UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei"

Corso di Laurea Triennale in Astronomia

Analisi delle distribuzioni di taglia dei massi presenti nella regione delle *tiger stripe* di Encelado

Relatore: Prof. FRANCESCO MARZARI
Correlatore: Dr. MAURIZIO PAJOLA
Correlatrice: Dr.ssa ALICE LUCCHETTI

Laureanda: LARA SENTER

Anno Accademico 2019/2020

Abstract

Encelado è un satellite ghiacciato di Saturno. Presenta un nucleo poroso, circondato da un oceano di acqua liquida e ricoperto da una crosta ghiacciata, il cui spessore varia a seconda della latitudine, con un minimo inferiore anche ai 10 km al South Polar Terrain - SPT. Il SPT è la superficie più giovane di Encelado, con età inferiore a 0.5 Ma e presenta fratture nella crosta ghiacciata da cui fuoriescono getti di gas, particelle ghiacciate e vapore acqueo. Tali fratture hanno dimensioni che vanno da qualche metro a 130 km, come le tiger stripe, i quattro Sulcus più importanti.
Le immagini catturate dall'Imaging Science Subsystem - ISS, della sonda Cassini tra il 2005 e il 2015, hanno rivelato la presenza di "blocchi di ghiaccio", qui denominati "massi", sparsi lungo tutto il SPT, la cui origine è tutt'oggi sconosciuta. Lo scopo di questo elaborato è, quindi, cercare di comprendere le ragioni della loro presenza, tramite l'utilizzo della tecnica di identificazione della loro Size Frequency Distribution - SFD. Essa consiste nell'analisi della distribuzione di taglia dei massi, la quale permette di studiare ed analizzare i processi geomorfologici che li hanno originati, o che attualmente li stanno modificando. Tramite il programma ArcGis 10.5, nello specifico ArcMap, sono stati conteggiati i massi presenti nelle immagini catturate dall'ISS. Sono state analizzate otto immagini e contati 17.073 massi situati lungo una fascia che si estende su tre dei quattro principali Sulcus: Cairo, Baghdad e Damascus. Successivamente sono state calcolate le SFD e sono stati ricavati i relativi indici di best fit di potenza di ciascuna immagine e dei massi totali, e i valori ottenuti oscillano tra -4.4 e -6.2.
Al SPT c'è un'anomalia termica nel sottosuolo che provoca picchi di temperatura superficiali di 197 K, in netto contrasto con le temperature tipiche su Encelado comprese tra 33 - 145 K. Inoltre, vi sono tensioni superficiali, stress mareale e processi tettonici, dovuti all'attrazione gravitazionale con Saturno e il satellite Dione con cui è in risonanza. Questi fenomeni e le piccate SFD ottenute testimoniano la possibilità che i massi osservati al SPT siano generati da fenomeni di sublimazione e fratturazione della crosta ghiacciata.

Indice

1 Encelado **5**
1.1 Introduzione 5
1.2 Encelado 7
1.2.1 Geologia 9
1.3 *South Polar Terrain* - SPT 11
1.3.1 Criovulcanismo 15
1.3.2 Eruzione 18

2 Missione Cassini - Huygens e ISS **21**
2.1 Obiettivi 24
2.2 Strumentazione 25
2.2.1 *Imaging Science Subsystem* - ISS 27

3 Dataset e Metodologia **29**

4 Risultati **35**

5 Discussione **45**
5.1 Processi di formazione dei massi 45
5.2 Analisi precedentemente compiute sul processo formativo dei massi 46
5.3 Discussioni 51

6 Conclusioni **53**

Capitolo 1

Encelado

1.1 Introduzione

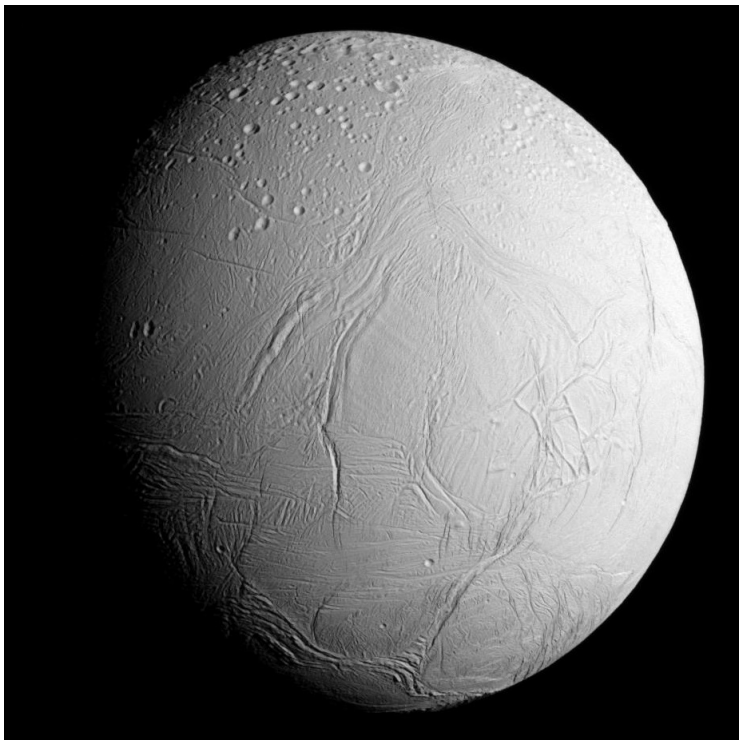

Figura 1.1: Encelado. Credit: *NASA*.

Encelado, vedi Figura 1.1, è uno degli ottantadue satelliti naturali di Saturno. Fu scoperto il 28 agosto del 1789 dall'astronomo naturalizzato britannico William Herschel (*Herschel et al., 1790*).
Le prime osservazioni importanti di Encelado risalgono agli inizi del Novecento, quando venne riportato un aumento in magnitudine della luminosità dell'emisfero sud (*Percival Lowell e E. C. Slipher et al., 1913*). Questo incuriosì la

comunità astronomica a tal punto che furono varie le sonde che studiarono Encelado, a partire dalle sonde Voyager 1 e 2 negli anni Ottanta, fino alla sonda Cassini con il suo ultimo *flyby* nel 2015.
Con un diametro di 504 km, Encelado risulta quasi 26 volte più piccolo della Terra ed è il sesto in ordine di grandezza tra i satelliti di Saturno. Presenta un nucleo roccioso circondato da un oceano di acqua liquida, a sua volta ricoperto da una crosta ghiacciata con spessore variabile (*Hemingway et al., 2018*). Una delle peculiarità di Encelado è il polo sud dove sono presenti delle fratture, dette *tiger stripes*, da cui fuoriescono geyser contenenti vapore acqueo, polvere e particelle ghiacciate (*Choblet et al., 2019*).
La sua orbita attorno a Saturno è ellittica, ha un raggio medio di 238.000 km e viene percorsa in 32.9 ore, lo stesso tempo della durata del giorno su Encelado. Ciò è dovuto a una rotazione sincrona per il quale il satellite mostra sempre la stessa faccia al pianeta attorno al quale orbita (*Porco et al., 2006*).
Prima di approfondire lo studio di Encelado, però, è preferibile soffermarsi su alcune specificazioni sull'anello di Saturno chiamato "Anello E", all'interno del quale si trova il satellite (*Dougherty et al., 2018*). L'anello E è quello più esterno e la conferma della sua esistenza si ebbe negli anni Sessanta (*Feibelman et al., 1967*). Questo anello è sottile ed è largo 300.000 km, però è debole in luminosità (*Feibelman et al., 1967*). Diversi *flyby* delle sonde Pioneer 11 e Voyager 1 hanno mostrato che esso ha un picco di luminosità a 3.9 raggi saturniani, esattamente lungo l'orbita di Encelado (*Baum et al., 1981*); inoltre, questa luminosità aumenta avvicinandosi al satellite stesso. L'anello E è principalmente composto da polveri e piccole particelle ghiacciate della grandezza dell'ordine dei micrometri. È stato verificato che il loro tempo di vita massimo è di cento anni e per questo motivo si pensa che l'anello riceva un continuo rifornimento di materiale da parte di una qualche sorgente esterna per sopravvivere così a lungo (*Baum et al., 1984*). Una delle spiegazioni è che questa sorgente sia Encelado stesso (*Pang et al., 1984*), attraverso il materiale proveniente dalle eruzioni dei geyser nel polo sud. Inoltre, lo Hubble Space Telescope (HST) misurò la presenza di OH neutro lungo l'anello (*Shemansky et al., 1993*), derivante probabilmente dall'acqua, la cui densità ha un picco proprio lungo l'orbita di Encelado.

1.2 Encelado

Come e quando Encelado si sia formato rimane tutt'oggi un dibattito molto acceso. Ci sono due possibili teorie: (i) la prima sostiene che Encelado si sia formato agli albori del Sistema Solare, circa 4.5 miliardi di anni fa, dal disco di accrescimento (*Canup e Ward et al., 2006; Sekine e Genda et al., 2012; Neveu e Rhoden et al., 2019*); (ii) la seconda teoria, invece, sostiene che si sia formato 1 o 2 miliardi di anni fa, a seguito della distruzione di un corpo celeste proveniente dalla fascia di Kuiper, che aveva superato il limite di Roche con Saturno[1]. Encelado e altri satelliti, una volta formati, sono poi migrati verso l'esterno (*Crida e Charnoz et al., 2012; Ćuk et al., 2016; Salmon e Canup et al., 2017; Nakajima et al., 2019*).

La struttura interna del satellite, vedi Figura 1.2, è stratificata con tre differenti componenti:

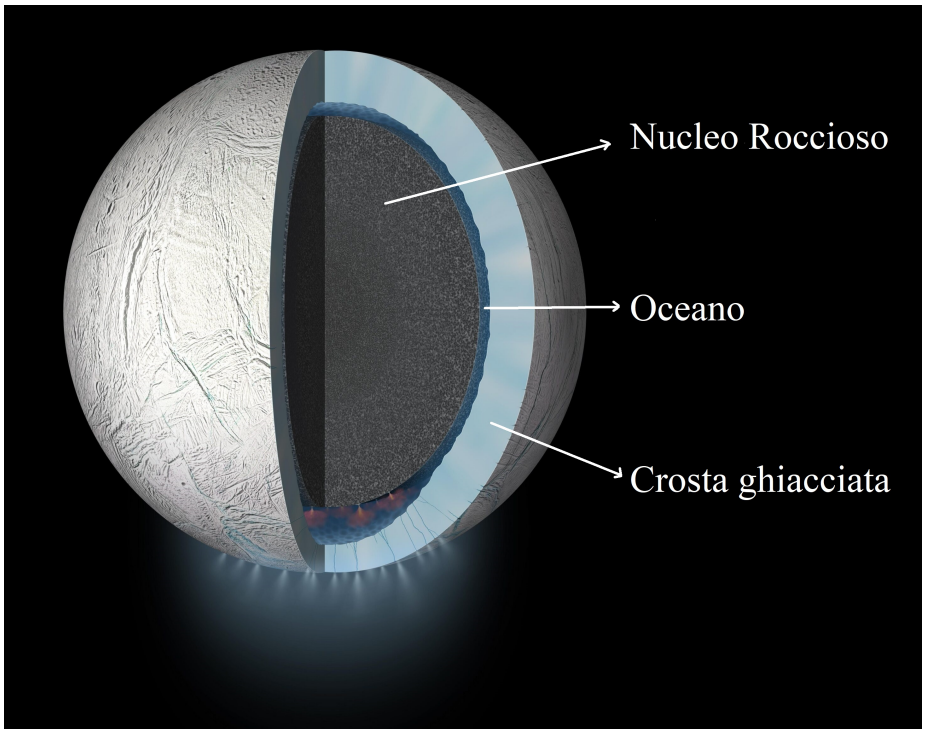

Figura 1.2: Rappresentazione della struttura interna di Encelado. Credit: *NASA/JPL-Caltech (2015).*

- ***Nucleo roccioso***: il nucleo ha un raggio di 188 - 205 km (*Hemingway e Mittal et al., 2017*) e ha una densità tra i 2450 e 2550 kg/m^3 (*Cadek et al., 2016, 2019; Beuthe et al., 2016; Hemingway et al., 2018*). Un

[1]Il limite di Roche è la distanza limite oltre la quale un corpo celeste minore che orbita attorno a un altro corpo celeste viene distrutto poiché la sua gravità non è più in grado di controbilanciare la forze mareali provocate dal corpo ospitante.

valore di densità così basso ha portato alla conclusione che il nucleo fosse poroso per ben il 30% (*Choblet et al., 2017*). L'acqua è quindi libera di scorrere nelle cavità interne. L'attrazione gravitazionale con Saturno e con il satellite Dione, con cui è in risonanza (2:1), genera forze mareali (*Nimmo et al., 2018*). Queste sono il motore che permette di creare energia nel nucleo attraverso lo sfregamento dell'acqua contro le pareti delle cavità. L'energia viene dissipata sotto forma di calore riscaldando l'acqua che risale in superficie (*Choblet et al., 2017; Postberg et al., 2018*) e viene immessa nell'oceano attraverso sorgenti idrotermali presenti nel sottosuolo tra nucleo e oceano.

- ***Oceano***: l'oceano sottostante la superficie ghiacciata ha uno spessore di circa 12 - 36 km (*Hemingwayand Mittal et al., 2017*) ed è composto da acqua salata allo stato liquido. Questo è stato dimostrato sia da un'analisi del campo gravitazionale, in stretta correlazione con la massa del corpo celeste, sia da uno studio sulla librazione, che ha dimostrato la presenza di acqua liquida sotto la superficie. Una librazione forzata della superficie, infatti, non avrebbe potuto essere determinata da un sottosuolo solido.
  Le fonti di calore che mantengono l'oceano allo stato liquido sono le sorgenti idrotermali presenti a confine tra nucleo e oceano nel polo sud.

- ***Crosta ghiacciata***: la crosta ghiacciata ha uno spessore che varia a seconda della latitudine: si va da un minimo di 10 km o meno per il SPT (*South Polar Terrain*) (*Iess et al., 2014; Čadek et al., 2016; Lucchetti et al., 2017; Hemingway et al., 2018*) a un massimo di 36 km all'equatore. In media il suo spessore è di 22 km. Essendo una superficie fresca, giovane e in continuo cambiamento, soprattutto nel SPT, l'albedo di Bond [2] è estremamente elevato e tendente all'unità (0.99) (*Buratti and Veverka et al., 1984*). Encelado è infatti il corpo che presenta l'albedo di Bond più elevato nel Sistema Solare.

[2] L'albedo di Bond è la capacità di un corpo celeste di riflettere la luce proveniente dalla stella ospitante. Il valore è compreso tra 0 (oggetto molto scuro e poco riflettente) ed 1 (oggetto molto riflettente e luminoso).

1.2.1 Geologia

La superficie di Encelado si è evoluta nel tempo mostrando un'evidente attività tettonica che ha portato all'odierna divisione della superficie in quattro principali regioni, vedi Figura 1.3: *crater terrain*, *Leading Hemisphere Terrain* (LHT), *Trailing Hemisphere Terrain* (THT) e *South Polar Terrain* (SPT) (*Crow-William e Pappalardo et al., 2015*).

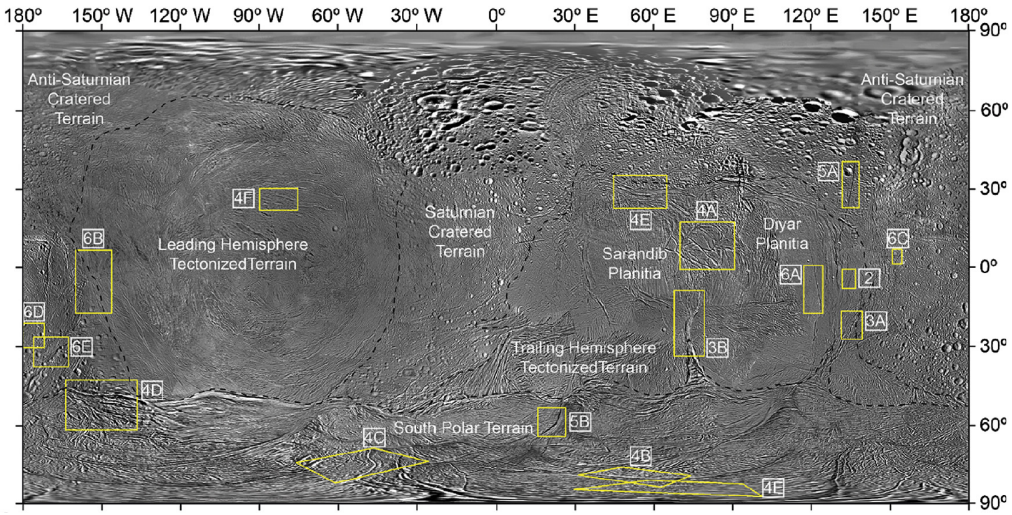

Figura 1.3: Superficie di Encelado raffigurante le 4 regioni principali. Immagine adattata da *Amanda L. Nahm e Simon A. Kattenhorn et al., 2015.*

Secondo *Porco et al., 2006* i terreni con la più alta densità di crateri da impatto sono le regioni dell'emisfero nord, mentre si nota una diminuzione della loro quantità lungo le zone equatoriali. Una densità estremamente bassa di crateri, invece, caratterizza l'emisfero sud, in cui è praticamente nulla in corrispondenza del SPT. I crateri da impatto sono utili per la datazione di superfici: più è elevata la densità di craterizzazione e più un terreno è vecchio, poiché non ha subito grandi cambiamenti dalla sua formazione. In questo caso le superfici con maggior densità di crateri sono chiamate *ancient terrains* (letteralmente terreni antichi) e hanno un'età stimata pari a 1 o 2 miliardi di anni (*Porco et al., 2006; Kirchoff e Schenk et al., 2009; Kirchoff e Schenk et al., 2009*). Al contrario, il SPT è la zona più giovane del satellite ed è quasi totalmente incontaminata. La maggior parte dei crateri osservati presenta bordi lievemente marcati con picchi centrali poco evidenti, a testimonianza di un rilassamento viscoso che ha dato ai crateri una forma "a scodella" (*Passey et al., 1983*).

Le strutture tettoniche osservate sulla superficie non uniforme del satellite si possono distinguere in sei classi principali (*Kattenhorn and Hurford et al., 2009; Nahm and Kattenhorn et al., 2015; Martin et al., 2016*): *band*, *chasmata*, *ridge*, *scarp*, *trough* e *strike-slip falut*.

- ***Band***: è una striscia larga fino a 25 km e molto corrugata compresa tra due bordi paralleli (*Nahm e Kattenhorn et al., 2015*).

- ***Chasma***, al plurale *chasmata*: è una profonda e lunga depressione nel terreno con pareti ripide. Su Encelado ve ne sono di due tipi: sottili e larghe. Le *chasmata* sottili hanno ampiezza da 0.8 a 3 km, profondità massima di 3200 m, lunghezza da una decina a un centinaio di chilometri e sono posizionate andando verso nord. Possono essere sia lineari che curvilinee. Le *chasmata* larghe, al contrario, hanno ampiezza da 4 a 35 km, profondità massima di 3600 m e lunghezza di qualche centinaio di chilometri. Si trovano principalmente al polo sud. (*Nahm e Katternhorn et al., 2015*)

- ***Ridge***: è una cresta montuosa abbastanza lineare e alta non oltre un centinaio di metri, mentre può essere oltre 100 km in lunghezza. Ve ne sono di vari tipi: *double*, *corrugated*, *funiscular* e *lenticular*. Le *double ridge*, che caratterizzano le fratture del SPT, sono costituite da un doppio *ridge* (creste) alto fino a 100 m e da un *trough* (depresioni) centrale profondo centinaia di metri. (*Nahm e Katternhorn et al., 2015*)

- ***Scarp***: è una superficie lineare o arcuata caratterizzata da un brusco dislivello topografico. (*Nahm e Katternhorn et al., 2015*)

- ***Trough***: è una lunga depressione lineare o curvilinea priva di bordi rialzati quali *ridge* (*Nahm and Kattenhorn et al., 2015*) ed è la tipologia tettonica più frequente su Encelado. Si pensa sia una frattura della crosta ghiacciata provocata da stress superficiale dovuto a forze mareali (*Nahm and Kattenhorn et al, 2015*). Inclusi in questa categoria sono i *pit chain* (*Martin et al., 2017*), una catena lunga decine di km composta da piccole depressioni aventi un diametro massimo di 700 m e distanti 500 m l'una dall'altra.

- ***Strike - slip fault***: faglia a scorrimento rapido, è una frattura nel terreno presumibilmente provocata dallo scorrimento laterale di distinti terreni (*Martin et al., 2016*). Si pensa che le *strike-slip fault* siano molto importanti nell'evoluzione geologica del SPT (*Yin and pappalardo et al., 2015*).

1.3 *South Polar Terrain* - SPT

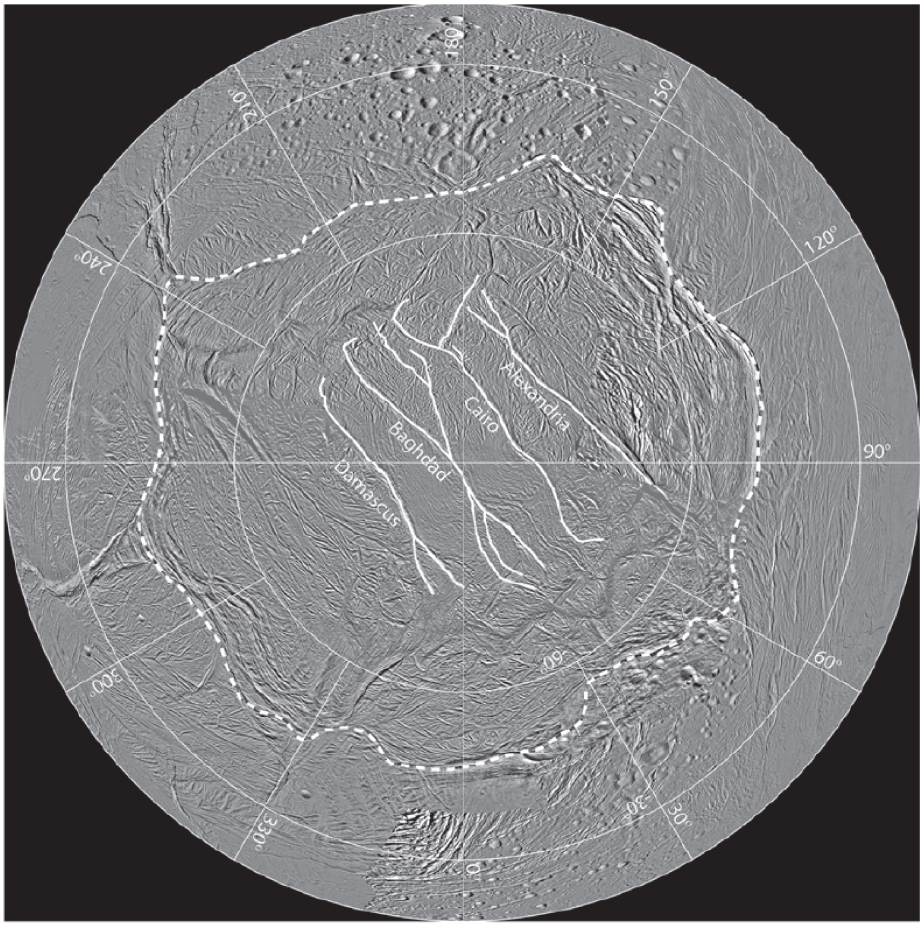

Figura 1.4: SPT con le 4 *tiger stripes*, i cui limiti sono identificati dalla linea tratteggiata. Immagine adattata da *Becker et al., 2016*.

Il SPT è una delle quattro regioni geologiche principali di Encelado. Avendo una densità di craterizzazione pressoché nulla è la superficie più giovane del satellite, con età stimata inferiore a 0.5 Ma (*Porco et al., 2006; Kirchoff e Schenk, 2009*). Il bacino del SPT si trova 500 - 1500 m sotto il "livello del mare" (*Porco et al., 2006; Schenk e McKinnon et al., 2009*) ed è interamente circondato da scarpate alte 1 km che, viste dall'alto, sembrano assumere la forma a poligono (*Porco et al., 2006; Helfenstein et al., 2014*).

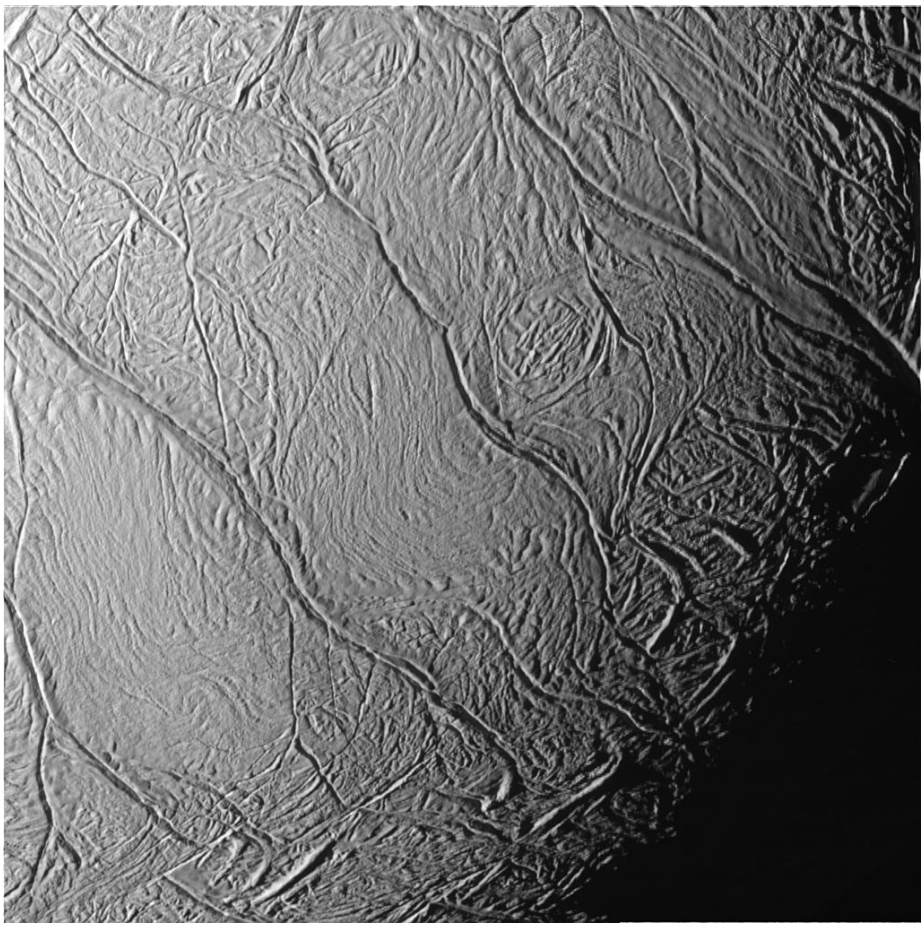

Figura 1.5: Immagine rappresentante le *tiger stripe*. Credit: *NASA/JPL/Space Science Institute (2005)*.

In corrispondenza dell'SPT sono presenti fratture nella crosta ghiacciata da cui fuoriescono getti di gas e particelle ghiacciate. Esse sono il condotto tra oceano e spazio esterno. Le principali e più evidenti fratture tutt'oggi geologicamente attive, comunemente dette *tiger stripes*, sono quattro: *Damascus*, *Baghdad*, *Cairo* e *Alexandria*, vedi Figura 1.4 e Figura 1.5. In realtà ve ne è anche una quinta, denominata E, che però non ha un'attività geologica così importante (*Porco et al., 2006, 2014*).
Le *Tiger Stripes Fractures* (TSF) sono mediamente lunghe 130 km, equidistanti 35 km e sono contrassegnate ai bordi da *trough* larghi 2 km e profondi 0.5 km. Va precisato che ciascuna frattura comprende anche numerose piccole fratture simili a ramificazioni, dette, appunto, *branch*. La temperatura superficiale lungo le TSF è stata misurata da CIRS (*Composite InfraRed Spectrometer*) e VIMS (*Visible and Infrared Mapping Spectrometer*) della sonda Cassini modellando curve di corpo nero con gli spettri di emissione della frattura considerata. Le temperature massime registrate sono di 197 +/- 20 K lungo il *Baghdad Sulcus* (*Goguen et al., 2013*) e di 176 +/- 1.3 K lungo il *Damascus Sulcus* (*Spencer et al., 2011*).

Lungo le TSF la temperatura non è uniforme e diminuisce all'aumentare della distanza da esse. Si raggiungono valori inferiori a 100 K tra una frattura e l'altra (*Spencer et al., 2009*) e 50 - 80 K al di fuori del SPT (*Howett et al., 2010*). Nonostante la presenza di acqua liquida nel sottosuolo, superficialmente non sono state mai registrate temperature superiori a 200 K, a causa della veloce sublimazione e raffreddamento evaporativo dell'acqua ghiacciata nei condotti (*Goguen et al., 201*1).
Il modello di *Spencer et al., 2013* prevede un flusso di calore dalle TSF di circa 4.2 GW. Il flusso totale irradiato attraverso l'intera superficie è di 13 GW.

I modelli più accreditati per la formazione delle principali strutture tettoniche presenti nel SPT sono due: rotazione non sincrona e *gravitational spreading*.

- ***Modello a rotazione non sincrona (NonSynchronous Rotation - NSR)***: questo modello, di *Patthoff e Katternhorn et al., 2011*, considera un minimo di quattro diversi set di fratture, formatesi in quattro tempi diversi, vedi Figura 1.6. Ciascun set presenta centinaia di fratture tutte aventi stessa orientazione, formazione e morfologia. Partendo dal set più vecchio a quello più recente, l'orientazione è evoluta in senso antiorario (*Cruikshank e Aydin et al., 2015*). Il SPT è quindi descritto da diverse ere geologiche. Il set predominante, più recente e più attivo tutt'oggi è quello con le *tiger stripe*, caratterizzato anche da un centinaio di fratture più piccole di lunghezza di decine di metri. Ciò che ha portato alla formazione di queste fratture è la rotazione non sincrona della crosta ghiacciata con il nucleo di Encelado generata da forze mareali in relazione all'attrazione gravitazionale del satellite con Saturno. Se la formazione delle fratture fosse simultanea alla rotazione della superficie, si avrebbero fratture curvilinee. Ciò che si osserva, però, sono crepe lineari, che evidenziano un tempo di formazione inferiore al periodo di rotazione non sincrona, ovvero decine di migliaia di milioni di anni. La presenza di un oceano di acqua liquida sotto la crosta ghiacciata ne ha permesso, invece, una rotazione libera, indipendente dalla rotazione del nucleo. Questo modello, però, non spiega la presenza dei *leading* e *trailing hemisphere terrain*.

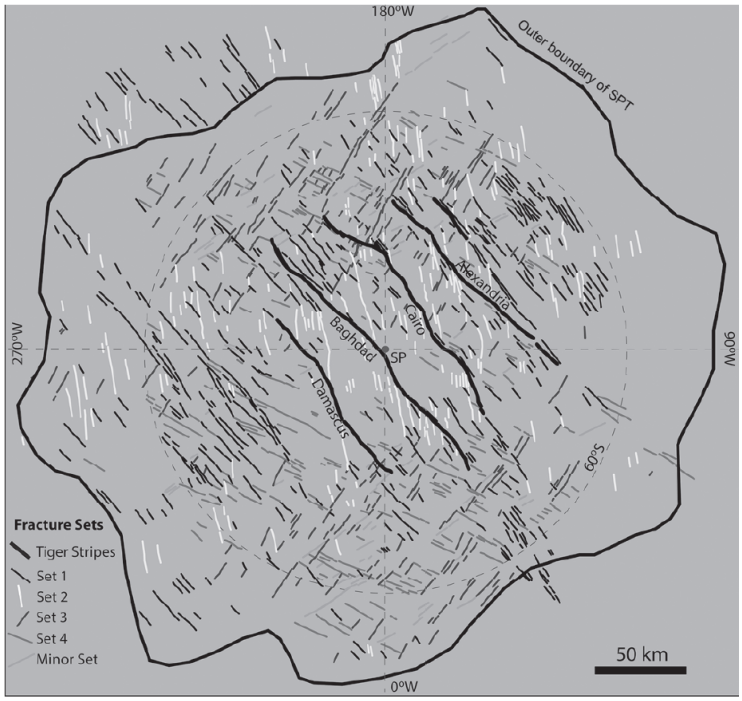

Figura 1.6: Rappresentazione del modello NSR. Dal set 1, il più giovane, al set 4, il più antico. Immagine adattata da *Patterson et al., 2018*.

- ***Modello gravitational spreading***: il modello *gravitational spreading* (*Yin e Pappalardo et al., 2015*), vedi Figura 1.7, prevede che il SPT abbia subito una migrazione. Esso confina con *leading hemisphere terrain*[3], *trailing hemisphere terrain*[4], *sub-saturnian-edge*[5] e *anti-saturnian-edge*[6]. Un'anomalia termica nel sottosuolo ha provocato un aumento di temperatura della crosta ghiacciata diminuendone così la viscosità. La crosta si è assottigliata e il SPT ha subito una migrazione dal LHT verso il THT, generando *strike - slip fault* (faglie di trascorrenza) lungo le pareti laterali confinanti con le zone sub e anti saturniane. Si ha, quindi, un'estensione del confine con il *leading-edge zone* e una contrazione con il *trailing-edge zone*.

[3]LHT è l'emisfero occidentale. Si veda Figure 3.
[4]THT è l'emisfero orientale. Si veda Figure 3.
[5]Il sub saturnian hemisphere è l'emisfero sempre rivolto verso Saturno. Encelado, a causa della rotazione sincrona con il pianeta ospitante, mostra sempre la stessa faccia a Saturno. Si veda Figure 3.
[6]L'anti saturnian hemisphere è l'emisfero che non è mai rivolto verso Saturno al contrario del sub saturnian hemisphere. Si veda Figure 3.

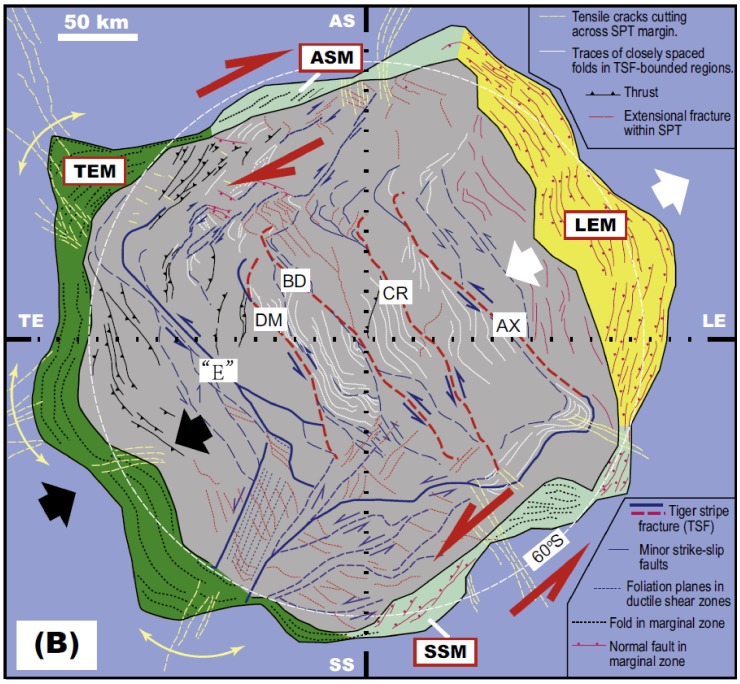

Figura 1.7: Rappresentazione del modello *gravitational spreading*. TEM: *trailing-edge margin*; ASM: *anti-saturnian-edge margin*; LEM: *leading-edge margin*; SSM: *sub-saturnian-edge margin*. Immagine adattata da *Yin e Pappalrdo et al., 2015*.

1.3.1 Criovulcanismo

La superficie del SPT di Encelado è caratterizzata da attività criovulcanica. Infatti sono stati rivelati pennacchi provenienti dalle fratture, con predominanza lungo le *tiger stripe*, vedi Figura 1.8 (*Dougherty et al., 2006; Porco et al., 2006; Spencer et al., 2006; Spitale e Porco et al., 2007*). Un pennacchio è, per definizione, lo sfiato che fuoriesce dal vulcano e il materiale proveniente dal sottosuolo raggiunge la superficie passando attraverso i condotti vulcanici.

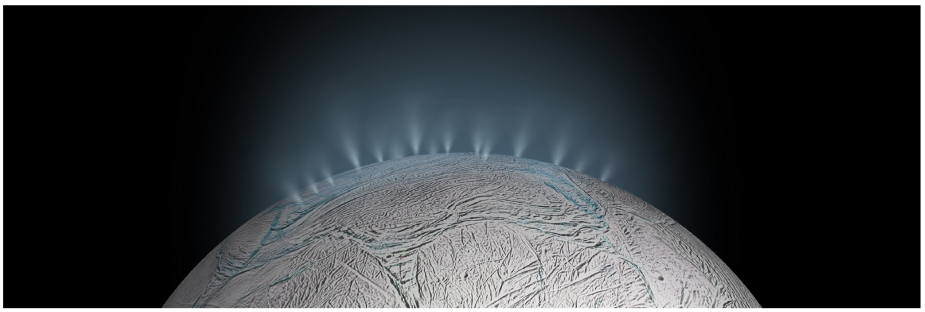

Figura 1.8: Raffigurazione dei pennacchi che fuoriescono dalle fratture al SPT. Credit: *Spaceflight Insider (2018)*.

L'orbita di Encelado è ellittica. In relazione alla posizione orbitale del satellite rispetto a Saturno, che provoca delle piccole oscillazioni nella velocità di rotazione, si generano forze mareali e tensioni superficiali, alterando l'attività criovulcanica di Encelado. Le dimensioni dei condotti presenti nel sottosuolo variano, modificando la quantità di materiale espulso (*Nimmo et al., 2014; Porco et al., 2014; Ingersoll e Ewald et al., 2017; Hedman et al., 2013*). Quando la luna si trova all'apocentro, il punto dell'orbita più lontano dal pianeta, le fratture si dilatano maggiormente e la luminosità dei pennacchi aumenta (*Hedman et al., 2013; Nimmo et al., 2014; Ingersoll e Ewald et al., 2017*). Al contrario, al pericentro, si ha una diminuzione in luminosità, segno che le fratture subiscono solamente una contrazione, ma non cessano completamente la loro attività criovulcanica chiudendosi. La luce del Sole può alterare la misurazione dei valori di luminosità poiché viene riflessa dalle particelle.
Mentre il flusso totale che fuoriesce cambia significativamente durante il giorno, la struttura verticale dei pennacchi non varia in modo così drammatico. I dati raccolti da ISS (*Imaging Science System*) e VIMS (*Visible and Infrared Mapping Spectrometer*) mostrano che il flusso di uscita dei pennacchi, in funzione della posizione del satellite lungo la sua orbita, è quasi quattro volte maggiore all'apocentro. Si presuppone, anche se questo ha generato numerosi dibattiti, che la velocità di lancio delle particelle possa variare relativamente poco nelle 32 ore di rivoluzione della luna.
Durante gli undici anni della missione di Cassini l'attività criovulcanica, misurata dal flusso di particelle, è diminuita (*Hedman et al., 2013; Ingersoll e Ewald et al., 2017*). Tuttavia, la probabilità che questa attività possa cessare è molto bassa. Una teoria più accreditata sostiene che questa diminuzione faccia parte di un ciclo a lungo termine dell'attività criovulcanica. Due meccanismi che potrebbero essere coinvolti sono una variazione, seppur molto piccola, dell'ellitticità dell'orbita durante questi undici anni (*Ingersoll e Ewald et al., 2017*) e i cambiamenti stagionali dell'illuminazione solare al SPT, anche se il calore del sole penetra solo pochi metri sotto la superficie.

Il *Cassini Dust Analyser* (CDA) ha analizzato la composizione chimica dei pennacchi, indentificando tre principali tipologie (*Postberg et al., 2011*):

- vapore acqueo e particelle di ghiaccio;
- componenti organiche, in maggioranza metano, e silicati, in parte responsabili della moderata salinità, ph alcalino e temperatura dell'oceano (*Hsu et al.,2015; Sekine et al., 2015*);
- particelle massive ricche di sodio e potassio concentrate perlopiù vicino alla superficie.

Il gas predominante è il vapore acqueo (*Postberg e Waite et al., 2017*). La presenza di ammoniaca, idrogeno molecolare, azoto, zolfo e componenti organiche (*Waite et al., 2017; Postberg et al., 2018*) potrebbe significare un potenziale sviluppo di vita simile a quella terreste. Infatti, tutti gli elementi chimici essenziali per generare la vita (CHNOPS)[7] sono stati identificati nei pennacchi e sono inoltre la testimonianza di un'interazione fra acqua e materiale roccioso

[7]CHNOPS è l'acronimo di Carbonio, idrogeno - H, azoto - N, Ossigeno, Potassio e zolfo - S.

nel fondale oceanico (*McKay et al., 2014, 2018*). Va aggiunto che la presenza di sali minerali quali sodio e potassio, misurata anche lungo l'anello E, oltre che nei pennacchi (*Postberg et al., 2009, 2011*), è un'ulteriore prova di una sorgente liquida presente nel sottosuolo: qualora le particelle provenissero da una sublimazione diretta del ghiaccio, risulterebbero prive di sali.

Come già enunciato, le *tiger stripe* sono caratterizzate da eruzioni vulcaniche di gas e materiale ghiacciato. Un'analisi di UVIS (*UltraViolet Imaging Spectrograph*), INMS (*Ion and Neutral Mass Spectrometer*) e MAG (*Magnetometer*) ha stimato che dalle fratture fuoriescono da 100 a 1500 kg/s, evento, però, piuttosto raro. *Porco et al., 2014*, utilizzando il metodo triangolazione per la quale superfici e dati vengono analizzati con diversi approcci, ha individuato nelle fratture un centinaio di jet. La loro dinamica varia nel tempo e la maggior parte di essi si trova lungo le *tiger stripe*. La distribuzione geografica dei jet e la loro attività è consistente con la temperatura superficiale misurata da VIMS a CIRS (*Howett et al., 2011*). Il *Damascus Sulcus*, che ha una tra le più alte temperature superficiali misurate su Encelado (176 K), risulta infatti essere estremamente attivo. La *tiger stripe* meno attiva è *Alexandra Sulcus*. Restava aperta la possibilità che molti jet non fossero discreti e distanti l'uno dall'altro qualche chilometro, bensì un bagliore continuo. *Spitale et al., 2015*, con un differente approccio, ha infatti identificato la presenza di emissione di materiale attraverso fessure continue dette *curtain*. Anche *Teolis et al., 2017* ha individuato, oltre ai jet, la presenza di una componente diffusa distribuita lungo le *tiger stripe*. È molto probabile che queste due tipologie coesistano, differenziandosi però a livello dinamico. Secondo *Spitale e Porco et al., 2007* e *Porco et al., 2014*, il materiale espulso dai jet raggiunge una velocità supersonica (numero di Mach pari[8] o superiore a 4) che permette alle particelle di raggiungere altezze di 50 - 450 km. Ad altitudini minori dominerebbero invece le *curtain ejecta*, eruzioni diffuse di materiale.

[8]Il numero di Mach è un valore adimensionale definito come il rapporto tra la velocità dell'oggetto nel mezzo e la velocità del suono nello stesso mezzo considerato.

1.3.2 Eruzione

Il calore prodotto nel nucleo poroso riscalda l'acqua, contenente sali minerali, che viene immessa nell'oceano attraverso sorgenti idrotermali, vedi Figura 1.9 (*Choblet et al. 2017; Postberg et al. 2018*).

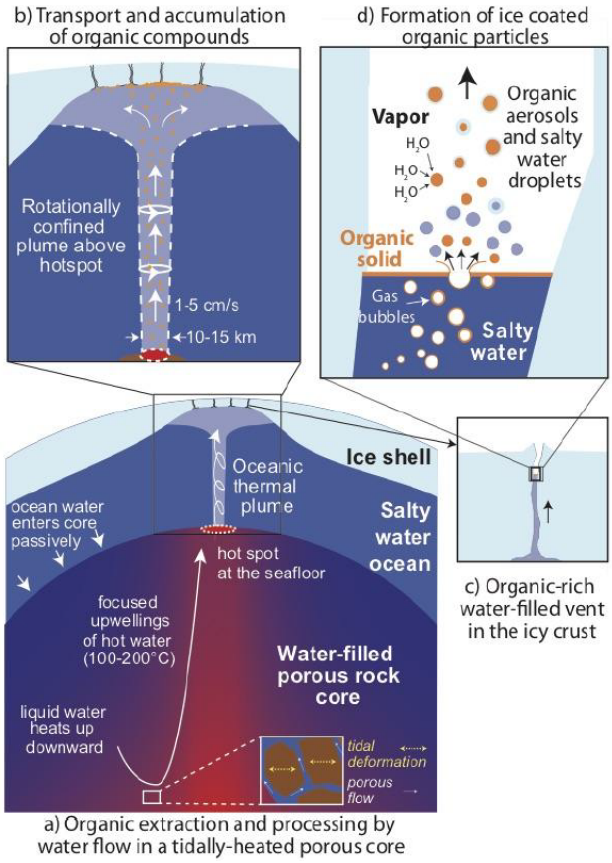

Figura 1.9: Rappresentazione del trasporto di materiale dal nucleo alla superficie. Immagine adattata da *Choblet et al., 2017 e Postberg et al., 2018.*

L'acqua risale in superficie penetrando nei condotti vulcanici situati tra le fratture. A una profondità di circa un chilometro sotto la superficie, bolle di acqua e minerali evaporano (vedi Figura 1.10 punto A) e risalgono il condotto (B) interagendo con le pareti scambiando massa, calore e quantità di moto. Ciò che non viene trasportato nei pennacchi riscende nell'oceano (*Postberg et al., 2011; Kite e Rubin et al., 2016; Ingersoll e Nakajima et al., 2016*). Il gas contenente vapore acqueo, minerali e particelle ghiacciate passa attraversano una strettoia (C) che lo accelera, si espande (D) e raggiunge la superficie. Una volta in superficie il gas continua a espandersi (E) e l'energia termica viene trasformata in energia cinetica. Aumentando l'altitudine (F) (10 - 100 km) la densità del gas diminuisce raffreddandolo. Inoltre, diminuiscono le interazioni intermolecolari tra le particelle del gas ed è in questa zona (G) che vi è il distacco

tra gas e particelle (10 - 1000 km) (*Yeoh et al., 2015*), alcune delle quali ricadono in superficie. Il cammino libero medio delle particelle aumenta fino a decine di chilometri ed è a un'altezza di 1000 km (H) che risentono dell'attrazione gravitazionale di Saturno e delle forze elettromagnetiche che le ionizzano.

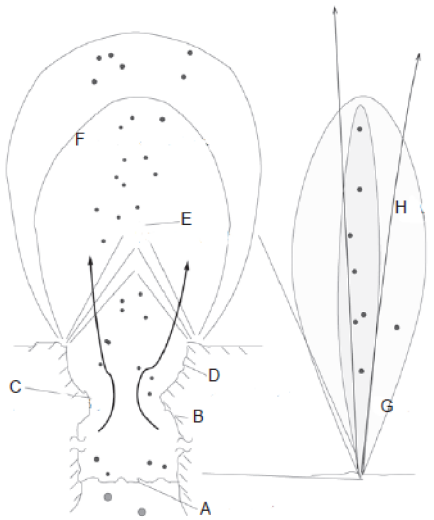

Figura 1.10: Rappresentazione dell'eruzione dei pennacchi. Immagine adattata da *Goldstein et al., 2018*.

La rapida espansione del gas in procinto di uscire dalla superficie risulta essere adiabatica, non permettendo così lo stabilirsi di un equilibrio tra gas e pareti del condotto. Non vi è scambio di energia per conduzione o radiazione tra il flusso e l'ambiente circostante. Se il processo risultasse essere effettivamente adiabatico il condotto si comporterebbe come una bocchetta da cui il fluido fuoriesce fino a velocità supersonica. In condizioni di gas ideale, nei pressi della strettoia il fluido avrebbe velocità pari a quella del suono, aumentando il valore una volta espanso. Nel caso non ideale, invece, vanno considerate perdite di viscosità, quantità di moto, e condensazione. Dove la lunghezza della bocchetta risulta essere insufficiente per poter far sì che tutta l'energia termica del fluido venga trasformata in energia cinetica, il gas, privato delle particelle, continuerà a espandersi sia lateralmente che verticalmente anche dopo aver lasciato il condotto.

La velocità di fuoriuscita delle particelle dalle *tiger stripe* varia in base alla dimensione delle stesse, nonostante provengano tutte dalla medesima sorgente. Il primo gruppo è costituito da particelle di grandi dimensioni, le quali fuoriescono dai condotti per poi ricadere sulla superficie in prossimità delle fratture (*Jaumann et al., 2008*). Il secondo gruppo è costituito da particelle più piccole ma con velocità inferiore alla velocità di fuga, per cui ricadono sul terreno, ma distanti dalle fratture. Il terzo e ultimo gruppo è costituito da particelle molto piccole la cui velocità supera quella di fuga, permettendo così loro di lasciare la superficie del satellite.
Grazie agli spettri dei pennacchi, ottenuti da VIMS nel vicino infrarosso, si è potuto determinare la distribuzione di taglia delle particelle più grandi. *Hedman et al., 2009* ha infatti determinato il numero di particelle, di raggio rispettivamente 1,2 e 3 μm, al variare dell'altezza del pennacchio. La densità di particelle di raggio 3 μm diminuisce molto più facilmente con l'altezza rispetto alla densità di particelle di raggio 1 μm. La velocità di lancio è perciò in stretta correlazione con la dimensione. *Degruyter e Manga et al., 2011* hanno applicato il modello di *Hedman* a particelle di 20 - 30 μm di raggio situate a 5 - 10 km di distanza dalle fratture (*Jaumann et al., 2008*). Hanno calcolato l'accelerazione delle particelle nei condotti vulcanici e la loro traiettoria una volta fuori dai condotti concludendo che particelle più grandi hanno velocità minori che permettono loro di raggiungere altezze più contenute. Questo tipo di particelle, grandi qualche decina di micrometri, non è originato dalla condensazione del vapore (*Schmidt et al., 2008; Yeoh et al., 2015*). Sono, più probabilmente, goccioline ghiacciate provenienti dall'oceano o prodotte dalle pareti dei condotti nella crosta ghiacciata.
Le particelle più piccole hanno invece una dimensione dell'ordine dei nanometri e possiedono una carica elettrica (*Jones et al., 2009; Dong et al., 2015*), forse a seguito dell'interazione di esse con la magnetosfera di Saturno. I dati di CAPS (*CAssini Plasma Spectrometer*) mostrano una distribuzione di taglia con picco di densità a 2 nm. La formazione di queste particelle è probabilmente dovuta alla condensazione del gas dopo la rapida espansione in prossimità della superficie dei condotti (*Yeoh et al., 2015*).
Tutte queste particelle che riescono a sfuggire alla gravità di Encelado vengono in parte immesse nell'anello E e in parte rimangono intrappolate nel campo magnetico di Saturno.

Capitolo 2

Missione Cassini - Huygens e ISS

La missione spaziale Cassini - Huygens fu realizzata in collaborazione tra *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), *Agenzia Spaziale Europea* (ESA) e *Agenzia Spaziale Italiana* (ASI) a partire dagli anni Ottanta fino a settembre 2017. Lo scopo era studiare in maniera più approfondita e ravvicinata il sistema saturniano.

Questa missione portava il nome di due astronomi che contribuirono allo studio di Saturno e degli anelli: Giovanni Domenico Cassini e Christiaan Huygens. Giovanni Domenico Cassini, astronomo italiano naturalizzato francese, vissuto tra il XVII e il XVIII secolo, scoprì la Divisione di Cassini e quattro satelliti di Saturno: Giapeto, Rea, Dione e Teti. Christiaan Huygens, invece, fu l'astronomo olandese del XVIII secolo che scoprì Titano, il satellite più grande di Saturno.

La sonda era composta dall'*orbiter*[1] americano, Cassini, e dal *lander*[2] europeo, Huygens, il quale nel gennaio del 2005 atterrò con successo sulla superficie di Titano.
Il 15 ottobre 1997, nella base americana di Cape Canaveral, a bordo del razzo Titan IVB/Centaur, la sonda Cassini - Huygens partì alla volta di Saturno. Al lancio pesava quasi 6 tonnellate, di cui metà propellente e 320 kg del *lander*. Vista l'enorme massa, la sonda non sarebbe stata in grado di raggiungere il suo obiettivo con il solo utilizzo del propellente. La gravità del Sole, infatti, avrebbe rallentato la sua velocità e l'avrebbe trattenuta nel Sistema Solare interno[3].
Sono stati quindi effettuati diversi *flyby* per permettere alla sonda di arrivare nel sistema di Saturno, vedi Figura 2.1. Il *flyby* si basa sull'effetto fionda gravitazionale che consente di sfruttare la gravità di un pianeta sottraendogli momento orbitale per accelerare i veicoli spaziali quando avviene un incontro ravvicinato tra di essi. L'enorme differenza di massa tra pianeta e sonda pro-

[1] Orbiter: veicolo spaziale che ha il compito di orbitare attorno a un corpo celeste, in questo caso Saturno, senza atterrarvi sopra.

[2] Lander: veicolo spaziale che atterra sul corpo celeste. Nel caso specifico trattato il corpo interessato fu Titano.

[3] Il Sistema Solare interno è la parte di Sistema Solare compresa tra il Sole e la cintura di asteroidi situata tra Marte e Giove. Saturno si trova nel sistema Solare esterno, dopo Giove.

voca un aumento della velocità di quest'ultima di migliaia di chilometri orari lasciando praticamente imperturbata la velocità orbitale del pianeta. La sonda Cassini - Huygens ha quindi effettuato due *flyby* con Venere, uno con la Terra e uno con Giove, fino a raggiungere nel giugno del 2004 l'orbita di Saturno.

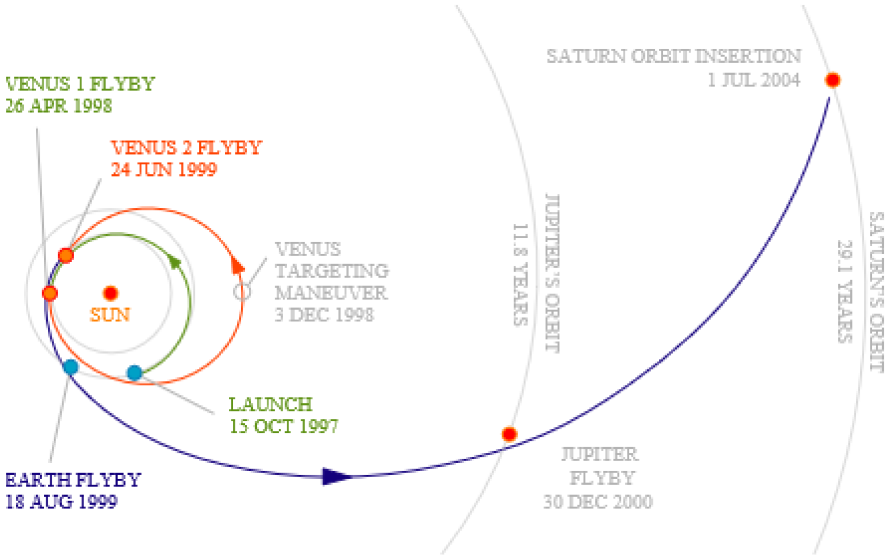

Figura 2.1: Traiettoria della sonda Cassini - Huygens con i 4 *flyby* di Venere, Terra e Giove. Credit: *NASA*.

Come anticipato, verso la fine dello stesso anno il *lander* Huygens fu rilasciato da Cassini per intraprendere la sua discesa verso Titano, atterrando nel gennaio del 2005. La missione avrebbe dovuto terminare nel 2008, ma dato l'enorme successo scientifico la NASA decise di estenderla per ben due volte, fino al 2017. La missione si può suddividere in tre fasi: la prima dal 2004 al 2008, la seconda, *Cassini Equinox Mission*, fino al 2010 e la terza, *Cassini Solstice Mission*, fino al 2017, anno del *Grand Finale*. Il *Grand Finale* era costituito da 22 orbite di Cassini tra gli anelli e il pianeta, terminando con il tuffo dell'*orbiter* nell'atmosfera di Saturno il 15 settembre 2017. Dopo 13 anni di viaggio, 3.5 miliardi di chilometri e 294 orbite attorno a Saturno la missione Cassini - Huygens giunse al termine. La Figura 2.2 mostra un *overview* della missione Cassini.

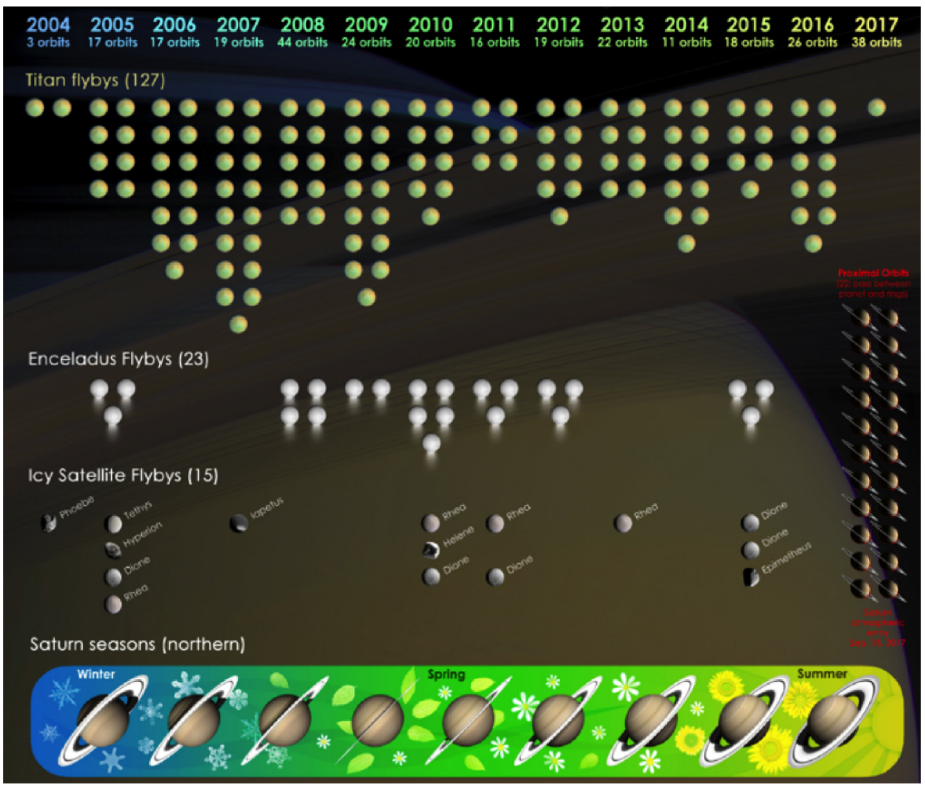

Figura 2.2: *Overview* della missione Cassini. Credit: *NASA*.

2.1 Obiettivi

I principali obiettivi scientifici della missione Cassini hanno interessato diversi campi di ricerca di seguito elencati:

- ***Saturno***:
  - Determinazione di temperatura, composizione, proprietà, rotazione e struttura interna dell'atmosfera.
  - Studio dei venti e dell'evoluzione delle nubi.
  - Analisi della relazione tra ionosfera e campo magnetico.
  - Analisi di composizione, flusso di calore e radiazioni durante le sue fasi di formazione e di evoluzione.
  - Studio della natura e delle sorgenti di fulmini presenti sul pianeta.
- ***Anelli***:
  - Studio della configurazione e dei processi dinamici che hanno portato all'odierna struttura degli anelli.
  - Analisi della distribuzione di taglia del materiale negli anelli e in prossimità di essi.
  - Determinazione di una relazione tra satelliti e anelli.
  - Studio dell'interazione tra anelli e magnetosfera, ionosfera e atmosfera di Saturno.
- ***Titano***: Grazie anche al *lander* Huygens, costruito dall'ESA, che atterrò sulla sua superficie nel 2005 si poté
  - Analizzare l'atmosfera (formazione ed evoluzione).
  - Studiarne temperatura, venti, composizione superficiale e topografia.
- ***Magnetosfera***:
  - Determinazione del campo magnetico, anche in relazione alla distanza dal pianeta stesso.
  - Composizione e concentrazione di elettroni e protoni nella magnetosfera.
  - Studio della sua interazione con il vento solare, i satelliti e gli anelli.
- ***Satelliti ghiacciati***:
  - Determinazione delle caratteristiche principali ed ere geologiche.
  - Analisi delle composizioni superficiali e, in particolare, di materiale organico e particelle ghiacciate.
  - Determinazione della struttura interna.
  - Studio dell'interazione con la magnetosfera e gli anelli.

2.2 Strumentazione

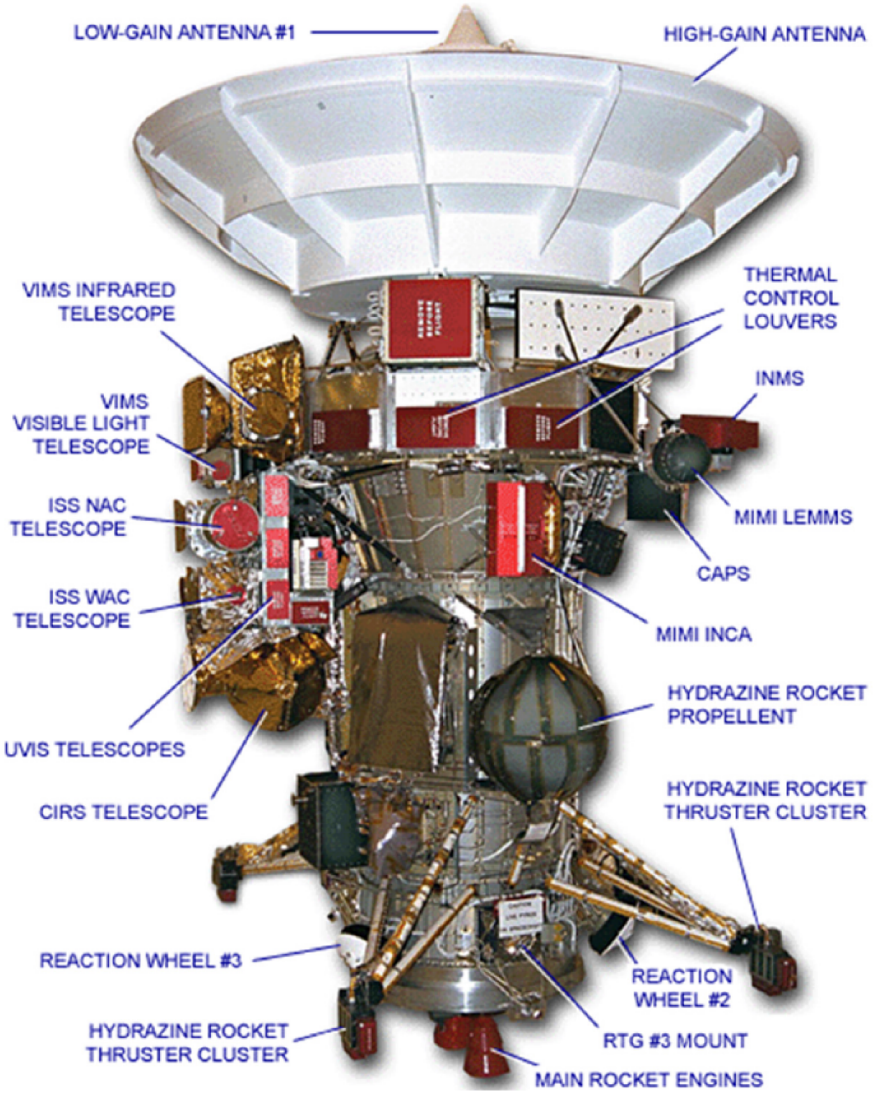

Figura 2.3: Illustrazione dell'*orbiter* Cassini con gli strumenti scientifici. Credit: *NASA*.

Gli strumenti scientifici a bordo della navicella spaziale erano 18, vedi Figura 2.3: 12 su Cassini e 6 su Huygens. Per quanto riguarda l'*orbiter* Cassini erano:

- ***Cassini Plasma Spectrometer (CAPS)***: misurava composizione, densità, velocità e temperatura di ioni ed elettroni nella magnetosfera di Saturno.
- ***Composite Infrared Spectrometer (CIRS)***: si occupava di studiare le emissioni in infrarosso da atmosfere, anelli e superfici per misurarne principalmente la temperatura e la composizione chimica.

- ***Cosmic Dust Analyzer (CDA)***: determinava e misurava la presenza di piccole particelle ghiacciate e polveri in tutto il sistema saturniano. Fu utilizzato per lo studio delle particelle provenienti dalle *tiger stripe* localizzate nel SPT di Encelado.

- ***Ion and Neutral Mass Spectrometer (INMS)***: studiava composizione e struttura di ioni positivi e di particelle neutre nell'alta atmosfera di Titano, nella magnetosfera di Saturno, tra gli anelli e nei satelliti.

- ***Magnetometer (MAG)***: rilevava e misurava il campo magnetico di Saturno e dei satelliti e studiava la loro interazione.

- ***Magnetospheric IMaging Instrument (MIMI)***: primo strumento a produrre immagini della magnetosfera di un pianeta. Dai dati raccolti si è potuto analizzare la dinamica e la configurazione della magnetosfera e la sua interazione con il vento solare, gli anelli, i satelliti e l'atmosfera di Saturno.

- ***Radio and Plasma Wave Science (RPWS)***: misurava i campi elettrico e magnetico del plasma[4] interplanetario e della magnetosfera di Saturno, oltre la densità elettronica e la temperatura.

- ***UltraViolet Imaging Spectrograph (UVIS)***: misurava la luce ultravioletta riflessa o emesssa da atmosfere, anelli e superfici per determinarne composizione, distribuzione, temperatura e contenuti di particelle aerosol. Inoltre misurava le fluttuazioni di luce del Sole e delle stelle attraverso gli anelli e le atmosfere di Saturno e di Titano per determinare la presenza di idrogeno e deuterio.

- ***RADAR***: studiava la superficie di Titano penetrando attraverso le nubi che la ricoprono.

- ***Radio Science Subsystem (RSS)***: questo non era uno strumento scientifico ma un esperimento che, utilizzando telecomunicazioni radio a bordo del veicolo spaziale e antenne posizionate sulla Terra, studiava composizione, pressione e temperatura delle atmosfere e ionosfere di Saturno e Titano. Analizzava inoltre dimensione, distribuzione di taglia e massa di particelle provenienti dagli anelli e massa di oggetti del sistema di Saturno.

- ***Visible and Infrared Mapping Spectrometer (VIMS)***: studiava distribuzione e chimica di minerali presenti negli anelli, nelle atmosfere di Saturno e Titano e sulle superfici dei satelliti.

- ***Imaging Science Subsystem (ISS)***.

[4] Il plasma è una nube di gas contenente elettroni liberi e particelle ionizzate.

2.2.1 *Imaging Science Subsystem* - ISS

L'*Imaging Science Subsystem*, considerato come l'occhio di Cassini, scattò migliaia di immagini di Saturno, Titano e satelliti ghiacciati, tra i quali Encelado, e degli anelli. Gli obiettivi scientifici principali di questo strumento sono stai i seguenti:

- Studiare composizione, fotometria e polarimetria dell'atmosfera di Saturno e il fenomeno aurorale del pianeta stesso.
- Studiare le dinamiche atmosferiche di Saturno e Titano.
- Determinare struttura e morfologia dei principali anelli.
- Definire le orbite dei satelliti e cercarne di nuovi.
- Studiare geologia e morfologia superficiale dei satelliti ghiacciati, tra cui Encelado, e mapparne le superfici.
- Studiare struttura superficiale e meteorologia di Titano.

Fu inoltre utilizzato per verificare traiettoria e posizione di Cassini analizzando le stelle in background presenti nelle varie immagini.
Pesava 57.83 kg ed era composto da due fotocamere: *Wide-Angle Camera* (WAC) a bassa risoluzione, vedi Figura 2.4, e *Narrow-Angle Camera* (NAC) ad alta risoluzione, vedi Figura 2.5. In Tabella 2.1 sono riportate le specifiche delle due fotocamere.

Figura 2.4: Fotocamera grandangolare. Credit: *NASA*.

Figura 2.5: Fotocamera ad angolo stretto. Credit: *NASA*.

Queste focalizzavano i dati raccolti in CCD da 1 mega pixel ciascuno per poi convertirli in immagini. Entrambe erano sensibili a lunghezze d'onda in ottico, nel vicino infrarosso e ultravioletto, e presentavano dei filtri montati su ruote per selezionare la lunghezza d'onda di interesse. L'intera gamma di filtri copriva lo spettro elettromagnetico da 200 nm a 1100 nm.

	Fotocamera grandangolare (WAC)	**Fotocamera ad angolo stretto (NAC)**
Tipologia	Telescopio rifrattore	Telescopio riflettore
Dimensioni	55x35x33 cm	95x40x33 cm
Lunghezza focale	200 mm	2000 mm
Campo di vista	3.5°	0.35°
Numero di filtri	18	24
Lunghezza d'onda filtri	380 - 110 nm	200 - 1100 nm

Tabella 2.1: In tabella sono riportati tipologia, dimensioni in cm, lunghezza focale in mm, campo di vista in gradi, numero di filtri e lunghezza d'onda in nm delle due fotocamere WAC e NAC dell'ISS della sonda Cassini.

Nel presente elaborato sono state utilizzate immagini acquisite dall'ISS per l'analisi dei massi presenti sulle *tiger stripe* di Encelado.

Capitolo 3

Dataset e Metodologia

Il SPT, come già menzionato, è la superficie più giovane di Encelado con età inferiore a 0.5 milioni di anni ed intensa attività criovulcanica. Fin dalle prime osservazioni del 2005 si è notata la presenza di un numero elevato di blocchi di ghiaccio (*Porco et al., 2006*) sparsi tra e lungo le *tiger stripe*. Per convenzione e comodità l'espressione "blocchi di ghiaccio" verrà sostituita di seguito nella tesi con il termine "massi". La loro origine è tutt'oggi sconosciuta e *Porco et al., 2006* ipotizza che essi non siano originati dalla formazione di crateri (quindi *crater ejecta*), data l'assenza di queste strutture al SPT, ma piuttosto che siano il risultato di processi sismici e tettonici del satellite. Si definisce "masso" un rilievo distaccato dal terreno che si identifica sulle immagini grazie alla presenza di un'ombra allungata quando l'angolo di fase è maggiore di zero, vedi Figura 3.1 (*Pajola et al., 2015, 2016b*). Inoltre, si parla di massi quando il diametro è maggiore di 0.25 metri, mentre di sassi (*cobble*) quando il diametro è compreso tra 0.25 e 0.064 metri e di ciottoli (*pebbles*) quando il diametro è tra 0.064 e 0.002 metri (*Wentworth et al., 1922*).

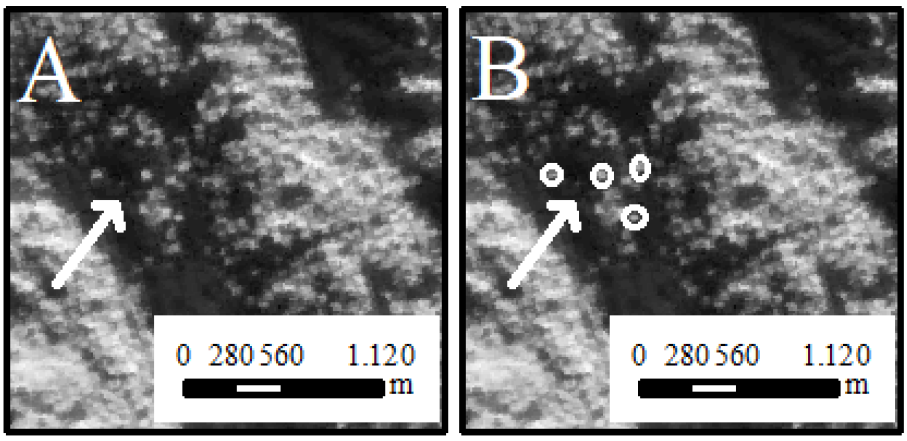

Figura 3.1: A) Sezione dell'immagine ISS 1604166970, dove sono indicati i massi con la freccia bianca. B) Massi identificati nella figura A.

L'analisi della distribuzione di taglia dei massi, dall'inglese *Size Frequency Distribution* (SFD), è uno strumento molto utile e importante che permette di studiare e analizzare i processi geomorfologici che caratterizzano o hanno caratterizzato una superficie planetaria (*Pajola et al.,2017*). Per ottenere tale distribuzione, il primo passo è il conteggio dei massi presenti sulla superficie del pianeta e/o satellite sotto studio. Dal conteggio si ottengono le dimensioni dei massi identificati in modo da poter ricavare il grafico rappresentante la distribuzione in taglia. Tale grafico, comunemente rappresentato in scala logaritmica, riporta in asse x il diametro dei massi e in asse y il relativo numero cumulato. La distribuzione in taglia dei massi può quindi essere modellata in un diagramma log-log tramite un andamento esponenziale o a legge di potenza (vedi Figura 3.2). Gli indici di tali andamenti (esponente della curva esponenziale e pendenza della linea di regressione), sono fondamentali per poter comprendere quali processi abbiano formato e caratterizzato la superficie che si sta analizzando. La metodologia appena descritta è oggi molto usata per l'analisi delle superfici planetarie dei corpi del Sistema Solare. Infatti, il confronto degli indici di potenza o esponenziale delle SFD aiuta a capire e comprendere corpi che hanno una storia evolutiva differente, ma che possono essere caratterizzati dai medesimi processi geologici sulla superficie. Inoltre, si possono anche trovare indici differenti analizzando diverse regioni di uno stesso corpo permettendo quindi di comprendere e ipotizzare quali processi evolutivi abbiano caratterizzato la superficie.

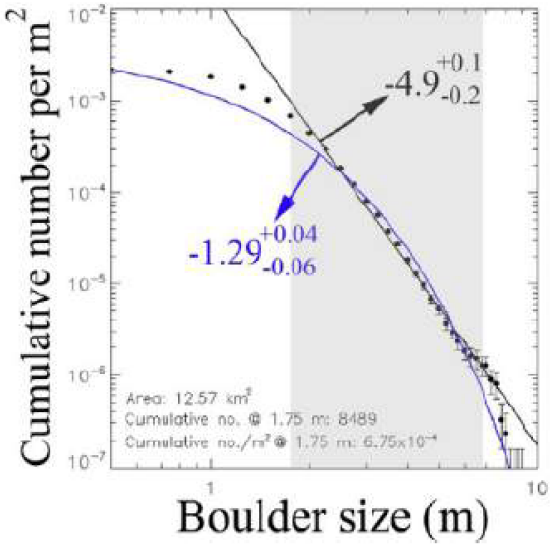

Figura 3.2: Esempio di SFD dei massi ottenuta analizzando l'Oxia Planum di Marte. La regressione lineare è rappresentata in nero con relativo indice di potenza pari a -4.9. Mentre in blu è la curva esponenziale con relativo indice esponenziale pari a -1.29. Immagine adattata da *Pajola et al., 2017*.

Le immagini utilizzate per l'analisi dei massi sono state acquisite dall'ISS della sonda Cassini tra il 2005 e il 2015 e sono otto. Ogni immagine è stata georeferenziata, associandole latitudine e longitudine. In Tabella 3.1 sono riportati nome, giorno di acquisizione, scala in metri su pixel e numero dei massi identificati di ciascuna immagine.

Nome	**Giorno di acquisizione**	**Scala (m/px)**	**Numero massi**
N1597182401	2008-224	11.5	854
N1597182434	2008-224	15.0	1819
N1597182467	2008-224	18.4	2562
N1597182500	2008-224	21.8	2544
N1597182533	2008-224	25.3	2348
N1604166970	2008-305	12.1	4415
N1604167158	2008-305	31.9	359
N1637462964	2009-325	14.4	2172

Tabella 3.1: In tabella sono riportati nome, giorno di acquisizione, scala in metri su pixel e numero di massi identificati di ciascuna immagine.

Il conteggio è stato fatto manualmente tramite il programma ArcGis 10.5, nello specifico ArcMap. L'identificazione dei massi può avvenire manualmente oppure utilizzando un algoritmo (*Golombek et al., 2008*). È preferibile, comunque, la selezione manuale per evitare bias nella statistica, nonostante con l'algoritmo si possa analizzare una superficie molto più ampia.
Per ogni immagine è stato creato un *shapefile* dove poter eseguire il conteggio. Il numero totale di massi contati è 17.073 e sono situati lungo una fascia che si estende su tre dei quattro principali *Sulcus* di Encelado: *Cairo*, *Baghdad* e *Damascus*. Ciascun masso è stato selezionato approssimandolo con un cerchio, non avendo esso una forma regolare, e il diametro rappresenta quindi la sua lunghezza massima.
Successivamente i diametri sono stati esportati da ArcMap in Excel dove si sono ricavati i corrispettivi grafici in scala logaritmica ponendo lungo l'asse x il diametro in metri e lungo l'asse y il numero cumulato. Inoltre, sono state aggiunte anche le barre di errore che sono la radice quadrata dei numeri cumulati.

La Figura 3.3, riportata in seguito, mostra il SPT con le quattro *tiger stripe* e in rosso l'area analizzata, ingrandita in figura 3.4.

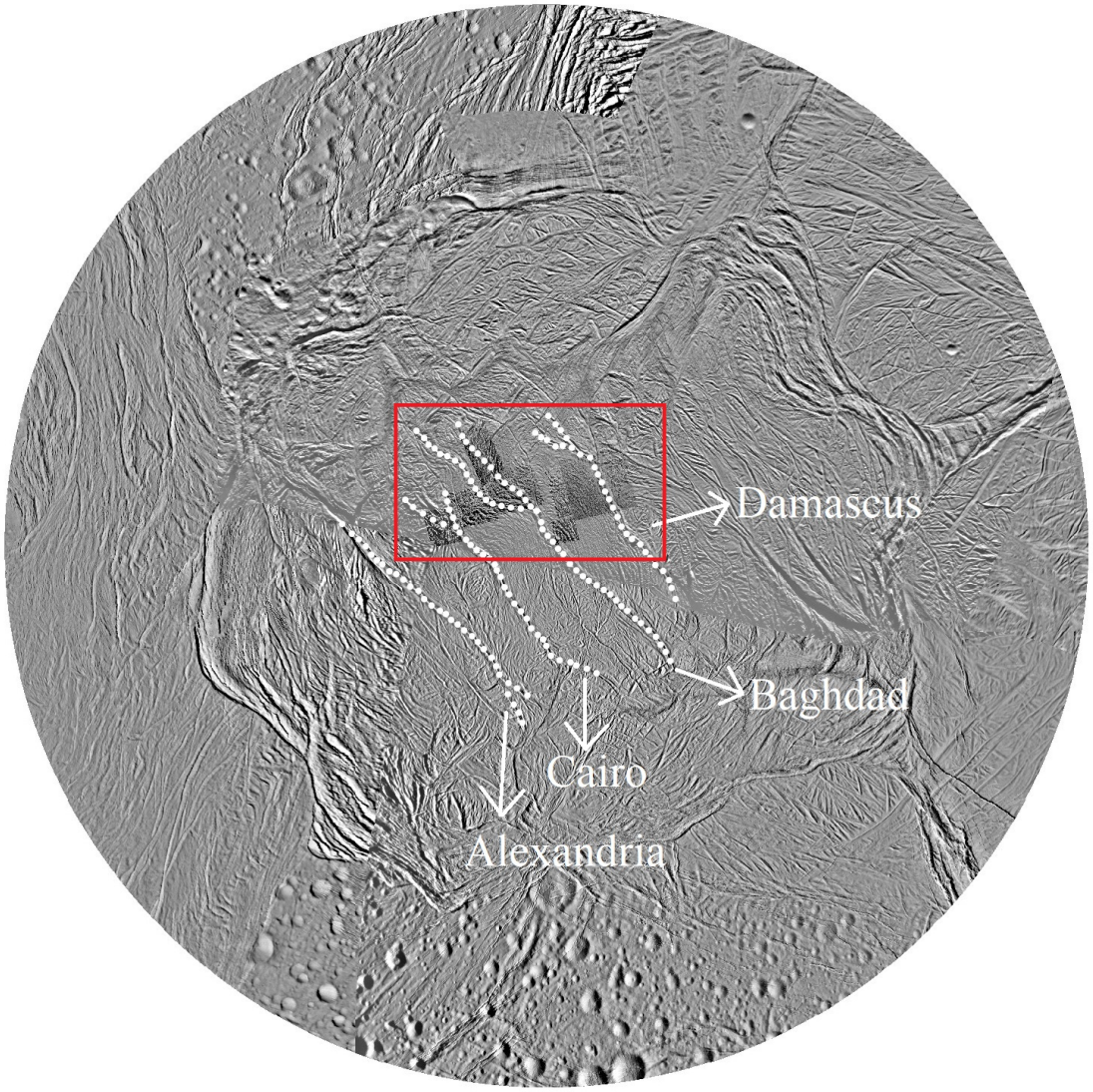

Figura 3.3: Immagine rappresentante il SPT con le quattro *tiger stripe* identificate dalle linee tratteggiate bianche. In rosso è evidenziata l'area oggetto di studio di questa tesi.

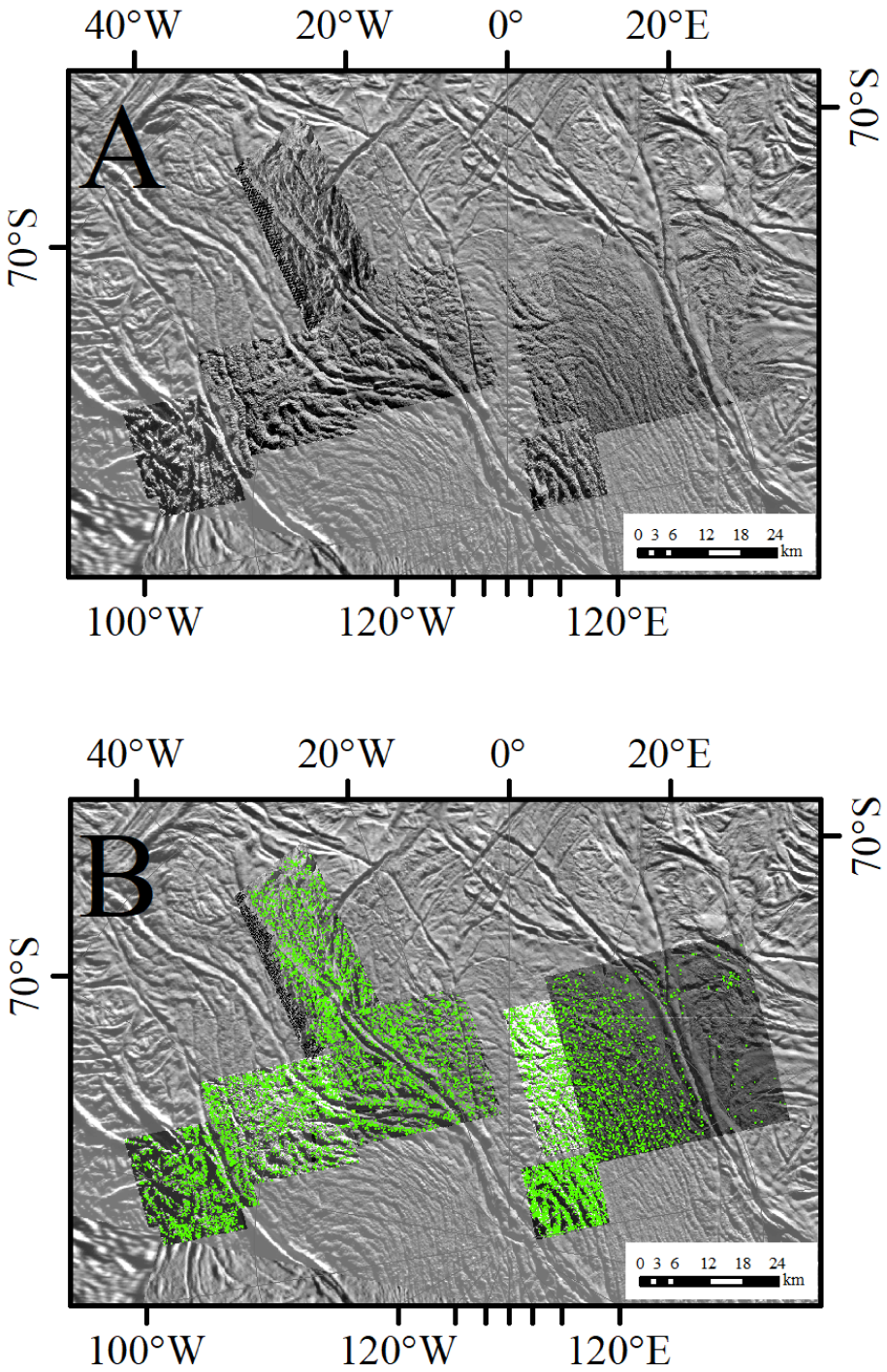

Figura 3.4: A) Sezione della Figura 3.3 delineata dal rettangolo rosso. B) Massi identificati nella figura A.

Capitolo 4

Risultati

In questo capitolo, vengono presentati i risultati ottenuti applicando la metodologia prima descritta (Figure 4.1 - 4.9).
A causa degli effetti di selezione, la regressione lineare in rosso presentata nelle Figure 4.1 - 4.9 C, che identifica gli indici di potenza, non interpola perfettamente l'intero grafico, in azzurro. La curvatura del grafico, denominata "ginocchio", significa che il campionamento potrebbe essere incompleto, per bassi valori dei diametri. Ciò tipicamente accade quando, a causa della risoluzione spaziale delle immagini, non si riescono più ad identificare i massi con dimensioni più ridotte (*Pajola et al., 2015, 2017*). Perciò, dal momento che le risoluzioni spaziali delle immagini sono differenti, gli intervalli nei quali sono stati ricavati i vari fit sono differenti (vedi Tabella 4.1). Se il campionamento fosse completo, il grafico in azzurro seguirebbe l'andamento della regressione lineare.

Gli indici di potenza ottenuti hanno dei valori che oscillano tra -4.4, Figura 4.5, e -6.2, Figura 4.8. Il valore della SFD totale calcolata considerando tutti i massi identificati ha un indice di potenza pari a -4.5 +0.1/-0.2, vedi la Figura 4.9

Le Figure 4.1 - 4.8 mostrano le immagini acquisite dall'ISS (immagine A) con i relativi massi identificati (immagine B) e i grafici delle varie SFD (immagine C).

Nome	**Indice di potenza**	**y+**	**y-**	Fit (m)
N1597182401	-4.7	+0.2	-0.4	53 - 140
N1597182434	-5.1	+0.1	-0.3	70 - 150
N1597182467	-5.2	+0.2	-0.3	90 - 296
N1597182500	-4.6	+0.2	-0.2	90 - 325
N1597182533	-4.4	+0.1	-0.2	100 - 330
N1604166970	-6.0	+0.3	-0.1	48 - 125
N1604167158	-5.1	+0.3	-0.4	128 - 270
N1637462964	-6.2	+0.2	-0.4	90 - 230
Totale	-4.5	+0.1	-0.2	90 - 360

Tabella 4.1: Nella tabella sono riportati nome, indice di potenza, y+, y- e il fit di ciascuna immagine. Gli y+ e y- identificano la barra d'errore.

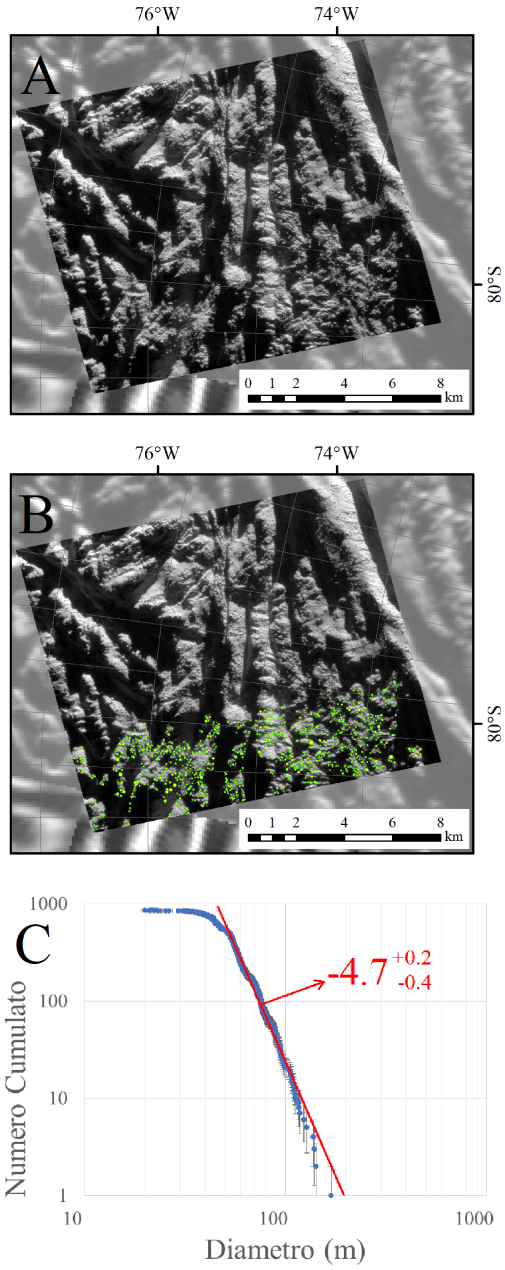

Figura 4.1: A) Immagine ISS N1597182401. B) Massi identificati nella figura A. C) SFD dei massi ottenuti e risultante indice di potenza. L'intervallo di dimensioni considerate per il fit è 53 - 140 m. Sono stati identificati solamente i massi in basso perché quelli sopra sono stati contati nell'immagine sovrapposta N1597182434, vedi Figura 4.2.

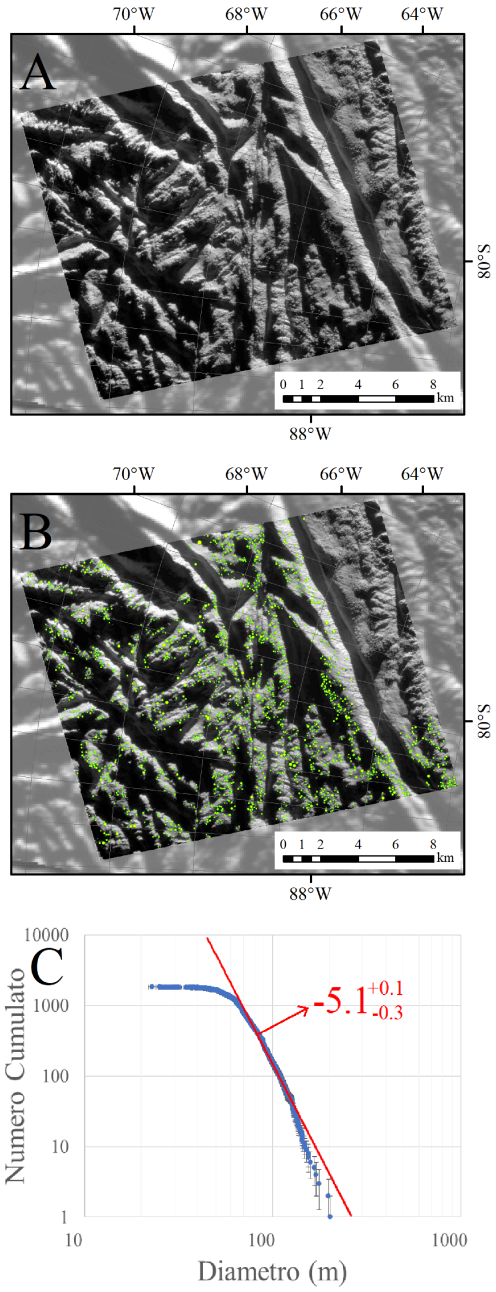

Figura 4.2: A) Immagine ISS N1597182434. B) Massi identificati nella figura A. C) SFD dei massi ottenuti e risultante indice di potenza. L'intervallo di dimensioni considerate per il fit è 70 - 150 m.

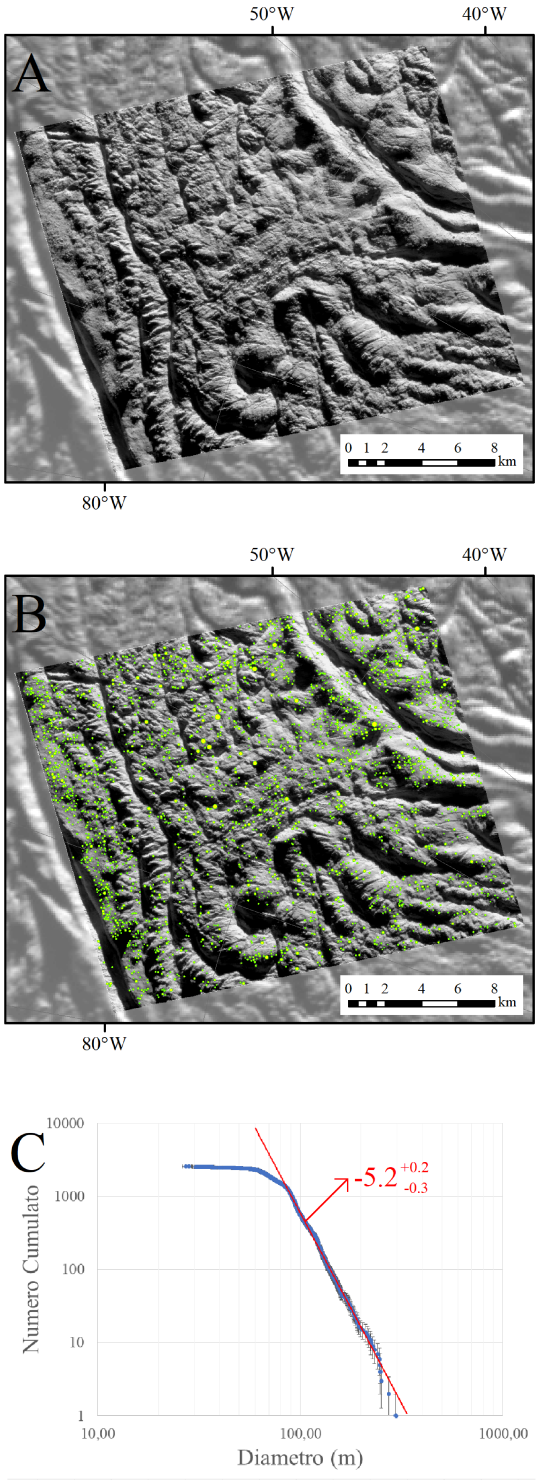

Figura 4.3: A) Immagine ISS N1597182467. B) Massi identificati nella figura A. C) SFD dei massi ottenuti e risultante indice di potenza. L'intervallo di dimensioni considerate per il fit è 90 - 296 m.

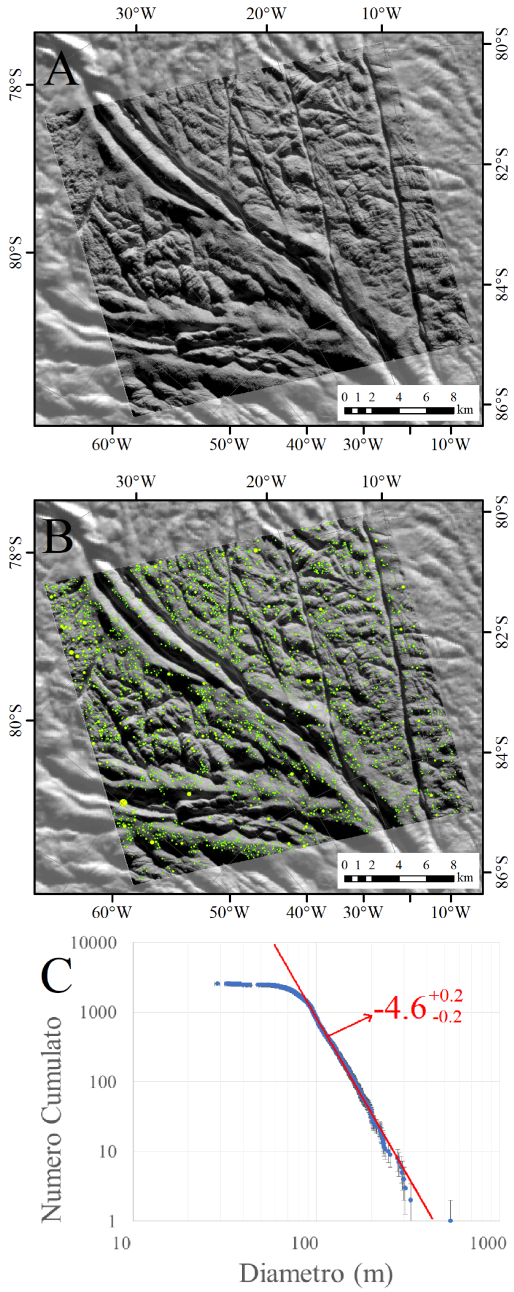

Figura 4.4: A) Immagine ISS N1597182500. B) Massi identificati nella figura A. C) SFD dei massi ottenuti e risultante indice di potenza. L'intervallo di dimensioni considerate per il fit è 90 - 325 m.

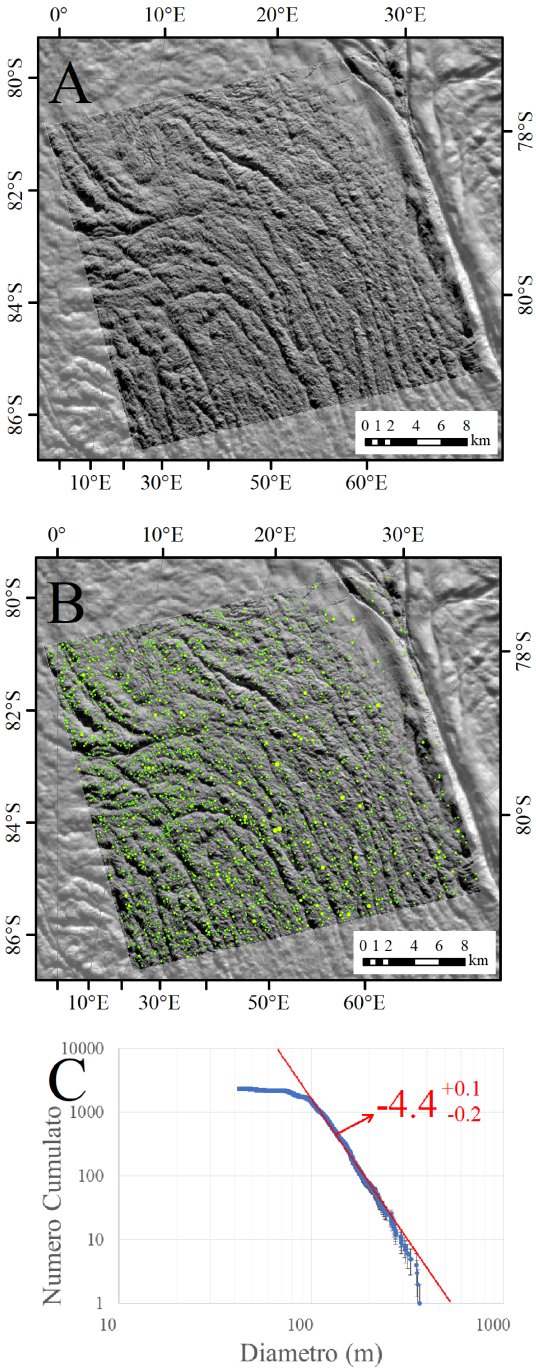

Figura 4.5: A) Immagine ISS N1597182533. B) Massi identificati nella figura A. C) SFD dei massi ottenuti e risultante indice di potenza. L'intervallo di dimensioni considerate per il fit è 100 - 330 m.

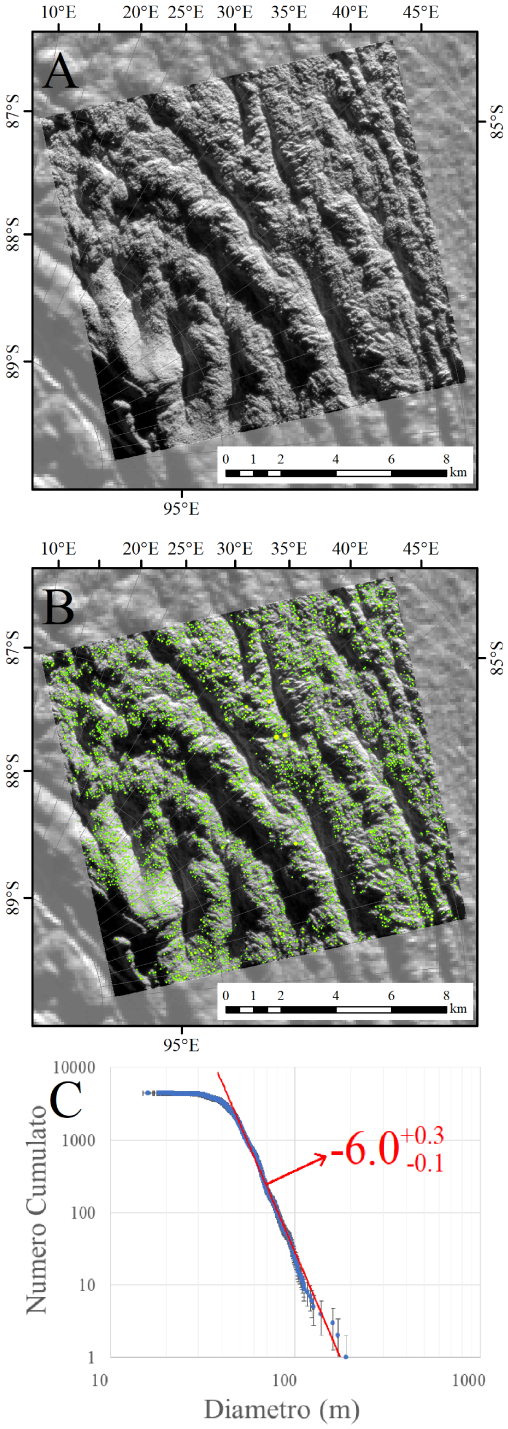

Figura 4.6: A) Immagine ISS N1604166970. B) Massi identificati nella figura A. C) SFD dei massi ottenuti e risultante indice di potenza. L'intervallo di dimensioni considerate per il fit è 48 - 125 m.

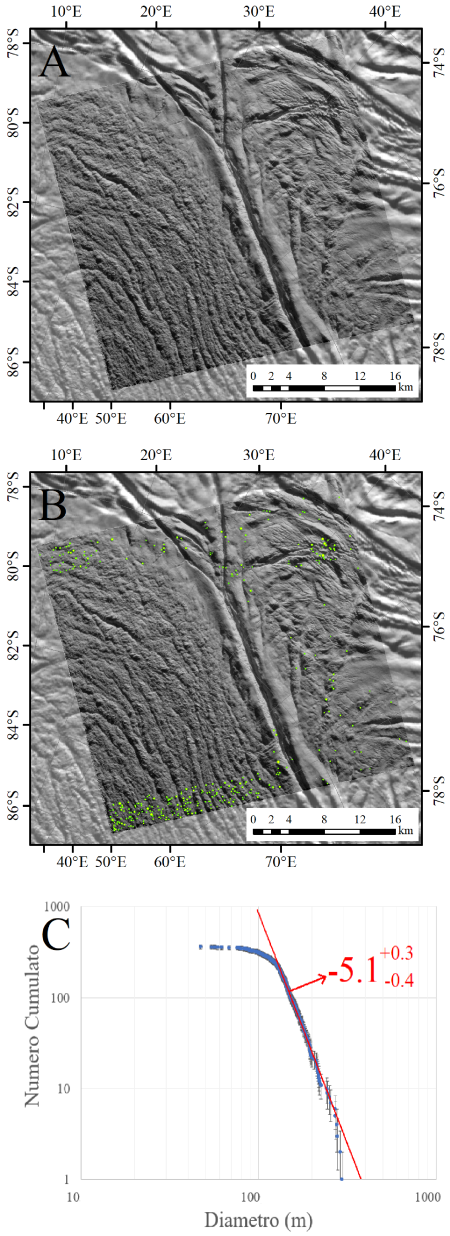

Figura 4.7: A) Immagine ISS N1604167158. B) Massi identificati nella figura A. C) SFD dei massi ottenuti e risultante indice di potenza. L'intervallo di dimensioni considerate per il fit è 128 - 270 m. I massi in centro sono stati contati nell'immagine sovrapposta N1597182533, vedi Figura 4.5.

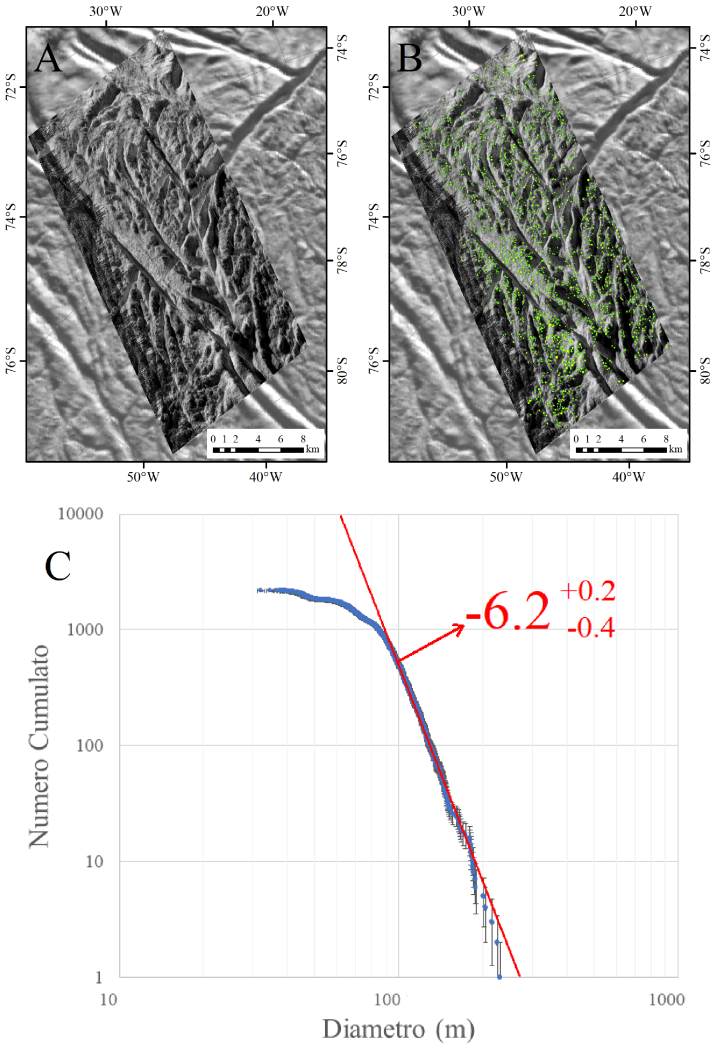

Figura 4.8: A) Immagine ISS N1637462964. B) Massi identificati nella figura A. C) SFD dei massi ottenuti e risultante indice di potenza. L'intervallo di dimensioni considerate per il fit è 90 - 230 m.

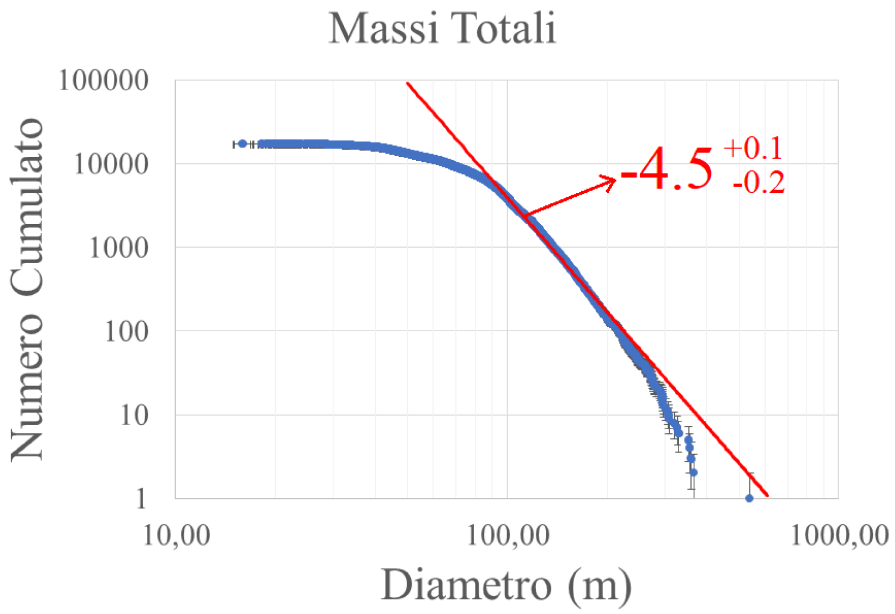

Figura 4.9: SFD totale e relativo indice di potenza. L'intervallo di dimensioni considerate per il fit è 90 - 360 m.

Capitolo 5

Discussione

5.1 Processi di formazione dei massi

L'obiettivo principale di questo lavoro è poter fornire una spiegazione della presenza dei massi al SPT e, quindi, identificare quale processo geologico li abbia originati.
Esistono diversi processi di formazione ed evoluzione che possono aver contribuito alla formazione dei massi che si osservano al SPT, come:

- ***Impact cratering - Craterizzazione***: processo di formazione di massi e detriti causato dall'impatto di un asteroide e/o meteorite sul suolo (*Martens et al., 2014*).

- ***Mass wasting - Movimento di massa***: fenomeno geologico per il quale i detriti si staccano dal fianco della montagna e cadono verso il basso a causa della forza di gravità. Tale processo può influire in due modi nella formazione ed evoluzione dei massi: (i) massi relativamente grandi che cadono e si depositano in valle al fianco della montagna; (ii) caduta di piccole particelle che lasciano così scoperti i massi sottostanti sul versante della montagna e ricoprono, invece, quelli presenti nella vallata. (*Martens et al., 2014*).

- ***Seismic disturbance - Perturbazione sismica***: processo geologico che può influire in svariati modi nella formazione ed evoluzione dei massi: (i) può generare frane e smottamenti che causano rotture della litosfera; (ii) può provocare *mass wasting* che ne comporta una ridistribuzione lungo il SPT; (iii) violenti e/o ripetuti episodi sismici che possono averne modificato la morfologia disgregandoli in componenti più piccole (*Martens et al., 2014*).

- ***Rottura della litosfera attraverso processi tettonici***: la superficie del SPT presenta molte fratture, alcune delle quali parallele tra loro (vedi Figura 1.6), di piccole e grandi dimensioni, da decine di metri a 130 km come le *tiger stripe* (*Martens et al., 2014*). Secondo *Porco et al., 2006* i massi si sarebbero formati a seguito della rottura della crosta ghiacciata a causa di processi tettonici.

- ***Eruzioni criovulcaniche***: processo che prevede l'eruzione dei massi attraverso le fratture durante un periodo di forti esplosioni criovulcaniche (*Martens et al., 2014*).
- ***Condensazione del vapore attorno alle fumarole ghiacciate***: processo che prevede l'accumulo di acqua ghiacciata e sostanze volatili che vengono condensate attorno a piccoli sfiati o fumarole ghiacciate (*Martens et al., 2014*).
- ***Sublimazione***: processo che comporta una transizione di fase da stato solido a stato aeriforme. Essa è responsabile della disgregazione ed erosione dei massi situati lungo le fessure (Porco et al., 2006). Nel SPT può essere causata dalle alte temperature superficiali, presumibilmente derivanti da stress e riscaldamento mareale, piuttosto che dal diretto riscaldamento solare (*Martens et al., 2014*).

5.2 Analisi precedentemente compiute sul processo formativo dei massi

Studi recenti hanno analizzato la distribuzione di massi in funzione delle strutture tettoniche presenti nel SPT (*Martens et al., 2014*) osservando una maggiore concentrazione di massi all'interno del confine del SPT (a circa 55°S) con picco di densità nel SPT interno[1].
Inoltre, lungo *Baghdad Sulcus* e *Cairo Sulcus*, le due *tiger stripe* centrali, vi è una maggiore concentrazione di massi rispetto a *Damascus Sulcus* situato a est. Figura 5.1 mostra la densità numerica dei massi in relazione a quattro figure geologiche principali: A) *tiger stripe*, B) *tiger stripe* e altre fratture rilevanti, C) polo sud e D) jet, identificati da *Spitale e Porco et al., 2007* .
Osservando il grafico, si nota che in tutti e quattro i casi si ha un'elevata densità numerica dei massi tra 0 e 20 - 50 km: 1500 per chilometro quadro al polo sud che diminuiscono a 1000 per chilometro quadro a una distanza di 10 - 50 km, confine del SPT interno. In generale, la loro distribuzione è omogenea in tutto il polo senza preferenze per le diverse figure tettoniche.

Data la mancanza di crateri da impatto al SPT, l'*impact cratering* non ha contribuito in maniera rilevante nella formazione ed evoluzione dei massi (*Porco et al., 2006*). A testimonianza di ciò è anche la loro distribuzione lungo strutture quali *Sulcus*, fratture e in corrispondenza di jet, in netto contrasto con ciò che comporterebbe questo processo geologico di craterizzazione (*Martens et al.,2014*).

Anche processi quali *mass wasting* e *seismic disturbance* sono da scartare in quanto, sulla superficie del SPT di Encelado, non sono stati osservati importanti raggruppamenti di massi ai piedi di *ridges* e nemmeno vallate prive di massi poiché ricoperti da particelle ghiacciate. Infatti, essi sono distribuiti in maniera uniforme in tutto il SPT e la loro dimensione, di decine di metri, testimonia che perturbazioni sismiche non possono aver influenzato in maniera significativa la

[1] Il SPT interno è la zona compresa fino a 15°S di latitudine.

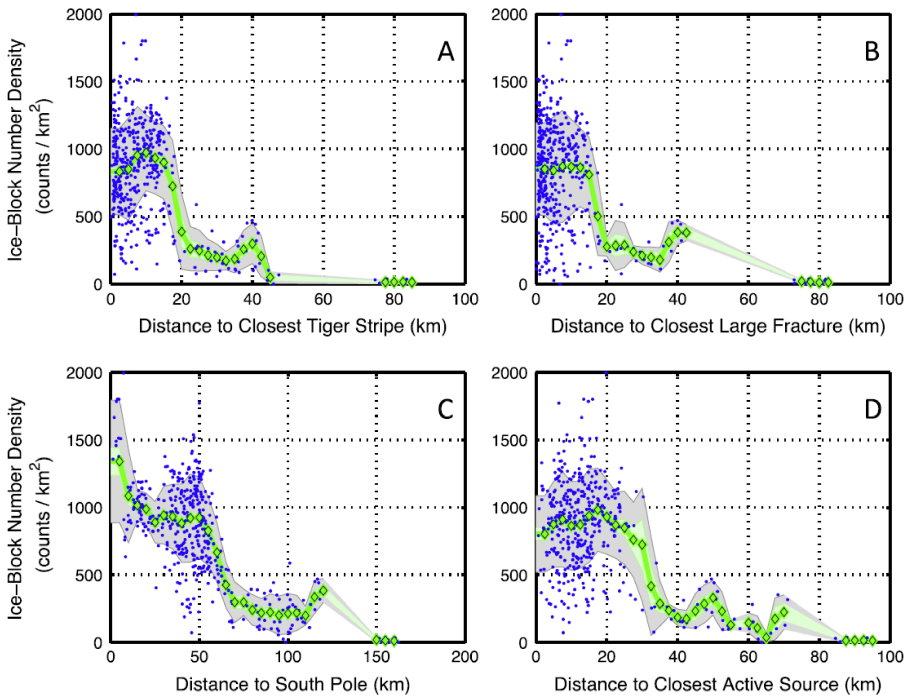

Figura 5.1: Densità numerica dei massi in relazione alle quattro figure geologiche principali: A) *tiger stripe*; B) *tiger stripe* e altre fratture rilevanti; C) polo sud; D) jet. I punti blu rappresentano le densità numeriche dei massi, i diamanti verdi le corrispettive medie. L'area grigia rappresenta l'incertezza delle densità medie e quella verde l'errore standard. Immagine adattata da *Martens et al., 2014*.

loro origine non avendoli disgregati a sufficienza (*Martens et al.,2014*).

Un'altra ipotesi è la condensazione di acqua e sostanze volatili attorno alle fumarole ghiacciate. Essi vengono riforniti nel sottosuolo da gas e liquidi provenienti dalle *tiger stripe* e l'acqua che risale in superficie ghiaccia creando così un cono attorno allo sfiato. *Martens et al., 2014* ha individuato 10^6 sfiati nel SPT interno. Potrebbe quindi essere che il calore latente rilasciato da questo processo possa aver contribuito nell'emissione termica totale rilasciata dal SPT. Inoltre, sono state rilevate da CIRS (*Spencer et al., 2011, 2006; Abramov and Spencer, 2009; Howett et al., 2011*) emissioni termiche ai margini delle *tiger stripe*, mentre da UVIS emissioni di vapore dai pennacchi sempre lungo le *tiger stripe* (*Hansen et al., 2011*). Forze mareali e tensioni superficiali controllano la quantità di flusso che fuoriesce dai pennacchi (*Hurford et al., 2007; Hedman et al., 2013*) ed essi possono facilitare il propagarsi delle sostanze volatili attraverso le fratture nel sottosuolo. Per verificare l'attendibilità di questo processo, *Martens et al., 2014* ne ha stimato la quantità di calore latente proveniente dagli sfiati e ha ricavato che l'energia rilasciata dai 10^6 sfiati è 1.8×10^9 J. I 16 GW di calore rilevati da CIRS dovuti alle emissioni eguagliano i 5×10^7 J di energia rilasciata all'anno. Se l'energia irradiata derivasse solo da questo processo ci vorrebbero

solo 40 anni per formare i blocchi di ghiaccio, rendendo plausibile questa ipotesi. Un problema riscontrato è, però, che questi massi sono osservati anche tra le *tiger stripe*, dove le emissioni termiche sono trascurabili *(Howett et al., 2011)*. Questa teoria, però, potrebbe spiegare l'alta concentrazione dei massi confinati nel SPT. Movimenti tettonici tra le *tiger stripe* possono aver spostato nel corso del tempo gli sfiati lontano da sorgenti di calore, rendendoli così inattivi. È possibile anche che in passato le strisce di terra comprese tra le *tiger stripe* fossero zone con elevata attività termica. Nonostante ciò, questo processo non può essere considerato come la principale causa di origine (*Martens et al., 2014*).

Di maggiore interesse sono i processi tettonici data la presenza sulla superficie del satellite di zone compresse, estensionali e zone di taglio (*shear fractures*) (*Porco et al., 2006; Spencer et al., 2009; Helfenstein et al., 2010*). Infatti, a causa dell'attrazione gravitazionale con Saturno e della risonanza con il satellite Dione, Encelado subisce stress mareale e tensioni superficiali, a intervalli di 1.37 giorni terrestri con picchi di 100 kPa (*Nimmo et al., 2007, 2014; Smith-Konter and Pappalardo et al., 2008; Hurford et al., 2009, 2012; Porco et al., 2014*), che aprono e chiudono le fratture e possono aver originato i massi. Data la distribuzione omogenea e l'alta densità spaziale di fratture (*Patthoff e Kattenhorn et al., 2011*) e massi, i processi tettonici potrebbero aver contribuito in maniera sostanziale alla formazione dei massi identificati *Martens et al., 2014*. È da notare, però, che blocchi di ghiaccio sono assenti in alcune regioni molto fratturate situate al di fuori del SPT interno.

Per verificare la validità di un'eruzione dei massi attraverso le fratture durante un periodo di forti esplosioni criovulcaniche, *Martens et al., 2014* ha calcolato la velocità minima dei pennacchi necessaria per il trasporto dei massi aventi 10 - 100 metri di diametro. Questi ultimi sono assunti sferici e omogenei, con densità uniforme pari a 920 kg/m^3. Eguagliando la forza di trascinamento con la forza di gravità si ottiene la formula

$$v_{min} = \sqrt{\frac{2m_b g_E}{\rho_v C_D A_b}} \tag{5.1}$$

dove m_b è la massa del masso, g_E l'accelerazione gravitazionale sulla superficie del satellite, ρ_v la densità del gas, C_D il coefficiente di trascinamento pari a 0.5 per un corpo circolare in un flusso turbolento (*Kuethe and Chow et al.,1986*) e A_b la sezione trasversale del masso che viene assunta sferica.

Il grafico ricavato sperimentalmente in Figura 5.2 mostra come, al variare della temperatura del pennacchio, vari la sua velocità e quindi la capacità nel trasportare un masso di varie dimensioni.

Le linee nere indicano le velocità necessarie per il trasporto di massi aventi diametro pari a 10 m (linea continua) - 50 m (linea tratteggiata) - 100 m (linea tratteggiata con puntini) mentre, quelle blu, le velocità termica[2] (linea tratteggiata) e dei pennacchi (linea continua). Recenti studi hanno mostrato come jet e pennacchi assieme possano raggiungere velocità di 1 km/s, o addirittura maggiori (*Hansen et al., 2011*), rendendo così possibile l'ipotesi di eruzioni

[2]La velocità termica rappresenta il limite minimo della velocità dei jet.

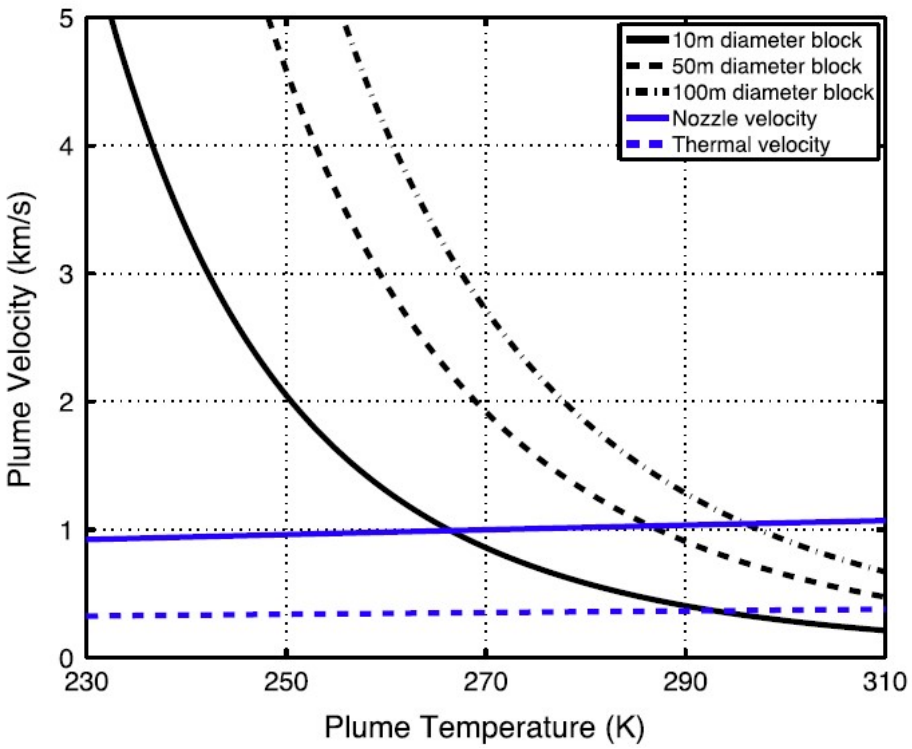

Figura 5.2: Velocità del pennacchio in funzione della sua temperatura. Le linee nere indicano le velocità necessarie per il trasporto di massi aventi diametro pari a 10 m (linea continua) - 50 m (linea tratteggiata) - 100 m (linea tratteggiata con puntini) mentre, quelle blu, le velocità termica (linea tratteggiata) e dei pennacchi (linea continua). Immagine adattata da *Martens et al., 2014*.

criovulcaniche dei massi osservati. Inoltre, secondo *Porco et al., 2006* , vi potrebbero essere zone in prossimità della superficie con temperature di 273 K o addirittura superiori. Nonostante ciò, il calore tutt'oggi generato non è sufficiente per cominciare tale processo, come avrebbe fatto in passato da evidenze di episodi di attività tettonica e criovulcanica (*O'Neill e Nimmo et al., 2010; Spencer e Nimmo et al.,2013*), ma sarebbe comunque in grado di sostenerlo (*Porco et al., 2006; Spencer e Nimmo et al., 2013*). Secondo *Crawford e Stevenson et al., 1988*, generare fratture larghe abbastanza per poter far passare massi di 10 - 100 metri di diametro richiederebbe un livello di stress superficiale estremamente alto. *Ingersoll e Pankine et al., 2010* hanno calcolato che la larghezza delle fratture lungo le *tiger stripe* è di 10 cm, ben più piccola rispetto ai massi. Perciò, tali eruzioni criovulcaniche non sono possibili in condizioni odierne, favorevoli, invece, in un periodo passato più attivo geologicamente. Inoltre, nel SPT interno, i massi sono sparsi in maniera omogenea senza preferenze statistiche per fratture, jet e fiancate delle *tiger stripe*. A questo proposito, per essere valida tale ipotesi di formazione, una plausibile spiegazione data l'intensa fratturazione del SPT interno, potrebbe essere lo spostamento spaziale dei jet nel corso del tempo. Il processo di eruzione criovulcanica è, perciò, consi-

stente con l'alto numero di massi presenti nel SPT interno (vedi Figura 5.3), dove l'attività criovulcanica è maggiormente concentrata (*Martens et al., 2014*).

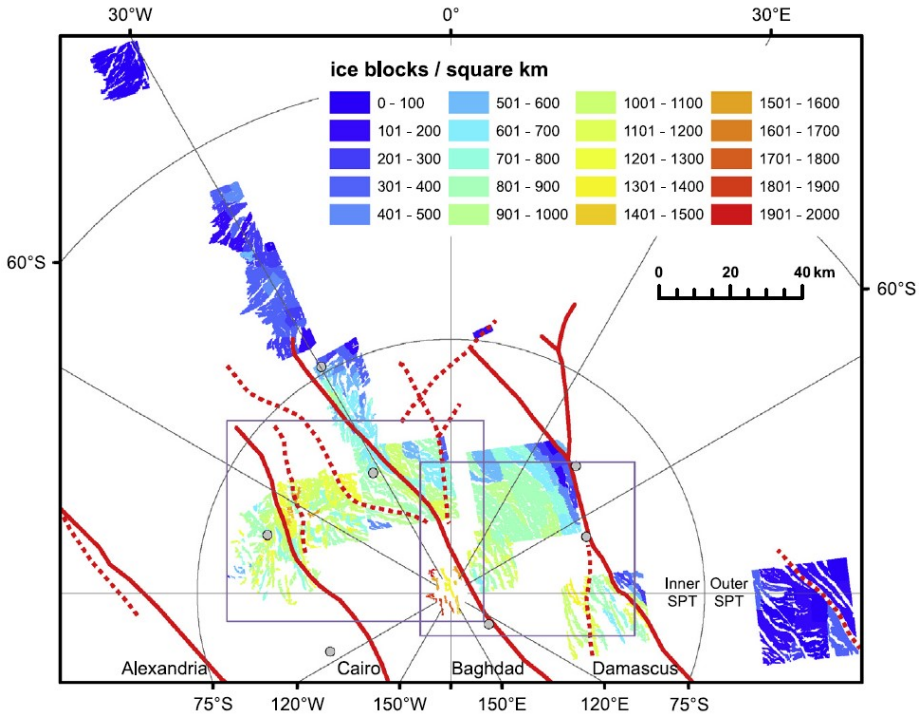

Figura 5.3: Immagine che rappresenta la distribuzione e densità spaziale dei massi tramite l'uso di colori. Le linee continue rosse identificano le *tiger stripe*, mentre quelle tratteggiate altre importanti fratture. Immagine adattata da *Martens et al., 2014*.

La sublimazione del ghiaccio può disgregare ed erodere i massi lungo le fessure e i geyser (*Porco et al., 2006*). Al polo sud di Encelado è causata dalle alte temperature superficiali, presumibilmente derivanti da stress e riscaldamento mareale, piuttosto che da quello solare (*Martens et al., 2014*). Lo strumento VIMS ha rilevato temperature fino a 197 +/- 20 K lungo il *Baghdad Sulcus*, una delle *tiger stripe* più attive. Dati presi da CIRS nel 2005 e 2006 durante i *flyby* hanno rilevato temperature di 223 K vicino alle *tiger stripe (Abramov and Spencer, 2009)* e, nel 2010, hanno rilevato temperature di 177 – 185 K lungo il *Damascus Sulcus*, con una diminuizione a 130 K sui fianchi (Spencer et al., 2011). *Goguen et al., 2013* ha analizzato la sublimazione del ghiaccio a una temperatura di 170 – 240 K e ha scoperto che tale processo può rimuovere metri di ghiaccio in periodi di soli giorni o settimane. Questo processo di ablazione, disgregazione ed erosione del ghiaccio avviene anche, in periodi più lunghi, in zone del SPT meno attive geologicamente e con temperature inferiori. *Spencer et al. 2006* ha determinato che le temperature tipiche su Encelado sono di 33 - 145 K, con una media di 75 K. *Martens et al., 2014* ha determinato che temperature al di sotto dei 102 K, che caratterizzano la maggior parte della

superficie di Encelado, non sono in grado di sublimare 1 cm di ghiaccio durante l'intera vita di Encelado. Per questo motivo, al di fuori del SPT, i massi sono pressoché assenti oppure ricoperti da un sottile strato di particelle ghiacciate che, quindi, ne impediscono la vista. Tra i 102 e 200 K (*Abramov e Spencer et al., 2009; Goguen et al., 2013*) il tasso di sublimazione aumenta a più di 10 ordini di magnitudine. Alla temperatura di 121 K, 1 cm di ghiaccio sublima in 0.5 Ma. A 145 K, 1 cm di ghiaccio sublima in meno di 130 anni. Perciò, oltre alle fratture e alle perturbazioni sismiche, la sublimazione gioca un importante ruolo nella formazione ed erosione dei massi, oltre ad allargare le preesistenti fratture (*Martens et al., 2014*). Residui di particelle e piccoli grumi di ghiaccio cadono in superficie, a seguito di sublimazione e di processi sismici e fratturazioni, formando così cumuli e successivamente blocchi di ghiaccio. Questi ultimi possono venire ricoperti da particelle ghiacciate e vapore che fuoriescono dagli sfiati (*Ingersoll e Ewald et al., 2011*), presenti nel SPT, oppure da particelle presenti nell'anello E (*Verbiscer et al., 2007; Kempf et al., 2010; Schenk et al., 2011*).

Secondo *Martens et al., 2014*, perciò, *impact cratering* non può aver influito nella formazione dei massi, come anche *mass wasting*, *seismic perturbance*. La sublimazione gioca invece un ruolo nell'erosione e disgregazione dei massi nel corso del tempo. Non è da escludere la formazione dei massi attraverso eruzioni criovulcaniche, anche se sono necessarie forti esplosioni per generare massi come quelli osservati. Le innumerevoli fratture, la distribuzione omogenea dei massi e le strutture lineari di blocchi, lungo il SPT, sono la testimonianza che una rottura della litosfera ghiacciata tramite processi tettonici possa essere il principale processo di formazione dei massi.

5.3 Discussioni

Come già anticipato, gli indici di potenza ottenuti hanno dei valori che oscillano tra -4.4 e -6.2, si veda Tabella 4.1. Il valore della SFD calcolata considerando i 17.073 massi totali ha un indice di potenza pari a -4.5 +0.1/-0.2.

Si nota come vi sia una variabilità tra le varie SFD ottenute, vedi Tabella 4.1, imputabile alla geografia del posto. Vi sono infatti zone nel SPT che hanno temperature superficiali maggiori di altre, lungo le *tiger stripe*, ad esempio, e, quindi, sono caratterizzate da maggiori fenomeni di sublimazione della crosta ghiacciata. Oppure vi sono zone più fratturate di altre che favoriscono maggiormente la formazione dei massi.
Nonostante ciò, tutte le SFD hanno un andamento molto pendente. Tale andamento non è stato rilevato su altri pianeti o satelliti del Sistema Solare, quali per esempio Marte (*Pajola et al., 2017*) o la Luna (*Pajola et al., 2019*). Questi ultimi non presentano infatti fenomeni di sublimazione e fratturazione come quelli osservati su Encelado. L'unico corpo ad ora studiato del Sistema Solare paragonabile a Encelado è la cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko (*Pajola et al., 2015, 2016*). Essa ha un diametro di 4 km e una densità di circa 500 kg/m^3. Nonostante abbia dimensioni e densità molto ridotte rispetto a Encelado, sono stati rilevati intensi fenomeni di sublimazione che hanno generato fratture su-

perficiali, conseguenti crolli e generazioni di pozzi, portando alla formazione di massi di dimensioni che variano dal metro a decametri. Dal momento che sia Encelado che la cometa 67P sono caratterizzati da fenomeni di fratturazione, crollo e sublimazione, questi potrebbero avere simili SFD di massi. Encelado e la cometa 67P potrebbero perciò avere simili processi di formazione dei massi.

Encelado, al SPT, presenta dei fenomeni di fratturazione e sublimazione molto evidenti. Infatti, si ha una densità di fratturazione estremamente elevata con jet e geyser sparsi in maniera pressocché omogenea lungo tutto il SPT, soprattutto nel SPT interno. Lungo le *tiger stripe* le temperature massime registrate sono di 197 +/- 20 K, lungo il *Baghdad Sulcus* (*Goguen et al., 2013*), e di 176 +/- 1.3 K, lungo il *Damascus Sulcus* (*Spencer et al., 2011*). La temperatura non è uniforme e diminuisce all'aumentare della distanza da esse raggiungendo valori inferiori a 100 K tra una frattura e l'altra (*Spencer et al., 2009*). Tali valori possono causare dei processi di sublimazione che generano crolli e fratture che, di conseguenza, danno origine ai massi osservati dalla sonda Cassini.
Un valore di SFD con indice di potenza pari a -4.5 suggerisce che i processi che hanno formato i massi possano essere imputabili a sublimazione e fratturazione. Tale studio supporta quindi quanto analizzato da *Martens et al., 2014*, suggerendo che la sublimazione possa giocare un ruolo rilevante non solo nell'evoluzione temporale dei massi, ma anche nella loro formazione.

Capitolo 6

Conclusioni

Al *South Polar Terrain* - SPT di Encelado, satellite ghiacciato di Saturno, vi è un'intensa attività criovulcanica. Nella crosta ghiacciata sono infatti presenti molte fratture dalle quali fuoriescono particelle ghiacciate, vapore acqueo e gas. Già dalle prime immagini acquisite dall'*Imaging Science Subsystem* - ISS della sonda Cassini, è stata rilevata la presenza di un numero elevato di massi sparsi nella regione delle *tiger stripe*, i quattro principali *Sulcus*.
L'obiettivo di questo lavoro è poter fornire una spiegazione della presenza dei massi al SPT, in quanto la loro origine è tutt'oggi sconosciuta, calcolandone la *Size Frequency Distribution* - SFD con relativo indice di potenza. Attraverso l'analisi di distribuzione di taglia dei massi, si può così studiare ed analizzare i processi geomorfologici che li hanno originati o che attualmente li stanno modificando.
I massi presenti nelle otto immagini catturate dall'ISS sono stati conteggiati tramite il programma ArcGis 10.5, nello specifico ArcMap, e sono 17.073. Gli indici di potenza delle SFD delle singole immagini oscillano tra -4.4 e -6.2 e la SFD totale ricavata considerando tutti i massi ha un indice di potenza pari a -4.5 +0.1/-0.2.
Vi sono svariati processi di formazione ed evoluzione che possono aver contribuito alla formazione dei massi presenti nel SPT. Essi sono: *impact cratering*, *mass wasting*, *seismic disturbance*, rottura della litosfera attraverso processi tettonici, eruzioni criovulcaniche, condensazione del vapore attorno alle fumarole ghiacciate e sublimazione.
Recenti studi hanno analizzato la distribuzione dei massi in funzione delle strutture tettoniche presenti nel SPT, e hanno trovato che una rottura della litosfera ghiacciata attraverso processi tettonici possa essere il fenomeno principale che li ha originati. Non sono però da escludere né la condensazione di sostanze volatili e acqua attorno agli sfiati, né le eruzioni vulcaniche, sebbene queste ultime siano maggiormente favorevoli in seguito a forti esplosioni criovulcaniche che, comunque, non si sono verificate recentemente. Fenomeni di sublimazione avrebbero invece portato a una modifica morfologica dei massi nel corso del tempo, più che alla loro formazione.
Secondo quanto ricavato invece dalle SFD, i cui indici di potenza oscillano tra -4.4 e -6.2, i massi si sarebbero originati a seguito di processi di fratturazione, crolli e sublimazione della crosta ghiacciata a causa di anomalie termiche presenti nel sottosuolo. Al SPT sono infatti state rilevate le temperature più alte

di tutto il satellite, con picchi di 197 +/- 20 K.
SFD con andamenti così pendenti non sono state rilevate su altri satelliti o pianeti, in quanto non presentato simili fenomeni. Invece, tali processi sono stati rilevati solamente su un altro corpo celeste, la cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko. Dal punto di vista formativo dei massi, Encelado può quindi essere paragonabile a tale cometa, che risulta essere fino ad ora l'unico corpo celeste che presenta simili processi di formazione ed evoluzione dei massi.
Ad oggi questo studio sulla SFD dei massi presenti al SPT risulta essere il più completo. Solamente future missioni spaziali su Encelado potranno confermare o confutare quanto ricavato, acquisendo immagini ancora a più alta risoluzione.

Referenze

Choblet, G., Cadek, O., Freissinet, C., Jones, G., Le Gall, A., MacKenzie, S., Neveu, M., Olsson-Francis, K., Saur, J., Schmidt, J., Sekine, Y., Tobie, G., Vance, S., Barge, L., Behounkova, M., Buch, A., Camprubi-Casas, E., Hedman, M., Lainey, V., Lucchetti, A., Mitri, G., Nimmo, F., Panning, M., Postberg, F., Shibuya, T., Sotin, C., Soucek, O., Szopa, C., Tomohiro, U., Van Hoolst, T., 2019. Enceladus as a potential oasis for life: Science goals and investigations for future explorations.

Dougherty, M. K., Buratti, B. J., Seidelmann, P. K. and Spencer, J. R., 2018. Enceladus as an active world: History and discovery. In: Enceladus and the Icy Moons of Saturn, pp. 3–16.

Goldstein, D. B., Hedman, M., Manga, M., Perry, M., Spitale, J. and Teolis, B., 2018. Enceladus plume dynamics. In: Enceladus and the Icy Moons of Saturn, pp. 175–194.

Helfenstein, P. and Porco, C. C., 2015. Enceladus' Geysers: relation to geological features. The Astronomical Journal. 150:96 (33pp).

Hemingway, D., Iess, L., Tajeddine, R. and Tobie, G., 2018. The interior of Enceladus. In: Enceladus and the Icy Moons of Saturn, pp. 57–77.

Landry, B. C., Munsill, L. C., Collins, G. C., Mitchell, K. L., 2014. Observations about boulders on the South Polar Terrain of Enceladus. 45th Lunar and Planetary Science Conference.

Lucchetti, A., Pozzobon, R., Mazzarini, F., Cremonese, G. and Massironi, M., 2017. Brittle ice shell thickness of Enceladus from fracture distribution analysis. Icarus 297, pp. 252-264.

Martens, H. R., Ingersoll, A. P., Ewald, S. P., Helfenstein, P. and Giese, B., 2014. Spatial distribution of ice blocks on Enceladus and implications for their origin and emplacement. Icarus 245, pp. 162–176.

Nahm, A. L. and Kattenhorn, S. A., 2015. A unified nomenclature for tectonic structures on the surface of Enceladus. Icarus 258, pp. 67–81.

NASA, 2019. Mission Description. In: Mission overview, science objectives and results, Vol. I Cassini Final Mission Report. JPL California Institute of

Technology.

NASA Science, 2019. <https://solarsystem.nasa.gov/moons/saturn-moons/enceladus /in-depth/>.

Neumann, W. and Kruse, A., 2019. Differentiation of Enceladus and Retention of a Porous Core. The Astronomical Journal, 882:47 (11pp).

Nimmo, F., Barr, A. C., Běhounková, M. and McKinnon, W. B., 2018. The thermal and orbital evolution of Enceladus: Observational constraints and models. In: Enceladus and the Icy Moons of Saturn, pp. 79–94.

Pajola, M., 2015. Size-frequency distribution of boulders $\geqslant$ 7 m on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. Astronomy and Astrophysics 583, A37.

Pajola, M., 2016. The southern hemisphere of 67P/Churyumov-Gerasimenko: Analysis of the preperihelion size-frequency distribution of boulders $\geqslant$ 7 m. Astronomy and Astrophysics 592, L2.

Pajola, M., Pozzobon, R., Lucchetti, A., Rossato, S., Baratti, E., Galluzzi, V. and Cremonese, G., 2019. Abundance and size-frequency distribution of boulders in Linne crater's ejecta (Moon). Planetary and Space Science 165, pp. 99-109.

Pajola, M., Rossato, S., Baratti, E., Pozzobon, R., Quantin, C., Carter, J. and Thollot, P., 2017. Boulder abundances and size-frequency distributions on Oxia Planum-Mars: Scientific implications for the 2020 ESA ExoMars rover. Icarus, pp. 73-90.

Patterson, G. W., Kattenhorn, S. A., Helfenstein, P., Collins G. C. and Pappalardo, R. T., 2018. The geology of Enceladus. In: Enceladus and the Icy Moons of Saturn, pp. 95–125.

PDS: The Planetary Atmospheres Node, <https://pds-atmospheres.nmsu.edu/data-and-services/atmospheres-data/Cassini/inst-iss.html>

Porco, C. C., Helfenstein, P. and Thomas, P. C., 2006. Cassini Observes the Active South Pole of Enceladus. Science, Volume 311, Issue 5766, pp. 1393-1401.

Spencer, J. R., Nimmo, F., Ingersoll, A. P., Hurford, T. A., Kite, E. S., Rhoden, A. R., Schmidt, J. and Howett, C. J. A., 2018. Plume origins and plumbing (ocean to surface). In: Enceladus and the Icy Moons of Saturn, pp. 163–174.

Yin, A. and Pappalardo, R. T., 2015. Gravitational spreading, bookshelf faulting, and tectonic evolution of the South Polar Terrain of Saturn's moon Enceladus. Icarus, 260 pp. 409–439.

Ringraziamenti

Ringrazio il mio relatore, il Professore Francesco Marzari, per la sua disponibilità e supporto.
Ringrazio davvero di cuore i miei due correlatori Maurizio Pajola e Alice Lucchetti per avermi seguita passo passo nella stesura della tesi e per avermi messa a mio agio fin da subito. Si sono fatti in quattro per me correggendo la tesi sia il giorno prima del loro matrimonio, nonostante avessero mille impegni, sia due giorni dopo. Grazie a Maurizio per avermi insegnato con pazienza, precisione e passione ad usare i vari programmi che ho utilizzato, a come si scrive una tesi nel modo più corretto possibile e per avermi mostrato come possa essere il mio futuro lavoro. Grazie ad Alice per i preziosi consigli durante la scrittura della tesi, per le sue correzioni, per la sua professionalità e per quella lezione di qualche anno fa proprio su Encelado. Quella lezione mi ha aperto il mondo dell'astronomia planetaria e mi ha fatto innamorare di questo argomento. Probabilmente, senza quella lezione, non avrei avuto l'opportunità e la fortuna di fare la tesi con voi e quando mi è stata proposta una tesi proprio su Encelado ho pensato che fosse destino.
Ringrazio Giovanni Munaretto per avermi aiutata nell'installazione del programma.
Ringrazio i miei Genitori e mia Sorella Elisa che mi hanno sempre sostenuta e aiutata, non solo a livello economico. Non hanno mai ostacolato le mie scelte credendo in me e spingendomi sempre a fare ciò che più mi piace. Non mi starei laureando senza di voi.
Ringrazio il mio ragazzo Fede che mi strappa sempre un sorriso anche quando sono triste e che mi è stato sempre vicino.
Ringrazio i miei coinquilini che mi hanno sopportata e supportata nel corso di questi anni: grazie a Chiara Gaggia, Joelo il più Belo, Felice Il Magnifico, Mati Mati, Selli Belli e De Nardo Petardo.
Ringrazio tutti gli amici padovani e trentini, vi voglio bene.
Ringrazio anche me stessa, sei stata brava tutto sommato.
E poi dicono che sono fredda come il ghiaccio.