



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI SCIENZE MM. FF. NN.

Dipartimento di Scienze Geologiche

Direttore Prof. Cesare Di Bernardo

TESI DI LAUREA TRIENNALE IN GEOLOGIA

**Studio di sorgenti di fluido sotterranee su Europa
attraverso l'analisi di reti di fratture**

Relatore: Prof. Matteo Massironi

Correlatore: Riccardo Pozzobon

Laureando: Riccardo Decina

ANNO ACCADEMICO 2015 / 2016

Indice

Introduzione	pg. 5
1. Europa	
1.1 Ridge	pg. 8
1.2 Band	pg. 11
1.3 Trough	pg. 12
1.4 Dark Lineament	pg. 12
2. Materiali e Metodo	
2.1 Percolation Theory e distribuzione frattale delle fratture	pg. 15
2.2 Mapping e analisi dei dati	pg. 17
3. Risultati	
4. Conclusione	
Bibliografia	pg. 27

INTRODUZIONE

In questa tesi si propone uno studio strutturale della superficie di Europa, il satellite gioviano in cui un oceano profondo è racchiuso da una litosfera ghiacciata di spessore non ancora certo. Europa presenta una superficie liscia, poco craterizzata, interessata da fratture sia dovute a effetti mareali ad opera di Giove sia a stress tettonici legati ad attività endogena. Attraverso l'analisi di queste fratture superficiali, di diversa lunghezza, dimensione, orientazione e morfologia, si è studiato il rapporto che esse possono presentare con possibili sorgenti sotterranee di fluidi. In particolare, è stato dimostrato che, derivando la distribuzione frattale delle fratture superficiali e gli intervalli di distribuzione e lunghezze, è possibile correlare il loro network allo spessore dello strato elastico in cui si formano e quindi, nel caso di Europa, alla profondità dell'oceano racchiuso dalla sua litosfera ghiacciata. Tale analisi di tipo frattale è già risultata molto efficace in diversi contesti, su Terra e Marte, e potrebbe essere fondamentale per predisporre le future osservazioni della sonda JUICE che visiterà Europa nel 2020. In questa tesi si sono analizzate due zone a diverse latitudini lungo il meridiano 136E ed entrambe hanno fornito una coerente profondità dello spessore litosferico attorno ai 110 km.

1. EUROPA

Europa è il quarto satellite di Giove per dimensione, leggermente più piccolo della Luna, con un diametro di circa 3000 km. Scoperta da Galileo Galilei nel 1610, assieme ad Io, Ganimede e Callisto, ha una superficie la cui età si attesta attorno a 50 Ma. L'esplorazione di Europa ebbe inizio con i sorvoli ravvicinati di Giove da parte delle sonde Pioneer 10 e 11 nel 1973 e 1974 rispettivamente. Le prime immagini erano a bassa risoluzione rispetto a quelle che saranno ottenute dalle missioni successive quali Voyager (1977) e Galileo (1996). Da queste ultime missioni sappiamo che il satellite è circondato esternamente da una tenue atmosfera composta principalmente da ossigeno, ed è stato sottoposto ad una storia deformativa intensa nel corso del tempo e, a differenza di Ganimede e Callisto, presenta una delle superfici più lisce all'interno del sistema Solare, poco craterizzata, ma fortemente lineata.

Secondo le teorie comunemente accettate (Schenk et al. 2002), Europa possiede uno strato di 100 km di acqua, di cui solo la parte superficiale è costituita da una litosfera ghiacciata dello spessore tra i 10 e i 30 Km. L'oceano sommerso potrebbe essere composto di acqua salata e avere una temperatura che si avvicina a 0°C; farebbe quindi supporre delle condizioni ambientali favorevoli allo sviluppo di forme di vita. Recentemente, attraverso le osservazioni del Telescopio spaziale Hubble, sono stati osservati getti d'acqua fuoriusciti da fratture superficiali intorno al Polo Sud (Roth et al. 2013). Questi geysers sarebbero stati causati dallo stress mareale provocato dall'interazione con Giove. Ogni satellite (Io, Europa, Ganimede e Callisto) subisce infatti gli effetti mareali di Giove con un'intensità inversamente proporzionale alla sua distanza dal pianeta gigante. Questi effetti su Io causano vulcanismo e su Europa contribuiscono all'apertura di fratture (tipicamente cicloidali), mentre, a mano a mano che ci si allontana da Giove, la tettonizzazione diminuisce, come si può osservare su Ganimede, fino ad una totale assenza riscontrata su Callisto, satellite intensamente craterizzato e geologicamente inattivo (O.Grasset et al. 2012).

Studiando le forme superficiali e le strutture tettoniche su Europa possiamo ottenere delle informazioni accurate per quanto riguarda la natura dei processi sopracitati (mareali) e la presenza di acqua allo stato liquido subcrostale.

1.1 Ridge

Le morfologie lineari, che ricoprono l'intera superficie del satellite, prendono il nome di ridge. Essi sembrano evolversi da fessurazioni causate principalmente da stress mareali diurni. Esistono comunque varie morfologie di ridge su Europa, tra cui depressioni con fianchi sollevati, double ridge, complex ridge (Greenberg et al., 1998; Testa et al., 1999) (Figura 1 e 2).

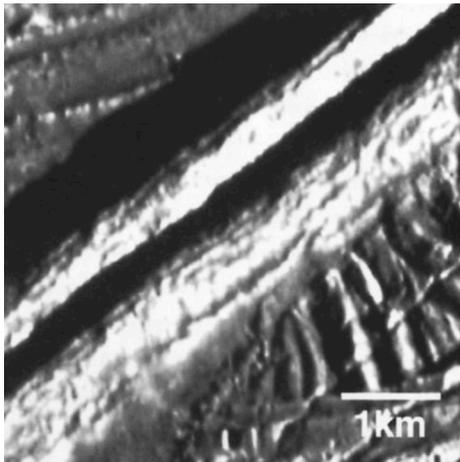


Figura 1 Immagine ad alta risoluzione (21m / pixel) di un double ridge (Galileo frame s0383718613).

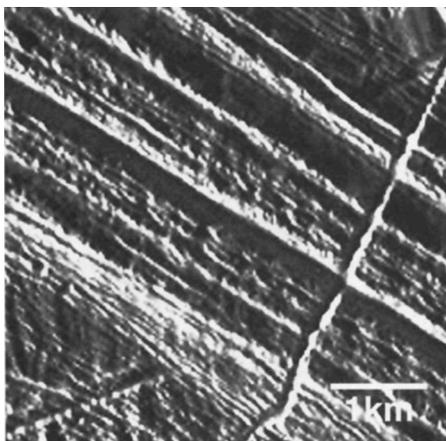


Figura 2 Immagine ad alta risoluzione (27m / pixel) di un complex ridge (Galileo frame s0374685452).

I ridge più comuni sono quelli doppi (double ridge), caratterizzate dalla presenza di un canale assiale fiancheggiato da creste gemelle. Questi hanno completamente plasmato il paesaggio del pianeta stesso. In tutte le creste e depressioni si osservano scale di lunghezza che raggiungono i 1000 km e possono variare da lineari a cicloidali in pianta, con un rilievo che può superare i 100 m. I ridge che definiamo cicloidali, identificano dei movimenti tidali diurni (Figura 3). Le fratture cicloidali possono, infatti, formarsi come fratture tensionali in risposta alle variazioni di marea su Europa. Quando viene raggiunta la massima resistenza alla trazione crostale, comincia a formarsi una frattura perpendicolare alla direzione locale di stress. Siccome gli stress mareali diurni cambiano la loro orientazione, anche le fratture cambiano le loro caratteristiche di propagazione sia in direzione sia in ampiezza, così nasce la tipica forma a cuspidi (Greenberg et al. 1998).

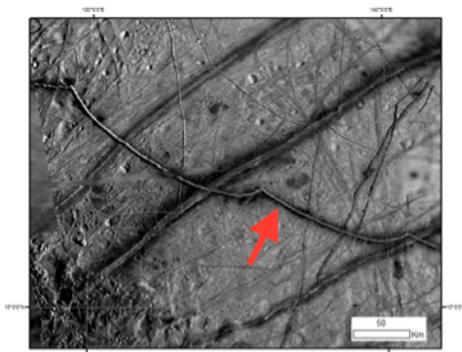


Figura 3 Rappresentazione di un Cycloidal ridge.

Alcuni double ridge presentano avvallamenti marginali sottili, profondi poche decine di km, vicino ai quali possono essere trovate fratture di accompagnamento subparallele. Queste depressioni e le fratture a loro associate deriverebbero da un carico litosferico (Tufts e al. 2000; Billings e Kattenhorn 2002) oppure da un sollevamento causato da uno shear conseguente a un riscaldamento che avrebbe portato a intrusioni all'interno di queste fratture (Gaidos and Nimmo 2000).

Benché sia difficile ricostruire la storia superficiale del satellite, a causa delle numerose sovrapposizioni tra terreni vecchi e giovani, le relazioni di

sovrapposizione tra strutture suggeriscono che le ridge plains (Figura 4) sono i terreni più vecchi mappabili su Europa e sovrapposti a questi, vi sono double e complex ridge. I complex ridge (Figura 5) sono elementi lineari lunghi non più di 15 km, composti da ridge o double ridge, formatesi probabilmente dall'unione di questi ultimi.

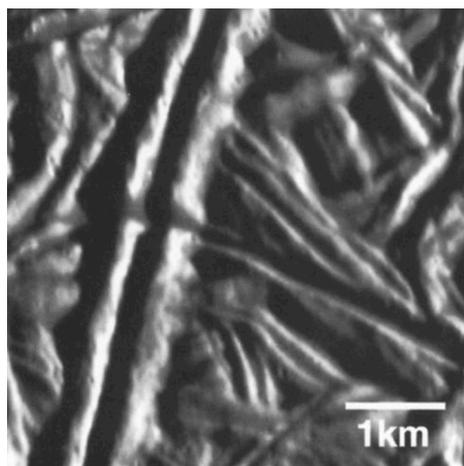


Figura 4 Immagine ad alta risoluzione (15m / pixel) di una ridge plain (Galileo frame s0383715504).

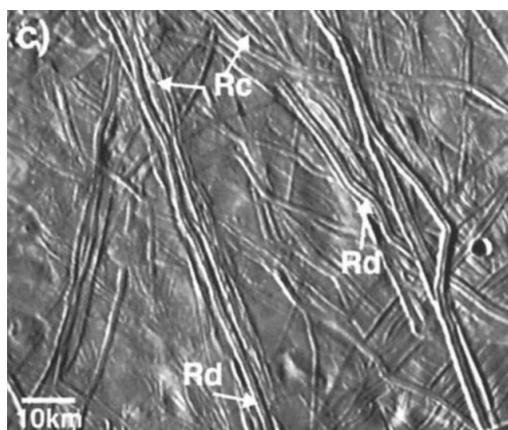


Figura 5 Fusione di double ridges (Rd) a formare dei complex ridge (Rc) (centered about 23°N/77°W, s0449974313).

In particolare, le ridge plains, sono aree piane interessate da numerosi ridge che possono essere da semplici a complessi e presentare molteplici orientazioni (Fagents et al. 2003). La disposizione, la grandezza, l'orientazione e le relazioni che si osservano tra tutte le unità visibili sulle ridge plains, fanno pensare che la loro formazione sia avvenuta in tempi diversi (Geissler et al., 1998; Fagents et al. 2003; Figueredo e Greeley). Sono stati proposti molti modelli per lo sviluppo dei

ridge, inclusi l'accumulo di detrito, derivante dall'apertura e chiusura ciclica delle fratture (Greenberg et al., 1998), attività criovulcanica (Fagents et al., 2000, 2003) e diapirismo lineare (Head et al., 1999).

1.2 Bands

Un'altra importante morfologia su Europa sono le bands. Queste bande sono costituite da dei margini che comprendono al loro interno del materiale di sottosuolo portato in superficie. Quasi tutte presentano una simmetria bilaterale intorno ad una depressione centrale, parallela ai margini della banda (Fagents et al. 2003; Prockter et al., 2002) (Figura 6).

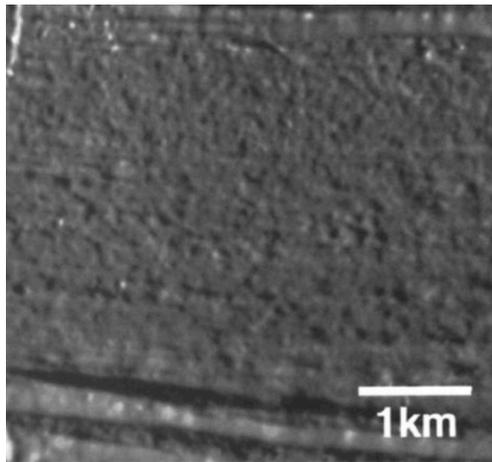


Figura 6 Immagine ad alta risoluzione (34m / pixel) di un band material lineati (Galileo frame s0420626752).

La lunghezza di queste bande è di 30 km al massimo. Esse presentano altezze che vanno dai 100 ai 150 m e delle forme convesse di 6 km di larghezza (Prockter et al., 2002). Su Europa generalmente se ne trovano di due tipi: bande lisce e bande lineate. Le prime sono costituite da piccoli dossi ravvicinati; le seconde invece mostrano delle lineazioni interne orientate subparallelamente al loro asse centrale. Questi lineamenti possono essere classificate sia come faglie normali oppure come creste e depressioni molto ravvicinate. Tramite un mapping geologico (Greeley et al. 2004; Prockter ed al. 2002; Figueredo e Greeley 2004) è stato dedotto che le bande si siano generate in un tempo intermedio tra la formazione

delle ridge plains e i terreni caotici. I terreni caotici caratterizzati da pit, dark spots, duomi e regioni di microchaos, ricoprono il 20-30% della superficie di Europa e sono posti in cima alla colonna stratigrafica.

1.3 Trough

Le fosse presenti su Europa hanno generalmente una forma a U o V in sezione e presentano spesso dei rim leggermente rialzati. A differenza dei ridge questi lineamenti sono meno marcati, quasi mai curvilinei e presentano sempre una zona d'ombra centrale. Questi trough possono attraversare qualsiasi tipo di terreno e sono difficilmente distinguibili in analisi a larga scala, dove appaiono come lineamenti scuri. Sono spesso l'ultima struttura a formarsi sulla superficie, infatti, nel mapping strutturale realizzato per questa tesi, sono le strutture che tagliano tutte le precedenti.

1.4 Dark Lineament

È possibile inoltre notare sulla superficie dei lineamenti scuri molto marcati. Questi sono stati classificati come Dark Lineament. Non è stata data una nomenclatura specifica a questa struttura poiché comprende diversi tipi di ridge (da double a cycloidal), tuttavia mostrano tutti delle macchie nere presso i margini del lineamento stesso, probabilmente dovute alla fuoriuscita di materiale subcrostale.

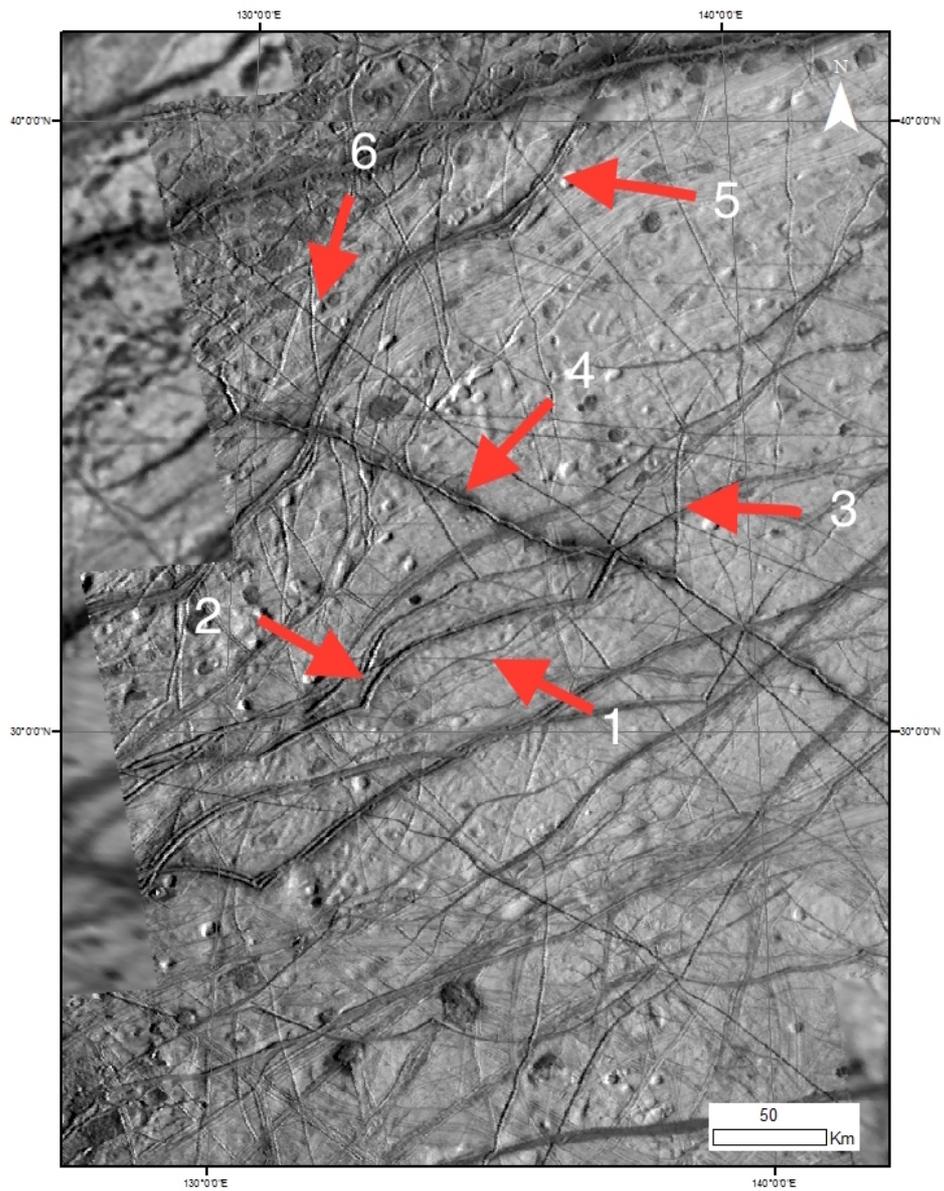


Figura 7 Porzione di superficie dove sono visibili le strutture prese in considerazione. (1 Simple Ridge; 2 Cycloidal; 3 Double Ridge; 4 Dark Lineament; 5 Complex Ridge; 6 Trough)

2. MATERIALI E METODO

2.1 Percolation Theory e distribuzione frattale delle fratture

In natura ciò che permette ai fluidi di circolare in volumi importanti sono i sistemi di fratture. È stato osservato che molto spesso questi sono regolati da proprietà geometriche di tipo frattale (Darcel et al. 2003, Mazzarini et al. 2004, Mazzarini and Isola 2010). Nel caso di Europa è stato osservato come molte di queste strutture siano associate a eventi di resurfacing oppure ad emissione di plume di vapore rilevati dal telescopio spaziale Hubble (Roth et al. 2013).

Il metodo utilizzato permette di indagare le proprietà geometriche di questi network di fratture che, se sufficientemente interconnesse, creano un sistema percolante. È possibile ricavare risultati, sulla distribuzione spaziale (clustering) e interconnessione di fratture, così da poter stimare lo spessore di crosta fratturata e quindi a che profondità è possibile trovare una sorgente fluida.

Ciò che regola un sistema di fratture è la loro orientazione, spaziatura, lunghezza, intersezione e densità.

È stato dimostrato, inoltre, che nel caso di fratture associate a fuoriuscita di fluidi (dicchi), la massima emissione avviene in corrispondenza del baricentro del dicco (Mazzarini et al. 2004).

Attraverso un software, ideato da Prof. Mazzarini, (Istituto Nazionale Geofisica e Vulcanologia di Pisa), è stato possibile determinare la presenza di una legge frattale che regola il sistema di fratture mappato sulla superficie di Europa.

Ciò che il software tiene in considerazione è la seguente equazione:

$$C(l) = \frac{2 \times N(l)}{N \times (N - 1)} \quad (1)$$

dove

$$C(l) = l^D \quad (2)$$

- $C(l)$ è la correlazione totale di tutti i punti ad una distanza minore di una data lunghezza l ;

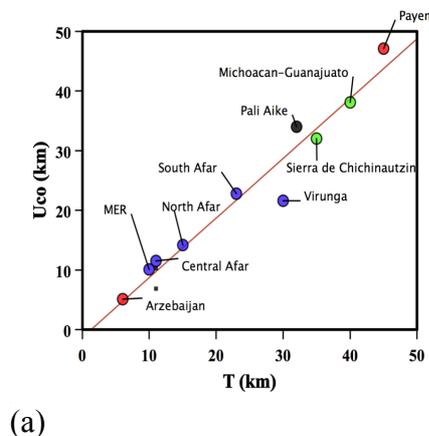
- $N(l)$ è il numero di fratture la cui lunghezza è maggiore di l ;

- l è la soglia che rappresenta il cluster infinito di fratture che connette la superficie alla sorgente.

È importante tenere a mente che le proprietà geometriche cui si fa riferimento sono dimensione, definita da l^a , e spaziatura, definita da l^D .

I due esponenti frattali a e D sono molto importanti poiché indicano quanto le fratture corte o lunghe siano dominanti nel sistema e se la loro distribuzione è omogenea o eterogenea (più a è grande più le fratture, per cui sussiste la distribuzione frattale, sono corte, più D è grande più la distribuzione frattale è omogenea nello spazio).

Nel metodo frattale esiste una soglia inferiore e superiore dove s'interrompe la correlazione frattale regolata da D . Questi due limiti sono chiamati Lower cutoff (Lco) e Upper cutoff (Uco). È stato osservato come nei sistemi naturali terrestri (Figura 8) l'Uco scala linearmente con la profondità della sorgente magmatica in tutti gli ambienti geodinamici. Lco e Uco marcano il range di dati dove si ottiene l' R^2 più prossima a 1. Ciò sta a significare che tra Lower Cutoff e Upper Cutoff avrò una relazione frattale regolata da un dato esponente frattale D .



$$Uco \text{ (km)} = 0.953 T \text{ (km)} - 0.072$$

$$R^2 = 0.974 \quad T = \text{crustal thickness} \quad (b)$$

Figura 8 Grafico che mostra la linearità del cutoff superiore (Uco) in funzione della profondità delle sorgenti di fluido in sistemi naturali terrestri (Mazzarini and Isola, 2010)

Questa relazione è stata ottenuta incrociando i risultati di analisi sismiche, geochimiche e gravimetriche. In seguito il metodo è stato testato nel campo vulcanico Marziano dei Tharsis, dove è stata calcolata la profondità del plume e delle sorgenti magmatiche superficiali del plumbing system che alimenta Ascraeus Mons (Pozzobon e al., 2014).

2.2 Mapping e analisi dati

Per sviluppare questa tesi si sono usufruite immagini a medio/alta risoluzione della sonda Galileo (Tabella 1).

L'analisi delle strutture è avvenuta a una scala che varia da 1:2.500.000, per un mapping globale, fino ad una scala 1:800.000 per un mapping più puntuale. Si è prestata particolare attenzione alla classificazione delle varie forme e alle intersezioni che presentano tra loro. La zona studiata su Europa è situata in corrispondenza del meridiano 136° E e compresa tra i paralleli 0° e 60° N. Il mapping è stato realizzato in immagini con proiezione sinusoidale per minimizzare la deformazione lungo il meridiano 136E, situato al centro del mio rilievo (Figura 9).

Product_ID	Resolution (m/px)	Product_ID	Resolution (m/px)
4253r.img	222,650627	9352r.img	54,94743149
9500r.img	52,60988357	4278r.img	222,2314264
4600r.img	210,5562267	1827r.img	232,1204
4514r.img	201,3109777	1828r.img	232,1204
4513r.img	201,3109777	8739r.img	62,73120844
9539r.img	51,18682894	8740r.img	62,73120844
9552r.img	50,69040975	7239r.img	288,9178931
9565r.img	50,15716808	7226r.img	289,4209982
9578r.img	49,66300744	7413r.img	283,627982
8727r.img	63,32626704	7426r.img	283,1290125
8726r.img	63,32626704	7439r.img	282,6234433
1814r.img	231,6942607	7400r.img	284,1281219
1813r.img	231,6942607	4500r.img	202,628161
1913r.img	229,9888154	1840r.img	232,9673435
1900r.img	229,1189248	1839r.img	232,9673435
1901r.img	229,1189248	8713r.img	64,01180032
8852r.img	19,21807715	8714r.img	64,01180032
9313r.img	218,8709036	4565r.img	211,6586969
4178r.img	226,0697843	8827r.img	19,66574681
4179r.img	226,0697843	4626r.img	210,0090096
1801r.img	231,5839206	2378r.img	5,820139264
1802r.img	231,5839206	2379r.img	5,820139264
8778r.img	20,4230755	1866r.img	228,4605262
4200r.img	225,0598651	1865r.img	228,4605262
4201r.img	225,0598651	4227r.img	223,6265902
4214r.img	224,2478583	4213r.img	224,2478583
4226r.img	223,6265902	4652r.img	210,1662536
9252r.img	219,9025766	1826r.img	232,1204
4252r.img	222,650627	4713r.img	202,5761347
4254r.img	222,650627	1852r.img	234,394506
1914r.img	229,9888154	1854r.img	234,394506
9200r.img	221,7082028	1853r.img	234,394506
4166r.img	226,7467893	1800r.img	231,5839206
4165r.img	226,7467893	4153r.img	227,9771903
4552r.img	212,4462415	4152r.img	227,9771903
4267r.img	222,3570333	4613r.img	210,2133411
4265r.img	222,3570333	8700r.img	64,72836812
4266r.img	222,3570333	8701r.img	64,72836812
7200r.img	290,4146563	4701r.img	201,8426722
4578r.img	211,0454096	4700r.img	201,8426722
4326r.img	223,2185739	8826r.img	19,66574681
4327r.img	223,2185739	8839r.img	19,43510513
7213r.img	289,9172308	1878r.img	228,6410787
8814r.img	19,90865555	1879r.img	228,6410787
8800r.img	20,16256404	8813r.img	19,90865555
4639r.img	209,988178	4239r.img	223,0918477
9513r.img	52,06852785	4240r.img	223,0918477
9526r.img	51,54775539	4241r.img	223,0918477
9226r.img	220,7134285	4301r.img	222,3155528
9278r.img	219,2892232	4302r.img	222,3155528
4665r.img	210,6120653	4300r.img	222,3155528
4279r.img	222,2314264	4313r.img	222,6226702
9339r.img	55,08275612	4314r.img	222,6226702

Tab. 1 Tabella riassuntiva di tutte le sezioni e le relative risoluzioni utilizzate (m/px)

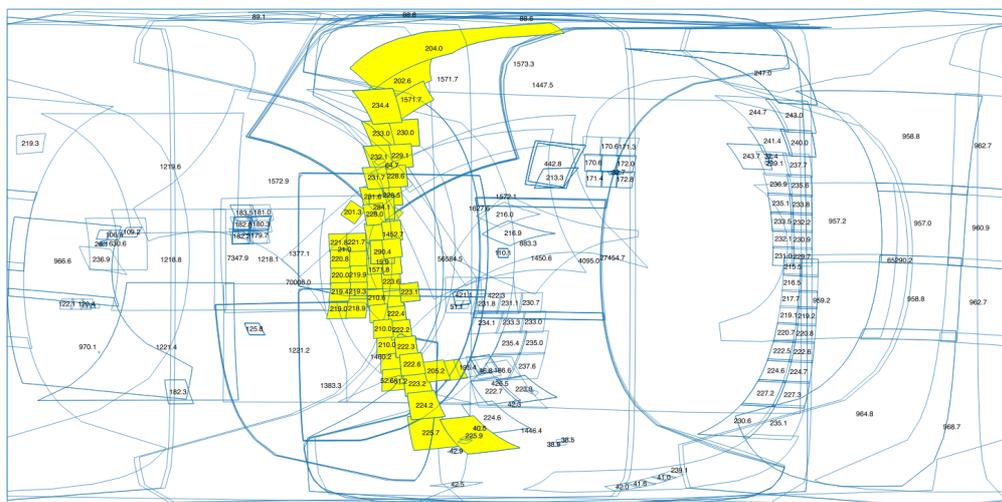


Figura 9 Mappa dei footprint delle immagini della sonda Galileo con risoluzione m/pixel. In giallo sono evidenziate tutte le aree utilizzate per il mapping.

Sono stati effettuati due mapping differenti tramite GIS. Il primo non tiene in considerazione i rapporti d'intersezione delle varie strutture visibili, ma è necessario al fine dell'analisi effettuata poiché quando si analizza una frattura è ovvio considerarla nella sua interezza visto che nasce come un unico lineamento (Figura 10); il secondo è un mapping più corretto a livello geologico, che tiene conto delle reali intersezioni che le fratture hanno tra loro (Figura 11).

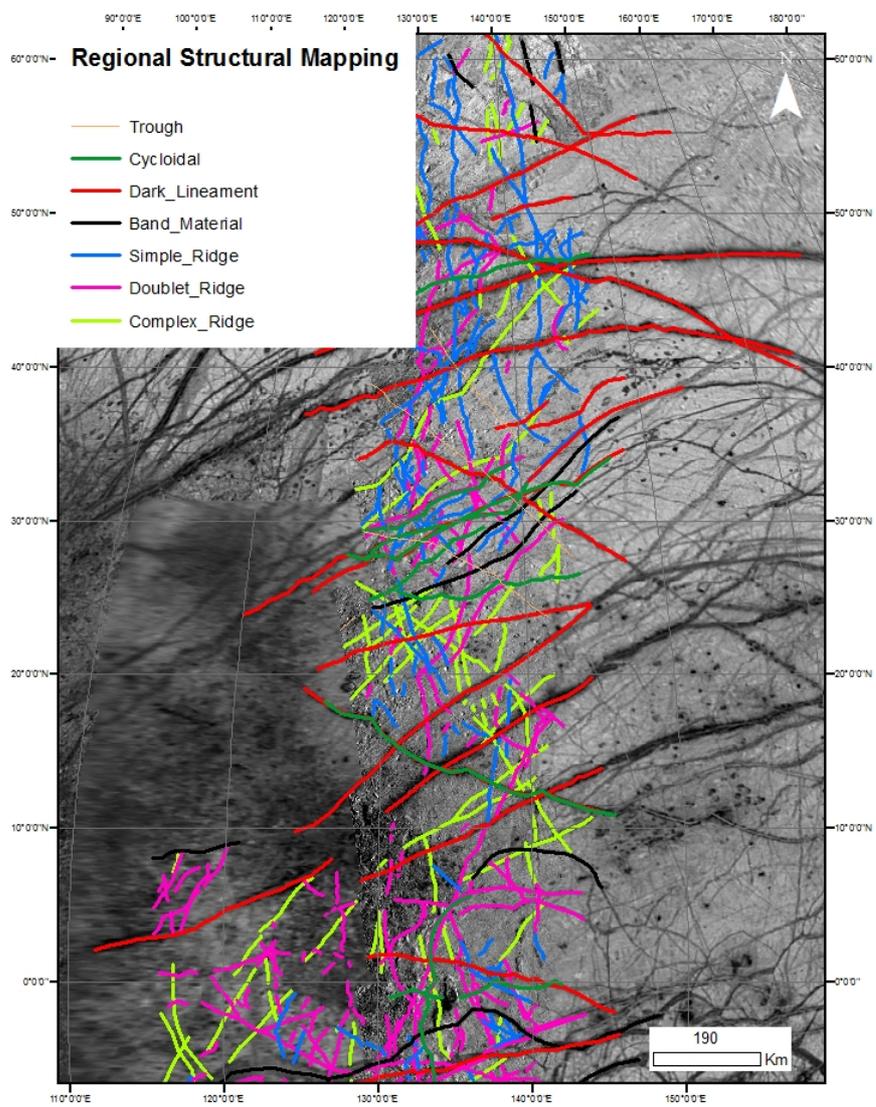


Figura 10 Mapping utile allo scopo dell'analisi frattale che non tiene conto dei rapporti di intersezione.

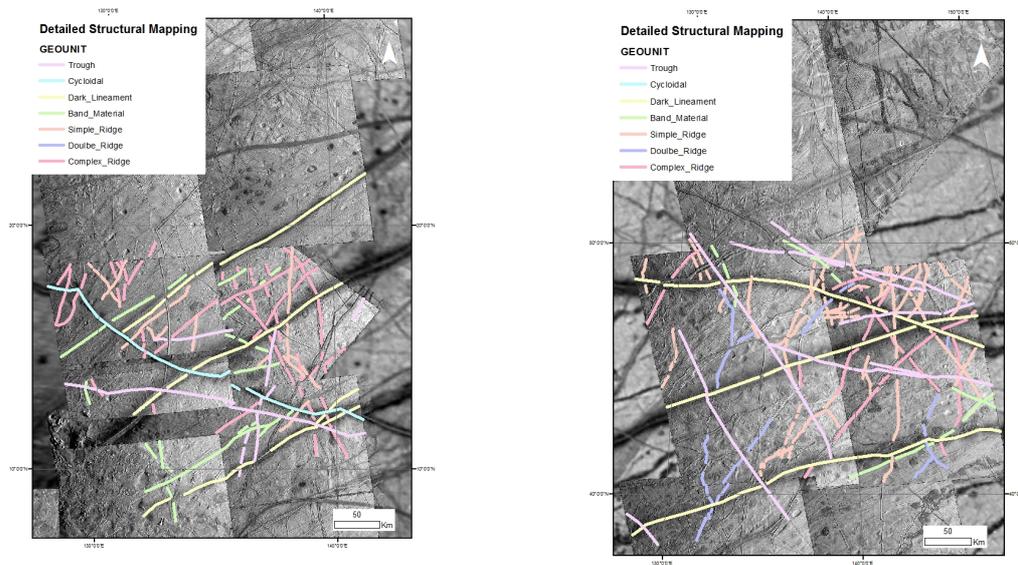


Figura 11 Mapping strutturale che tiene conto dei rapporti di intersezione fra i diversi tipi di frattura.

Dopo aver mappato tutte le fratture trovate nell'intera zona di studio, ci si è concentrati su due aree circoscritte di intensa fratturazione per l'analisi frattale (Figura 12). La rilevante curvatura compresa in quest'ampio intervallo ha, infatti, reso necessario ridurre l'area di analisi visto che l'algoritmo utilizzato lavora in 2D. In secondo luogo, concentrarsi dove vi è maggiore numero di dati aumenta la probabilità statistica e quindi la possibilità di successo dell'analisi.

Le fratture da noi considerate nella zona settentrionale sono 125 mentre nella zona meridionale 146 (Figura 12). Per ogni frattura, tramite ArcGIS, sono state estratte le coordinate x e y (in metri) del loro baricentro. In seguito è stata calcolata la $C(1)$ descritta in (1) e (2) tramite il software di Mazzarini et al., (2004, 2010).

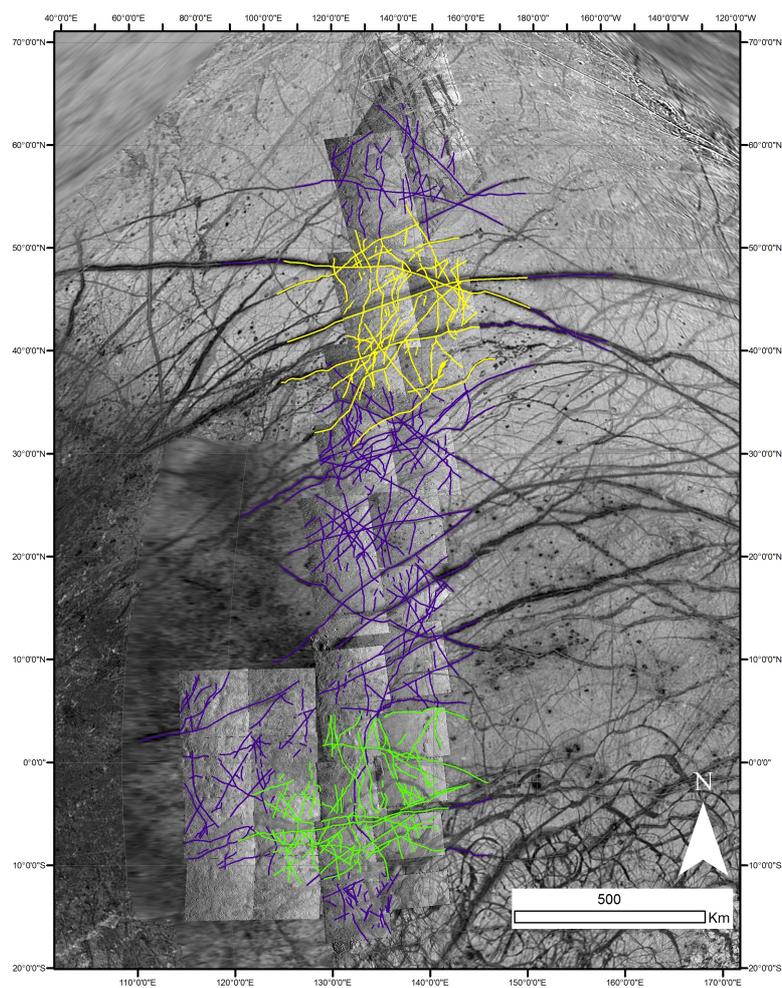


Figura 12 Rappresentazione di tutte le fratture mappate, in particolare, in giallo e in verde le zone nord e sud rispettivamente analizzate con il metodo frattale.

I dati sono stati trasferiti in Excel dove sono stati calcolati $\text{Log}(l)$, $\text{Log}(C(l))$ e la local slope rappresentata nel grafico della distribuzione di queste fratture nello spazio.

3. RISULTATI

I risultati ottenuti in seguito allo studio effettuato, forniscono 2 grafici per ogni zona che confermano la possibile correlazione frattale fra le strutture prese in considerazione e permettono di calcolare il cluster infinito (Figura 13a, 13b).

I grafici ottenuti rappresentano la distribuzione frattale delle due zone, limitando l'area ottimale di analisi tra due cutoff (Lco, Uco). L'errore stimato, per quanto riguarda il calcolo di Lco (12±3.4 km Zona Nord; 10±2 Km Zona Sud) e Uco (112±15.8 km Zona Nord; 113±10.2 km Zona Sud), è rappresentato in grafico tramite lo spessore della banda che rappresenta il limite oltre il quale i dati non presentano più una continuità associabile ad una distribuzione frattale (più spesso è la banda maggiore è l'errore calcolato).

La tabella 2 riassume i risultati ottenuti per la zona Nord e Sud.

data set	n	c	D	R ²	Lco (km)	Uco (km)
Zona Nord	125	3,9x10 ⁻¹¹	1.933 ± 0.02	0,998	12 ± 3.4	112 ± 15.8
Zona Sud	146	1x10 ⁻¹⁰	1.837 ± 0.004	0,9995	10 ± 2	113 ± 10.2

Tab. 2 Tabella riassuntiva dei risultati ottenuti con il metodo di fractal clustering relativi ai quadranti Nord e Sud del mapping effettuato su Europa. (N: numerosità, c: clustering, D: esponente frattale relativo all'omogeneità delle fratture nello spazio, R²: rappresenta la retta di regressione, Lco: Lower cutoff, Uco: Upper cutoff).

Ciò che otteniamo sono due cutoff confrontabili per entrambe le regioni. Tuttavia nel caso di reti di fratture il Lower cutoff, che permette eventualmente di derivare discontinuità meccaniche intermedie nella crosta, ha meno senso poiché dipende fortemente dalla risoluzione delle immagini (Mazzarini et al. 2013).

Infatti, più la risoluzione è bassa, più è difficile mappare le fratture di piccole dimensioni. Nel caso analizzato sono state considerate tutte le fratture aventi una $l > 3,6$ km.

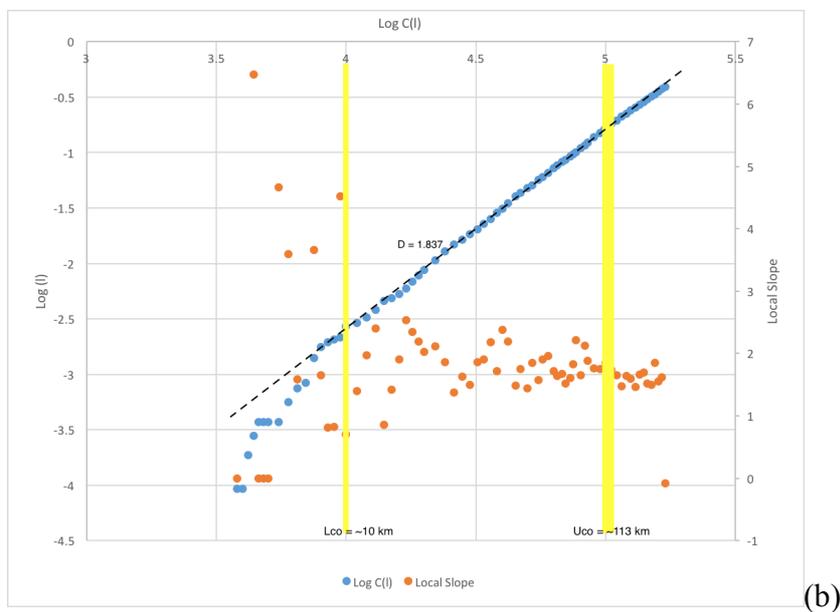
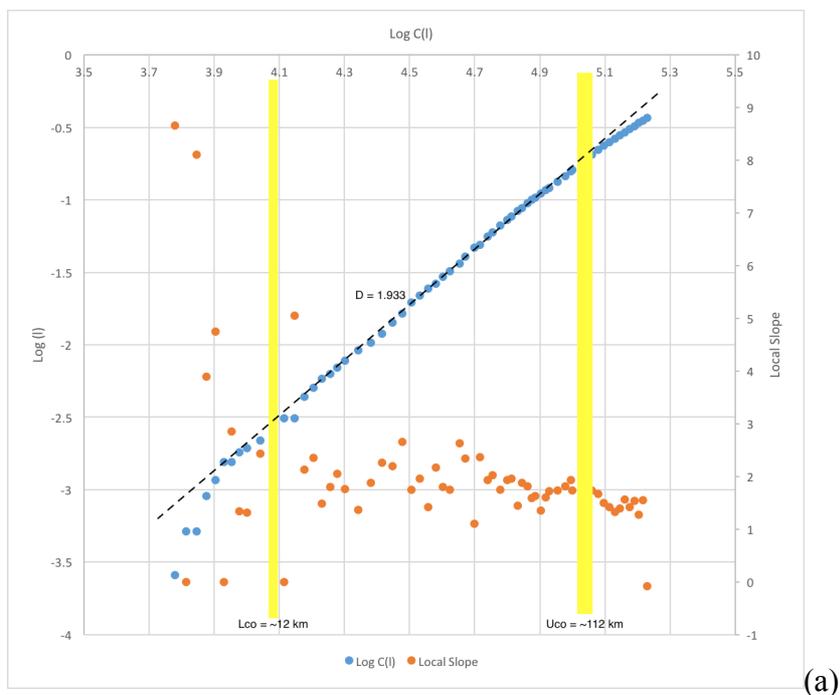


Figura 13

I grafici rappresentano la distribuzione delle fratture nello spazio, con particolare evidenza alle due bande gialle, che identificano Lco e Uco e lo spessore che ne definisce l'errore.

4. CONCLUSIONI

Tramite un mapping di dettaglio delle strutture presenti su Europa lungo il meridiano 136E e tra i paralleli 0° e 60°, è stato possibile applicare un modello di distribuzione frattale di queste ultime e verificare lo spessore della litosfera elastica ghiacciata del satellite gioviano e quindi la profondità del suo oceano. I due tipi di mapping effettuati (morfologico e strutturale) hanno infatti fornito uno schema utile per l'identificazione di network di fratture connesse direttamente a sorgenti fluide subcrostali. Dai dati ottenuti è stata verificata la presenza di una relazione frattale che indica, in entrambe le zone studiate, una profondità della sorgente di fluido intorno ai 110 km. L'esito di quest'analisi sembra confermare una omogeneità nello spessore della crosta ghiacciata di Europa alle varie latitudini analizzate. Questo tipo di risultato può influire sulle strategie di analisi adottate dalla missione JUICE (Jupiter Icy Moon Explorer) che nel 2020 effettuerà due flyby su settori di Europa dove in precedenza, la sonda Galileo aveva riscontrato una recente attività geologica (criovulcanismo).

BIBLIOGRAFIA

- Darcel, C., 2003. Connectivity properties of two-dimensional fracture networks with stochastic fractal correlation. *Water Resour. Res.* 39, 1–13. doi:10.1029/2002WR001628
- Fagents, S. a., 2003. Considerations for effusive cryovolcanism on Europa: The post-Galileo perspective. *J. Geophys. Res.* 108, 5139. doi:10.1029/2003JE002128
- Fagents, S., 2000. Cryomagmatic Mechanisms for the Formation of Rhadamanthys Linea, Triple Band Margins, and Other Low-Albedo Features on Europa. *Icarus* 144, 54–88. doi:10.1006/icar.1999.6254
- Figueredo, P.H., Greeley, R., 2000. Geologic mapping of the northern leading hemisphere of Europa from Galileo solid-state imaging data. *J. Geophys. Res.* 105, 22629. doi:10.1029/1999JE001107
- Geissler, P.E., Greenberg, R., Hoppa, G. V., Helfenstein, P., McEwen, A.S., Pappalardo, R.T., Tufts, R., Ockert-Bell, M., Sullivan, R.J., Greeley, R., Belton, M.J.S., Denk, T., Clark, B.C., Burns, J.A., Veverka, J., 1998. Evidence for non-synchronous rotation of Europa. Galileo Imaging Team. *Nature* 391, 368–370. doi:10.1038/34869
- Greeley, R., Figueredo, P.H., Williams, D. a., Chuang, F.C., Klemaszewski, J.E., Kadel, S.D., Prockter, L.M., Pappalardo, R.T., Head, J.W., Collins, G.C., Spaun, N. a., Sullivan, R.J., Moore, J.M., Senske, D. a., Tufts, B.R., Johnson, T. V., Belton, M.J.S., Tanaka, K.L., 2000. Geologic mapping of Europa. *J. Geophys. Res.* 105, 22559. doi:10.1029/1999JE001173
- Greenberg, R., Geissler, P., Hoppa, G., Tufts, B.R., Durda, D.D., Pappalardo, R., Head, J.W., Greeley, R., Sullivan, R., Carr, M.H., 1998. Tectonic Processes on Europa: Tidal Stresses, Mechanical Response, and Visible Features. *Icarus* 135, 64–78. doi:10.1006/icar.1998.5986
- Head, J., 1999. Europa: Morphological characteristics of ridges and triple bands from Galileo data (E4 and E6) and assessment of a linear diapirism model. *J. Geophys. ...* 104, 223–236. doi:10.1029/1998JE001011
- Mazzarini, F., Isola, I., 2010. Monogenetic vent self-similar clustering in extending continental crust: Examples from the East African Rift System. *Geosphere* 6, 567–582. doi:10.1130/GES00569.1
- Pozzobon, R., Mazzarini, F., Massironi, M., Marinangeli, L., 2014. Self-similar clustering distribution of structural features on Ascræus Mons (Mars): implications for magma chamber depth. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* doi:10.1144/SP401.12
- Prockter, L.M., Lopes, R.M.C., Giese, B., Jaumann, R., Lorenz, R.D., Pappalardo, R.T., Patterson, G.W., Thomas, P.C., Turtle, E.P., Wagner, R.J., 2010. Characteristics of Icy Surfaces, *Space Science Reviews.* doi:10.1007/s11214-010-9649-8
- Roth, L., Saur, J., Retherford, K.D., Strobel, D.F., Feldman, P.D., McGrath, M. a, Nimmo, F., 2014. Transient water vapor at Europa's south pole. *Science* (80-.). 343, 171–174. doi:10.1126/science.1247051
- Schenk, P.M., 2002. Thickness constraints on the icy shells of the galilean satellites from a comparison of crater shapes. *Nature* 417, 419–421. doi:10.1038/417419a
- Tufts, B., 2000. Lithospheric Dilation on Europa. *Icarus* 146, 75–97. doi:10.1006/icar.2000.6369