

ALMA MATER STUDIORUM UNIVERSITA' DI BOLOGNA

Dipartimento di Fisica e Astronomia

Corso di Laurea in Fisica

***“Fenomeni vulcanologici estremi
tra Islanda e Antartide”***

Relatore

Prof. Giorgio Spada

Presentata da

Niccolò Bonarini

Sessione IV del 31/10/2025

Anno Accademico 2024/2025

SOMMARIO

Il lavoro di ricerca esplora il vulcanismo estremo, analizzando come modella il paesaggio terrestre e influenza l'equilibrio climatico. L'obiettivo è approfondire le dinamiche fisiche e le implicazioni globali/locali con un approccio interdisciplinare (geologia, fisica, climatologia).

Le aree di studio sono:

1. Islanda: Laboratorio per il vulcanismo attivo in placche divergenti, studiando eruzioni, flussi magmatici e gas vulcanici.
2. Antartide: Ambiente subglaciale, analizzando l'interazione tra magma e spesse calotte di ghiaccio (fusione subglaciale), con impatti sul bilancio energetico globale.

Gli aspetti fisici chiave includono: la dinamica dei flussi magmatici (viscosità, gas), il trasferimento di calore e la generazione di campi geotermici, le esplosioni freatomagmatiche (interazione magma-acqua/ghiaccio), e gli impatti climatici (raffreddamento temporaneo o riscaldamento a lungo termine).

Le conclusioni mirano a identificare somiglianze/differenze nei meccanismi estremi per migliorare la previsione e la mitigazione dei rischi, evidenziando il ruolo cruciale del vulcanismo nell'evoluzione climatica e la sua rilevanza per la ricerca planetaria.

INDICE

<i>Introduzione</i>	<i>Pg.5</i>
<i>Scopo e obiettivi della ricerca</i>	<i>Pg.7</i>
<i>Rilevanza scientifica e metodologie utilizzate</i>	<i>Pg.9</i>
<i>1. Capitolo 1: Fisica dei fenomeni vulcanici</i>	<i>Pg.11</i>
<i>1.1. Dinamica dei flussi magmatici</i>	<i>Pg.11</i>
<i>1.2. Impatti energetici e termodinamici</i>	<i>Pg.17</i>
<i>2. Capitolo 2: Vulcanismo estremo in Islanda</i>	<i>Pg.22</i>
<i>2.1. Caratteristiche geologiche</i>	<i>Pg.22</i>
<i>2.2. Eruzioni significative e loro analisi fisica</i>	<i>Pg.27</i>
<i>3. Capitolo 3: Vulcanismo estremo in Antartide</i>	<i>Pg.35</i>
<i>3.1. Vulcani subglaciali: processi fisici</i>	<i>Pg.35</i>
<i>3.2. Interazioni tra vulcanismo e ghiaccio</i>	<i>Pg.40</i>
<i>4. Capitolo 4: Confronto Islanda-Antartide</i>	<i>Pg.44</i>

<i>4.1. Meccanismi comuni e differenze principali</i>	<i>Pg.44</i>
<i>4.2. Impatti climatici e globali</i>	<i>Pg.47</i>
<i>5. Capitolo 5: Conclusioni e prospettive</i>	<i>Pg.49</i>
<i>5.1. Sintesi dei risultati</i>	<i>Pg.49</i>
<i>5.2. Implicazioni per lo studio dei fenomeni estremi</i>	<i>Pg.50</i>
<i>Bibliografia</i>	<i>Pg.53</i>
<i>Sitografia</i>	<i>Pg.55</i>

INTRODUZIONE

Il vulcanismo rappresenta uno dei fenomeni naturali più potenti e affascinanti del nostro pianeta, capace di plasmare il paesaggio terrestre e influenzare profondamente l'equilibrio climatico globale. L'interesse per i processi vulcanici non si limita alla loro spettacolarità, ma risiede anche nel loro valore scientifico, che consente di indagare i meccanismi interni della Terra, le interazioni tra i diversi elementi geologici e gli impatti che tali eventi hanno sull'ambiente circostante. Questa tesi si colloca in questo contesto, con l'intento di approfondire la comprensione della fisica dei fenomeni vulcanici in due delle regioni più estreme e significative: l'Islanda e l'Antartide.

L'Islanda, situata lungo la dorsale medio-atlantica, è un esempio emblematico di vulcanismo attivo in un contesto geologicamente unico, dove la collisione tra placche tettoniche e la presenza di un punto caldo generano un'intensa attività vulcanica. I fenomeni vulcanici islandesi, caratterizzati da eruzioni esplosive ed effusive, offrono una straordinaria opportunità per studiare la dinamica dei flussi magmatici e il rilascio di energia sotto forma di calore e particelle. In contrasto, l'Antartide, con i suoi vulcani subglaciali, rappresenta un ambiente radicalmente diverso, dove il vulcanismo interagisce con spesse coltri di ghiaccio, dando origine a processi fisici complessi che influenzano non solo il territorio, ma anche il bilancio energetico globale.

Il cuore dell'analisi proposta si concentra sulla comprensione della fisica di questi fenomeni, attraverso lo studio dei processi che regolano il movimento del magma, le modalità di rilascio dell'energia e le interazioni tra i vulcani e l'ambiente

circostante. La dinamica dei flussi magmatici, con la sua capacità di spostare enormi quantità di materia e calore, costituisce un elemento fondamentale per decifrare i meccanismi eruttivi. A ciò si aggiunge l'indagine sugli impatti termodinamici, che si manifestano non solo a livello locale, ma anche su scala planetaria, alterando la composizione atmosferica e influenzando i modelli climatici.

L'Islanda e l'Antartide, pur essendo due contesti geofisici e geologici estremamente differenti, presentano alcuni elementi comuni che rendono particolarmente interessante una loro analisi comparativa. Entrambe le regioni testimoniano come il vulcanismo possa esprimersi in forme estreme, adattandosi alle caratteristiche ambientali e climatiche uniche di ciascun luogo. Tuttavia, le differenze tra i due contesti sono altrettanto significative, evidenziando come i processi vulcanici siano modellati da fattori quali la presenza di acqua, ghiaccio o litosfera sottile. Questa dualità rappresenta un'opportunità unica per esplorare i limiti estremi della dinamica vulcanica e comprenderne le implicazioni a livello globale.

In questa prospettiva, la tesi mira a fornire un quadro esaustivo dei fenomeni vulcanici estremi, analizzando in dettaglio i processi fisici sottostanti e valutandone gli impatti a breve e lungo termine. Attraverso lo studio delle eruzioni significative in Islanda e delle complesse interazioni tra vulcanismo e ghiaccio in Antartide, si intende approfondire la conoscenza delle dinamiche che regolano questi eventi e il loro potenziale contributo ai cambiamenti climatici globali. La natura interdisciplinare dell'argomento, che intreccia geologia, fisica e climatologia, offre una visione integrata e approfondita, capace di gettare nuova luce su alcuni degli aspetti più affascinanti e complessi della scienza dei vulcani.

SCOPO E OBIETTIVI DELLA RICERCA

Lo scopo principale di questa ricerca è approfondire la comprensione dei fenomeni vulcanici estremi, analizzandone le dinamiche fisiche e valutandone le implicazioni a livello locale e globale. Attraverso lo studio comparativo di due contesti geologicamente e climaticamente distinti, come l'Islanda e l'Antartide, si intende esplorare i meccanismi che regolano il vulcanismo in condizioni ambientali opposte, offrendo una prospettiva più ampia e articolata sui processi naturali che plasmano il nostro pianeta. Questa analisi mira a integrare conoscenze già consolidate con nuove interpretazioni, ponendo l'accento sulla natura interdisciplinare del tema e sull'importanza di collegare la geologia e la fisica dei fenomeni vulcanici alle loro ripercussioni sull'ambiente e sul clima globale.

Gli obiettivi di questa ricerca sono molteplici. In primo luogo, si intende sviluppare una comprensione della dinamica dei flussi magmatici, concentrandosi sui processi che ne regolano il movimento e l'interazione con l'ambiente circostante. Questi aspetti vengono esplorati in relazione alle peculiarità geologiche dell'Islanda, dove i flussi lavici e le eruzioni esplosive forniscono un modello per studiare le dinamiche magmatiche in un contesto caratterizzato dalla collisione tra placche tettoniche e la presenza di un punto caldo. Al contempo, l'Antartide offre l'opportunità di esaminare il vulcanismo subglaciale, un fenomeno meno studiato, ma di enorme rilevanza scientifica, che coinvolge complessi processi di fusione del ghiaccio e rilascio di gas vulcanici.

Un altro obiettivo centrale è quello di valutare gli impatti energetici e termodinamici dei fenomeni vulcanici, analizzando il trasferimento di calore e

l'energia rilasciata durante le eruzioni. Tali aspetti sono essenziali per comprendere come il vulcanismo possa influenzare la composizione atmosferica, il bilancio energetico globale e, in ultima analisi, il clima terrestre. La ricerca intende inoltre identificare le similitudini e le differenze nei meccanismi vulcanici che caratterizzano i due contesti di studio, al fine di delineare modelli che possano essere applicati anche ad altri ambienti estremi.

Un ulteriore obiettivo è quello di analizzare le implicazioni ambientali e climatiche di eventi vulcanici significativi, esplorando come le emissioni di gas, le interazioni tra magma e ghiaccio, e la dispersione di particelle nell'atmosfera possano influenzare il clima locale e globale. Attraverso questa analisi, si cerca di chiarire come i fenomeni vulcanici estremi possano fungere da indicatori e agenti di cambiamento ambientale, contribuendo a ridefinire le attuali comprensioni delle dinamiche planetarie, e per migliorare la capacità di prevedere e mitigare gli effetti dei fenomeni vulcanici estremi, riducendo i rischi per le popolazioni e gli ecosistemi.

Come si evince, quindi, l'intento di questa tesi non si limita a fornire una descrizione accurata dei fenomeni vulcanici in Islanda e Antartide, ma si estende alla comprensione più profonda delle loro dinamiche fisiche e delle loro conseguenze su scala globale. Gli obiettivi specifici si concentrano sullo studio delle dinamiche magmatiche, sull'analisi energetica e termodinamica, sulla comparazione tra ambienti vulcanici estremi e sull'individuazione degli impatti ambientali e climatici, con l'intento di contribuire in modo significativo alla conoscenza scientifica e alla gestione dei fenomeni naturali estremi.

RILEVANZA SCIENTIFICA E METODOLOGIE UTILIZZATE

La rilevanza scientifica di questa ricerca risiede nell'approfondimento di una delle tematiche più complesse e interdisciplinari delle scienze naturali: lo studio dei fenomeni vulcanici estremi e delle loro implicazioni fisiche, ambientali e climatiche. Il vulcanismo è un elemento cruciale nella comprensione della Terra, poiché i processi che regolano l'attività vulcanica influenzano non solo la struttura interna del pianeta, ma anche la sua superficie e l'atmosfera. L'analisi comparativa tra due contesti estremi come l'Islanda e l'Antartide permette di esplorare le diverse modalità con cui il vulcanismo si manifesta e interagisce con ambienti opposti, fornendo così una visione integrata e innovativa delle dinamiche terrestri.

L'Islanda, con la sua intensa attività vulcanica legata alla dorsale medio-atlantica e alla presenza di un punto caldo, rappresenta un laboratorio naturale unico per lo studio di eruzioni esplosive ed effusive. Le caratteristiche geologiche dell'isola consentono di osservare in tempo reale la dinamica dei flussi magmatici e i fenomeni termodinamici che li accompagnano, offrendo una base empirica solida per l'elaborazione di modelli fisici. Al contrario, l'Antartide presenta un vulcanismo meno visibile ma altrettanto significativo, dove l'interazione tra magma e ghiaccio genera processi unici e poco conosciuti, come la fusione subglaciale, la formazione di laghi nascosti e il rilascio di gas nell'atmosfera. Studiare questi fenomeni contribuisce a colmare le lacune nella comprensione delle interazioni tra vulcanismo e criosfera, un ambito di ricerca cruciale in un'epoca di rapido cambiamento climatico.

La metodologia adottata in questa ricerca si fonda su un approccio interdisciplinare, che integra un'analisi teorica accoppiata alla revisione critica della letteratura scientifica. Un elemento centrale del metodo utilizzato è lo studio e l'analisi delle eruzioni significative in Islanda e in Antartide. Questi studi sono stati elaborati per identificare pattern ricorrenti e differenze chiave tra i due contesti. Inoltre, l'utilizzo di tecnologie satellitari ha permesso di monitorare le emissioni vulcaniche, le variazioni topografiche e gli effetti atmosferici in modo continuo e dettagliato. I risultati ottenuti da tali tecniche si sono rivelati particolarmente utili per lo studio dei vulcani subglaciali, dove l'accesso diretto è spesso limitato.

Infine, il lavoro si avvale di una prospettiva comparativa, che non solo confronta i fenomeni vulcanici nei due contesti, ma li colloca anche in una cornice globale, valutandone le implicazioni climatiche e ambientali. Pertanto, la rilevanza scientifica di questo approccio risiede nella sua capacità di affrontare questioni fondamentali legate ai rischi vulcanici, al cambiamento climatico e alla resilienza degli ecosistemi, offrendo nuovi strumenti per la gestione e la mitigazione degli effetti dei fenomeni naturali estremi.

CAPITOLO 1

FISICA DEI FENOMENI VULCANICI

1.1 Dinamica dei flussi magmatici

La dinamica dei flussi magmatici rappresenta uno degli aspetti più complessi e rilevanti della vulcanologia, poiché coinvolge processi fisici e chimici strettamente interconnessi che governano il comportamento del magma dal suo accumulo in profondità fino alla sua eventuale eruzione in superficie. Il magma è una miscela eterogenea composta da una fase liquida, una fase solida costituita da cristalli sospesi e una fase gassosa contenente volatili come acqua, anidride carbonica, zolfo e altri composti. La sua origine si colloca principalmente nel mantello terrestre, dove la fusione parziale delle rocce avviene a seguito di cambiamenti nelle condizioni di pressione, temperatura e composizione chimica. La dinamica del magma è influenzata da variabili quali la viscosità, la densità, la temperatura e la presenza di gas disciolti, ognuna delle quali gioca un ruolo cruciale nella determinazione del comportamento magmatico¹.

La viscosità del magma è una delle proprietà fondamentali che controllano il suo movimento. Essa dipende dalla composizione chimica del magma, dal contenuto di silice e dalla temperatura. Magmi ricchi di silice, come quelli riolitici, presentano una viscosità molto elevata, che ostacola la risalita e favorisce l'accumulo in camere

¹ Carapezza M. *Molti fuochi ardono sotto il suolo. Di terremoti, vulcani e statue*. Sellerio Editore Palermo, Palermo, 2017, p. 22-23.

magmatiche². Al contrario, magmi basaltici, caratterizzati da un contenuto di silice inferiore, sono meno viscosi e fluiscono più facilmente. La temperatura esercita un'influenza significativa sulla viscosità: temperature più alte tendono a ridurre la resistenza al flusso, mentre il raffreddamento progressivo durante la risalita aumenta la viscosità del magma. La presenza di gas disciolti, come acqua e anidride carbonica, diminuisce temporaneamente la viscosità, ma la loro exsoluzione durante la risalita genera bolle che possono alterare le proprietà reologiche del magma e aumentare la sua tendenza all'esplosività³ (Fig. 1).

Properties of Magma Bodies with Differing Compositions						
Composition	Silica Content (SiO ₂)	Gas Content (% by weight)	Eruptive Temperature	Viscosity	Tendency to Form Pyroclastics	Volcanic Landform
Basaltic (MAFIC) High in Fe, Mg, Ca, low in K, Na	Least (~50%)	Least (0.5–2%)	Highest 1000–1250°C	Least	Least	Shield volcanoes, basalt plateaus, cinder cones
Andesitic (INTERMEDIATE) Varying amounts of Fe, Mg, Ca, K, Na	Intermediate (~60%)	Intermediate (3–4%)	Intermediate 800–1050°C	Intermediate	Intermediate	Composite cones
Rhyolitic (FELSIC) High in K, Na, low in Fe, Mg, Ca	Most (~70%)	Most (5–8%)	Lowest 650–900°C	Greatest	Greatest	Pyroclastic flow deposits, lava domes

Figura 1: Proprietà e classificazione dei magmi (Physics Forums, *What are the different types of volcanoes and how are they formed?*)

Un altro fattore cruciale nella dinamica dei flussi magmatici è la densità relativa tra il magma e le rocce incassanti. Il magma è generalmente meno denso delle rocce sovrastanti, una caratteristica che favorisce la sua risalita verso la superficie

² Mugnos S. *Vulcani. Così il pianeta cambia pelle*. Hoepli, Milano, 2019, p. 38.

³ Ivi, p. 40.

attraverso il meccanismo della spinta di galleggiamento. Tuttavia, la presenza di strati rocciosi con proprietà meccaniche differenti può modificare il percorso del magma, creando intrusioni come dicchi, laccoliti o *sills*, che rappresentano accumuli di magma all'interno della crosta terrestre. L'interazione con fratture preesistenti nella crosta gioca un ruolo fondamentale, poiché le fratture facilitano la formazione di canali di risalita per il magma. La velocità con cui il magma risale dipende dalla permeabilità delle rocce, dalla pressione magmatica interna e dall'entità dei gradienti di pressione generati dalla spinta di galleggiamento⁴.

Durante la risalita, il magma è soggetto a processi di differenziazione chimica, come la cristallizzazione frazionata, che alterano la sua composizione originale. Questo processo avviene quando i minerali cristallizzano e si separano dal magma residuo, lasciando una fase liquida arricchita in elementi incompatibili. La cristallizzazione rilascia calore latente, che influisce sulle proprietà termodinamiche del sistema magmatico. In parallelo, il degassamento, ovvero il rilascio di volatili disciolti, modifica sia la pressione interna del magma sia le condizioni fisiche che governano il flusso (Fig. 2).

⁴ Cuccurullo G. *Elementi di termodinamica e trasmissione del calore. Con prime applicazioni agli impianti termotecnici*. Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2020, p. 100.

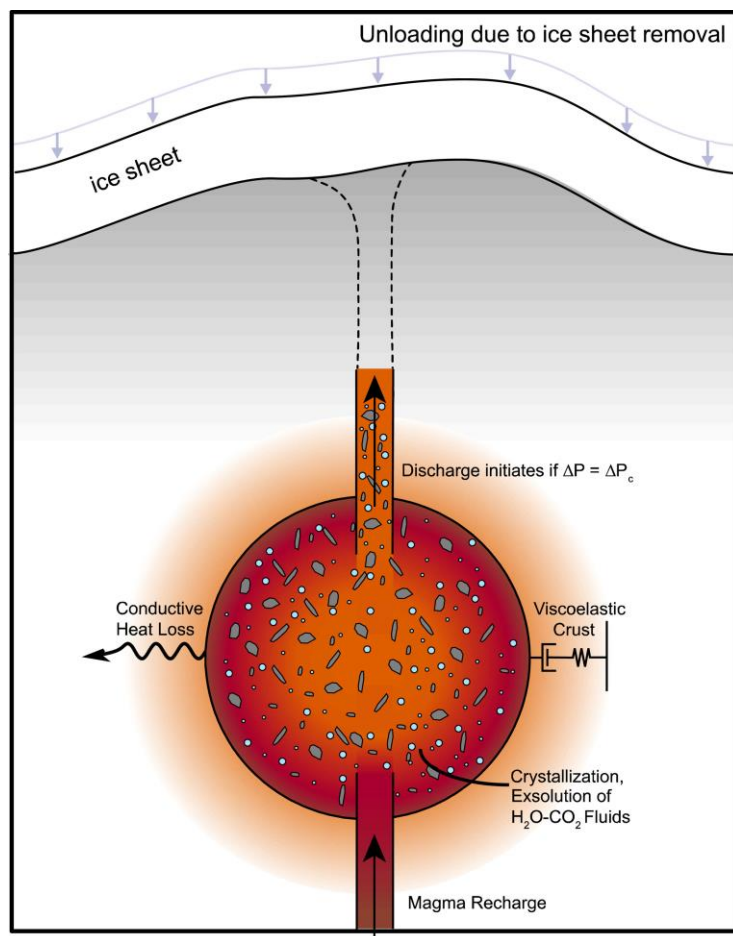


Figura 2: Fenomeno della cristallizzazione ed essoluzione durante la risalita del magma (Techno-Science, Depond C., *The awakening of volcanoes beneath Antarctica's ice threatens our planet*)

Il degassamento rapido durante una risalita veloce può intrappolare bolle di gas, aumentando la pressione e favorendo eruzioni esplosive, mentre una risalita più lenta consente al magma di degassare gradualmente, riducendo l'esplosività⁵.

Le camere magmatiche, che fungono da serbatoi temporanei per il magma, influenzano profondamente la dinamica dei flussi magmatici. La loro posizione, dimensione e interconnessione determinano la velocità di ricarica e la natura delle

⁵ Carapezza M. *Molti fuochi ardono sotto il suolo. Di terremoti, vulcani e statue*, op. cit., pp. 68-69.

eruzioni vulcaniche. Studi recenti hanno dimostrato che le camere magmatiche profonde sono spesso collegate a serbatoi superficiali attraverso sistemi complessi di condotti magmatici. Questi condotti agiscono come canali di trasporto per il magma, ma possono anche fungere da zone di accumulo temporaneo, dove il magma subisce ulteriori modifiche composizionali e termiche prima di raggiungere la superficie. Il riempimento e il drenaggio ciclico delle camere magmatiche causano fenomeni geofisici osservabili, come il bradisismo, che è stato ampiamente studiato nei Campi Flegrei e in altre aree vulcaniche attive⁶.

Un aspetto interessante della dinamica magmatica riguarda le interazioni tra magma e acqua. Quando il magma entra in contatto con l'acqua superficiale o sotterranea, si generano processi altamente energetici, come le eruzioni freatomagmatiche. Questi eventi, caratterizzati da esplosioni violente, si verificano quando l'acqua viene rapidamente vaporizzata dal calore del magma, generando una pressione sufficiente a frammentare il materiale circostante. (Fig. 3) Inoltre, l'interazione tra magma e ghiaccio, osservata in contesti come l'Islanda e l'Antartide, produce ulteriori complessità termodinamiche, con la formazione di pennacchi di vapore e il rilascio di gas nell'atmosfera. Tali fenomeni hanno implicazioni significative per il bilancio energetico globale e per la comprensione delle dinamiche vulcaniche in ambienti estremi⁷.

⁶ Carapezza M. *Molti fuochi ardono sotto il suolo. Di terremoti, vulcani e statue*, op. cit., p. 71.

⁷ Rota R. *Fondamenti di termodinamica dell'ingegneria chimica*. Bonomo, Bologna, 2023, pp. 14-15.

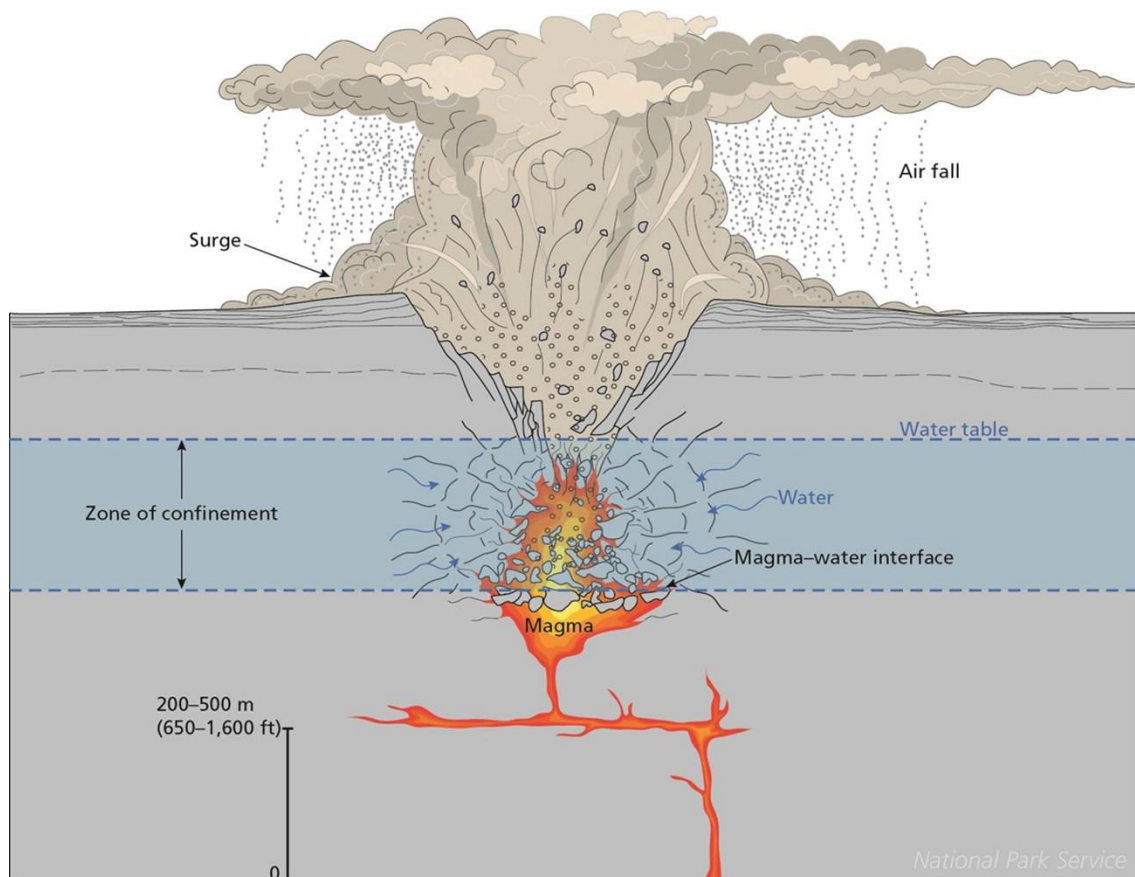


Figura 3: Esempio di un'eruzione freatomagmatica (National Park Service, *Maars and Tuff Rings*)

In conclusione, la dinamica dei flussi magmatici è governata da un insieme di processi fisici e chimici interconnessi che determinano il comportamento del magma lungo tutto il suo percorso, dalla formazione nel mantello alla sua eruzione in superficie⁸. La comprensione di questi meccanismi è essenziale non solo per approfondire le conoscenze geofisiche fondamentali, ma anche per migliorare le capacità di previsione e mitigazione dei rischi vulcanici, che rappresentano una minaccia per le popolazioni umane e gli ecosistemi in tutto il mondo.

⁸ Mugnos S. *Vulcani. Così il pianeta cambia pelle*, op. cit., p. 55.

1.2 Impatti energetici e termodinamici

Gli impatti energetici e termodinamici associati ai flussi magmatici sono determinanti per comprendere le trasformazioni geologiche e ambientali che si verificano durante l'attività vulcanica⁹. La risalita del magma rappresenta un processo ad altissimo contenuto energetico, in cui enormi quantità di calore vengono trasferite dal mantello e dalla crosta profonda verso la superficie terrestre. Questo trasferimento di energia avviene attraverso un complesso equilibrio tra conduzione, convezione e radiazione termica. La capacità del magma di trasferire calore dipende dalle sue proprietà fisiche, inclusi viscosità, densità e composizione chimica, così come dalla natura delle rocce incassanti e dalle condizioni ambientali circostanti¹⁰.

Uno degli aspetti più significativi riguarda il ruolo del calore latente rilasciato durante i processi di cristallizzazione frazionata del magma. Questo fenomeno, che avviene prevalentemente all'interno delle camere magmatiche, comporta un incremento della temperatura delle rocce circostanti, che possono subire processi di metamorfismo termico. Tali trasformazioni chimiche e strutturali influenzano non solo la composizione delle rocce stesse, ma anche le loro proprietà meccaniche, alterando il comportamento delle faglie e la dinamica dei condotti magmatici. Inoltre, l'energia termica liberata dai flussi magmatici contribuisce alla generazione di campi geotermici, particolarmente rilevanti in regioni vulcanicamente attive come l'Islanda. Questi campi geotermici costituiscono una

⁹ Sen P. *Il frigorifero di Einstein. Come la differenza tra caldo e freddo spiega l'universo*. Bollati Boringhieri, Torino, 2021, pp. 83-84.

¹⁰ Cuccurullo G. *Elementi di termodinamica e trasmissione del calore. Con prime applicazioni agli impianti termotecnici*, op. cit., p. 148.

risorsa naturale di grande valore, utilizzata per la produzione di energia sostenibile¹¹.

Un altro aspetto fondamentale è rappresentato dall'interazione tra i flussi magmatici e i fluidi presenti nella crosta terrestre. Quando il magma entra in contatto con acqua sotterranea o superficiale, si sviluppano processi ad alta intensità energetica, come esplosioni freatomagmatiche o la formazione di geysir. Questi fenomeni sono il risultato del rapido trasferimento di calore dal magma all'acqua, che causa l'espansione improvvisa del vapore e la generazione di pressioni elevate. Le esplosioni freatomagmatiche, in particolare, sono caratterizzate da una violenta frammentazione del magma e delle rocce circostanti, che produce nuvole di cenere e lapilli con impatti significativi sull'atmosfera e sugli ecosistemi locali. Questi eventi possono inoltre contribuire alla modifica della topografia, creando crateri di esplosione e depositi vulcanoclastici di notevole spessore¹².

La termodinamica dei flussi magmatici si manifesta anche attraverso la formazione e il comportamento delle bolle gassose. Durante la risalita, la riduzione della pressione favorisce l'essoluzione dei volatili disciolti, portando alla formazione di bolle. La coalescenza e la crescita di queste bolle influenzano profondamente la reologia del magma, modificandone la viscosità e la velocità di risalita. Le bolle di gas, se accumulate in quantità significativa, possono agire come motore per eruzioni esplosive, rilasciando energia in modo rapido e violento. Studi recenti sulla fisica delle bolle nei sistemi magmatici hanno evidenziato come il loro

¹¹ Sen P. *Il frigorifero di Einstein. Come la differenza tra caldo e freddo spiega l'universo*, op. cit., pp. 94-96.

¹² Carapezza M. *Molti fuochi ardono sotto il suolo. Di terremoti, vulcani e statue*, op. cit., p. 115.

comportamento sia regolato da un delicato equilibrio tra tensione superficiale, viscosità del magma e gradienti di pressione, elementi che determinano il tipo di eruzione che si verifica¹³.

Gli impatti energetici e termodinamici non si limitano alla dinamica interna dei flussi magmatici, ma si estendono agli effetti sull'atmosfera terrestre. Le grandi eruzioni vulcaniche rilasciano nell'atmosfera enormi quantità di calore, insieme a particelle solide e gas come anidride solforosa e anidride carbonica. L'anidride solforosa, in particolare, reagisce nell'atmosfera formando aerosol di solfato, che riflettono la radiazione solare e possono causare un raffreddamento temporaneo del clima globale. Questo fenomeno, noto come "effetto ombrello," è stato osservato in seguito a eruzioni storiche come quella del Tambora nel 1815 e del Pinatubo nel 1991 (Fig. 4). Al contrario, l'emissione di anidride carbonica contribuisce all'effetto serra, amplificando il riscaldamento globale nel lungo termine. La modellazione termodinamica di questi processi è essenziale per prevedere gli impatti climatici delle eruzioni vulcaniche e per comprendere le interazioni tra vulcanismo e cambiamenti climatici¹⁴.

¹³ Carapezza M. *Molti fuochi ardono sotto il suolo. Di terremoti, vulcani e statue*, op. cit., p. 115.

¹⁴ Rota R. *Fondamenti di termodinamica dell'ingegneria chimica*, op. cit., pp. 44-46.

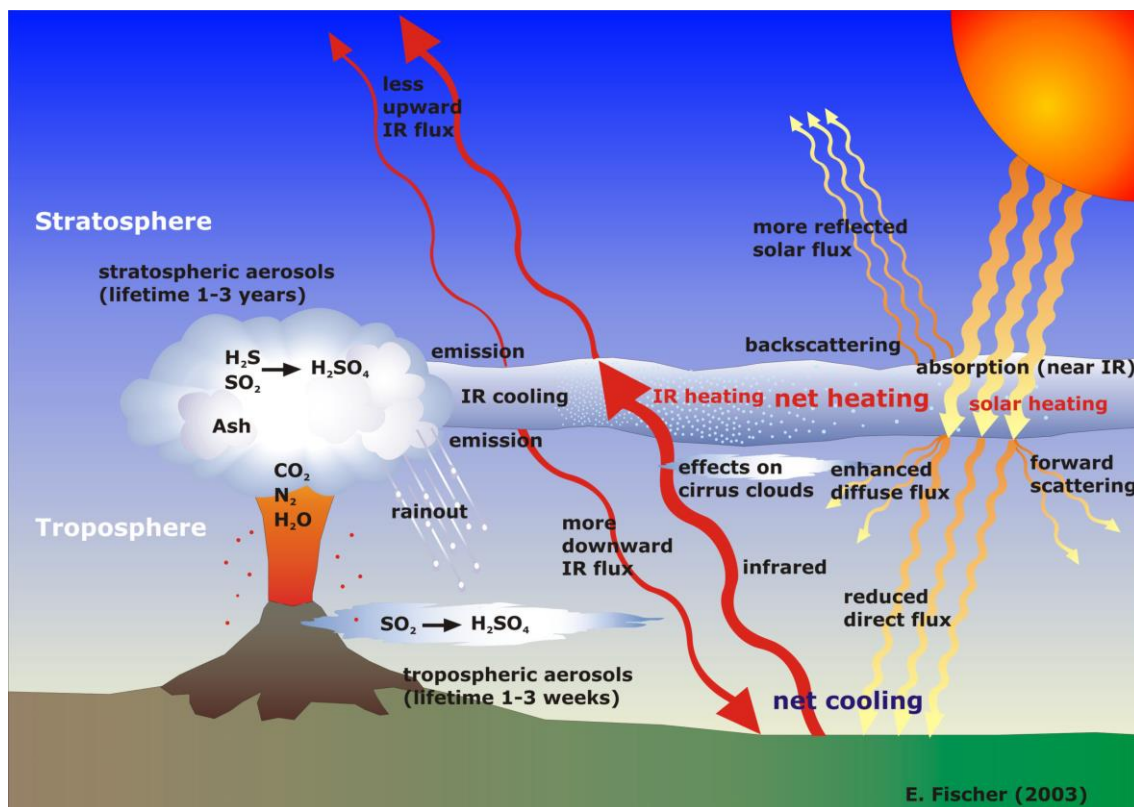


Figura 4: Effetti atmosferici dell'eruzione del Tambora nel 1815 (ScienceSmith, *The Eruption of Mount Tambora 1815-1818*)

Un ulteriore ambito di rilevanza scientifica riguarda l'interazione tra flussi magmatici e ghiaccio in contesti glaciali o subglaciali, come quelli osservati in Islanda e in Antartide. In questi ambienti estremi, il calore del magma provoca la fusione del ghiaccio sovrastante, generando grandi quantità di acqua che possono innescare inondazioni catastrofiche, conosciute come *jökulhlaups*. Questi fenomeni, caratterizzati da un rilascio improvviso e massiccio di acqua, rappresentano un rischio significativo per le aree circostanti e modificano la morfologia dei paesaggi glaciali. Inoltre, il rilascio di vapore acqueo e gas vulcanici durante queste

interazioni contribuisce alla formazione di pennacchi atmosferici, con implicazioni per la dispersione delle ceneri e la qualità dell'aria¹⁵.

La comprensione degli impatti energetici e termodinamici dei flussi magmatici richiede un approccio multidisciplinare, che integri conoscenze di fisica, chimica, geologia e scienze ambientali¹⁶. L'utilizzo di tecnologie avanzate, come la tomografia sismica e le simulazioni numeriche ad alta risoluzione, consente di analizzare con maggiore dettaglio le interazioni tra i processi magmatici e l'ambiente. La combinazione di dati sperimentali, osservazioni sul campo e modelli teorici permette di sviluppare previsioni più accurate sul comportamento dei sistemi magmatici, contribuendo alla mitigazione dei rischi vulcanici e alla gestione sostenibile delle risorse energetiche associate. Gli impatti termodinamici del magma non si limitano quindi al breve termine, ma esercitano un'influenza duratura sull'evoluzione geologica e climatica del pianeta, rendendoli un tema centrale nella ricerca scientifica contemporanea.

¹⁵ Mugnos S. *Vulcani. Così il pianeta cambia pelle*, op. cit., p. 79.

¹⁶ Carapezza M. *Molti fuochi ardono sotto il suolo. Di terremoti, vulcani e statue*, op. cit., p. 131.

CAPITOLO 2

VULCANISMO ESTREMO IN ISLANDA

2.1. Caratteristiche geologiche

L'Islanda rappresenta uno dei luoghi più affascinanti al mondo dal punto di vista geologico, una terra che si erge letteralmente al confine tra due placche tettoniche, la nordamericana e l'euroasiatica¹⁷. Questo particolare posizionamento rende l'isola un laboratorio naturale per lo studio del vulcanismo estremo, dove le caratteristiche geologiche uniche si combinano con una frequente attività vulcanica. Il territorio islandese è infatti solcato da una dorsale medio-oceanica che emerge in superficie, permettendo agli scienziati di osservare processi che, altrove, si verificano in profondità sotto gli oceani¹⁸ (Fig. 5).

¹⁷ Giacomelli L. e C. Pesaresi. *Vulcani nel mondo. Viaggio visuale tra rischi e risorse*. Franco Angeli, Milano, 2019, pp. 39-40.

¹⁸ Ivi, p. 41.

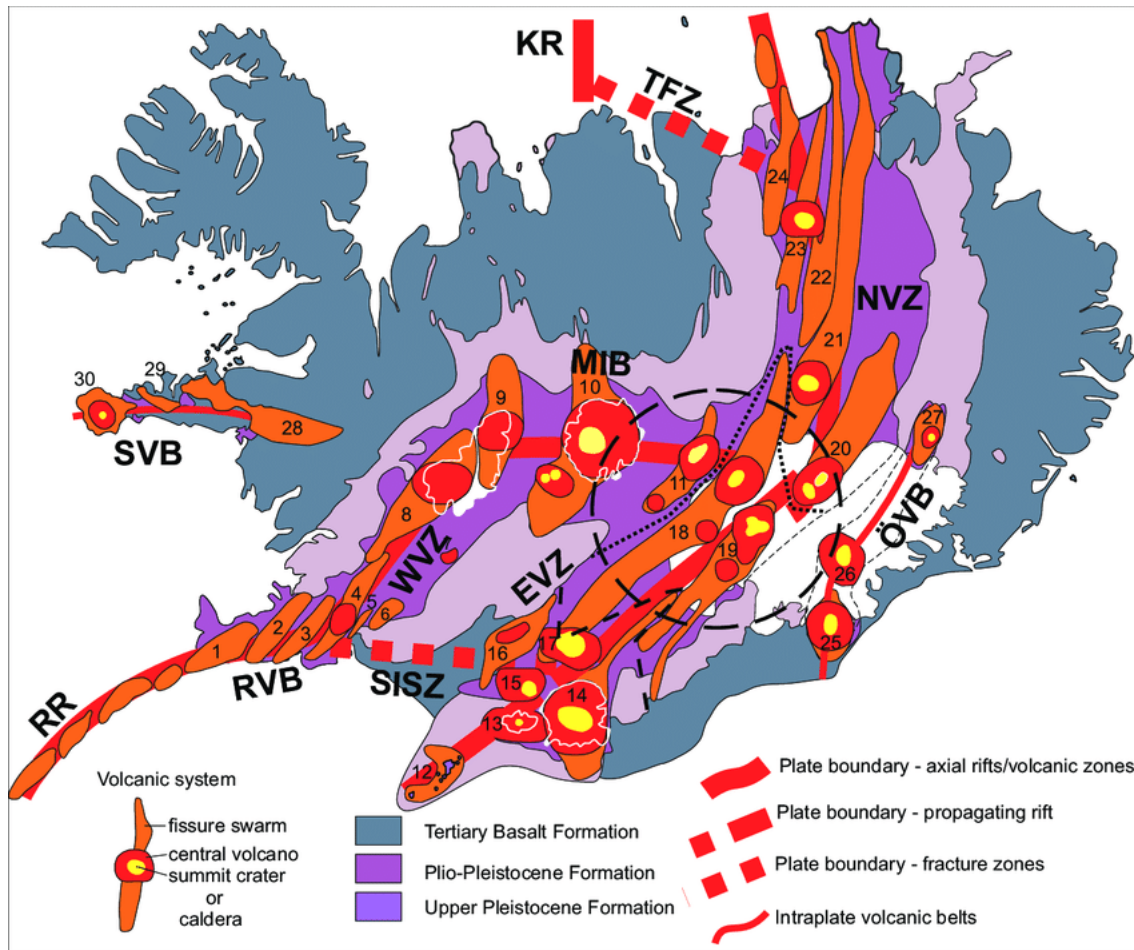


Figura 5: Mappa dell'Islanda che ne evidenzia i principali sistemi vulcanici

(ResearchGate, Thordarson T., *Postglacial volcanism in Iceland*)

Il substrato geologico dell'Islanda è dominato dalla presenza di rocce basaltiche, tipiche delle regioni vulcaniche. Queste rocce si formano dal raffreddamento rapido del magma che sgorga dalle fratture nella crosta terrestre. A causa della sua composizione chimica, il basalto islandese è particolarmente ricco di ferro e magnesio, conferendo alle colate laviche un colore scuro e una notevole densità. Questo tipo di roccia, insieme ai flussi di lava che si accumulano in strati successivi,

ha contribuito a modellare le vaste pianure laviche e i paesaggi frastagliati dell'isola¹⁹.

Uno degli aspetti più impressionanti del vulcanismo islandese è la varietà di fenomeni vulcanici presenti. Tra questi, si possono annoverare i vulcani a scudo, come quelli che si trovano nel sistema vulcanico di Katla, caratterizzati da eruzioni effusive che producono flussi di lava vasti e relativamente tranquilli. Allo stesso tempo, l'Islanda è nota per i suoi stratovulcani, come l'Hekla, la cui attività esplosiva può generare colonne di cenere che raggiungono decine di chilometri di altezza. Le eruzioni esplosive, che rilasciano quantità significative di materiale piroclastico, sono spesso il risultato della presenza di acqua che entra in contatto con il magma, un fenomeno favorito dalla vicinanza dell'isola all'Oceano Atlantico.

Il ruolo delle faglie e delle fratture nella formazione del paesaggio islandese è altrettanto significativo. Le continue spinte divergenti delle placche tettoniche causano l'apertura di nuove fratture, da cui fuoriesce magma che, raffreddandosi, aggiunge nuova crosta terrestre al margine della dorsale medio-oceanica. Questo processo continuo di accrescimento crostale ha portato alla formazione di sistemi vulcanici complessi, come quello di Laki, noto per una delle eruzioni più devastanti nella storia moderna. L'eruzione di Laki, avvenuta nel 1783, ha avuto effetti globali, con la produzione di una quantità eccezionale di gas solforosi che hanno influenzato il clima dell'emisfero settentrionale per anni²⁰.

Le caratteristiche idrotermali dell'Islanda, strettamente legate alla sua attività vulcanica, rappresentano un ulteriore elemento distintivo. I geyser, come il celebre

¹⁹ Mugnos S. *Vulcani. Così il pianeta cambia pelle*, op. cit., p. 105.

²⁰ Dumas A. *Elementi di fluidodinamica e termocinetica*. CLUT, Torino, 2024, p. 97.

Strokkur, sono alimentati dall'acqua piovana che penetra nel sottosuolo, dove viene riscaldata dal magma sottostante fino a trasformarsi in vapore ad alta pressione. Quando la pressione supera un determinato limite, il vapore viene espulso violentemente verso l'alto, creando spettacolari getti d'acqua che possono raggiungere altezze considerevoli. Anche le sorgenti termali, come quelle della regione di Landmannalaugar, sono un prodotto dell'interazione tra il magma e le falde acquifere, offrendo un chiaro esempio della stretta connessione tra la geologia vulcanica e le risorse naturali²¹.

Un altro fenomeno geologico che merita attenzione è la formazione delle caldere vulcaniche, ampie depressioni circolari che si formano quando un vulcano collassa su sé stesso dopo un'eruzione particolarmente violenta. Un esempio significativo è la caldera del Katla, che si trova sotto il ghiacciaio Mýrdalsjökull (Fig. 6). Questo sistema vulcanico rappresenta una delle principali fonti di rischio in Islanda, in quanto le eruzioni sotto i ghiacciai possono provocare massicce fusioni di ghiaccio, noti come *jökulhlaup*. Questi eventi catastrofici generano inondazioni improvvise che devastano le pianure circostanti, trasportando enormi quantità di detriti²².

²¹ Dumas A. *Elementi di fluidodinamica e termocinetica*. CLUT, Torino, 2024, p. 97.

²² Piccione L., *Il libro dei vulcani d'Islanda*, Iperborea, Milano, 2019, p. 47.

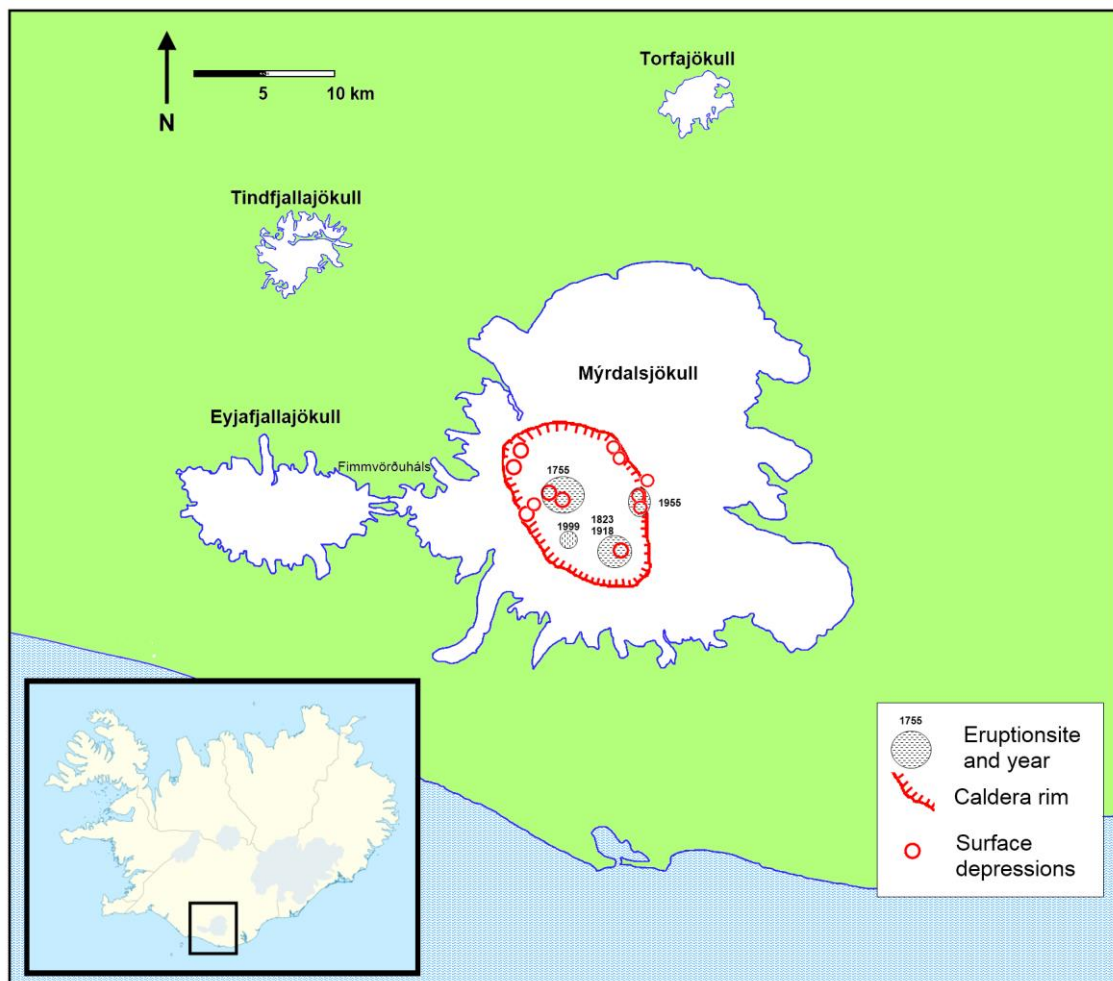


Figura 6: Mappa della caldera del Katla (Arctic Adventures, *Is Katla Volcano Erupting?*)

Inoltre, l'interazione tra vulcanismo e glaciazione ha dato origine a paesaggi unici, come le montagne tabulari chiamate *tuya*, che si formano quando un vulcano erutta al di sotto di uno spesso strato di ghiaccio. Queste formazioni, caratterizzate da cime piatte e pendii ripidi, sono evidenti testimonianze delle ere glaciali che hanno modellato l'Islanda nei millenni.

La continua attività vulcanica, combinata con il clima rigido e l'isolamento geografico, rende l'Islanda un luogo in cui i processi geofisici possono essere

studiati in un ambiente privo di contaminazioni. Ogni eruzione, ogni nuova faglia che si apre, contribuisce non solo a plasmare il paesaggio, ma anche a fornire preziosi dati scientifici. Questo fa dell'Islanda una vera e propria frontiera per la ricerca vulcanologica, un luogo dove il passato geologico e il presente dinamico si fondono in un'esperienza unica, scolpendo la terra con la forza primordiale del magma.

2.2. Eruzioni significative e loro analisi fisica

L'Islanda, con il suo straordinario contesto geologico, è stata teatro di alcune delle eruzioni vulcaniche più significative della storia moderna. Ogni evento eruttivo è unico per dinamiche fisiche, composizione chimica del magma e impatti sul paesaggio e sul clima globale. Tra i fenomeni vulcanici di maggiore rilievo, si annoverano le eruzioni del sistema di Bárðarbunga, Eyjafjallajökull e Grímsvötn, ognuna caratterizzata da specificità fisiche che meritano un'analisi dettagliata²³.

L'eruzione del Bárðarbunga nel 2014-2015 ha rappresentato un esempio imponente di attività effusiva in Islanda. Questo evento ha avuto origine in un sistema vulcanico complesso, caratterizzato da una caldera collassata e da numerose fratture radiali (Fig. 7). L'eruzione, preceduta da migliaia di terremoti che segnalavano la risalita del magma, ha prodotto una vasta colata di lava basaltica, estendendosi per oltre 85 chilometri quadrati. Uno degli aspetti fisici più interessanti di questa eruzione è stato il comportamento del magma durante la risalita²⁴. La viscosità relativamente bassa, dovuta all'elevata temperatura e alla

²³ Giacomelli L. e C. Pesaresi. *Vulcani nel mondo. Viaggio visuale tra rischi e risorse*, op. cit., p. 65.

²⁴ Mugnos S. *Vulcani. Così il pianeta cambia pelle*, op. cit., p. 126.

bassa concentrazione di silice, ha permesso al magma di fluire rapidamente, creando ampie distese di lava pahoehoe, caratterizzate da superfici lisce e ondulate. Questo tipo di lava, comune nelle eruzioni islandesi, contrasta con le colate più viscosi che si osservano in vulcani andini, dimostrando come la chimica del magma influenzi profondamente la morfologia delle eruzioni.



Figura 7: Eruzione del vulcano Bárðarbunga, nel 2014 (Wikipedia, *Bárðarbunga*)

Un altro elemento distintivo del Bárðarbunga è stato il rilascio di gas vulcanici, in particolare anidride solforosa. Le stime indicano che oltre 11 milioni di tonnellate di questo gas furono emesse nell'atmosfera, influenzando la qualità dell'aria in Islanda e in altre regioni dell'Europa settentrionale. Questo fenomeno ha offerto agli scienziati l'opportunità di studiare i meccanismi di dispersione atmosferica e il ruolo del vulcanismo nel ciclo globale dello zolfo. L'effetto sul clima, pur non

paragonabile a quello di eruzioni storicamente più esplosive, ha comunque generato un temporaneo raffreddamento locale, evidenziando la complessa interazione tra i gas vulcanici e l'ambiente atmosferico²⁵.

Un evento eruttivo che ha avuto un impatto particolarmente significativo sul traffico aereo globale è stato quello dell'Eyjafjallajökull nel 2010. L'eruzione di questo vulcano subglaciale ha evidenziato le complesse interazioni tra magma e ghiaccio, un tema centrale per il vulcanismo islandese. Quando il magma basaltico ha incontrato la base del ghiacciaio sovrastante, il rapido raffreddamento ha causato la frammentazione violenta del materiale, generando ceneri vulcaniche estremamente fini²⁶. Questo materiale piroclastico, composto principalmente da frammenti di vetro vulcanico, si è diffuso nell'atmosfera a causa delle forti correnti ascensionali e della turbolenza associata al pennacchio eruttivo. La granulometria delle particelle, combinata con l'altezza della colonna di cenere che ha raggiunto circa 10 chilometri, ha portato alla loro lunga permanenza in sospensione nell'atmosfera (Fig. 8).

²⁵ Piccione L., *Il libro dei vulcani d'Islanda*, op. cit., pp. 84-85.

²⁶ Ibidem.

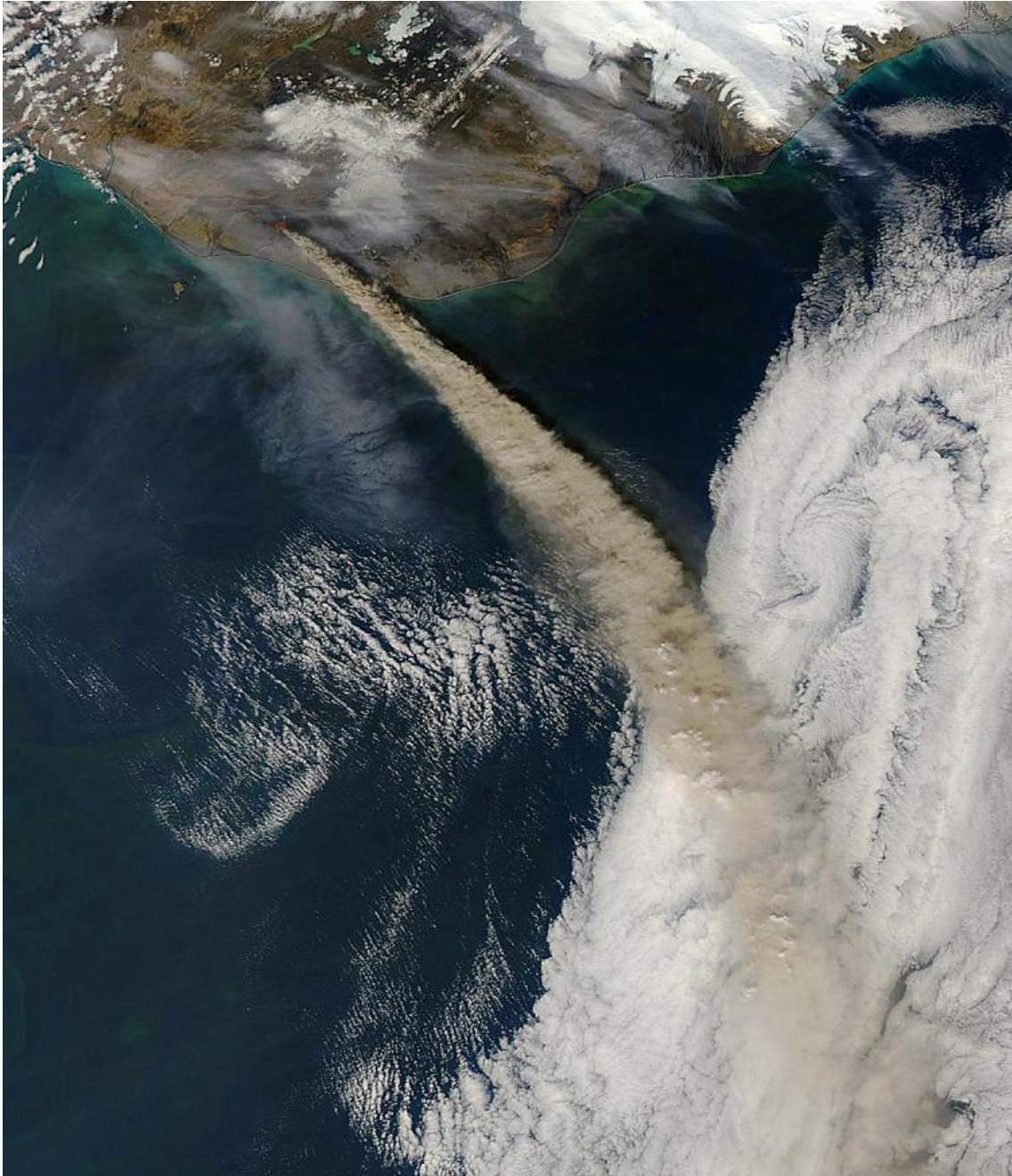


Figura 8: Foto satellitare della colonna di ceneri del Eyjafjallajökull nel 2010 (NASA Earth Observatory, *Eruption of Eyjafjallajökull Volcano, Iceland*)

Dal punto di vista fisico, la dispersione delle ceneri dell'Eyjafjallajökull ha seguito modelli atmosferici prevedibili ma complessi, fortemente influenzati dalla circolazione dei venti nella troposfera superiore (Fig. 9). Gli studi successivi hanno

evidenziato come la concentrazione di particelle e la loro composizione chimica abbiano avuto un impatto sulla sicurezza del volo, provocando la chiusura dello spazio aereo in gran parte dell'Europa. Questo evento ha inoltre permesso di migliorare i modelli predittivi per la dispersione delle ceneri vulcaniche, contribuendo a sviluppare protocolli di sicurezza più efficaci.

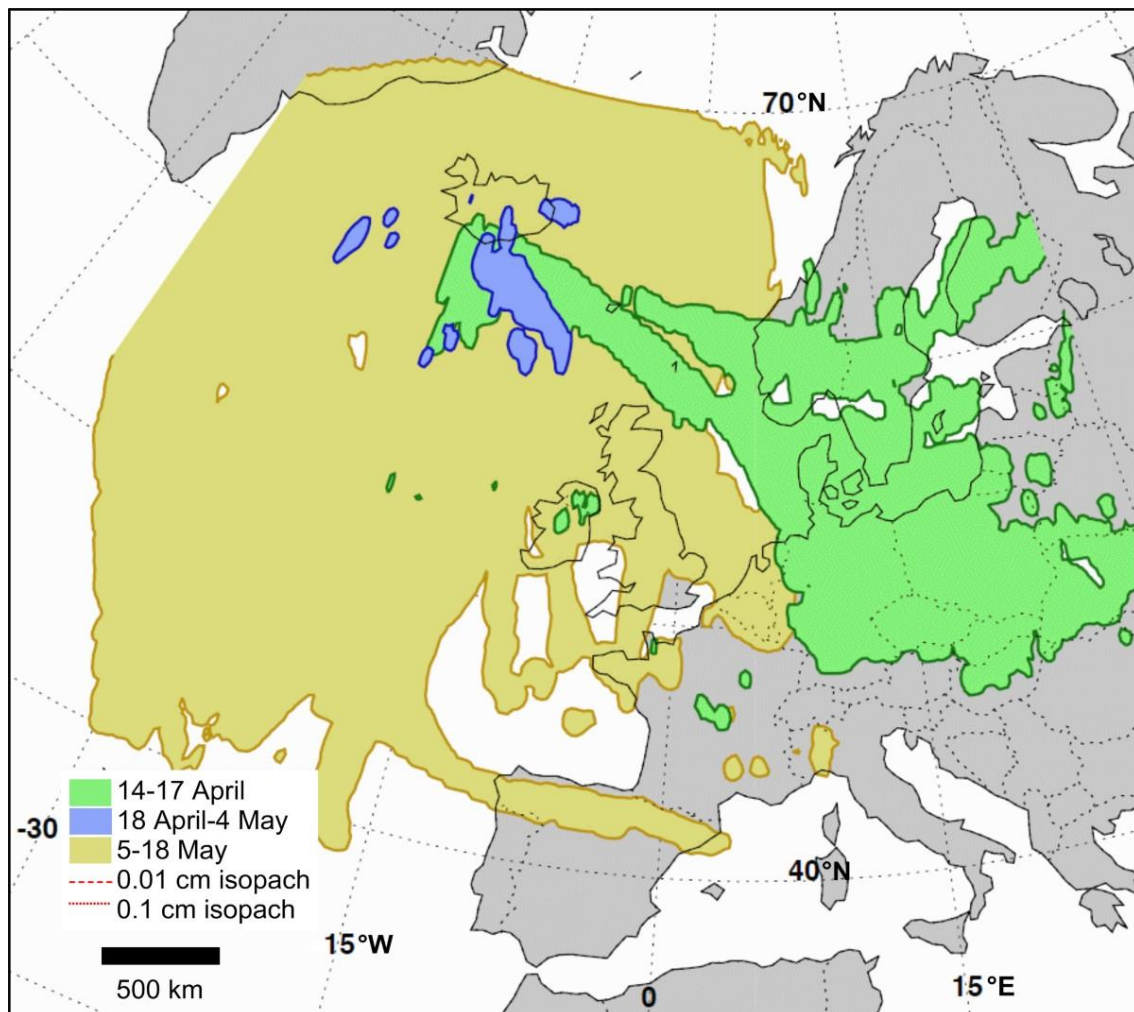


Figura 9: Modello di dispersione delle ceneri dell'Eyjafjallajökull nel 2010 (Nature, Gudmundsson M., Thordarson T., Höskuldsson Á., *Ash generation and distribution from the April-May 2010 eruption of Eyjafjallajökull, Iceland*)

Un altro esempio emblematico di eruzione esplosiva è quello del Grímsvötn nel 2011, uno dei vulcani più attivi dell'Islanda. Questo evento è stato caratterizzato da una rapida liberazione di energia, con la formazione di un pennacchio che ha raggiunto i 20 chilometri di altezza. La velocità con cui il magma ha interagito con l'acqua di fusione glaciale ha generato un'esplosione freatomagmatica, amplificando significativamente l'impatto dell'eruzione. Dal punto di vista chimico, il magma del Grímsvötn presentava un contenuto di silice leggermente superiore rispetto a quello di altri vulcani islandesi, contribuendo a una maggiore viscosità e a una più intensa frammentazione durante l'eruzione.

Un aspetto particolarmente significativo dell'eruzione del Grímsvötn è stata la sua capacità di influenzare le condizioni climatiche locali. L'enorme quantità di particelle rilasciate, inclusi solfati e particelle fini di vetro vulcanico, ha alterato temporaneamente l'albedo della regione, aumentando la riflettività della superficie terrestre e contribuendo a un lieve raffreddamento locale. Inoltre, la composizione dei gas vulcanici, dominata da anidride carbonica, diossido di zolfo e tracce di fluoruri, ha sollevato preoccupazioni sulla salute umana e animale nelle aree circostanti. La ricaduta di fluoruri nelle zone agricole ha rappresentato una minaccia diretta per il bestiame, evidenziando l'interconnessione tra eventi geofisici estremi e sistemi ecologici²⁷.

Un capitolo significativo della vulcanologia islandese è rappresentato dalle eruzioni storiche del Laki nel XVIII secolo. Sebbene non direttamente analizzata in precedenza, questa sequenza eruttiva è ancora oggi considerata un caso di studio fondamentale per comprendere le eruzioni fissurali di grande scala. Il sistema del

²⁷ Dumas A. *Elementi di fluidodinamica e termocinetica*, op. cit., p. 111.

Laki ha prodotto una serie di colate di lava che hanno coperto oltre 600 chilometri quadrati, accompagnate da un'enorme emissione di gas vulcanici, tra cui anidride solforosa e acido cloridrico. Questi gas, combinandosi con l'umidità atmosferica, hanno generato piogge acide che hanno devastato le colture agricole, portando a una carestia che ha decimato la popolazione islandese (Fig. 10).

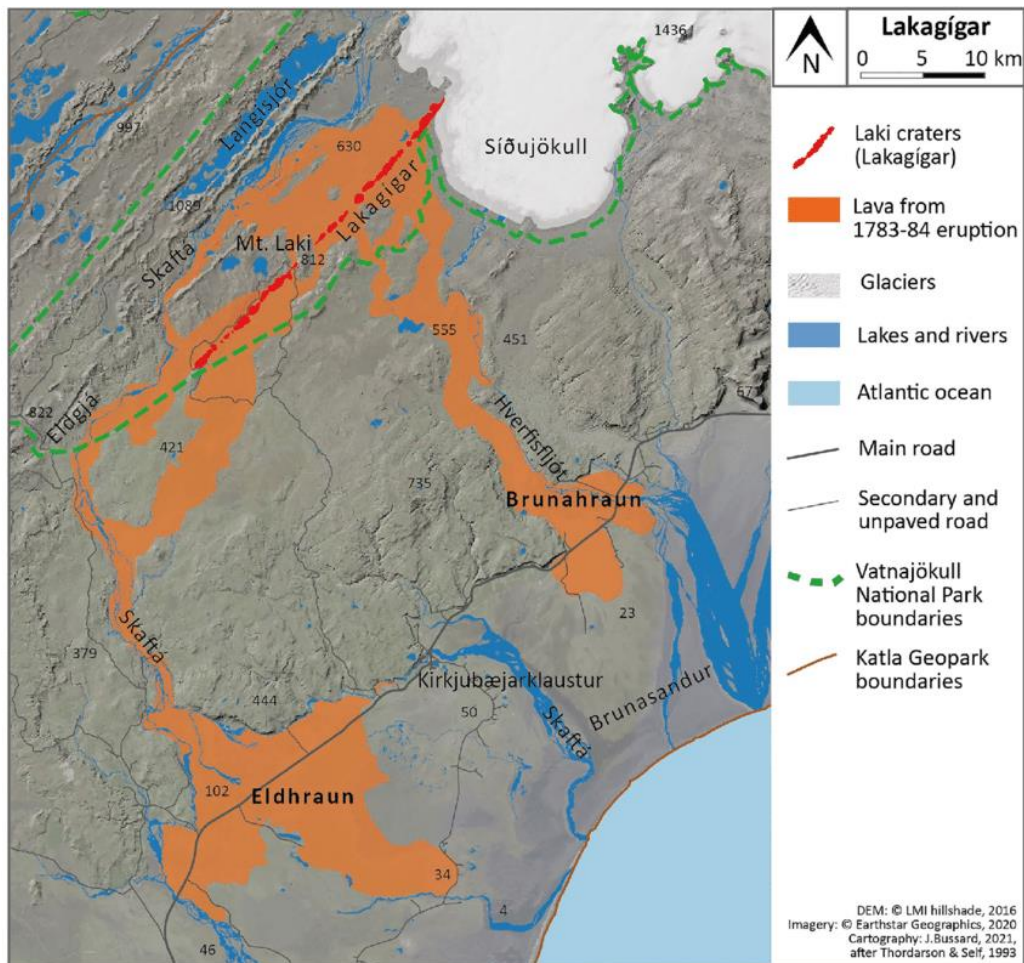


Figura 10: Mappa dei flussi lavici del Laki nell'eruzione del 1783-84 (ResearchGate, Bussard J., Reynard E., *Heritage Value and Stakeholders' Perception of Four Geomorphological Landscapes in Southern Iceland*)

Le analisi fisiche successive hanno rivelato che il flusso di lava era alimentato da un sistema di camere magmatiche superficiali interconnesse, il che ha permesso un rilascio prolungato e continuo del magma. La dinamica eruttiva, caratterizzata da un'alternanza tra effusioni di lava e violente esplosioni, è un esempio di come le eruzioni fissurali possano avere un impatto devastante non solo localmente ma anche a livello globale²⁸. Il raffreddamento atmosferico osservato negli anni successivi al Laki è attribuito alla dispersione degli aerosol solforosi nella stratosfera, che hanno ridotto l'insolazione a livello globale.

Questi eventi, analizzati nel loro contesto fisico e chimico, dimostrano come il vulcanismo islandese rappresenti una finestra unica sui processi geofisici che modellano il nostro pianeta, offrendo opportunità ineguagliabili per lo studio scientifico e la comprensione delle dinamiche terrestri.

²⁸ Mugnos S. *Vulcani. Così il pianeta cambia pelle*, op. cit., p. 139.

CAPITOLO 3

VULCANISMO ESTREMO IN ANTARTIDE

3.1. Vulcani subglaciali: processi fisici

Il vulcanismo estremo in Antartide costituisce un capitolo poco esplorato ma di fondamentale importanza per la comprensione dei processi geofisici in ambienti estremi, dove le condizioni climatiche e geografiche più ostili al mondo si intrecciano con fenomeni vulcanici di elevata complessità²⁹. I vulcani subglaciali dell'Antartide sono nascosti sotto spesse calotte di ghiaccio che in alcune regioni, come nella West Antarctic Ice Sheet, raggiungono uno spessore di oltre quattro chilometri. Questa condizione unica rende il vulcanismo antartico profondamente diverso da quello osservato in altre parti del mondo, come in Islanda o alle Hawaii, dove i vulcani sono spesso visibili in superficie (Fig. 11). L'interazione tra magma, ghiaccio e l'enorme pressione esercitata dalla calotta glaciale crea una serie di processi fisici straordinariamente complessi, con conseguenze non solo sul paesaggio subglaciale, ma anche sull'intero equilibrio del continente antartico e, indirettamente, sul sistema climatico globale³⁰.

²⁹ Giacomelli L. e C. Pesaresi. *Vulcani nel mondo. Viaggio visuale tra rischi e risorse*, op. cit., p. 115.

³⁰ Bianco F. *Grande atlante dei vulcani*. Libreria Geografica, Novara, 2024, pp. 33-35.



Figura 11: Ricostruzione 3D del sottosuolo antartico (EarthlyMission, *There Are Hunderds of Volcanoes Hiding Under Antarctica's Ice Sheet*)

Uno degli aspetti più rilevanti dei vulcani subglaciali antartici è rappresentato dai processi di fusione indotti dal magma. Quando il magma risale attraverso la crosta terrestre, il calore generato fonde il ghiaccio circostante, formando laghi subglaciali che possono rimanere stabili per lunghi periodi o drenarsi improvvisamente attraverso canali subglaciali. Questo fenomeno è particolarmente evidente nel caso del Monte Erebus, uno dei pochi vulcani attivi della regione antartica che emerge parzialmente in superficie, ma il cui sistema vulcanico si estende in profondità sotto il ghiaccio (Fig. 12). La fusione glaciale può produrre milioni di metri cubi di acqua in poche ore, generando inondazioni subglaciali note come *jökulhlaup*, un termine mutuato dal vulcanismo islandese. Tuttavia, in Antartide, tali fenomeni si verificano su scala ancora più ampia e in condizioni termodinamiche estreme, dove

la temperatura media del ghiaccio si mantiene ben al di sotto dello zero, rendendo il trasferimento di calore tra magma e ghiaccio particolarmente significativo³¹.

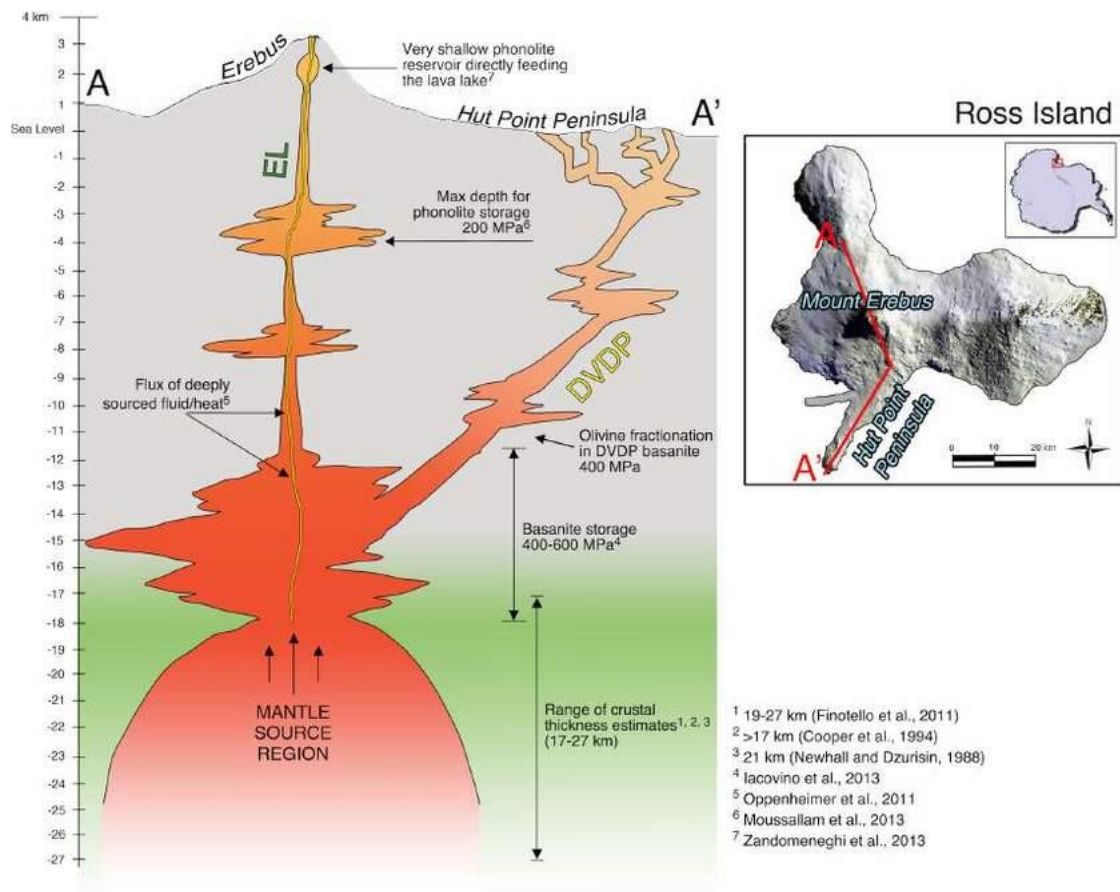


Figura 12: Sezione laterale del Monte Erebus (ResearchGate, Iacovino K., *An unexpected journey: experimental insights into magma and volatile transport beneath Erebus volcano, Antarctica*)

Le esplosioni freatomagmatiche sono un'altra caratteristica fondamentale dei vulcani subglaciali antartici. Quando il magma entra in contatto con l'acqua generata dalla fusione glaciale, il rapido passaggio di stato da liquido a vapore

³¹ Bianco F. *Grande atlante dei vulcani*. Libreria Geografica, Novara, 2024, p. 37.

causa una violenta frammentazione del magma stesso³². Questo processo produce una quantità significativa di materiale piroclastico che, intrappolato sotto il ghiaccio, viene ridistribuito lungo i letti glaciali o incorporato nei flussi idrici subglaciali. Le particelle di cenere vulcanica generate in questi contesti sono spesso straordinariamente fini, con una granulometria che riflette la violenza del processo esplosivo e che ha importanti implicazioni per il trasporto di nutrienti negli oceani circostanti. Infatti, quando tali materiali vengono infine rilasciati nelle acque marine attraverso i ghiacciai che terminano in mare, essi arricchiscono l'ambiente con ferro e altri minerali, stimolando la produttività biologica nei mari polari.

Dal punto di vista geofisico, l'identificazione dei vulcani subglaciali rappresenta una sfida considerevole. Poiché questi vulcani sono spesso completamente sepolti dal ghiaccio, le tecniche tradizionali di osservazione, come il monitoraggio visivo delle eruzioni o la raccolta diretta di campioni di roccia, non sono applicabili. Gli scienziati fanno affidamento su una combinazione di metodi geofisici e geochimici, tra cui il rilevamento di anomalie termiche attraverso immagini satellitari, l'analisi delle onde sismiche per identificare la risalita del magma e il monitoraggio delle emissioni di gas vulcanici, come l'anidride carbonica e il diossido di zolfo, che possono fuoriuscire attraverso fratture nel ghiaccio. Questi gas, una volta intrappolati nelle bolle d'aria conservate nei nuclei di ghiaccio, forniscono informazioni preziose sull'attività vulcanica passata, permettendo di ricostruire una storia eruttiva lunga milioni di anni³³.

³² Mugnos S. *Vulcani. Così il pianeta cambia pelle*, op. cit., p. 156.

³³ Giacomelli L. e C. Pesaresi. *Vulcani nel mondo. Viaggio visuale tra rischi e risorse*, op. cit., p. 138.

Un esempio emblematico è costituito dal sistema vulcanico di Marie Byrd Land, una regione vasta e remota dell'Antartide occidentale, dove sono stati identificati decine di vulcani subglaciali attraverso tecniche radar e gravimetriche (Fig. 13). La composizione chimica del magma eruttato dai vulcani subglaciali antartici è un ulteriore elemento di interesse scientifico. I magmi antartici tendono a essere più ricchi di silice rispetto a quelli islandesi, una caratteristica che li rende più viscosi e inclini a eruzioni esplosive. Tuttavia, la pressione esercitata dalla coltre glaciale può attenuare la violenza delle esplosioni, intrappolando i gas vulcanici e rallentando il rilascio del materiale magmatico. Questa pressione glaciale, se da un lato modera l'intensità delle eruzioni, dall'altro favorisce la formazione di strutture vulcaniche uniche, come le montagne tabulari (*tuya*), che si sviluppano quando un vulcano erutta al di sotto di uno spesso strato di ghiaccio, creando una morfologia caratterizzata da pendii ripidi e cime piatte.

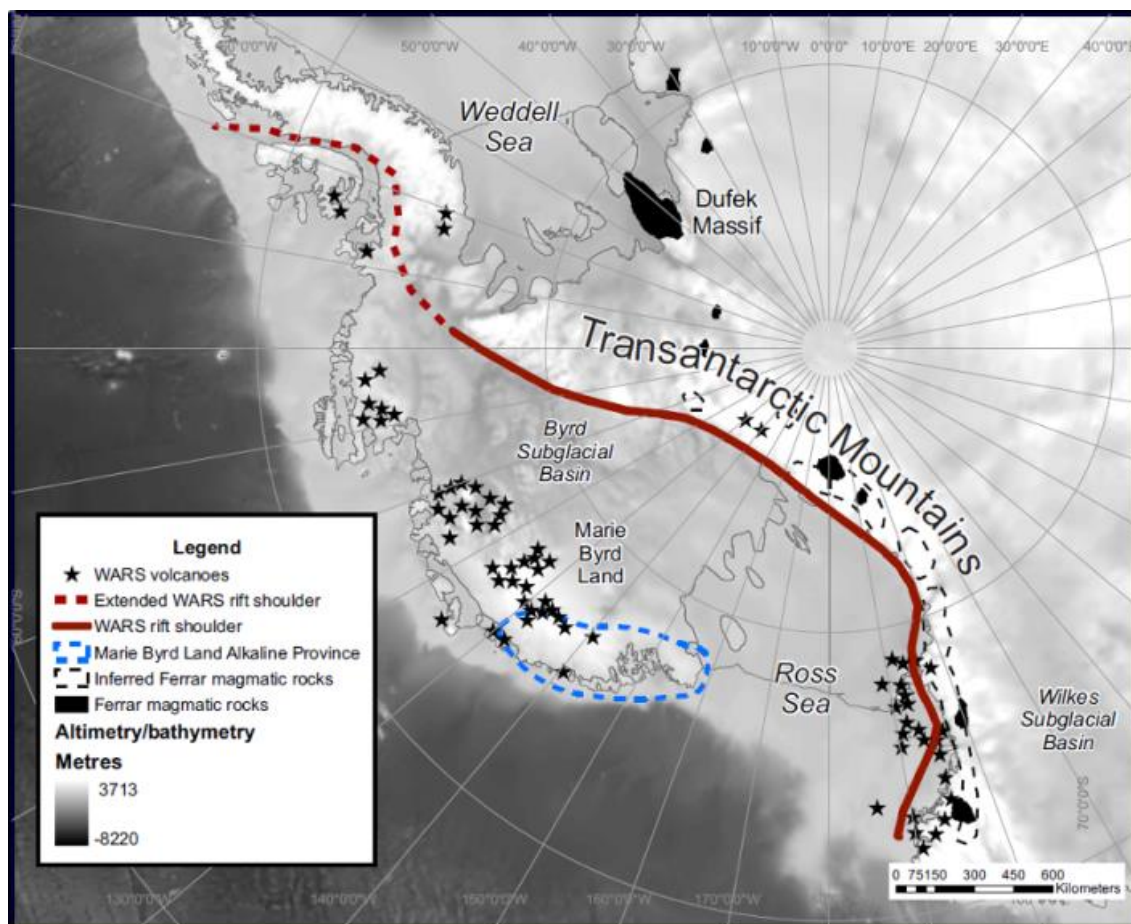


Figura 13: Mappa dei vulcani dell'Antartide Occidentale (VolcanoHotspot, *Antarctica 1 – Introduction to Antarctica's Volcanoes*)

3.2. Interazioni tra vulcanismo e ghiaccio

Le interazioni tra vulcanismo e ghiaccio rappresentano uno degli ambiti di studio più affascinanti e complessi della geologia moderna, in cui si osserva la convergenza di due forze naturali potenti che modellano profondamente il paesaggio e influenzano sistemi climatici e idrologici su larga scala³⁴. Nei contesti subglaciali, come in Antartide, il magma risalente dalle profondità della crosta terrestre si scontra con gli spessi strati di ghiaccio, generando una serie di processi

³⁴ Bianco F. *Grande atlante dei vulcani*, op. cit., pp. 88-89.

fisici e chimici unici. Il calore emanato dal magma, spesso con temperature superiori ai 1.200°C, provoca la rapida fusione del ghiaccio sovrastante, formando laghi subglaciali che possono raggiungere volumi impressionanti, fino a decine di chilometri cubi d'acqua. Questa acqua liquida, intrappolata sotto la pressione della calotta glaciale, si incanala attraverso un complesso sistema di fratture e canali subglaciali, alterando significativamente la dinamica del ghiaccio. Il suo ruolo di lubrificante riduce l'attrito tra il ghiaccio e il substrato roccioso, accelerando il movimento dei ghiacciai verso le zone costiere, con potenziali effetti sull'innalzamento globale del livello del mare³⁵.

Un altro fenomeno cruciale è rappresentato dalle esplosioni freatomagmatiche, che si verificano quando il magma entra in contatto diretto con l'acqua generata dalla fusione glaciale. Il rapido passaggio dell'acqua dallo stato liquido a quello di vapore genera una pressione esplosiva capace di frammentare il magma in particelle estremamente fini, formando depositi piroclastici intrappolati nel ghiaccio o dispersi nell'ambiente subglaciale. Questi eventi esplosivi possono essere amplificati dall'alta pressione esercitata dalla coltre glaciale, che, pur smorzando in parte la violenza delle eruzioni in superficie, intensifica i processi di frammentazione interna e riorganizzazione del ghiaccio. Le onde d'urto prodotte dalle esplosioni, insieme al rilascio di gas vulcanici come il diossido di zolfo e l'anidride carbonica, generano cambiamenti locali nelle proprietà termiche e meccaniche del ghiaccio, rendendo alcune aree più soggette a fusione accelerata o collasso strutturale³⁶.

³⁵ Mugnos S. *Vulcani. Così il pianeta cambia pelle*, op. cit., p. 177.

³⁶ Bianco F. *Grande atlante dei vulcani*, op. cit., p. 112.

Le implicazioni idrologiche di queste interazioni sono altrettanto significative. L'acqua prodotta dalla fusione glaciale non solo altera le dinamiche locali del ghiaccio, ma, una volta rilasciata attraverso i flussi subglaciali, arricchisce gli oceani polari di nutrienti vitali come il ferro e i silicati. Questi nutrienti, derivati dalle particelle piroclastiche vulcaniche e dalle rocce sciolte nei canali subglaciali, stimolano la produttività biologica nelle acque circostanti, innescando processi ecologici che possono influenzare la catena alimentare marina su larga scala³⁷. Questo complesso ciclo di interazioni dimostra come il vulcanismo subglaciale non sia un fenomeno isolato, ma un elemento chiave che collega il mondo geologico a quello biologico e climatico.

Dal punto di vista termico, il vulcanismo subglaciale crea anomalie significative che modificano la stabilità delle calotte polari. Le aree adiacenti ai vulcani attivi, come quelle identificate nella regione di Marie Byrd Land o nel sistema del Monte Erebus, mostrano flussi di calore superiori alla media, che possono destabilizzare il ghiaccio e accelerare i processi di fusione (Fig. 14). Queste anomalie termiche, rilevate attraverso tecniche radar satellitari e studi gravimetrici, forniscono informazioni cruciali per modellare il comportamento futuro della calotta glaciale antartica e prevedere i suoi effetti sul livello del mare. Inoltre, il rilascio di grandi quantità di acqua dolce e fredda nei sistemi oceanici circostanti può alterare le correnti marine e influenzare la circolazione termoalina, un fattore critico per il clima globale³⁸.

³⁷ Bianco F. *Grande atlante dei vulcani*, op. cit., p. 112.

³⁸ Giacomelli L. e C. Pesaresi. *Vulcani nel mondo. Viaggio visuale tra rischi e risorse*, op. cit., p. 147.

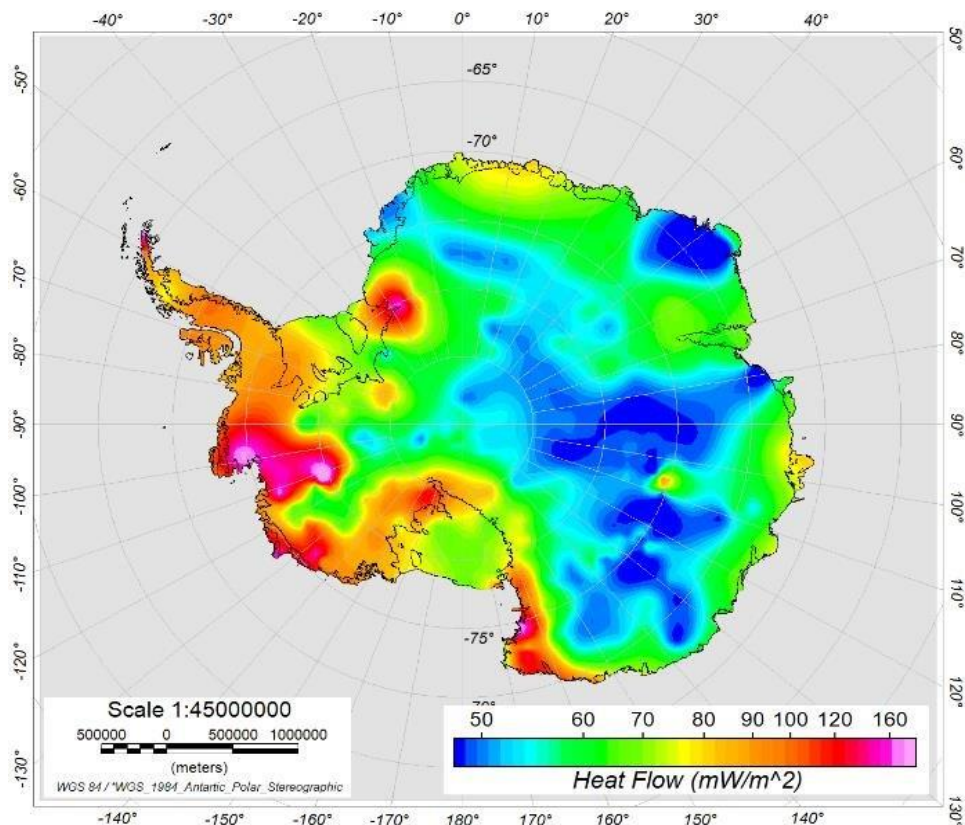


Figura 14: Mappa del flusso di calore in Antartide (ResearchGate, Guimaraes Suze
Nei P., *Heat flow variations in the Antarctic Continent*)

Le interazioni tra vulcanismo e ghiaccio in Antartide offrono anche una finestra unica per studiare fenomeni analoghi su altri corpi celesti, come le lune ghiacciate di Giove e Saturno, dove si ritiene che il calore generato dall'attività vulcanica o mareale interagisca con vasti strati di ghiaccio, formando oceani sotterranei e potenzialmente ambienti abitabili. Questi paralleli extraterrestri rendono l'Antartide un laboratorio naturale per la comprensione dei processi che governano l'interazione tra calore interno e superficie ghiacciata, dimostrando come il nostro pianeta possa fornire le chiavi per esplorare l'universo³⁹.

³⁹ Mugnos S. *Vulcani. Così il pianeta cambia pelle*, op. cit., p. 189.

CAPITOLO 4

CONFRONTO ISLANDA-ANTARTIDE

4.1. Meccanismi comuni e differenze principali

Il confronto tra il vulcanismo estremo in Islanda e in Antartide rivela un intreccio complesso di somiglianze e differenze, che derivano principalmente dalla loro posizione geodinamica, dalla natura del substrato e dall'interazione con l'ambiente circostante. Entrambe le regioni sono caratterizzate da un'intensa attività vulcanica, ma mentre l'Islanda si trova in corrispondenza di una dorsale medio-oceanica emergente, dove la divergenza tra le placche nordamericana ed euroasiatica dà origine a eruzioni prevalentemente effusive, l'Antartide ospita un vulcanismo più nascosto e profondamente influenzato dalla presenza di enormi masse glaciali, che ne alterano significativamente la dinamica eruttiva. In Islanda, il rilascio di magma basaltico a bassa viscosità favorisce la formazione di estese colate laviche, modellando un paesaggio di altopiani, crateri e caldere ben visibili, mentre in Antartide l'attività vulcanica è spesso sepolta sotto chilometri di ghiaccio, dando origine a fenomeni subglaciali che restano celati alla superficie e si manifestano principalmente attraverso anomalie termiche e movimenti del ghiaccio sovrastante⁴⁰.

Dal punto di vista dei meccanismi eruttivi, l'Islanda è dominata da processi di tipo effusivo ed esplosivo, con eruzioni che possono generare sia fiumi di lava sia pennacchi di cenere, come dimostrato dall'Eyjafjallajökull e dal Bárðarbunga. In

⁴⁰ Piccione L., *Il libro dei vulcani d'Islanda*, op. cit., p. 125.

Antartide, invece, la presenza di ghiaccio modifica il comportamento delle eruzioni, portando a frequenti esplosioni freatomagmatiche, in cui il contatto tra magma e acqua glaciale produce una violenta vaporizzazione e la frammentazione del materiale piroclastico. Questo fenomeno, raramente osservabile in Islanda se non in contesti subglaciali come il Grimsvötn, è invece predominante in Antartide, dove i vulcani attivi, come il Monte Erebus, rilasciano gas e frammenti lavici spesso intrappolati sotto la calotta. Il calore vulcanico nel continente polare, oltre a generare fusioni localizzate, può portare alla formazione di laghi subglaciali, come dimostrato dai bacini idrici scoperti sotto la calotta antartica occidentale, un fenomeno meno frequente nelle regioni islandesi, dove l'acqua derivante dalla fusione glaciale viene rapidamente drenata verso l'oceano⁴¹ (Fig. 15).

⁴¹ Mugnos S. *Vulcani. Così il pianeta cambia pelle*, op. cit., p. 206.

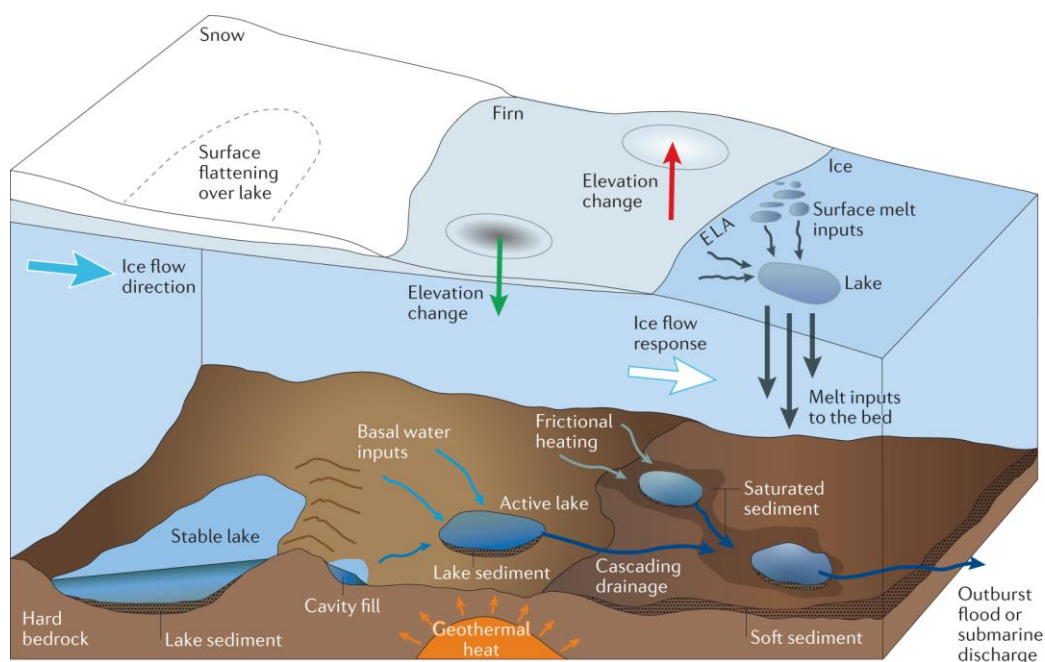


Figura 15: Processo di formazione dei laghi subglaciali antartici (Nature, Livingstone S.J., Li Y., Rutishauser A. *et al.* Subglacial lakes and their changing role in a warming climate)

Un'altra differenza sostanziale risiede nell'influenza dell'attività vulcanica sul clima e sull'ecosistema circostante. In Islanda, le eruzioni influenzano direttamente l'atmosfera, rilasciando gas come anidride solforosa e cenere che possono alterare temporaneamente il clima regionale e causare ripercussioni su scala globale, come nel caso dell'eruzione del Laki nel XVIII secolo, che ebbe effetti devastanti sul clima europeo. In Antartide, invece, l'impatto atmosferico è mitigato dal fatto che gran parte del materiale vulcanico rimane intrappolato sotto il ghiaccio o viene trasportato lentamente attraverso i flussi glaciali, rendendo più difficile valutare il contributo del vulcanismo alla composizione dell'atmosfera. Tuttavia, il calore generato dai vulcani antartici gioca un ruolo chiave nella destabilizzazione della calotta polare, accelerando il movimento dei ghiacciai e aumentando il rischio di un

innalzamento del livello del mare, un fenomeno meno marcato in Islanda, dove i vulcani, pur modificando localmente il paesaggio, non incidono in modo così significativo sulla stabilità delle calotte polari⁴².

Nonostante queste differenze, esistono meccanismi comuni che collegano il vulcanismo delle due regioni, tra cui il ruolo delle anomalie termiche nel modellare il paesaggio e l'importanza del rilascio di gas vulcanici nel bilancio climatico globale. In entrambi i contesti, il vulcanismo rappresenta un elemento dinamico e in continua evoluzione, che non solo modella la superficie terrestre, ma interagisce attivamente con i sistemi idrologici e atmosferici. L'Islanda e l'Antartide, pur essendo agli antipodi per condizioni climatiche e geografiche, condividono la caratteristica di essere tra le aree più attive dal punto di vista geologico, offrendo un terreno di studio eccezionale per comprendere il legame tra attività vulcanica, cambiamenti ambientali e processi evolutivi della Terra.

4.2. Impatti climatici e globali

Gli impatti climatici e globali del vulcanismo estremo in Islanda e in Antartide si manifestano attraverso processi distinti ma accomunati dalla capacità di alterare la composizione atmosferica, influenzare i cicli climatici e modificare le dinamiche glaciali e oceaniche. In Islanda, le eruzioni vulcaniche rilasciano nell'atmosfera ingenti quantità di gas, tra cui anidride solforosa, anidride carbonica e vapore acqueo, i quali possono interagire con le correnti atmosferiche e innescare fenomeni transitori di raffreddamento o modificazioni nella circolazione dei venti su scala regionale e globale. Eventi come l'eruzione del Laki nel 1783 hanno

⁴² Bianco F. *Grande atlante dei vulcani*, op. cit., p. 118.

dimostrato il potenziale impatto delle emissioni vulcaniche, con la formazione di aerosol solfati in grado di riflettere la radiazione solare e abbassare le temperature nell'emisfero settentrionale, provocando anomalie climatiche e carestie in Europa. In Antartide, il vulcanismo subglaciale agisce in maniera meno evidente ma altrettanto significativa, poiché il calore generato dalle eruzioni e dalle intrusioni magmatiche modifica la stabilità della calotta glaciale, contribuendo a processi di fusione che accelerano il deflusso di ghiaccio verso l'oceano. Questo fenomeno, osservato in regioni come la West Antarctic Rift System, può alterare l'equilibrio della circolazione termoalina e influenzare la distribuzione delle correnti oceaniche, con ripercussioni sulla regolazione termica dell'intero pianeta. A differenza dell'Islanda, dove gli effetti delle eruzioni si manifestano più rapidamente con impatti diretti sull'atmosfera, in Antartide il vulcanismo agisce su scale temporali più lunghe, con un'influenza progressiva sulla perdita di massa glaciale e sull'innalzamento del livello marino. Le differenze nei meccanismi di interazione con il clima derivano anche dalla diversa natura geologica e ambientale dei due territori, con l'Islanda che funge da epicentro per eruzioni altamente visibili e cariche di particolato atmosferico, mentre in Antartide la maggior parte dell'attività vulcanica rimane nascosta sotto la calotta, rilasciando il proprio impatto attraverso il sistema idrologico e oceanico piuttosto che direttamente nell'aria. Nonostante queste peculiarità, entrambi i sistemi vulcanici dimostrano come l'attività geologica possa esercitare un'influenza profonda sulle condizioni climatiche globali, con conseguenze che si estendono ben oltre i confini geografici delle regioni in cui si verificano⁴³.

⁴³ Piccione L., *Il libro dei vulcani d'Islanda*, op. cit., 148.

CAPITOLO 5

CONCLUSIONI E PROSPETTIVE

5.1. Sintesi dei risultati

L'analisi del vulcanismo estremo in Islanda e in Antartide ha evidenziato il ruolo fondamentale di questi fenomeni geofisici nell'evoluzione del paesaggio, nella regolazione climatica e nella dinamica delle calotte glaciali. Sebbene entrambe le regioni siano caratterizzate da un'intensa attività vulcanica, le modalità con cui essa si manifesta e i suoi effetti a lungo termine risultano profondamente diversi, influenzati dalle condizioni geodinamiche, dalla natura del substrato e dalla presenza di ghiaccio o oceano nelle vicinanze dei centri eruttivi. L'Islanda, situata lungo la dorsale medio-atlantica, è un esempio di vulcanismo divergente con eruzioni prevalentemente effusive ma potenzialmente esplosive, capaci di influenzare rapidamente il clima attraverso l'emissione di aerosol solfati e ceneri vulcaniche. L'Antartide, invece, ospita un vulcanismo prevalentemente subglaciale, con processi più nascosti che modificano la calotta polare attraverso il rilascio di calore e la formazione di laghi subglaciali, contribuendo indirettamente all'innalzamento del livello del mare e all'evoluzione della circolazione oceanica globale.

Uno degli aspetti più significativi emersi dall'analisi è il ruolo che queste due regioni giocano nel sistema climatico terrestre. In Islanda, le eruzioni possono avere impatti immediati sulla temperatura e sulla circolazione atmosferica, come dimostrato dal caso del Laki, mentre in Antartide il vulcanismo agisce su scale

temporali più lunghe, destabilizzando progressivamente la calotta e influenzando l'equilibrio del ghiaccio con effetti meno visibili ma potenzialmente più duraturi. La capacità del ghiaccio antartico di registrare tracce dell'attività vulcanica passata nei suoi strati più profondi ha inoltre permesso di ricostruire una storia dettagliata delle interazioni tra geologia e clima, fornendo informazioni preziose per la previsione dei cambiamenti futuri.

L'analisi comparativa tra i due sistemi vulcanici ha anche dimostrato il valore dello studio del vulcanismo estremo per la ricerca planetaria. Le interazioni tra magma e ghiaccio osservate in Antartide forniscono un modello utile per comprendere fenomeni analoghi su altri corpi celesti, come le lune ghiacciate di Giove e Saturno, mentre il vulcanismo islandese rappresenta un laboratorio naturale per lo studio della formazione della crosta terrestre e dei processi magmatici globali. La comprensione di questi fenomeni richiede un'integrazione tra rilevamenti satellitari, studi sul campo e modelli di simulazione, strumenti indispensabili per migliorare le capacità predittive degli effetti del vulcanismo sulla circolazione atmosferica, sulla stabilità delle calotte polari e sul clima globale. Le prospettive future della ricerca si concentrano sulla necessità di un monitoraggio più approfondito delle anomalie termiche in entrambe le regioni e sull'analisi dei possibili scenari di evoluzione del vulcanismo in un contesto di cambiamenti climatici sempre più rapidi e imprevedibili.

5.2. Implicazioni per lo studio dei fenomeni estremi

Lo studio del vulcanismo estremo in Islanda e in Antartide rappresenta una risorsa fondamentale per la comprensione dei fenomeni geofisici in ambienti caratterizzati

da condizioni estreme, offrendo nuove prospettive sull'interazione tra attività magmatica, criosfera e atmosfera. Queste regioni, pur così diverse tra loro, mostrano come il vulcanismo possa influenzare il clima globale, alterare la stabilità delle calotte glaciali e contribuire alla riorganizzazione della circolazione atmosferica e oceanica. La capacità delle eruzioni islandesi di modificare rapidamente la composizione dell'atmosfera, attraverso il rilascio di ceneri e gas vulcanici che possono persistere per mesi o anni, consente di comprendere meglio il ruolo degli aerosol nella regolazione termica del pianeta, fornendo dati cruciali per migliorare i modelli climatici globali. In Antartide, l'analisi dei vulcani subglaciali permette invece di investigare la connessione tra calore geotermico e dinamiche della calotta polare, contribuendo a una maggiore comprensione dei processi di destabilizzazione glaciale e delle loro implicazioni a lungo termine sull'innalzamento del livello del mare.

Le implicazioni di queste ricerche si estendono ben oltre il contesto terrestre, poiché i processi osservati in Islanda e in Antartide presentano interessanti analogie con le dinamiche vulcaniche e criogeniche di altri corpi celesti, in particolare delle lune ghiacciate di Giove e Saturno, come Europa ed Encelado. La presenza di vulcani subglaciali terrestri suggerisce che, in ambienti extraterrestri, il calore endogeno potrebbe mantenere vasti oceani sotto strati di ghiaccio, creando condizioni potenzialmente favorevoli alla vita. L'Antartide, in particolare, con i suoi laghi subglaciali alimentati da fonti geotermiche, offre un modello naturale per l'esplorazione astrobiologica, permettendo di testare strumenti e strategie di rilevamento che potrebbero essere applicati a missioni spaziali future.

Oltre all'interesse planetario, il monitoraggio del vulcanismo estremo in queste regioni contribuisce a sviluppare tecniche avanzate di osservazione e previsione, migliorando la capacità di rilevare anomalie termiche, variazioni sismiche e cambiamenti nella composizione atmosferica prima di un'eruzione. L'integrazione di rilevamenti satellitari, indagini radar e analisi geochimiche consente di affinare la comprensione dei meccanismi eruttivi e delle loro conseguenze, offrendo strumenti più efficaci per mitigare i rischi associati a eventi vulcanici di grande portata. Poiché il vulcanismo estremo è in grado di influenzare equilibri climatici e geodinamici su scala globale, il suo studio diventa sempre più rilevante in un contesto di cambiamenti climatici accelerati, in cui le interazioni tra geosfera, idrosfera e atmosfera richiedono un'analisi integrata e multidisciplinare. Comprendere come il calore interno della Terra plasmi il suo ambiente superficiale e quali siano le implicazioni a lungo termine di questi fenomeni non è solo una sfida scientifica, ma anche una necessità per prevedere e gestire gli impatti di un pianeta in continua evoluzione.

BIBLIOGRAFIA

- Abate T. e S. Branca. *Il disegno delle eruzioni storiche dell'Etna. Percorsi iconografici dal XVI secolo ad oggi*. Edizioni Caracol, Palermo, 2015.
- Bianco F. *Grande atlante dei vulcani*. Libreria Geografica, Novara, 2024.
- Carapezza M. *Molti fuochi ardono sotto il suolo. Di terremoti, vulcani e statue*. Sellerio Editore Palermo, Palermo, 2017.
- Cossali G. E. e S. Tonini. *Esercitazioni di termofisica*. Esculapio, Bologna, 2024.
- Cossali G. E. e S. Tonini. *Lezioni di termofisica*. Esculapio, Bologna, 2022.
- Comini G. e S. Savino. *Fondamenti termodinamici dell'energetica*. libreriauniversitaria.it, Padova, 2022.
- Cuccurullo G. *Elementi di termodinamica e trasmissione del calore. Con prime applicazioni agli impianti termotecnici*. Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2020.
- Dumas A. *Elementi di fluidodinamica e termocinetica*. CLUT, Torino, 2024.
- Ercoli A. e V. Lubicz. *Termodinamica e teoria microscopica*. Edizioni Efestò, Roma, 2023.
- Giacomelli L. e C. Pesaresi. *Vulcani nel mondo. Viaggio visuale tra rischi e risorse*. Franco Angeli, Milano, 2019.

- Keller T. e J. Suckale. "A Continuum Model of Multi-Phase Reactive Transport in Igneous Systems." *arXiv preprint arXiv:1809.00079*, 2018.
- Kushnir A. R. L. et al. "Magma Dynamics with the Enthalpy Method: Benchmark Solutions and Magmatic Focusing at Mid-Ocean Ridges." *Journal of Petrology*, vol. 49, no. 12, 2008, pp. 2099–2121.
- Mannino A. *Ambientalismo fisico-economico. Il ciclo di Car-Not (Carnot-Notarrigo)*. Youcanprint, Lecce, 2024.
- Mugnos S. *Vulcani. Così il pianeta cambia pelle*. Hoepli, Milano, 2019.
- Neri M. *Etna il nemico sbagliato. Il drammatico confronto tra la natura e l'uomo nel corso dell'eruzione etnea del 1991-1993*. EBS Print, Catania, 2022.
- Piccione L., *Il libro dei vulcani d'Islanda*, Iperborea, Milano, 2019.
- Rota R. *Fondamenti di termodinamica dell'ingegneria chimica*. Bonomo, Bologna, 2023.
- Rota R. *Eserciziario di termodinamica dell'ingegneria chimica*. Bonomo, Bologna, 2023.
- Scandone R. e L. Giacomelli. *Vulcani d'Italia*. Liguori, Napoli, 2007.
- Sen P. *Il frigorifero di Einstein. Come la differenza tra caldo e freddo spiega l'universo*. Bollati Boringhieri, Torino, 2021.
- Zollo A. e A. Emolo. *Terremoti e onde. Metodi e pratica della sismologia moderna*. Liguori, Napoli, 2011.

SITOGRAFIA

- *Antarctica 1 – Introduction to Antarctica's Volcanoes*, VolcanoHotspot, 2017.
- *Bárðarbunga*, Wikipedia.
- Bussard J., Reynard E. *Heritage Value and Stakeholders' Perception of Four Geomorphological Landscapes in Southern Iceland*, ResearchGate, 2022.
- Depond C. *The awakening of volcanoes beneath Antarctica's ice threatens our planet*, Techno-Science, 2025.
- *Eruption of Eyjafjallajökull Volcano, Iceland*, NASA Earth Observatory, 2010.
- Gudmundsson M., Thordarson T., Höskuldsson Á. et al. *Ash generation and distribution from the April-May 2010 eruption of Eyjafjallajökull, Iceland*, Nature, 2012.
- Guimaraes Suze Nei P., *Heat flow variations in the Antarctic Continent*, ResearchGate, 2020.
- Iacovino K., *An unexpected journey: experimental insights into magma and volatile transport beneath Erebus volcano, Antarctica*, ResearchGate, 2014.
- *Is Katla Volcano Erupting*, Arctic Adventures, 2024.
- Livingstone S.J., Li Y., Rutishauser A. et al. *Subglacial lakes and their changing role in a warming climate*, Nature, 2022.
- *Maars and Tuff Rings*, National Park Service, 2023.
- *The Eruption of Mount Tambora 1815-1818*, ScienceSmith, 2023.

- *There Are Hunderds of Volcanoes Hiding Under Antarctica's Ice Sheet*, EarthlyMission, 2020.
- Thordarson T. *Postglacial volcanism in Iceland*, ResearchGate, 2008.
- *What are the different types of volcanoes and how are they formed*, Physics Forums, 2021.