno (NASA/JPL/University of Arizona). Questi paesaggi osservati per la prima volta nel 1999 dal Mars Orbiter Camera furono definiti dall'aspetto simile al "formaggio svizzero" (Thomas et al., 2000).

Evoluzione di uno spider

a) All'inizio della primavera australe, la struttura a canali radiali è coperta da uno strato di ghiaccio secco; b) il ghiaccio traslucido è riscaldato dal basso e sublima dalla base. Il gas eiettato attraverso crepe nel ghiaccio, porta in carico la polvere che viene dispersa dal vento a formare dei conoidi; c) Il loro sviluppo risente dei cambiamenti della direzione del vento, nuovi conoidi si depositano sul ghiaccio secco in assottigliamento; la favorevole inclinazione del Sole rispetto alla superficie fa brillare le pareti dei canali; d) In piena estate con il disgelo completo del ghiaccio secco, i canali scavati nel ghiaccio d'acqua vengono esumati. Il substrato esposto è coperto da un sottile strato di polvere che nella stagione successiva verrà ridistribuita da nuove eruzioni. (<http://www.uahirise.org>).



no a formare un livello scuro tra il ghiaccio di CO₂ e il sottostante substrato di ghiaccio di H₂O perenne. L'energia assorbita dalle polveri fornisce il calore necessario a innescare la sublimazione del ghiaccio di CO₂ lungo l'interfaccia con il substrato di ghiaccio d'H₂O. La sublimazione genera vapore di CO₂ che provoca un rapido aumento di pressione in grado di sollevare e rompere localmente la lastra di ghiaccio soprastante da cui erutta gas ad alta pressione. Il flusso gassoso mentre converge velocemente verso il punto di emissione prende in carico i depositi di sabbia e polvere e li eietta all'esterno. Contemporaneamente, erode anche il substrato scavando una rete di canali ipogei organizzati in una struttura di tipo radiale, gli "spider". Alla fine dell'estate, il ghiaccio secco può essere completamente rimosso esumando i canali ipogei scavati nel substrato che vengono ricoperti da nuovo ghiaccio di CO₂ nell'inverno successivo, rinnovando il ciclo.

Fatte le dovute differenze genetiche, queste morfologie ricordano una sorta di karren ad andamento centripeto che si approfondiscono e convergono dalla periferia verso il centro.

Durante il disgelo stagionale, la sublimazione esercita anche un altro tipo di "erosione" sul mantello di ghiaccio di CO₂ sporco. Con la primavera e l'estate australe la sublimazione del ghiaccio secco stagionale dà origine a depressioni doliniformi, che informalmente potremmo definire "doline da sublimazione", circondate da altipiani residuali dalla sommità piatta tipo *mesa*. Queste depressioni hanno pareti scannellate, talora gradonate e molto inclinate e ampliandosi lateralmente possono andare in coalescenza fra loro. Sebbene il loro diametro sia variabile da poche centinaia di metri a più di un chilometro, la profondità, dedotta in base alla proiezione dell'ombra, è di circa 8-10 m. Le pareti a contorno mostrano una sequenza di strati costituita da un'alternanza di bande chiare e scure dello spessore di 1-2 m. L'ampliamento delle depressioni fino alla loro coalescenza riduce nel contempo l'estensione delle mesa. La velocità di arretramento delle pareti è dell'ordine di 1-3 m/anno.

A destra: **evoluzione di una "dolina da sublimazione a fagiolo"**. La dolina a "fagiolo" (1) si richiude a "tenaglia" su se stessa (2) isolando un torrione (testimone o butte) al centro (3) che col tempo sublimerà completamente (4). (NASA/JPL/University of Arizona).

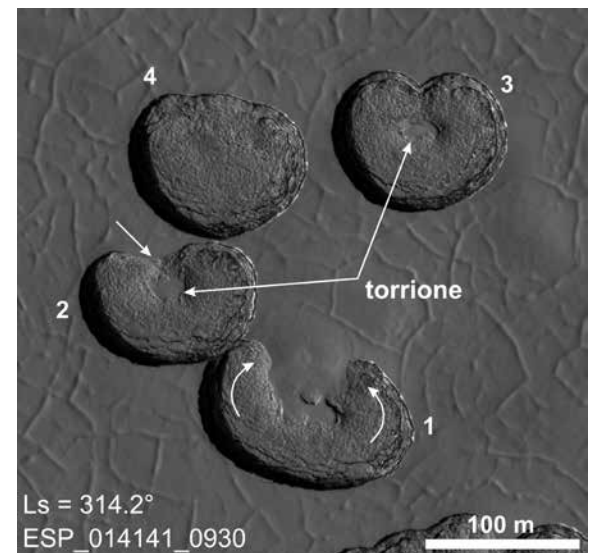
Talora le doline hanno una tipica forma a "fagiolo" e quando i due margini si uniscono possono isolare un piccolo torrione residuale al centro che poi scomparirà. L'approfondimento verso il basso della depressione procede fino allo strato di ghiaccio perenne di H₂O sottostante che rimane in sede in quanto le temperature raggiunte non sono sufficienti a farlo sublimare. Le depressioni si espandono di anno in anno, ma se nel fondo durante l'inverno si accumula un nuovo strato di ghiaccio secco, si può originare una forma multipla con una nuova generazione di doline sovrimposte.

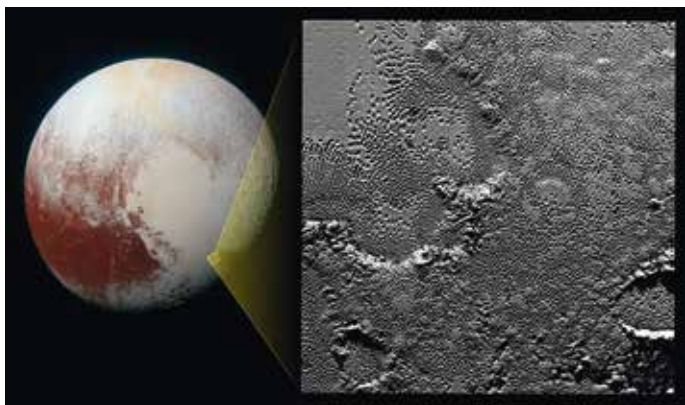
Il carsismo negli idrocarburi di Titano

Sulla superficie di Titano, luna di Saturno, la sonda Cassini ha individuato forme molto simili a quella di una tipica area carsica: colline residuali a cono, aree con diffusa presenza di morfologie doliniformi, valli e laghi di origine pseudocarsica presumibilmente sono il risultato dell'azione solvente esercitata sull'esotico substrato "roccioso" composto da toline (molecole organiche che si formano per irraggiamento della radiazione ultravioletta di metano o etano), acido cianidrico, acetilene e altri composti organici in un ambiente con temperatura media di 95 °K (-178 °C). Questo tipo di substrato risulta solubile in una miscela di composti organici con una composizione media di 77% di metano, 23% di azoto molecolare e tracce di etano tipica delle piogge e dell'atmosfera di Titano.

In anni di osservazione, la sonda Cassini ha individuato molti sistemi temporaleschi nelle regioni polari ed equatoriali a seguito dei quali si sono formati temporanei laghi di idrocarburi, provando che le piogge di idrocarburi effettivamente raggiungono e bagnano il suolo nonostante la ridotta gravità (0,14 g).

Pur non disponendo di dati diretti, le dimensioni dei canali individuati indicano che gli eventi piovosi possono essere molto intensi (fino a 1 cm/ora) mentre i modelli atmosferici indicano valori annuali medi delle precipitazioni più o meno equivalenti a quelli dell'iperarido deserto dell'Atacama in Cile. Questa dissoluzio-





ne potrebbe essere uniforme o portare alla formazione di morfologie carsiche come valli, doline, inghiottitoi o cavità sotterranee.

Le doline di Plutone

Plutone, "declassato" nel 2006 a pianeta nano, è stato osservato da vicino solo in parte nel 2015 dalla sonda New Horizons che ha rivelato interessanti aspetti geologici.

La sua superficie è composta per il 98 % da ghiaccio d'azoto, con tracce di metano e monossido di carbonio poggianti su un mantello di ghiaccio d'H₂O che avvolge un nucleo roccioso.

La temperatura media è di 40 °K (-233 °C) e in queste condizioni ambientali il ghiaccio d'H₂O è solido e resistente come una roccia terrestre, mentre gli altri tipi di ghiaccio sono più "teneri".

Il ghiaccio di azoto e quello di monossido di carbonio sono miscibili fra loro, meno rigidi del ghiaccio d'acqua e, proprio come nei ghiacciai della Terra, possono fluire più facilmente con velocità di alcuni centimetri l'anno. La presenza di ghiaccio di metano contribuisce a rendere meno volatile questa miscela e quindi più rigida. In questo contesto glaciale, sulla superficie di Plutone sono state osservate catene montuose e piane ghiacciate con flussi glaciali costituiti da composti organici. La Sputnik Planitia è un'estesa piana di ghiaccio di azoto e monossido di carbonio con evidenze di flussi glaciali che si sviluppa dall'emisfero nord fino all'equatore di Plutone nel settore occidentale della Regione di Tombaugh. La sua superficie si suddivide in poligoni irregolari larghi alcune decine di km, spessi 3-4 km e delimitati da depressioni da cui talora emergono blocchi collinari costituiti da ghiaccio di H₂O sporco. Questa sorta di zolle ghiacciate si muovono a una velocità di alcuni cm/anno per effetto, forse, della convezione alimentata dal calore interno o da un oceano sepolto che favorisce un costante rimodellamento e ringiovanimento del paesaggio. In questa enorme piana di ghiaccio sono visibili molte depressioni e/o pozzi che si ritiene siano il risultato della sublimazione del ghiaccio di azoto; questi pozzi, del diametro di centinaia di metri per decine di metri di profondità, si concentrano anche lungo i margini delle celle di convezione. Spesso il fondo è scuro, forse per l'accumulo di toline, che si depositano come residuo dal ghiaccio che su-

blima, o perché pozzi molto profondi, che rivelano un substrato di depositi scuri sotto lo strato di ghiaccio superficiale. Nelle regioni del Planum in cui le "placche" di convezione non sono evidenti, i pozzi sono più numerosi. In questi casi essi sembrano allinearsi lungo le direzioni del flusso di ghiaccio e probabilmente rappresentano dei punti di scambio di sostanze volatili tra il "sottosuolo" e l'atmosfera.

I sinkhole della Cometa 67P

Forse l'ultimo posto dove ci si sarebbe attesi di osservare forme pseudocarsiche è proprio una cometa. Tuttavia, la missione Rosetta, coordinata dall'ESA per lo studio della cometa 67P, ha aperto nuovi scenari sulla loro distribuzione. Nell'emisfero nord della cometa sono stati individuati 18 "pozzi" dalla forma quasi circolare molto simili a doline da collasso. Hanno un diametro da decine a poche centinaia di metri, profondi fino a 210 m e con il fondo liscio e coperto di polvere. Durante l'avvicinamento al Sole, con il riscaldamento della superficie, alcuni "pozzi" si sono attivati emettendo getti di gas la cui azione contribuisce al loro continuo modellamento. Sulla loro origine ancora diverse sono le teorie al vaglio ma le immagini indicano che si sono formati per collasso del tetto di cavità ipogee la cui genesi non è ancora certa.

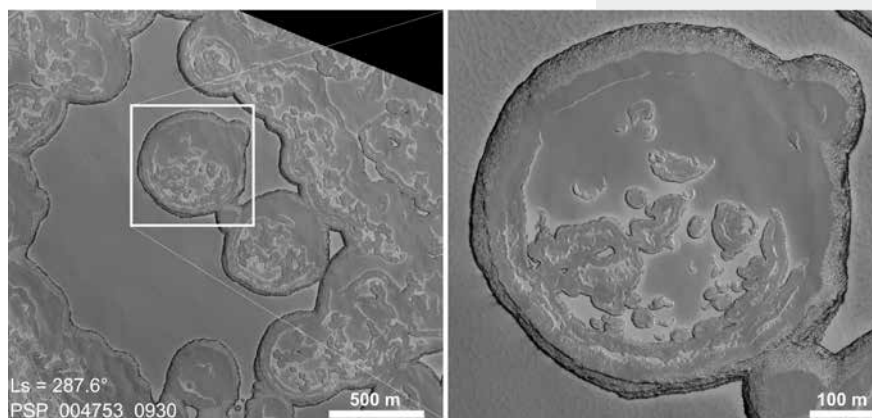
Un'ipotesi è che gli ipogei esistessero fin dalla nascita della cometa come conseguenza di collisioni a bassa velocità tra i blocchi primordiali che hanno originato un conglomerato caratterizzato da ampi vuoti o, più verosimilmente, da una diffusa micro-porosità strutturale. Una ipotesi più accreditata prevede la formazione di cavità dall'interno per sublimazione di ghiaccio di CO₂ e CO innescata dal calore prodotto dalla transizione di fase da ghiaccio d'H₂O amorfo, una forma in cui le molecole d'H₂O non sono disposte in modo ordinato, a cristallino.

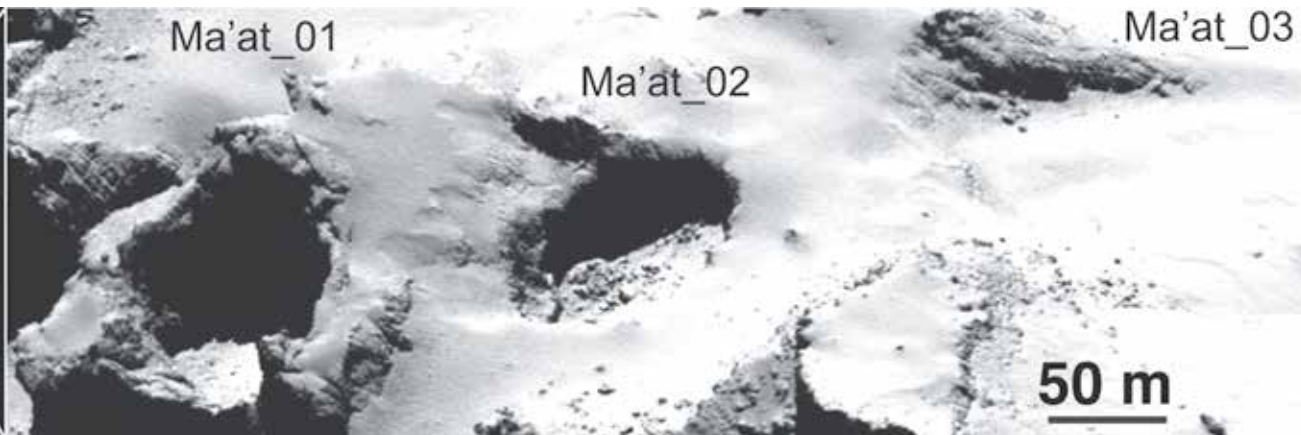
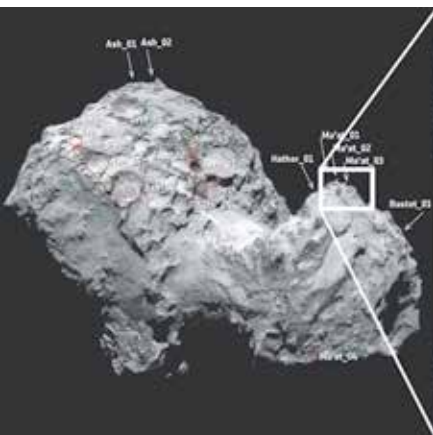
Diffuso nello spazio interstellare, sulla Terra è molto raro. Una diminuzione di pressione può attivare la transizione di fase esotermica che, insieme a una diminuzione di densità da 1,2 a 0,94 g/cm³, innescerebbe un processo disgregativo subsuperficiale in grado di liberare gas volatili intrappolati, formare una cavità ipogea e frantumare la crosta superficiale. Con la rottura del tetto della cavità, il ghiaccio delle pareti esposte sublima generando getti di gas.

L'intricato pattern di morfologie doliniformi che la sonda New Horizons ha fotografato nella regione di Tombaugh il 14 luglio 2015 (NASA/JHUAPL/SwRI). Il riquadro ingrandito copre un'area di 80x80 km.

Doline nella dolina.

La deposizione durante l'inverno di un nuovo strato di ghiaccio secco all'interno di una grande "dolina da sublimazione" crea le condizioni per la formazione di una nuova generazione di "doline" più piccole (NASA/JPL/University of Arizona).





Distribuzione delle forme da collasso sulla cometa 67P e dettaglio delle doline della regione di Ma'at in diversi stadi evolutivi (da Vincent et al., 2015). La dolina più giovane (Ma'at_01) è più profonda, ha pareti ripide e può emettere getti di degassazione durante l'avvicinamento al Sole. Col tempo sul fondo si accumulano massi e detriti che si distaccano dalle pareti laterali (Ma'at_02) avviandosi verso una fase senile in cui i bordi delle pareti sono erosi e addolciti e la dolina si riempie di polvere e detriti (Ma'at_03).

Conclusioni

Nelle regioni ghiacciate del Sistema Solare si sviluppano processi geologici su "substrati esotici" che non hanno eguali sulla Terra. L'esplorazione di nuovi mondi ci porterà inesorabilmente a confronto con ambienti molto diversi dal nostro che apriranno la strada verso scenari geologici e geomorfologici finora impensati e mai osservati.

Si amplieranno gli orizzonti della geologia e dei processi geomorfologici e le morfologie su ghiaccio appena illustrate ne rappresentano un esempio eclatante.

Forme, queste, che solo per un fenomeno di convergenza morfologica risultano molto simili a quelle carsiche ma che tali non sono poiché generate da processi principalmente legati alla temperatura su cui possono sovrapporsi processi di suffosione gassosa. Morfologie non generate, quindi, né da processi di dissoluzione né da soluzione ma dalla trasformazione del ghiaccio solido direttamente in gas (sublimazione) per effetto della temperatura.

Per questo motivo alcuni Autori definiscono queste morfologie come termocarsiche estendendo a questi contesti una terminologia adottata per gli ambienti periglaciali terrestri.

Tuttavia, nel caso di Titano ci troviamo di fronte a veri e propri fenomeni di dissoluzione benché il processo interessi una fase liquida e una solida completamente diversa da qualsiasi altro contesto terrestre.

Questo è forse l'unico caso tra quelli finora noti che, nonostante l'esoticità delle componenti coinvolte, più si avvicina alle caratteristiche di un'area carsica classica.

Nel caso di Titano, infatti, non si esclude che le piogge di metano e azoto non solo scorrono in superficie ma anche nel sottosuolo all'interno di gallerie naturali.

Bibliografia

- **Bernhardt H., Reiss D., Hiesinger H., Ivanov M.A. (2016):** "The honeycomb terrain on the Hellas basin floor, Mars: arguments for salt or ice diapir scenarios". In: 47th Lunar and Planetary Science Conference, 1871.pdf.
- **Byrne S., Ingersoll A.P. (2003):** A sublimation model for Martian South Polar Ice features. *Science*, vol. 299, p. 1051-1053.

- **Coombs C.R., Hawke B.R. (1992):** "A search for intact lava tubes on the Moon: Possible lunar base habitats". In: 2nd Conference on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century, NASA CP-3166, 1, p. 219-229.
- **Cushing G.E. (2012):** Candidate cave entrance on Mars. *Journal of Cave and Karst Studies*, vol. 74, n. 1, p. 33-47.
- **De Bernardinis P., Sauro F. (2014):** Speleologia marziana: oltre la fantascienza. *Speleologia*, n. 70, p. 62-66.
- **Del Prete S. (2015):** "Cavità naturali nel Sistema Solare: una rassegna". In: Atti del XXII Congresso Nazionale di Speleologia. *Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia*, s. 2, vol. 19, p. 313-325.
- **Fishbaugh K. E., Head J. W. (2001):** Comparison of the North and South Polar Caps of Mars: New Observations from MOLA Data and Discussion of Some Outstanding Questions. *Icarus*, vol. 154, p. 145-161.
- **Hansen C.J., Thomas N., Portyankina G., McEwen A., Becker T., Byrne S., Herkenhoff K., Kieffer H., Mellon M. (2010):** HiRISE observations of gas sublimation-driven activity in Mars' southern polar regions: I. Erosion of the surface. *Icarus*, vol. 205, pp. 283-295.
- **Kieffer H.H., Christensen P.R., Titus T.N. (2006):** CO₂ jets formed by sublimation beneath translucent slab ice in Mars' seasonal south polar ice caps. *Nature*, vol. 442, n. 17, p. 793-796.
- **Mitchell K.L., Malaska M. (2011):** "Karst on Titan". In: 1st Inter. Planetary Cave Research Workshop, October 25-28, 2011, Carlsbad - New Mexico, abs. 8021.
- **Moore J.M. et al. (2016):** The geology of Pluto and Charon through the eyes of New Horizons. *Science*, vol. 351, n. 6279, p. 1284-1293.
- **Piqueux S., Byrne S., Richardson M.I. (2003):** Sublimation of Mars's southern seasonal CO₂ ice cap formation of spiders. *Journal of Geophysical Research*, v. 108, n. E8, 5084, p.1-9.
- **Stern A. et al. (2015):** The Pluto system: Initial results from its exploration by New Horizons. *Science*, vol. 350 (6258), 8 p.
- **Vincent J.B. et al. (2015):** Large heterogeneities in comet 67P as revealed by active pits from sinkhole collapse. *Nature*, vol. 523, p. 63-66.

Sitografia

- **High Resolution Imaging Science Experiment:** <http://hirise.lpl.arizona.edu/>
- **New Horizons NASA's Mission to Pluto:** <http://pluto.jhuapl.edu/>
- **Missione Rosetta:** http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Rosetta