

Dottorato di ricerca in
“Modellistica Fisica per la Protezione dell’ Ambiente”
XIX Ciclo – Geo/08
Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

**STUDIO PROBABILISTICO DELLA PERICOLOSITÀ
DA COLATE DI LAVA AL VULCANO NYIRAGONGO
(REPUBBLICA DEMOCRATICA DEL CONGO) E
POSSIBILI MISURE VOLTE ALLA RIDUZIONE DEL
RISCHIO**

Giuseppe Damiano Chirico

Coordinatore
Prof. Ezio Todini

Tutore
Prof. Stefano Tinti

Co-tutori

Dott. Paolo Papale

Dott. Massimiliano Favalli

*Ai miei genitori
e a Paolo*

Ringraziamenti

Ringrazio il Prof. Stefano Tinti in qualità di tutore di questa tesi. Un ringraziamento speciale all'INGV di Pisa che mi ha permesso di utilizzare la struttura in questi 3 anni di studio. A tal proposito vorrei ringraziare Massimiliano per la sua disponibilità e per l'aiuto datomi nello sviluppo della tesi, permettendomi di migliorare le mie conoscenze. Ringrazio Antonella e Melissa per la loro gentilezza nell'ascoltarmi e nel consigliarmi nei momento più caotici.

Ringrazio tutta la mia famiglia per essermi stata vicina ed aver compreso le mie scelte. Un ringraziamento particolare anche al CRCN per le serate rilassanti passate insieme e a Pino.

Un ringraziamento speciale a Paolo per la fiducia dimostratami e per l'entusiasmo che è riuscito ad infondermi in questo studio e che spesso è stato il motore principale della mia ricerca.

Indice

Introduzione e scopo della tesi	1
Capitolo 1: Il vulcano Nyiragongo e l'eruzione del 17 gennaio 2002	5
1.1 - Inquadramento geologico: la Provincia Vulcanica del Virunga e il Nyiragongo	5
1.2 - I segnali precursori dell'eruzione del 17 gennaio 2002	9
1.3 - L'eruzione del 17 gennaio 2002	11
1.4 - Caratteristiche della lava emessa lungo il sistema di fratture	24
Capitolo 2 : Colate di lava	26
2.1 - Le colate di lava	26
2.2 - I modelli di colata di lava	29
Capitolo 3 : Mappatura delle colate laviche delle eruzioni del Nyiragongo del 1977 e del 2002	36
3.1 - Mappatura delle colate laviche del 2002	36
3.2 - Mappatura delle colate laviche del 1977	40
Capitolo 4 : Modelli digitali del terreno utilizzati	44
4.1 - Dati topografici esistenti relativi all'area circostante il Nyiragongo	44
4.2 - Il Modello Digitale del Terreno ricavato dalla mappa topografica 1:10.000, Ville de Goma	47
4.3 - Il Modello Digitale del Terreno ottenuto dalla missione satellitare SRTM	49

Capitolo 5 : Il codice Downflow e le simulazioni delle colate di lava nella città di Goma	52
5.1 - Il codice Downflow	52
5.2 - Calibrazione del codice Downflow	55
5.3 - Simulazioni dei percorsi da ipotetiche bocche effimere sui bordi della colata di lava	58
5.4 - Simulazione dei percorsi da vent lungo l'estensione della frattura di Munigi	60
5.5 - Valutazione degli effetti topografici delle colate del 2002	62
5.6 - Mappa di suscettibilità da invasione di colate di lava a Goma	64
5.7 - Considerazioni generali sulle simulazioni di colate di lava nella città di Goma	66
Capitolo 6 : Simulazioni delle colate di lava utilizzando il DEM SRTM	68
6.1 - Confronto fra DEM	68
6.2 - Le simulazioni dei percorsi delle colate dell'eruzione del 2002	70
6.2.1 - Calibrazione dello spazio parametrico (N, Δh)	72
6.2.2 - Simulazioni delle colate del fianco sud del Monte Nyiragongo	78
6.3 - Identificazione delle aree di accesso alla città di Goma per le colate di lava	80
6.5 - Suscettibilità da invasione di colate di lava della città di Gisenyi (Ruanda)	82
Capitolo 7 : Mappa di pericolosità da invasione di colate di lava	84
7.1 - Metodologia	84
7.1.1 - Probabilità relativa di apertura di futuri vent	85

7.1.2 - Identificazione delle distanze massime e minime percorribili dalle colate di lava	88
7.1.3- Metodo di quantificazione della pericolosità vulcanica	93
7.2 - Mappa di pericolosità	94
Capitolo 8 : Studio dell'effetto di barriere protettive sui percorsi delle colate di lava	101
8.1 - Utilizzo di barriere protettive durante le eruzioni dell'Etna e di altri vulcani basaltici	102
8.2 - Obiettivo delle barriere protettive	105
8.3 - Metodologia	106
8.3.1 – Goma, settore est a più alta pericolosità	109
8.3.1 - Goma, settore ovest a alta pericolosità	111
8.3.1 - Gisenyi	117
8.4 - Mappa di pericolosità da invasione di colate di lava modificata attraverso l'uso di barriere protettive	118
Capitolo 9 : Conclusioni	123
Bibliografia	127

Introduzione e scopo della tesi

I fenomeni geologici che da sempre regolano l'evoluzione del nostro pianeta, nel loro manifestarsi lento e spesso impercettibile oppure violento e drastico, hanno da sempre attirato l'attenzione degli studiosi e non solo. Di pari passo le discipline naturalistiche che si occupano di capire, spiegare ed interpretare tali fenomeni sono progredite nel corso degli anni giungendo, attraverso un approccio sempre più quantitativo, ad una comprensione delle problematiche sempre più approfondita e dettagliata. Gli studi dei fenomeni legati all'attività vulcanica sono tra quelli che maggiormente si sono avvantaggiati di un approccio multidisciplinare, unendo alle osservazioni di campagna una base fisico-matematica sempre più rigorosa.

Le fenomenologie legate ai vulcani sono molto varie e principalmente dipendono dal tipo di vulcano e dalle modalità con cui il magma arriva in superficie. Alcuni vulcani sono caratterizzati da fenomeni come le colate di lava che solitamente non portano a perdite umane, e vulcani le cui eruzioni sono capaci di generare flussi piroclastici che possono distruggere città intere in pochi minuti, come avvenne ad esempio nel 1902 a St. Pierre, in Martinica, dove morirono quasi 30.000 persone (Lacroix, 1904).

Il rischio connesso alla presenza di un vulcano dipende non solo dal tipo di fenomeni che si innescano, ma anche dalle strutture e dal numero di persone soggette a pericolo, cioè da quello che in termini di rischio vulcanico viene definito "valore". L'area napoletana in cui si trovano il Vesuvio e i Campi Flegrei, ad esempio, viene considerata quella a più alto rischio vulcanico al mondo proprio per l'elevata densità di popolazione; se tali vulcani fossero ubicati in un deserto probabilmente non desterebbero la stessa attenzione, da parte del mondo vulcanologico e non solo. Secondo la definizione dell'UNESCO (1972), il rischio è dato dal prodotto di tre fattori: pericolosità, valore esposto e vulnerabilità. La pericolosità vulcanica è la probabilità che una certa area sia interessata da fenomeni vulcanici potenzialmente distruttivi in un determinato intervallo di tempo, e viene riferita a fenomeni ben definiti (una colata di lava, un flusso piroclastico, la caduta di ceneri, ecc.). Il valore esposto, come detto precedentemente, è dato dal numero di persone, dalle infrastrutture, dalla superficie di terreno agricolo, e da qualunque altro bene esposto al pericolo. La vulnerabilità è invece la percentuale di valore che si stima verrà perduta per effetto di un determinato evento. Pertanto, la stima del rischio vulcanico

e la pianificazione degli interventi per la sua mitigazione vengono basati su risultati di studi vulcanologici, ingegneristici, socio-economici, ecc.

Gli effetti disastrosi di un'eruzione sono tanto maggiori quanto maggiore è l'urbanizzazione dell'area circostante al vulcano e quanto maggiore è la probabilità di avere fenomeni di tipo esplosivo. Nelle eruzioni di quest'ultimo tipo, il magma viene frammentato prima di giungere in superficie e viene scagliato verso l'alto sotto forma di pomice, scorie, bombe e ceneri, detti prodotti piroclastici. I prodotti piroclastici possono essere suddivisi in base ai differenti meccanismi con cui si depositano al suolo dopo l'eruzione. I prodotti di caduta derivano dal lancio diretto dal cratere o ricadono per gravità da una nube pliniana. Questo tipo di prodotti può mantellare gran parte del territorio distruggendo i raccolti e provocando enormi disagi sulla circolazione sia stradale che aerea. I flussi piroclastici invece rappresentano, per la loro velocità di propagazione e per l'elevata temperatura, gli eventi più disastrosi associati a vulcanismo esplosivo. Possono raggiungere distanze fino a decine di chilometri dal centro eruttivo e sono senza dubbio i fenomeni più distruttivi tra quelli vulcanici. Un altro fenomeno legato alle eruzioni esplosive è quello delle colate di fango, o lahar. Esso è dovuto al rilevante accumulo di ceneri e altro materiale sciolto sui pendii dei vulcani. Grandi quantità di acqua accumulata in breve tempo, in seguito alle forti piogge che accompagnano le eruzioni esplosive o al rapido scioglimento di ghiacciai, possono mobilitare la massa di materiale. Scendendo verso valle questi veri e propri fiumi di fango possono trasportare massi anche di diverse tonnellate e travolgere tutto ciò che trovano lungo il cammino. Questi fenomeni possono portare al seppellimento di vaste aree come accaduto durante il 1985 alla città di Armero, ubicata a ben 70 km dal cratere del Nevado del Ruiz in Colombia (Naranjo et al., 1986).

La fenomenologia delle eruzioni effusive è molto diversa da quella delle eruzioni esplosive. Il magma, risalendo verso la superficie, non raggiunge condizioni tali da determinarne la frammentazione. Questo fa sì che il magma non fuoriesca come una miscela di gas e piroclasti ma sotto forma di lava. Si tratta quindi di fenomenologie molto differenti dalle eruzioni esplosive sia in termini di materiali emessi, sia in termini di dinamiche eruttive. Le colate di lava possono durare da giorni fino ad anni presentando velocità molto basse rispetto ai flussi piroclastici, e sebbene siano dotate di un'elevata capacità distruttiva, costituiscono di solito un elemento di rischio

ridotto per la popolazione. A volte però, la variabilità dei fenomeni naturali può far sì che si verifichino eventi con caratteristiche molto particolari, come nel caso dell'eruzione del 17 gennaio 2002 del Nyiragongo, nella Repubblica Democratica del Congo, che costituisce l'oggetto di questa tesi.

L'eruzione del Nyiragongo del 17 gennaio 2002 ha prodotto il maggiore caso nella storia di impatto di colate di lava con una grande città. La viscosità estremamente bassa della lava emessa è in grado di determinare velocità di propagazione delle colate fino a svariate decine di km/h, generando un elevato rischio per la popolazione. Tale eruzione rappresenta un caso di grande interesse in termini di pericolosità e rischio vulcanico, e un caso-test ideale per la simulazione dei cammini delle colate di lava e l'ideazione e messa a punto di possibili interventi volti alla riduzione della pericolosità e del rischio.

I percorsi delle colate di lava prodotte da eruzioni passate e da possibili eruzioni future al Nyiragongo vengono simulati in questa tesi attraverso un codice numerico (DOWNFLOW, Favalli et al., 2005, 2006) che permette di quantificare la distribuzione di probabilità di invasione da colate di lava, a partire da una distribuzione delle bocche eruttive. Le informazioni necessarie per l'utilizzo del codice ai fini della definizione della pericolosità vulcanica sono costituite dalla morfologia del terreno, dal comportamento passato delle colate di lava, e dalla probabilità di apertura di future bocche o fessure eruttive. Le simulazioni sono in grado di tenere conto in maniera efficace degli aspetti fondamentali relativi alla propagazione delle colate di lava, quali l'effetto della gravità, la capacità di riempire depressioni, superare ostacoli morfologici, ed espandersi sulla topografia. Il limite principale è costituito dall'impossibilità di determinare la lunghezza massima delle colate di lava, per cui tale informazione deve essere introdotta sulla base delle caratteristiche delle colate di lava osservate. Il codice DOWNFLOW presenta un'elevata rapidità di esecuzione che lo rende uno strumento ideale per lo studio della pericolosità a breve e a lungo termine, estendendo la possibilità di applicazioni anche in tempo reale durante l'emergenza vulcanica.

In una prima fase di studio il codice di calcolo viene validato attraverso il confronto con i percorsi delle numerose colate di lava dell'eruzione del 2002, a diverse scale di risoluzione topografica, utilizzando modelli digitali del terreno sia ottenuti in questa tesi sia disponibili, come il DEM interferometrico ottenuto dalla missione satellitare

SRTM. Attraverso lo studio delle caratteristiche delle eruzioni note nell'ultimo secolo di attività del vulcano vengono definite le quantità necessarie per la realizzazione di una mappa di pericolosità da invasione di colate di lava. Successivamente viene studiata la possibilità di ridurre la pericolosità locale nella città di Goma, devastata dalle colate del Nyiragongo nel gennaio 2002, attraverso la costruzione di barriere artificiali volte a deviare i percorsi lavici. Il presente lavoro di tesi costituisce pertanto uno studio sistematico della pericolosità da colate di lava in un'area intensamente urbanizzata, e delle possibili misure per la sua riduzione.

Capitolo 1

Il vulcano Nyiragongo e l'eruzione del 17 gennaio 2002

1.1 - Inquadramento geologico: la Provincia Vulcanica del Virunga e il monte Nyiragongo

Il vulcano Nyiragongo appartiene alla Provincia Vulcanica del Virunga che si estende approssimativamente in direzione E-W a cavallo tra la Repubblica Democratica del Congo e il Ruanda, in corrispondenza del ramo occidentale del Rift Orientale Africano. Questa parte del Rift, estesa oltre 2.500 km, si è sviluppata principalmente fra i cratoni Archeani della Tanzania e del Bangweulu. La Rift Valley occidentale è suddivisa in una serie di bacini che si estendono per parecchie decine di chilometri, caratterizzati dalla presenza di laghi molto estesi come il lago Malawi, il lago Tanganica, il lago Kivu, il lago Edward, e il lago Albert.

Le province vulcaniche si sono formate principalmente nelle porzioni intrabacinali, alle intersezioni di almeno due sistemi di faglie (Delvaux, 1991). La provincia del Virunga, a nord del lago Kivu, è infatti ubicata in corrispondenza dell'intersezione tra il Rift Albertino ed il Rift Kamatembe ad ovest, e della Baia di Bufumbira ad est (Figura 1.1). Il sistema di faglie del Virunga, che si sviluppa generalmente in direzione N-S, separa il rift Albertino dalla Baia di Bufumbira e divide la catena del Virunga in due segmenti principali. Questa catena è costituita da otto grandi edifici vulcanici: Muhavura (4.127 m), Gahunga (2.474 m), Sabinyo (3.647 m), Visoke (3.711 m), Karisimbi (4.507 m), Mikeno (4.437 m) e Nyiragongo (3.470 m), che sono stratovulcani, e il Nyamulagira (3.058 m) che è invece un vulcano a scudo.

Questi vulcani sono allineati secondo una direzione E-W trasversalmente al senso principale del ramo occidentale del Rift Orientale Africano. Il Nyiragongo e il Nyamulagira, ubicato a 15 km a NW da questo, rappresentano la porzione attiva della catena vulcanica.

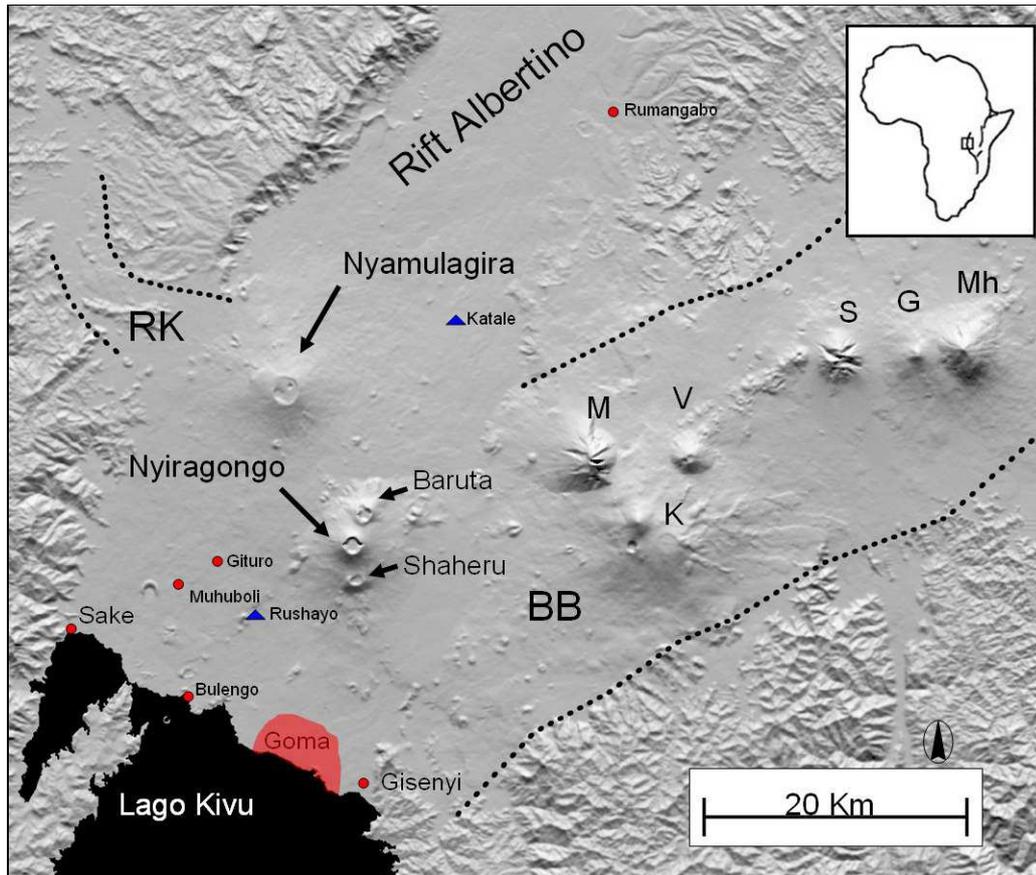


Figura 1.1. La catena vulcanica del Virunga. I vulcani Nyiragongo e Nyamulagira sono ubicati nella parte bassa del Rift Albertino tra il rift Kamatembe (RK) e la Baia di Bufumbira (BB). Gli altri vulcani della catena sono il Karisimbi (K), il Mikeno (M), il Muhavura (Mh), il Gahunga (G.), il Sabinyo (S), e il Visoke (V). I triangoli blu indicano la posizione delle due stazioni sismiche di Rushayo e Katala.

Le prime informazioni sul Nyiragongo risalgono ad un esploratore tedesco, Von Gotzen (1896). Successivamente il vulcano divenne famoso come uno dei pochi ad essere caratterizzato dalla presenza nel suo cratere centrale di un lago di lava permanente (Tazieff, 1949). Il Nyiragongo è anche noto in vulcanologia per le sue colate di lava, le cui velocità sono le più alte mai stimate sulla terra, fino ad arrivare a decine di chilometri orari (Tazieff, 1977, 1979). Le caratteristiche composizionali di

questi magmi molto primitivi, ultrabasici e alcalini, rendono inoltre il magma di questo vulcano un esempio ideale per lo studio petrologico del mantello (Demant et al., 1994; Santo et al., 2004; Landi et al., 2004).

Il Nyiragongo è uno stratovulcano caratterizzato dalla presenza sui suoi fianchi, di altri due antichi coni: il Baruta (3.100 m.) a nord e lo Shaheru (2.800 m.) a sud (Figura 1.2). E' ubicato all'intersezione di almeno quattro sistemi del faglie: un sistema di faglie principale N-S, uno NW-SE che collega il Nyiragongo al Nyamulagira, un sistema di faglie NE-SW visibile in corrispondenza dalla catena di Rushayo ed un sistema di faglie che collega il Nyiragongo con i coni di scoria attivi di Muhuboli e di Gituro, a circa 15 km in direzione W-S-W dal cratere centrale del Nyiragongo (Tazieff, 1984). È attualmente poco chiaro se il Nyiragongo sia collegato strutturalmente ai vulcani Mikeno e Karisimbi posti rispettivamente a E-N-E ed a E, sebbene gli allineamenti dei coni di scoria siano notevoli.



Figura 1.2. Il Nyiragongo visto dall'Osservatorio Vulcanologico di Goma.

Fino al 1977 era stata osservata solamente un'attività da lago di lava (Figura 1.3) sebbene molti coni di scoria con le associate colate di lava testimoniano un'intensa

attività eruttiva passata (Thonnard et al., 1965). La presenza di coni di tufo fino a 1,5 km dal lago indica inoltre una passata attività di tipo esplosivo legata all'interazione del magma con l'acqua del lago Kivu (Capaccioni et al., 2004). L'Osservatorio Vulcanologico di Goma (GVO) è sito proprio sul più alto di questi coni di tufo idromagmatici, denominato Monte Goma. La città di Goma è ubicata sulla costa nord del lago Kivu, 18 km a sud del cratere centrale del Nyiragongo. Questa città è diventata tristemente famosa nel 1994 in seguito alla edificazione di numerosissimi campi di accoglienza che ospitarono un totale di circa 800.000 profughi, che in quegli anni fuggivano dal Ruanda, teatro di una terribile guerra civile, che vide contrapposte le etnie Tutsi e Hutu.

La prima eruzione laterale osservata risale al 1977, quando la lava fuoriuscì da una serie di fratture orientate principalmente in direzione N-S. Da queste fratture si originarono delle colate di lava estremamente veloci che devastarono parecchi villaggi (Tazieff, 1977, 1979; Durieux, 2004a). Fortunatamente le colate di lava si fermarono a 2 km dalla città di Goma che al tempo non era popolata ed estesa come oggi.



Figura 1.3. Attività di lago di lava all'interno del cratere centrale del Nyiragongo (<http://www.swisseduc.ch>).

L'eruzione del 1977 durò due giorni e cambiò fortemente la morfologia del cratere centrale dove era sito il lago di lava creando un baratro profondo 800 m (Tazieff, 1977). Un nuovo lago di lava cominciò a formarsi nel 1982 ma la sua superficie rimase attiva solo per pochi mesi (Tazieff, 1984). Nel 1994 un piccolo cono iniziò a formarsi sulla superficie del lago solidificato (Figura 1.4) dando origine a piccole colate di lava intracrateriche (Lockwood e Casadevall, 1994; Tedesco, 2004). Questo tipo di attività terminò pochi mesi dopo, nel 1995, e da allora non è stato registrato nessun tipo di attività effusiva fino all'eruzione del gennaio del 2002 (Durieux, 2004b).



Figura 1.4. Spatter cone presente all'interno del cratere del Nyiragongo nel 1995 (Foto © D. Tedesco).

1.2 - I segnali precursori dell'eruzione del 17 gennaio del 2002

A partire da un anno prima dell'eruzione del 17 gennaio 2002, le stazioni sismiche dell'Osservatorio Vulcanologico di Goma (GVO) avevano registrato sciami di terremoti a lungo periodo e tremore vulcanico. Il 6 febbraio 2001 il vicino vulcano Nyamulagira entrò in eruzione. Dopo questa eruzione, durata due settimane, la sismicità non si abbassò come di solito accade immediatamente dopo gli eventi

eruttivi. Al contrario, a partire dal marzo 2001 sino al gennaio 2002, il tremore vulcanico e le scosse a lungo periodo furono registrate sia nella stazione di Bulengo, a sud del Nyiragongo, che di Katale, ubicata invece a nord-est del Nyiragongo, a circa 40 km da quella di Bulengo (vedi figura 1.1). Quest'ultima stazione, essendo leggermente più vicina al vulcano Nyamulagira, veniva usata dal GVO come stazione di riferimento per l'attività sismica di questo vulcano. Durante i 10 mesi precedenti l'evento eruttivo del gennaio 2002 fu impossibile distinguere, dalle due uniche stazioni sismiche, a quale vulcano poteva essere attribuita l'attività sismica registrata. Infatti, dalla cronologia disponibile degli eventi, in parte ricostruita dopo l'evento eruttivo, sarebbe stato impossibile preparare ed emanare un allarme di evacuazione relativo ad una possibile eruzione di uno dei due vulcani. Questo tipo di attività sismica fu inoltre caratterizzata da alcune forti scosse che furono avvertite il 5 ottobre, mentre il 7 ottobre un forte terremoto tettonico di magnitudo 3,5-4, insolito per questa regione, fu registrato e fu sentito dalla popolazione. Questo terremoto fu seguito alcune ore più tardi da tremore vulcanico di elevata ampiezza. La stessa sequenza di eventi si ripeté il 4 gennaio 2002, questa volta con un terremoto di magnitudo leggermente più alta di 4 che causò danni al villaggio di Rumangabo (Kavotha et al., 2004; Komorowski et al., 2004). Il 7 gennaio un ulteriore terremoto e l'attività sismica ad esso connessa, provocarono alcune visibili variazioni, inclusa la riattivazione dell'attività fumarolica in una località non precisata (Komorowski et al., 2004). Dopo l'evento tettonico di ottobre, i ricercatori del GVO avevano notato un pennacchio bianco in corrispondenza della frattura eruttiva dell'eruzione del 1977, localizzata nella parte alta del cratere di Shaheru ad una quota di 2.700 m slm. Un'attività simile si stava sviluppando da nuove fessure apertesì sulle pareti del cratere centrale, mentre un pennacchio scuro era visibile da uno spatter cone intracraterico del 1995. Le fumarole avevano una temperatura di 70°C, mentre la temperatura del terreno che normalmente era tra 5-9°C, salì sino a 28°C; furono inoltre misurate anche temperature di ~50°C in corrispondenza delle fessure dello Shaheru. Dopo il terremoto del 4 gennaio la sismicità rimase a livelli alti, senza variazioni significative sino al 16 gennaio. L'inizio dell'eruzione fu preceduto da quasi 8 ore di calma, durante le quali furono registrati durante questo arco di tempo livelli molto bassi di sismicità. L'eruzione cominciò improvvisamente senza alcun segnale premonitore immediato intorno alle 8:35 (tempo locale) del 17 gennaio 2002.

1.3 - L'eruzione del 17 gennaio del 2002

L'eruzione del vulcano Nyiragongo del 17 gennaio 2002 ebbe inizio con l'apertura di un esteso sistema di fratture sviluppatosi dalle zone comprese fra il cono centrale del Nyiragongo e il cratere del cono Shaheru fino alla città di Goma e al lago Kivu. Il trend principale di questo sistema di fratture era all'incirca N-S, simile quindi al trend generale della Rift Valley nella regione del Nyiragongo. Il sistema di fratture si propagò, partendo da una quota compresa fra 2.800 e 3.000 m slm, 300-400 m a nord del vecchio cratere dello Shaheru, coprendo una distanza di almeno 10 km verso la città di Goma in meno di otto ore.

Per quanto riguarda l'inizio dell'attività eruttiva, come confermato dalle registrazioni sismiche e dai testimoni oculari, la parte più elevata della frattura cominciò ad emettere lava alle 8:35 del 17 gennaio 2002. Questa frattura, larga circa 2 m, era in pratica la stessa frattura eruttiva dell'eruzione del gennaio 1977, presente all'interno e al di sopra del cono Shaheru, e riattivata durante l'evento del 2002. Le colate di lava originatesi da tale frattura in parte si riversarono verso il settore orientale del vulcano ed in parte riempirono il cratere Shaheru, secondo le stesse modalità della precedente eruzione del 1977, anche se con volumi finali complessivamente minori (Figura 1.5).

Una volta solidificate, le colate partite da tale frattura e che si propagarono a sud-est di Shaheru, presentano spessori variabili dai 5 cm ai 15 cm, anche se i numerosi segni lasciati sugli alberi suggeriscono il passaggio di un flusso alto almeno un metro. Nella figura 1.6 vengono riportate alcune foto relative a queste particolari tipi di lave non facilmente riscontrabili in altri vulcani basaltici. Non sono visibili depositi di scoria associati all'attività della fessura più sommitale, se non una quantità molto modesta associata alla fase finale dell'eruzione.

Senza alcuna osservazione diretta, una frattura lunga alcune centinaia di metri si aprì, inoltre, sul fianco nord-ovest del Nyiragongo, ad una quota di circa 2830 m slm, dando origine ad una colata di lava che non interessò comunque le zone abitate (Figura 1.7). Diversamente dal sistema di fratture che caratterizza il fianco sud del vulcano, questa frattura ha un'orientazione NNW.



Figura 1.5. Foto relativa alla frattura presente a nord del cono Shaheru, le cui colate hanno in parte riempito il cratere del cono.



Figura 1.6. Alcune foto relative al campo lavico nei pressi della frattura di Nord Shaheru. Come si nota delle immagini riportate, i depositi lasciati dai flussi lavici sono molto esigui e lasciano sottili patine di lava sugli ostacoli incontrati.



Figura 1.7. Foto relativa colata partita dalla frattura apertasi immediatamente ad ovest del cratere centrale del vulcano, che comunque non ha interessato zone abitate.

In un lasso di tempo variabile dalle 8:35 e le 10:00, circa 500 metri a sud del bordo del cratere di Shaheru si originò una ulteriore area fratturata più complessa della precedente, con tre principali fratture parallele (Figura 1.8). La porzione occidentale di questa area è contraddistinta da una frattura che si estende verso sud per una lunghezza notevolmente maggiore rispetto alla porzione immediatamente più orientale. Tale differenza era dovuta probabilmente alla presenza di un cono di scorie che ha limitato la propagazione della porzione orientale di tale sistema. Quest'ultimo, come si osserva dalla figura 1.8, è costituito da due piccole fratture sub parallele distanti tra loro circa 150 m.

La frattura ovest invece, si estende per una lunghezza di circa 2400 m e termina in corrispondenza dei rilievi dei due coni Kanyambuzi-Mudjoga, interessando una zona sub pianeggiante dalla quale si originarono due piccole colate di lava in direzione ovest lunghe 300 e 700 m, parzialmente visibili nella parte alta della figura 1.9, a poche centinaia di metri ad ovest della frattura.

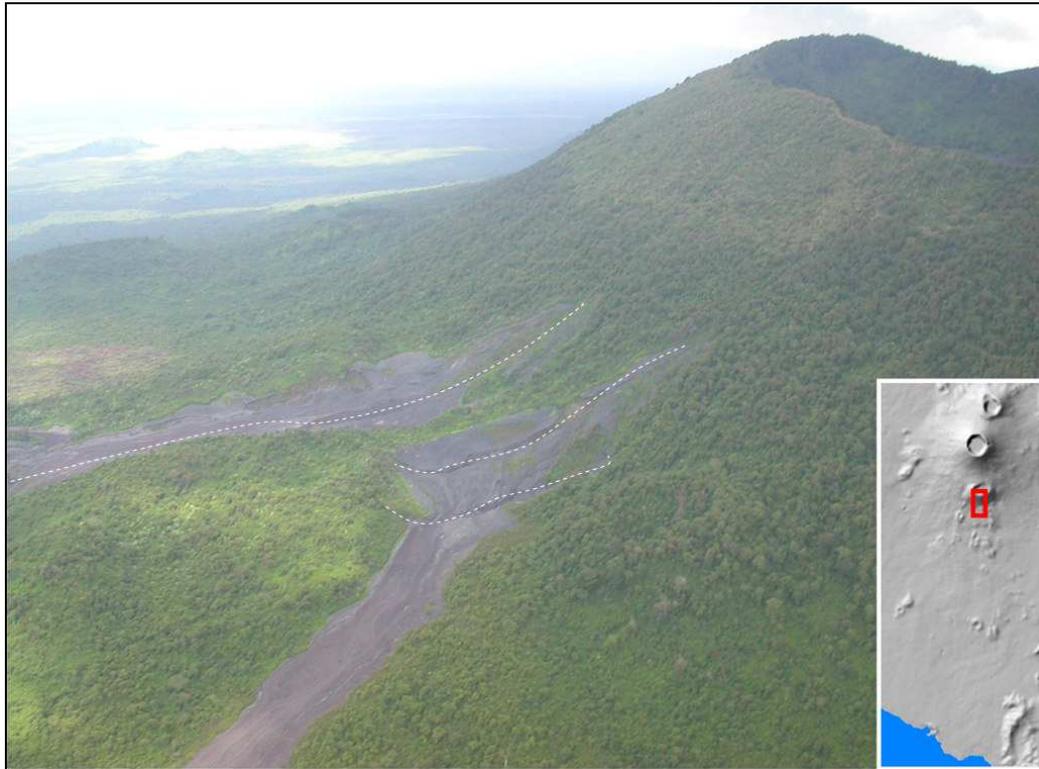


Figura 1.8. Foto relativa alle fratture apertasi a sud del cono Shaheru.



Figura 1.9. Foto relativa alle fratture e alle colate a nord dei coni Kanyambu-Mudjoga.

In corrispondenza della parte terminale della frattura ovest, ad una distanza di qualche centinaio di metri si generò un'altra frattura parallela alla precedente dalla quale scaturirono colate che in parte confluirono verso l'area est del vulcano. Insieme a quelle fuoriuscite dalle fratture alla base dello Shaheru, tali colate diedero origine a due campi lavici distinti (Figura 1.10). Il primo, visibile nella parte sinistra della figura 1.10, interessò l'area orientale del fianco sud del Nyiragongo percorrendo una notevole distanza (~ 9 km), il secondo invece (a destra in figura 1.10), costeggiò i fianchi dei coni Kanyambuzi-Mudjoga, interessando alcuni villaggi e fermandosi a circa 5 km dalla città di Goma. Va sottolineato il fatto che le colate sopra descritte hanno percorso gli stessi cammini di quelle del 1977, originate da sistemi di fratture praticamente simili a quelli del 2002.



Figura 1.10. Foto panoramica scattata a nord del cono Shaheru. Oltre alla frattura eruttiva e alle relative colate sono visibili sullo sfondo i due campi lavici originati invece dalle fratture immediatamente a sud del cono.

Intorno alle 10:00, il sistema di fratture si era propagato sino a quota 1.900 m slm, e in corrispondenza del fianco sud-ovest dei coni Kanyambuzi-Mudjoga era

nuovamente eruttivo. Anche in questo caso le colate, almeno in prossimità della frattura presentavano spessori notevolmente esigui, vista anche la notevole pendenza dei fianchi dei coni in questione (Figura 1.11). Da tale frattura si generò una colata di lava che dopo aver invaso alcuni piccoli villaggi si propagò verso sud costeggiando interamente il cono Lemera ubicato a circa 900 m dal vent eruttivo. Il lobo orientale di tale colata lambì il campo lavico delle colate partite precedentemente a sud di Shaheru, come risulta visibile nella parte in basso a sinistra della figura 1.11.



Figura 1.11. Foto relativa alle colate originatesi dalla frattura apertasi sul fianco ovest dei coni Kanyambuzi-Mudjoga. Parte delle colate originate da questa frattura lambirono quelle formatesi più a nord (angolo in basso a sinistra). Nel riquadro in basso a destra è possibile osservare la frattura eruttiva vista da ovest.

Ancora più avanti, a sud del cono Lemera, le fratture emettevano ancora lava per una lunghezza di circa 2,2 km dando origine ad altre colate che si unirono a quelle formatesi dalla frattura sul Mudjoga, invadendo alcuni villaggi e giungendo a poche centinaia di metri dalla città di Goma. Nella figura 1.12 è possibile osservare le fratture a sud del cono Lemera e le relative colate. In questo punto del fianco sud si verificò inoltre la confluenza tra le suddette colate e il lobo orientale di una ulteriore

colata originatasi intorno alle 16:30 da una frattura ubicata ad una quota di circa 1800 m slm, circa 2 km ad ovest del sistema principale, visibile nella parte alta della figura 1.12. Questa colata percorse una distanza notevole, pari a circa 10 km, in pochissime ore, sino ad arrivare in città distruggendone parte del settore occidentale ed arrestandosi in corrispondenza della strada che collega Goma a Sake (figura 1.13)

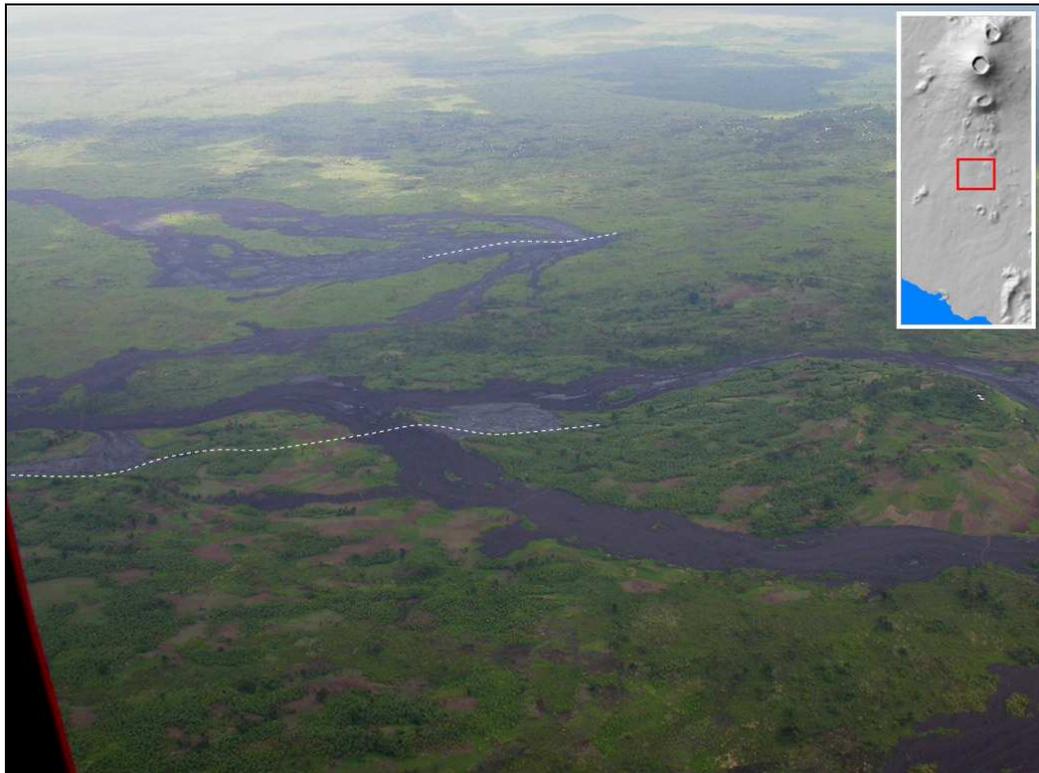


Figura 1.12. Foto relativa alle colate originatesi dalla frattura apertasi a sud del cono Lemera. Nella parte alta della figura è possibile osservare parte della colata originatasi da una frattura distante 2 km dalla zona del Lemera, il cui lobo orientale è confluito nelle colate suddette.

Dall'analisi delle caratteristiche degli eventi eruttivi fin qui descritti emerge come la presenza dei numerosi coni di scorie lungo il fianco sud del Nyiragongo, abbia in qualche modo esercitato un controllo sulla intensa fratturazione avvenuta. Tipicamente, le fratture sono più marcate tra i coni, e la lava fuoriesce solo dalle zone pianeggianti, mentre sui coni, sebbene ancora ben visibili, le fratture mostrano rigetti molto minori e non sono mai associate all'emissione di lava.



Figura 1.13. Foto relativa al fronte della colata partita dalla frattura più occidentale. La colata dopo aver attraversato e distrutta parte della città di Goma si è fermata in corrispondenza della strada che collega Goma a Sake.

Approssimativamente intorno alle 14:00, le fratture che avevano interessato il fianco sud del Nyiragongo, dalle zone a nord di Shaheru sino all'area a sud del Lemera, per un dislivello totale di quasi 1 km, raggiunsero il villaggio di Munigi, in pratica alla periferia di Goma.

Anche se parte del sistema di fratture, immediatamente a nord di Goma non presentava carattere eruttivo, in parecchi punti era possibile osservare l'intrusione di

piccoli dicchi da poche decine di centimetri sino a pochi metri al di sotto del piano di campagna (Figura 1.14).



Figura 1.14. Foto relativa alla colate originatesi dalla frattura nei pressi del villaggio di Munigi. Nel riquadro in alto a destra viene presentato un particolare dei piccoli dicchi emergenti da alcune fratture.

Il sistema di fratture più meridionale, ubicato in corrispondenza del villaggio di Munigi ad una quota di 1.570-1.580 m s.l.m., divenne attivo alle 16:10. Dalla frattura, che si estendeva per un totale di 1100 m, si originarono fontane di lava che risultarono nella creazione di una catena di piccoli coni di scorie (Figura 1.15), e produssero colate di lava lungo due lobi principali che successivamente si unirono in unico ramo. Il lobo più meridionale raggiunse l'aeroporto internazionale di Goma, distruggendo circa 1000 m di pista (Figura 1.16), e continuò il suo percorso attraverso la città e il suo centro storico, provocando devastazione (Figura 1.17) per 7 km fino a raggiungere, intorno alle 20:30, il lago Kivu, originando un piccolo delta di lava esteso 0,05 km², visibile in figura 1.18 (Komorowski et al., 2004).



Figura 1.15. Coni di scorie in prossimità della frattura di Munigi.



Figura 1.16. Impatto sull'aeroporto di Goma della colata di lava partita dalla frattura di Munigi.



Figura 1.17. Il passaggio distruttivo della lava nel cuore della città di Goma



Figura 1.18. Foto relativa al delta di lava formatosi sulle rive del lago Kivu in seguito all'arrivo della colata partita da Munigi.

Secondo le registrazioni sismiche, i testimoni dei villaggi sui pendii del vulcano e le osservazioni visive fatte dal personale scientifico del GVO, l'attività eruttiva in corrispondenza delle fratture durò per gran parte della notte fino alle prime luci dell'alba del 18 gennaio. Il bilancio finale dell'eruzione risultò devastante per la città di Goma. Circa 5.000 abitazioni furono distrutte, come anche 1/3 dell'aeroporto e l'intero centro commerciale, provocando danni all'80% dell'economia di Goma. Inoltre, numerose strutture pubbliche (45 scuole, 3 ospedali, 27 cliniche), e il 26% di tutti i distributori di benzina della città furono danneggiati fortemente (Baxter e Ancia, 2002; Baxter et al., 2004). Alla fine dell'eruzione circa il 15% della città risultava e circa 120.000 persone rimasero senza tetto (Figura 1.19).



Figura 1.19. Impatto delle colate del 2002 su Goma. L'immagine in basso a sinistra mostra l'esplosione della pompa di benzina raggiunta dalle colate di lava il 21 gennaio 2002, che provocò dai 60 ai 100 morti.

L'eruzione del 17 gennaio 2002 fu accompagnata dall'esodo spontaneo di circa 250.000 persone verso la città ruandese di Gisenyi, ubicata a meno di 1 km da Goma, e verso altri campi profughi sparsi su tutto il fianco sud del vulcano che raccolsero la gente che cercava di mettersi al sicuro dalla lava (Figura 1.20). Tra 60 e 100 persone morirono il 21 gennaio durante l'esplosione di una stazione di benzina invasa dalla lava, e circa 470 persone subirono bruciature, fratture e intossicazioni. Alla fine il bilancio fu di circa 160 vittime (Baxter et al., 2004), di cui alcune decine nei villaggi a nord di Goma. A causa dell'elevata fluidità e velocità della lava, infatti, le colate generate a quote medio alte del vulcano sono in grado di generare un rischio diretto per l'uomo, che spesso non ha il tempo di fuggire di fronte al loro rapido avanzamento.



Figura 1.20. Esodo spontaneo della gente di Goma verso il Ruanda.

Tale drammatico evento suscitò la rapida reazione delle Nazioni Unite, che inviarono prontamente una squadra di vulcanologi internazionali, con lo scopo di fornire delle prime valutazioni sugli eventi occorsi e su quelli attesi. Questa tesi beneficia delle numerose osservazioni compiute dai ricercatori di questa squadra uno dei quali, il Dott. Paolo Papale, è correlatore del presente lavoro.

1.4 – Caratteristiche della lava emessa lungo il sistema di fratture

L'elemento che maggiormente colpisce osservando le colate di lava emesse alle diverse quote del vulcano, è la forte differenza tra i campi lavici generati dalle fratture sommitali e quelli prodotti in corrispondenza della città di Goma. Come già discusso, il campo di lava in corrispondenza del cono Shaheru, ad una quota di circa 2750 m slm, è costituito da un sottile strato dello spessore di 5-15 cm che mantella la topografia e che presenta una superficie molto liscia (Figura 1.6). Ovunque un sottile strato di lava solidificata avvolge la vegetazione fino ad un'altezza approssimativa di un metro, suggerendo che la colata attiva avesse all'incirca questo spessore.

Al contrario, le colate di lava che hanno raggiunto e devastato la città di Goma, sono di tipo "aa" (Figure 1.19 e 1.20), con superficie estremamente rugosa e frammentata, e presentano spessori dell'ordine di pochi metri (fino ad un massimo stimato intorno a 4 m) che corrispondono allo spessore della colata attiva. Le colate emesse a quote intermedie tendono ad avere anche caratteristiche intermedie.

Sulla base di misure di viscosità, esperimenti di cristallizzazione, e analisi tessiturali sulle lave del Nyiragongo del 17 gennaio 2002, e di simulazioni numeriche dello scambio termico tra il magma in risalita lungo dicchi e le rocce incassanti, Giordano et al. (2007) hanno concluso che la ragione di tali differenze sta nel diverso grado di sottoraffreddamento che ha caratterizzato la lava emessa a diverse quote. A sua volta, tale sottoraffreddamento è stato interpretato come dovuto al diverso percorso compiuto dal magma lungo i dicchi intrusi all'interno delle fratture, dalla zona d'origine fino al punto d'emissione. Il magma emesso a quote più basse avrebbe percorso maggiori distanze dalla zona d'origine, verosimilmente localizzata in corrispondenza del cratere centrale del Nyiragongo, perdendo maggiormente calore ed aumentando la sua viscosità di circa un ordine di grandezza. Al contrario, il magma a più alta quota non avrebbe avuto il tempo di raffreddarsi efficacemente, e sarebbe stato eruttato a temperature maggiori o prossime a quella di liquidus. La viscosità corrispondente è dell'ordine di 10 Pa s, tra le più basse mai registrate in magmi terrestri, giustificando l'elevata velocità delle colate di lava e l'assenza di depositi di scoria alle quote più alte in seguito al totale disaccoppiamento meccanico

tra liquido e gas. Giordano et al. (2007) concludono che le peculiarità reologiche del magma emesso al Nyiragongo e la dinamica eruttiva del gennaio 2002 hanno determinato colate di lava ad alta quota aventi una scarsa capacità distruttiva (come testimoniato dall'abbondante vegetazione non abbattuta dalla lava) ma rappresentanti un elevato rischio per l'uomo a causa dell'elevata velocità, stimata dell'ordine delle decine di km/h. Per le stesse ragioni, le colate di lava emesse a bassa quota e penetrate nella città di Goma erano caratterizzate da bassa velocità dell'ordine di 1-10 km/h, che ha permesso a centinaia di migliaia di profughi di fuggirne l'avanzata, ma da capacità distruttiva rilevante.

Lo studio di Giordano et al. (2007) suggerisce che futuri eventi di fratturazione ed emissione di colate a diverse quote tenderanno a produrre simili variazioni nella reologia e nelle caratteristiche della lava. Tuttavia, come gli stessi autori notano non è possibile escludere che un più rapido processo di fratturazione, o il succedersi di eventi simili risultanti in un'anomalia termica delle rocce incassanti e quindi minore efficienza di raffreddamento del magma in risalita, possano in futuro risultare nell'emissione di lava più fluida alle basse quote. In tal caso, la minaccia per le centinaia di migliaia di persone che vivono a Goma sarebbe enormemente più grande, in quanto la rapida propagazione delle colate di lava potrebbe non lasciare tempo sufficiente per sfuggirne l'avanzata.

Capitolo 2

Colate di lava

2.1 – Le caratteristiche delle colate di lava

I sistemi vulcanici sono essenzialmente costituiti da fluidi ad alta pressione e temperatura che interagiscono con le rocce circostanti, inducendo sforzi che eventualmente si sovrappongono a quelli di origine tettonica. Il superamento di soglie critiche di sforzo genera la formazione e la propagazione di fratture nelle quali i fluidi magmatici trovano una via preferenziale per raggiungere la superficie. La risalita del magma dal mantello, il suo stoccaggio e differenziazione nella crosta terrestre, la sua possibile risalita verso la superficie all'interno di condotti e dicchi, la sua dispersione nell'ambiente atmosferico e lungo le pendici del vulcano, sono tutti processi che coinvolgono trasferimenti di massa, quantità di moto, e energia per un fluido multifase in condizioni transienti ed in un ambiente intrinsecamente tridimensionale, eterogeneo ed anisotropo. Inoltre, la messa in posto dei prodotti induce talvolta fenomeni secondari (tsunami, lahar), tutt'altro che trascurabili ai fini dell'analisi della pericolosità.

Il magma che arriva in superficie prende il nome di lava quando è emesso nel corso di eruzioni effusive e forma delle colate che scorrono lungo i fianchi del vulcano. Il termine "lava" nasce dal dialetto napoletano e viene riferito ai torrenti di acqua e fango che scendevano dai rilievi circostanti la città in seguito a forti eventi piovosi, come descritto in alcune cronache delle eruzioni storiche del Vesuvio. In seguito all'eruzione del Vesuvio del 1737, il termine "lava di fuoco" venne utilizzato per descrivere le colate di lava in generale (Serao, 1738).

La lava è un sistema multifase, chimicamente eterogeneo, che si comporta come un fluido non Newtoniano. La composizione chimica della lava corrisponde a quella del magma originario privato dei gas che vengono liberati prima e durante l'eruzione (Carroll e Holloway, 1994). Il principale requisito per l'emissione di magma come continuo liquido è che la viscosità del magma sia sufficientemente bassa da impedire la frammentazione del magma prima della sua uscita a giorno (Cashman et al., 2000). Il flusso allo stato liquido ad alta temperatura prende il nome di colata lavica. A seconda del contenuto in silice, i magmi e i prodotti che ne derivano vengono detti acidi se contengono molta silice (più del 52%) e basici se ne contengono relativamente poca. Molte delle lave presenti sulla superficie terrestre derivano da magmi basici e sono chiamate basalti. Le lave basiche possono essere eruttate da vulcani centrali, da sorgenti puntiformi o da fratture di modesta lunghezza. Queste lave sono caratterizzate da volumi più ridotti e coprono aree molto minori rispetto alle lave fissurali che invece si originano da sistemi di frattura lunghi a volte molti chilometri. Ad esempio, la più grande eruzione effusiva storica che ha prodotto lave di questo tipo è quella di Laki (Islanda) del 1783. Durante questa eruzione la lava infatti fu emessa da una sorgente lineare (Lakagigar) lunga 25 km lungo la quale si allinearono più di 100 punti diversi di emissione. Nel corso di circa sette mesi furono emessi circa 12 km^3 di lave basaltiche che coprirono un'area di 565 km^2 e raggiunsero distanze massime di oltre 50 km dal punto di emissione (Thorarinsson, 1969).

Meno diffuse sono le lave di tipo acido, in quanto i magmi con alto contenuto in silice danno più facilmente luogo a eruzioni esplosive. I volumi dei prodotti piroclastici emessi dalla stragrande maggioranza dei vulcani non basaltici è molto superiore al volume delle lave. Non è comunque raro che magmi evoluti ed intermedi siano emessi sotto forma di lave. Le lave con alti contenuti in silice hanno poca capacità di movimento e si accumulano vicino al punto di emissione formando dei rilievi detti duomi vulcanici. Quando si raffreddano appena sotto la superficie terrestre, provocando il sollevamento dell'area, sono chiamati criptoduomi. Alcuni dei più famosi duomi vulcanici sono ad esempio quello presente al Monte St. Helens (U.S.A.), il duomo Santiaguito, ubicato sul fianco sud est del vulcano Santa Maria in Guatemala (Rose, 1973) e il duomo presente al vulcano Soufrière Hills a Montserrat, nella Federazione delle Indie Occidentali.

Una delle caratteristiche fisiche più importanti delle colate di lava è la viscosità, che viene definita come la resistenza di un fluido allo scorrimento e dipende in modo particolare dalla composizione chimica e dalla temperatura del fluido. Una lava molto calda e poco viscosa scorre velocemente, mentre una con temperatura più bassa tende ad essere più viscosa, scorre lentamente e tende ad accumularsi in colate molto spesse. A parità di temperatura, le lave derivanti da magmi basici sono in genere più fluide di quelle derivanti da magmi acidi. Con la distanza dal centro eruttivo, diminuisce la temperatura e in ogni tipo di lava aumenta la viscosità.

La velocità di scorrimento delle lave è generalmente di qualche chilometro all'ora e diminuisce ulteriormente nelle zone più lontane dalla bocca eruttiva. Proprio per la loro scarsa velocità, le colate di lava raramente rappresentano un pericolo per le vite umane. La velocità dei flussi lavici dipende da un certo numero di fattori differenti: il tasso eruttivo, la viscosità del magma, la pendenza e la natura del canale in cui fluisce la lava. All'interno dei flussi di lava esiste un complesso gradiente di velocità, che dipende dalle condizioni locali oltre che dai processi che portano alla formazione di argini e della crosta superficiale, e che infine possono condurre alla formazione di tunnel di lava. Come detto in precedenza, oltre che dalla topografia, la velocità delle colate di lava dipende principalmente dal tipo di lava e dalla viscosità. Generalmente le colate di lava basiche presentano velocità di alcune decine di chilometri mentre le lave più acide hanno velocità molto basse dell'ordine di pochi metri orari.

Le lave chimicamente più evolute hanno quindi in genere volumi minori e le distanze percorse in genere non superano i pochi chilometri. Vi sono comunque eccezioni notevoli a questa regola: le lave fonolitiche e trachitiche iperalcaline del Rift Orientale Africano, per esempio, sono capaci di percorrere significative distanze mantenendo spessori modesti come riflesso della loro particolare composizione che conferisce loro viscosità non troppo dissimile da quella dei basalti.

Durante l'effusione, il magma è soggetto a un processo di raffreddamento che ne modifica in maniera continua le proprietà fisiche. In particolare, le proprietà reologiche della lava sono fortemente dipendenti dalla temperatura e hanno un ruolo fondamentale nel determinare la dinamica delle colate. La colata disperde calore rapidamente dalle zone a contatto con l'aria e, dopo un percorso a volte molto breve, si ricopre di una crosta solida che aumenta di spessore con la distanza. Una volta formatasi la crosta, la lava ancora calda resta isolata dall'esterno con il conseguente

rallentamento del raffreddamento. Fino a che la crosta è abbastanza sottile e plastica, essa può deformarsi senza rompersi. Al contrario, quando è spessa e rigida, il movimento della lava calda sottostante la rompe in pezzi. Questo processo, detto autobrecciatura, forma lastre, blocchi e detriti solidi che ricoprono molte colate laviche.

Le caratteristiche sopra citate mostrano brevemente quanto complesse possano essere le fenomenologie associate a questo tipo di eventi. Dal momento in cui la lava fuoriesce fino al suo raffreddamento la casistica dei processi fisici che avvengono risulta essere molto ampia: perdite di calore per conduzione, convezione e radiazione con la conseguente formazione di crosta e tubi di lava, transizioni da superficie lisce a ruvide durante il raffreddamento, formazione di argini o di materiale solidificato ai margini del flusso, fusione e erosione del terreno nel caso in cui la temperatura e la velocità della lava siano sufficientemente alte. Da qui, l'esigenza di creare dei modelli, a volte molto semplici, a volte molto complessi, per affrontare lo studio di questi eventi con il duplice scopo, spesso non contemporaneamente perseguibile, di comprendere e prevedere sia le dinamiche che le conseguenze spesso drammatiche per il territorio e la popolazione.

2.3 – I modelli di colata di lava

Lo studio delle dinamiche delle colate di lava implica il considerare di aspetti molto complessi dei materiali multifase come le eterogeneità fisiche e chimiche e in particolar modo come queste cambiano nel tempo e nello spazio (Griffiths, 2000). I modelli finora creati sono generalmente ideati per tenere conto di alcune caratteristiche selezionate, come le dinamiche di flusso (Hulme, 1974; Ishihara et al., 1990; Baloga et al., 1995; Miyamoto e Sasaki, 1998; Tallarico e Dragoni, 2000), il raffreddamento (Griffiths e Fink, 1993; Keszthelyi e Denlinger, 1996; Neri, 1998; Harris e Rowland, 2001; Patrick et al., 2004) e la reologia (Cashman et al., 1999; Saar et al., 2001, e Harris e Rowland, 2001). Questi modelli sono supportati da numerosi studi teorici relativi ai fattori di controllo esercitati dalla morfologia (Hulme, 1974; Dragoni et al., 1986; Baloga 1987; Crisp e Baloga 1990b; Wadge e

Lopes, 1991). Oltre che dalla viscosità, la forma finale di una colata è controllata dalla soglia di snervamento del magma (Hulme, 1974), dal tasso eruttivo (Walker, 1973), dal volume eruttato (Malin, 1980; Guest, et al., 1987), dal raffreddamento (Crisp e Baloga 1990a) e da altri parametri. Le difficoltà nella modellizzazione delle colate di lava sono anche dovute alla notevole variabilità nel tempo dei parametri sopra elencati, ad esempio durante il raffreddamento ci sono notevoli variazioni della temperatura, della soglia di snervamento e della viscosità. Non è quindi facile studiare gli effetti che questi parametri hanno sulla morfologia delle colate di lava.

Un obiettivo importante della vulcanologia è lo sviluppo di modelli per simulare fenomeni a rischio elevato. I modelli esistenti sulle colate di lava possono essere divisi principalmente in due categorie: modelli deterministici e modelli probabilistici. I modelli deterministici sono basati sulla risoluzione delle equazioni del trasporto, ovvero la conservazione della massa e i bilanci della quantità di moto e dell'energia termica. Questi modelli necessitano di complesse descrizioni delle proprietà dei magmi, in particolare delle proprietà reologiche.

Il codice LavaSIM (Fujita et al., 2004), ad esempio, rappresenta uno dei modelli più avanzati per la trattazione della fluidodinamica 3D delle colate di lava. Il codice è basato su un algoritmo descritto in Hidaka e Ujita (2001) e Hidaka et al., (2002). LavaSIM è capace di considerare tridimensionalmente i processi di convezione, di spreading e di solidificazione, la dipendenza della viscosità del magma dalla temperatura e lo spessore minimo di spreading. Il modello formula rigorosamente l'interfaccia tra il fuso e la crosta. Il codice può trattare la superficie libera associando un attributo ad ogni cella della griglia. Le celle di convezione sono completamente riempite con lava fusa o crosta, mentre le celle della superficie libera non sono completamente riempite e rappresentano i contorni esterni del flusso. I trasferimenti di massa e di calore, connessi alla propagazione della lava, sono modellati aggiornando gli attributi delle celle. Nella formulazione del codice è necessario assumere che il fuso non si disperda nell'atmosfera e che la crosta galleggi e si muova solo verticalmente. Il criterio di cessazione del flusso è basato sullo spessore minimo di spreading dovuto al fatto che la lava presenta una soglia di resistenza agli sforzi di taglio non nulla. Questo modello è stato applicato per simulare le colate di lava al Mt. Fuji (Fujita et al., 2004).

Un altro dei metodi che ha riscontrato maggior successo nella modellistica delle colate di lava è quello che adotta gli Automi Cellulari. Gli Automi Cellulari utilizzano metodi capaci di considerare la conservazione della massa, lo scambio termico con l'atmosfera, le variazioni di viscosità con la temperatura ed il comportamento non Newtoniano del magma (Crisci et al., 1986; Barca et al., 1987, 1988, 1993; Ishihara et al., 1988, 1989; Miyamoto e Sasaki, 1997; Crisci et al., 2004). Gli Automi Cellulari (von Neumann, 1966) sono uno dei primi modelli di calcolo parallelo utilizzato per lo studio di sistemi la cui evoluzione può essere descritta esclusivamente attraverso le interazioni locali delle loro parti componenti. Possono essere descritti come una matrice di semplici unità di calcolo, ciascuna interagente con le proprie vicine. Ogni unità rappresenta una porzione di spazio (cella) e modella le caratteristiche ritenute importanti per l'evoluzione del sistema. In pratica l'Automa Cellulare evolve cambiando gli stati degli automi finiti a passi discreti, applicando simultaneamente la stessa funzione di transizione a tutte le celle. Negli ultimi decenni questi modelli, utilizzati in vari campi dalla fisica alle scienze sociali (Wu, 1998; Frisch et al., 1986; Succi et al., 1991; Di Gregorio et al., 1998), sono stati impiegati anche per la modellizzazione dello scorrimento delle colate di lava (Crisci et al., 1982, 1986, 1999a). Il modello, progettato inizialmente a tre dimensioni, è stato successivamente ridotto a bidimensionale per ridurre i costi di calcolo, e aveva come scopo quello di descrivere le transizioni di stato tra 4 celle confinanti (Barca et al., 1988, 1993, 1994). Ogni cella era caratterizzata da uno spessore minimo di lava proporzionale ad un termine dipendente dalla temperatura. Per simulare volumi modesti di flussi lavici venivano richieste circa 2000 interazioni. Nel 1997, Miyamoto e Sasaki hanno inoltre inserito alcune modifiche per superare alcuni problemi relativi alla dipendenza dalla griglia dei risultati delle simulazioni. Lo sviluppo del modello ha portato alla formulazione di Reti Cellulari Non lineari (Cellular Nonlinear Networks, CNN) che sono state utilizzate per la descrizione dell'evoluzione reologica di flussi lavici all'Etna (Del Negro et al., 2005).

Come detto in precedenza, l'alta complessità delle equazioni del trasporto non permette a volte una completa modellizzazione delle colate di lava. Per superare queste difficoltà computazionali sono stati adottati dei modelli semplificati, come i modelli bidimensionali (2D). Tra quest'ultimi ricordiamo quello di Costa e Macedonio (2005), basato sulle equazioni mediate sulla profondità (*shallow water*

equation, SWE) ottenute integrando le equazioni della massa, della quantità di moto e dell'energia sulla profondità del fluido, dal fondo fino alla superficie libera. Questo metodo è valido entro il limite $H^*/L^{*2} \ll 1$ (dove H^* è l'altezza indisturbata del fluido e L^* la scala caratteristica di lunghezza d'onda nella direzione del flusso). Si ha quindi a che vedere con onde molto lunghe o con "acque superficiali", da cui proviene appunto il termine "shallow water". I modelli di flusso mediati sulla profondità, basati su quelle che vengono definite equazioni SWE, furono introdotti per la prima volta da De San Venant nel 1864 e da Boussinesq nel 1872. Attualmente, le applicazioni delle equazioni SWE, includono una vasta gamma di problematiche che hanno implicazioni importanti per la valutazione del rischio, dalla simulazione dei flussi (Burguete et al., 2002) alla propagazione degli tsunami (Heinrich et al., 2001). Il modello, che è stato applicato all'eruzione dell'Etna avvenuta nel periodo 1991-1993, può riprodurre semi-quantitativamente il comportamento delle colate di lava reali e la grandezza delle quantità implicate, quali lo spessore e la temperatura della lava, mostrando un buon accordo con le osservazioni effettuate direttamente sul campo. Questo metodo presenta una robusta descrizione fisica e un buon compromesso fra una piena descrizione tridimensionale del fenomeno e la necessità di diminuire i tempi di calcolo. I buoni risultati ottenuti da questa versione preliminare del modello lo rendono potenzialmente ottimo per la previsione dei percorsi delle colate di lava.

Un ulteriore esempio di un modello che cerca di superare le difficoltà computazionali dovute alla complessità dei processi di propagazione delle colate di lava, è FLOWGO (Harris e Rowland, 2001). FLOWGO è un modello numerico che segue ogni elemento di una colata di lava durante lo scorrimento in un canale. La base del modello è la valutazione di velocità della lava vista come un fluido di tipo Bingham nel suo fluire in un canale approssimato ad una depressione semicircolare. Durante il calcolo viene considerato lo scambio termico per determinare gli effetti di variazione di temperatura sulla reologia della lava. Partendo da alcune condizioni iniziali note al vent, la temperatura, la cristallinità, la reologia e le velocità vengono calcolate dal modello e trasferite alla successiva unità di lunghezza del canale, con un eventuale arrestamento se la velocità è zero o se il nucleo del flusso ha raggiunto la temperatura di solidus. Il modello è stato applicato e calibrato simulando i campi lavici al Mauna Loa, al Kilauea e all'Etna (Harris e Rowland, 2001). Questo modello permette di

analizzare la storia termo-reologica delle colate di lava, identificando fattori importanti come ad esempio la distanza percorsa dal flusso in un canale, dato fondamentale ai fini della valutazione del rischio. Comunque, anche se questo codice adotta un dettagliato bilancio del calore ed una descrizione accurata della reologia della lava, i suoi principali limiti sono contenuti intrinsecamente nella rigorosa assunzione di un profilo monodimensionale.

I modelli probabilistici sono solitamente basati sul concetto di massima pendenza (Macedonio et al., 1990; Dobran e Macedonio, 1992; Favalli et al., 2005, 2006) e danno massima importanza agli effetti topografici. Anche se meno esatti da un punto di vista fisico, tali modelli sono in grado di riprodurre bene la geometria dei campi lavici, e soprattutto, grazie alla rapidità di calcolo, possono essere utilizzati per studi sistematici sulla pericolosità e per applicazioni in tempo reale.

Nel modello di Macedonio et al. (1990) si assume che la topografia svolga il ruolo principale sul controllo dei percorsi delle colate di lava. L'identificazione delle differenti zone potenzialmente invase da una colata di lava, viene effettuata calcolando la probabilità di invasione usando un algoritmo Monte Carlo. Il flusso può propagarsi lungo percorsi casuali a partire da un punto di origine (*vent*) su una mappa topografica seguendo un insieme di leggi di propagazione. I percorsi non possono propagarsi verso l'alto, mentre invece quelli verso il basso sono più probabili lungo la direzione di massima pendenza. Quando vengono generati parecchi percorsi le zone con maggiore probabilità vengono attraversate molte volte, mentre le zone con probabilità più bassa sono attraversate molto raramente. I percorsi dei flussi non hanno dimensioni laterali e non possono riempire bacini; quando molti percorsi entrano in un bacino, si propagano in modo random e si espandono fino a che non toccano i fianchi del bacino e si fermano. Di conseguenza, un bacino si comporta come un dispersore per i percorsi dei flussi e questo permette il loro facile riconoscimento. La portata non può essere specificata nei punti di origine e il programma non tiene conto del tempo. Esso mostra semplicemente quali percorsi sono più probabili quando viene permesso ad un flusso di fuoriuscire da punti di emissione dati. Il programma è stato usato in applicazioni alle eruzioni dell'Etna del 1983, del 1985, del 1987 e del 1989 e per la realizzazione di una mappa di pericolosità al vulcano (Macedonio et al., 1990), usando dei dati relativi alla distribuzione spaziale dei vent eruttivi e dati strutturali da Guest e Murray (1979) e

Villari et al. (1988). Altre applicazioni sono state effettuate da Barberi et al. (1992b), Barberi e Villari (1994) e Dobran e Macedonio (1992), per l'eruzione dell'Etna del 1991-1993, fornendo in breve tempo un mappa di probabilità di invasione che venne utilizzata per la creazione di barriere artificiali ad eruzione in corso (Barberi et al., 1992a, 1993; Dobran e Macedonio, 1992). Più recentemente, il modello è stato utilizzato durante l'eruzione dell'Etna del luglio 2001.

Esistono inoltre anche dei modelli che presentano un approccio sia deterministico che probabilistico, come quello proposto da Young e Wadge (1990) e Wadge et al. (1994) volto alla modellizzazione del fronte della colata di lava. La caratteristica principale di questo programma è la relativa velocità di calcolo. Ciò viene realizzato simulando soltanto la parte anteriore di una colata lavica, presupponendo implicitamente l'arrivo della lava sul fronte lavico. Per ogni iterazione, un volume di lava al di sopra di un volume critico è distribuito alle relative otto celle vicine. Assumendo una reologia Binghamiana, questo è possibile quando lo spessore della lava è abbastanza grande che la sollecitazione al taglio supera la soglia di snervamento su un dato pendio. Ogni volta che una cella ha distribuito con successo la propria lava in eccesso, diventa inattiva durante l'iterazione seguente (Wadge et al., 1994). Questo modello non considera la variazione della reologia della lava con la temperatura, ma consente variazioni nel tasso eruttivo e nella soglia di snervamento. Il modello è stato applicato all'eruzione del 1988-1989 del vulcano Lonquimay. Tuttavia, come notato dagli autori, questa applicazione ha sollevato delle riserve circa il carattere deterministico di questo modello. I risultati migliori sono stati ottenuti dagli stessi autori per le colate di lava all'Etna quando un metodo probabilistico, basato su una simulazione Monte Carlo, è stato realizzato (Wadge et al., 1994). In questo caso i parametri di input al modello venivano variati in maniera random secondo una probabilità precedentemente computata, valutata utilizzando uno studio sulle colate di lava all'Etna lava nel periodo 1763-1989.

Esistono in letteratura ulteriori modelli semplificati (Wadge, 1978; Huppert, 1982; Pieri, 1986; Crisp e Baloga, 1990b; Dragoni, 1993). Anche se ciascuno tiene conto di alcuni aspetti della deposizione e del raffreddamento delle colate, la maggior parte di essi sembra essere troppo semplificata. Generalmente, i metodi sono basati su equazioni ottenute empiricamente per casi molto semplici e sono difficili da applicare a condizioni generali.

L'uso dei modelli digitali del terreno (DEM), unito all'elaborazione di modelli matematici ha senza dubbio fornito un ulteriore mezzo per chiarire i fattori dominanti che controllano la morfologia delle colate di lava (Wadge et al., 1994; Crisci et al., 2003; Del Negro et al., 2005; Favalli et al., 2005, 2006). Uno dei modelli più completi è quello di Miyamoto e Papp (2004), che ha come scopo quello di valutare e quantificare gli effetti della topografia preesistente sul movimento di un flusso lavico. Questo modello utilizza un'approssimazione Binghamiana, visto che questa è una delle più semplici e più ampiamente utilizzate per descrivere la reologia della colate di lava (Griffiths, 2000), sebbene altri modelli sofisticati come quello di Herschel-Bulkley possono essere più realistici (Balmforth et al., 2001).

In questa tesi di dottorato verrà utilizzato il codice probabilistico DOWNFLOW (Favalli et al., 2005, 2006), unitamente a modelli digitali del terreno. Le caratteristiche del codice, la sua calibrazione, e il tipo di modelli digitali utilizzati saranno ampiamente discussi in seguito. Prima di introdurre tali argomenti, vengono descritti i risultati relativi alla mappatura delle colate di lava del Nyiragongo. L'ottenimento di mappe accurate di campi lavici passati è un prerequisito fondamentale per la calibrazione del codice DOWNFLOW, per cui tale attività ha rappresentato una parte rilevante del presente studio di tesi.

Capitolo 3

Mappatura delle colate laviche delle eruzioni del Nyiragongo del 1977 e del 2002

3.1 – Mappatura delle colate laviche del 2002

Il lavoro di mappatura è stato molto lungo ed ha portato ad un'ottima definizione del campo lavico grazie all'utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione. Questo tipo di studio era iniziato tra mille difficoltà vista la mancanza nei primi mesi successivi all'eruzione di dati morfometrici relativi alle colate laviche. Le acquisizioni satellitari erano infatti parzialmente caratterizzate dalla presenza di nubi che schermavano così le caratteristiche del territorio circostante il Nyiragongo.

La prima fase del lavoro di mappatura è stata così effettuata attraverso l'analisi di più di 150 immagini digitali e di due ore di video riprese dall'elicottero, raccolte durante due indagini nel gennaio 2002. La composizione di alcune di queste immagini è esemplificata in due foto panoramiche, qui riportate, relative alle due colate che hanno invaso e parzialmente distrutto la città di Goma (Figure 3.1 e 3.2).



Figura 3.1. Foto panoramica della colata che si è originata dalla frattura eruttiva apertasi nei pressi del villaggio di Munigi. La colata ha attraversato parte della città distruggendo la pista dell'aeroporto e ha continuato ad avanzare fino a formare un piccolo delta di lava in corrispondenza della costa nord del Lago Kivu (fuori dal campo della figura).



Figura 3.2. Foto panoramica della colata che si è originata dalla frattura eruttiva più occidentale (colata “West”) apertasi intorno a quota 1860 m slm, a circa due chilometri dal sistema di frattura principale.

Questo tipo di studio ha avuto durante la prima fase della ricerca lo scopo di ottenere una prima mappatura delle colate che hanno colpito Goma, per una prima valutazione oltre che delle aree della città interessate dalle colate anche della stima della quantità di lava fuoriuscita dalla frattura di Munigi, che ha prodotto la principale colata di lava in città. Grazie a queste immagini in una fase successiva dello studio è stato anche possibile identificare le isole di terreno lasciate dalle colate laviche nel loro fluire, spesso non identificabili se non con immagini ad altissima risoluzione (Figura 3.3).



Figura 3.3. Particolare del campo lavico a sud del cono Shaheru. Nella foto sono riconoscibili sia la frattura eruttiva che le numerose isole lasciate dalla lava nel suo fluire.

Nel gennaio del 2003, e cioè esattamente un anno dopo l'eruzione, è stata acquisita un'immagine LANDSAT 7 ETM+ con una risoluzione della banda pancromatica di 15 m che ha permesso una analisi della quasi totalità del campo lavico dell'eruzione del 2002. E' stato così finalmente possibile esaminare non solo le caratteristiche morfometriche delle colate di lava ma anche e soprattutto l'ubicazione e l'estensione del lungo sistema di fratture che ha interessato tutto il fianco sud. Attraverso un software GIS è stata così effettuata la digitalizzazione di tutte le colate visibili dall'immagine LANDSAT. Per quanto riguarda la tracciatura della colata che si è originata dalla frattura apertasi a ovest del cratere centrale del Nyiragongo (Kabanga nella tabella 3.1) è stata utilizzata inizialmente un'immagine ASTER acquisita il 4 marzo 2003 (<http://www.gsi.jp>) visto che, nell'immagine LANDSAT a disposizione, questa parte del territorio era non visibile a causa del plume uscente dal cratere centrale del vulcano (Figura 3.4).

Grazie a stime degli spessori massimo e minimo delle colate, effettuate sulla base di rilievi di terreno, è stato possibile ottenere un stima della quantità di lava emessa nell'evento del 2002 (Tabella 3.1) che ben si accorda con la stima di 20 Mm³ fornita dagli studiosi nei giorni successivi l'eruzione.

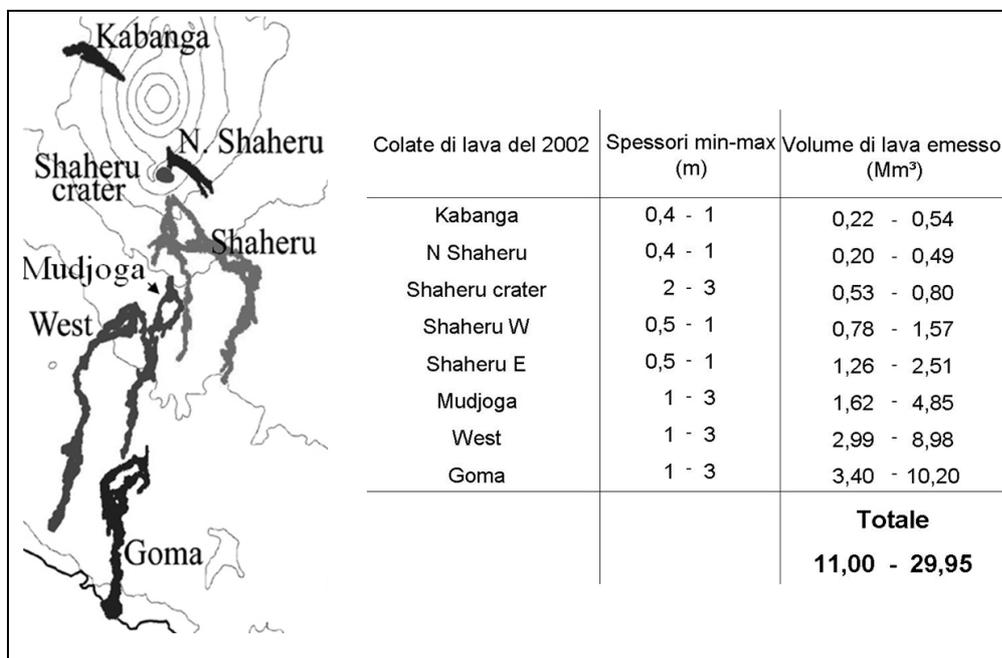


Tabella 3.1. Stima degli spessori e dei volumi delle colate dell'eruzione del 2002.

Con l'acquisizione e l'analisi di altre immagini è stato inoltre possibile migliorare la prima mappatura effettuata, fino ad arrivare ad un metro di risoluzione per la colata di Goma, mentre per quanto riguarda le altre colate del 2002 si è arrivati a 3 m di risoluzione per circa il 90% dei flussi considerati. Nella figura 3.5 vengono riportati alcuni particolari della mappatura finale relativi alle colate che sono partite a nord del cono di Shaheru (a), la colata West (b), e quella che è partita dal villaggio di Munigi per poi distruggere parte della città di Goma (c) (vedi anche tabella 3.1).

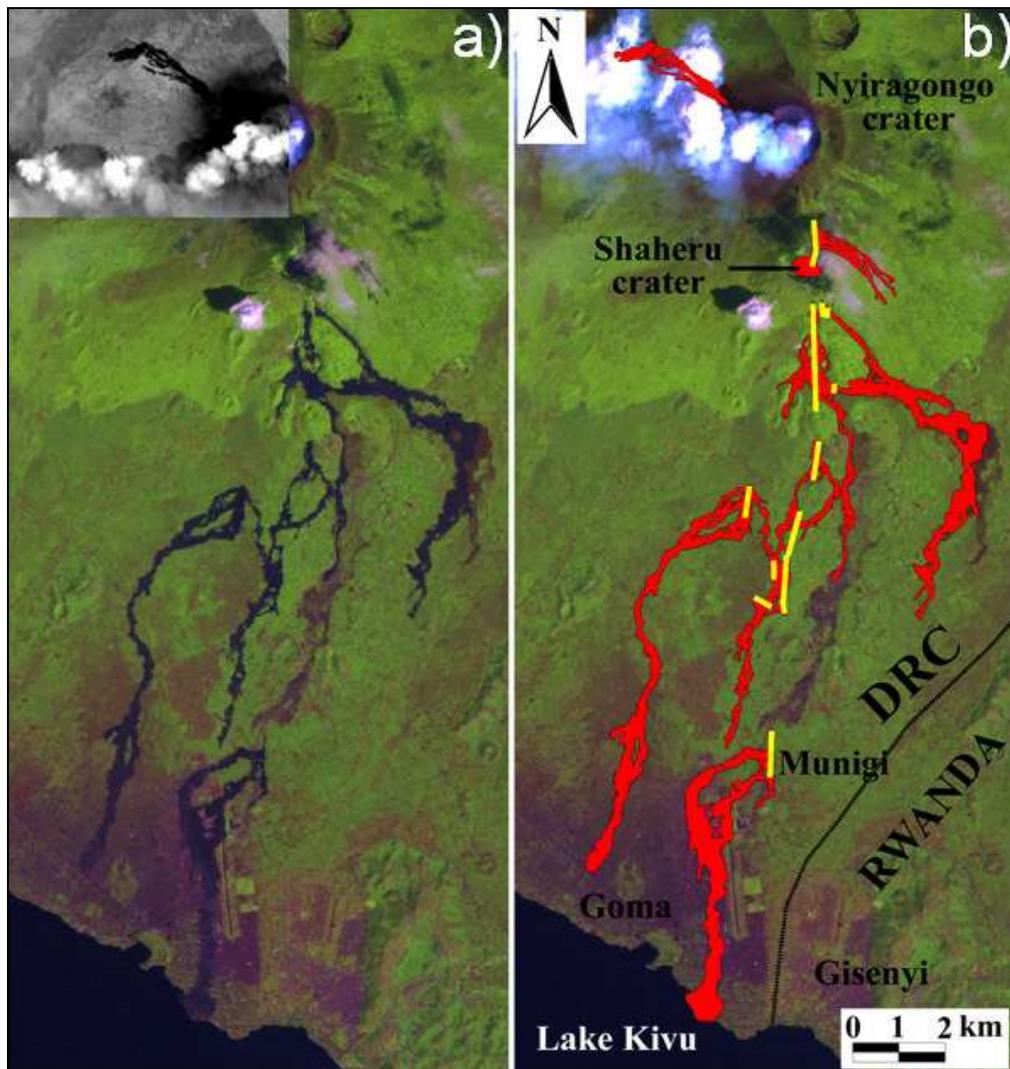


Figura 3.4. a) Immagine LANDSAT 7 ETM+ acquisita il 31 gennaio 2003 relativa al fianco sud del vulcano Nyiragongo e immagine ASTER relativa al settore occidentale del cono centrale, acquisita il 3 aprile 2003. b) Mapping delle fratture eruttive e delle colate di lava dell'eruzione del 17 gennaio 2002. Sono visibili i campi di lava del 1977, parzialmente ricoperti dalle lave del 2002.

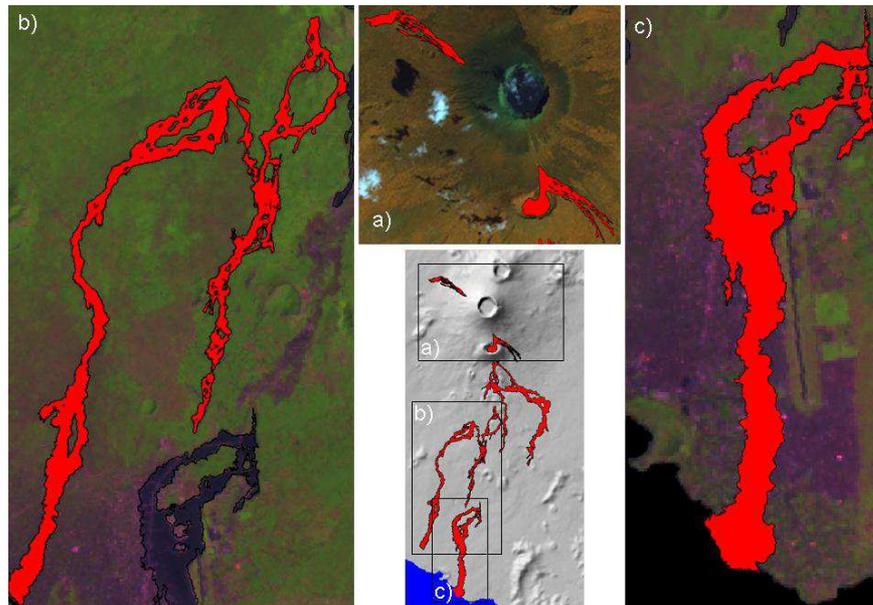


Figura 3.5. Mappatura finale dei flussi dell'eruzione del 2002. In figura sono presentate (a) le colate originatesi nelle vicinanze del cratere centrale e del cono Shaheru, (b) la colata west, il cui ramo destro confluisce nella colata partita ai piedi del cono Mudjoga e (c) la colata che ha colpito Goma.

3.2 – Mappatura delle colate laviche del 1977

Alcune delle immagini LANDSAT raccolte, sono antecedenti all'eruzione del 2002. Grazie all'analisi di alcune di queste immagini è stato possibile realizzare una mappatura del campo lavico della precedente eruzione del 10 gennaio 1977. Anche per questa eruzione è stata così creata una mappatura di tutte le colate di lava e delle rispettive fratture eruttive (Figura 3.6 e 3.7).

Questa eruzione, come quella del 2002, è stata caratterizzata dall'apertura di un sistema di fratture ubicato principalmente tra il cratere centrale e l'area a sud del cratere Shaheru, ma anche il fianco ovest e quello nord (quest'ultimo non interessato dall'eruzione del 2002) sono stati caratterizzati da colate laviche (Sud Kabanga e Nord Baruta, nella tabella 3.3). Le stime dei volumi emessi durante questa eruzione (Tabella 3.3) sono inferiori rispetto a quelle dell'eruzione del 2002, in accordo al fatto che l'eruzione del 1977 è stata caratterizzata da una minore estensione del sistema di fratture eruttive.

Satellite	Data di acquisizione	Risoluzione (m)
Landsat MSS	12-03-1975	57 m
Landsat MSS	04-12-1984	57 m
Landsat 5 TM	07-08-1987	28 m
Landsat 5 TM	04-08-1989	28 m
Landsat 5 TM	17-01-1995	28 m
Landsat 7 ETM+	15-06-2000	15 m
Landsat 7 ETM+	11-12-2001	15 m
Landsat 7 ETM+	15-01-2003	14.5 m
Landsat 7 ETM+	31-01-2003	15 m
IKONOS	15-02-2003	1 m
ASTER	04-03-2003	15 m

Tabella 3.2. Immagini satellitari utilizzate e relativa risoluzione spaziale.

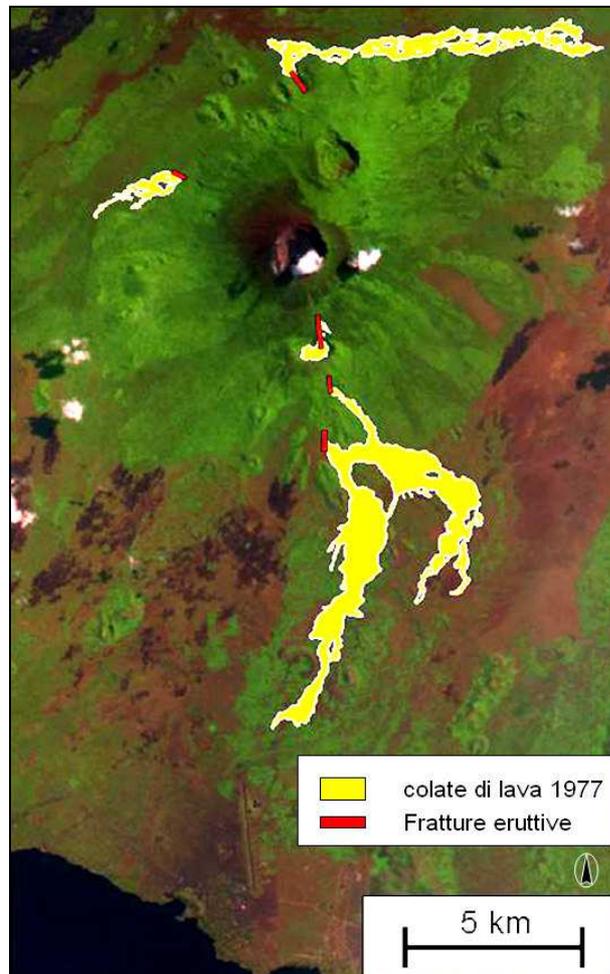


Figura 3.6. Mappatura delle fratture eruttive e delle colate di lava dell'eruzione del 10 gennaio 1977 del Nyiragongo. L'immagine satellitare di sfondo è una LANDSAT 5 TM, acquisita l'8 luglio del 1987.

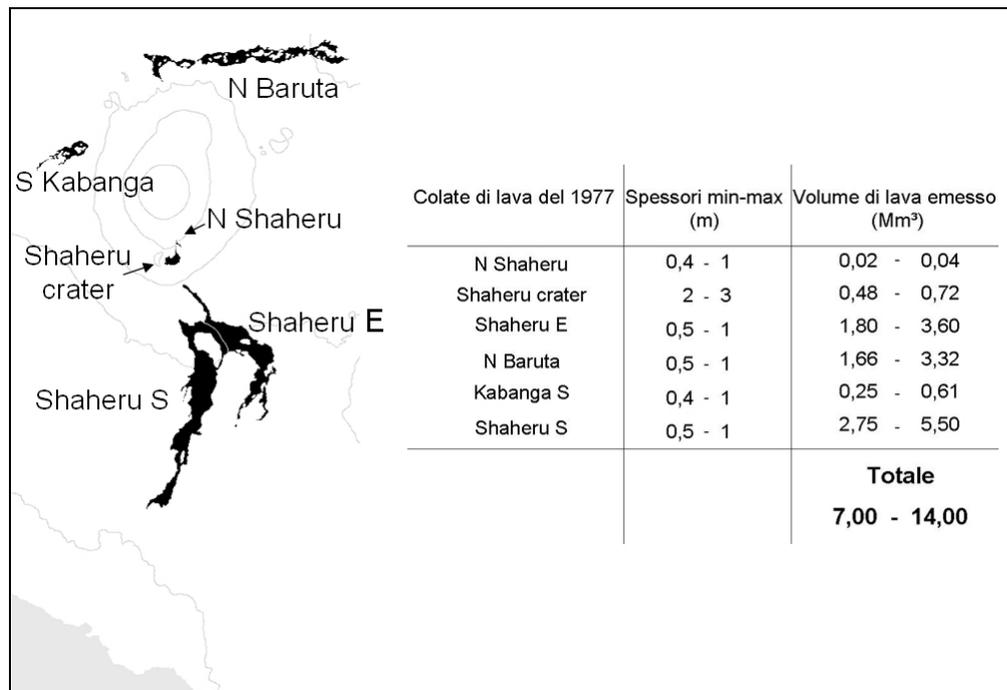


Tabella 3.3. Stima degli spessori e dei volumi delle colate dell'eruzione del 1977

I risultati del lavoro di mappatura relativo sia al sistema di fratture che al campo lavico delle due ultime eruzioni suggeriscono come l'eruzione del 2002 sia stata, come già nel 1977, un evento vulcano-tettonico, originato quindi da un processo di rifting regionale non imputabile alla sola azione del vulcano. E' rilevante notare che nell'ultima eruzione si è verificata la riattivazione e il prolungamento del sistema di fratture precedente. Questa considerazione risulterà di notevole importanza successivamente, quando si studierà la pericolosità da colate di lava.

Altre analogie tra le due eruzioni, oltre all'orientazione e all'ubicazione delle fratture, sono rappresentate dai cammini delle colate di lava molto simili. Se per esempio andiamo a confrontare le colate che si sono originate a sud del cratere Shaheru, notiamo come i percorsi seguiti siano praticamente identici (Figura 3.7) Questo elemento suggerisce che le colate dell'eruzione del 1977, soprattutto quelle che presentavano percorsi verso est, non abbiano modificato fortemente la topografia creando un'inversione del rilievo, come spesso accade quando una colata scorre in una zona confinata. Una ragione di questo può essere identificata sia nella particolare morfologia del fianco sud del vulcano, caratterizzato da numerosissimi coni eccentrici ubicati su un pendio solitamente regolare che non presenta zone

canalizzate, ma anche nella particolari caratteristiche fisico chimiche delle lave del Nyiragongo caratterizzate da valori di viscosità estremamente bassi che permettono così alla lava di compiere lunghe distanze realizzando spessori molto bassi. Vedremo successivamente che i risultati delle simulazioni svolte in questo lavoro sono perfettamente consistenti con queste osservazioni.

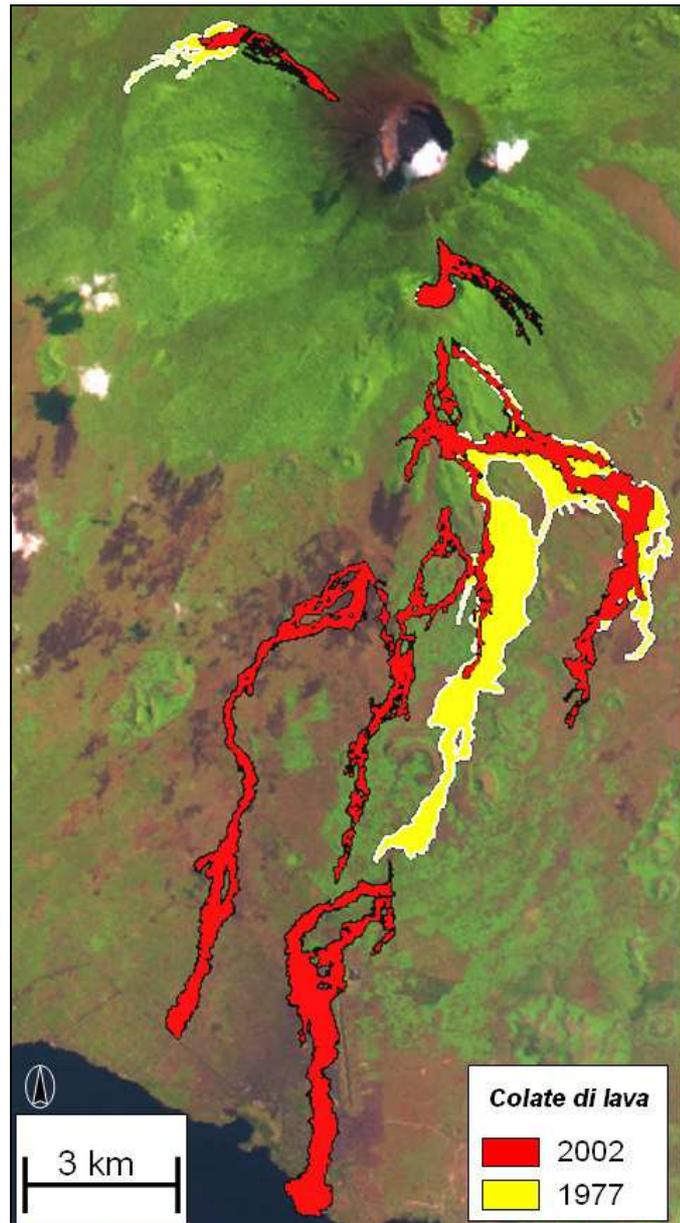


Figura 3.7. Sovrapposizione dei campi lavici delle due ultime eruzioni al Nyiragongo.

Capitolo 4

Modelli digitali del terreno utilizzati

4.1 - Dati topografici esistenti relativi all'area circostante il Nyiragongo

Il codice numerico utilizzato in questa tesi di dottorato, come anticipato in precedenza, utilizza un modello digitale del terreno per la determinazione dei percorsi dei flussi. Uno degli obiettivi fondamentali è stato quindi la ricerca di tutto il materiale topografico esistente relativo all'area circostante il monte Nyiragongo e la città di Goma. Attualmente molte regioni dell'Africa non sono ben mappate. In molti paesi africani le carte topografiche più accurate e le foto aeree recenti non sono disponibili e sono persino considerate come documenti segreti per la sicurezza nazionale. Le carte topografiche disponibili sono rappresentate da alcune mappe coloniali britanniche degli anni '50 e francesi degli anni '60 a scala 1:50.000. Purtroppo queste mappe sono risultate inefficienti poiché caratterizzate da curve di livello errate che a volte addirittura si incrociano, e da una generale qualità estremamente bassa.

Nel momento in cui si è iniziata questa ricerca, il DEM interferometrico ottenuto dalla missione SRTM non era ancora stato messo a disposizione dalla NASA. La missione Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) fu attuata nel febbraio 2000, utilizzando un tipo di tecnica stereografica, che portò alla creazione di una nuova e accurata mappatura DEM della Terra. I dati SRTM, a copertura globale, sono divenuti disponibili nel 2004 e attualmente sono reperibili presso il sito della NASA (<ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov>).

Uno dei primi tentativi di ottenere una base topografica utile per l'effettuazione delle simulazioni dei percorsi dei flussi lavici è stato quello di ottenere un DEM attraverso l'acquisizione e l'elaborazione di immagini dal satellite EROS1, ma a causa delle continue condizioni meteorologiche sfavorevoli si è dovuto abbandonare questo tipo di ricerca, e concentrarsi sulla ricerca di mappe topografiche. Dopo una lunga ricerca sono state esaminate tre carte topografiche. La prima, mostrata in figura 4.1, è rappresentata da una carta geologico geomorfologica a scala 1:50.000 dell'area occupata dai vulcani Nyiragongo e Nyamulagira ed è stata prodotta dal Belgio negli anni sessanta (Thonnard et al., 1965).

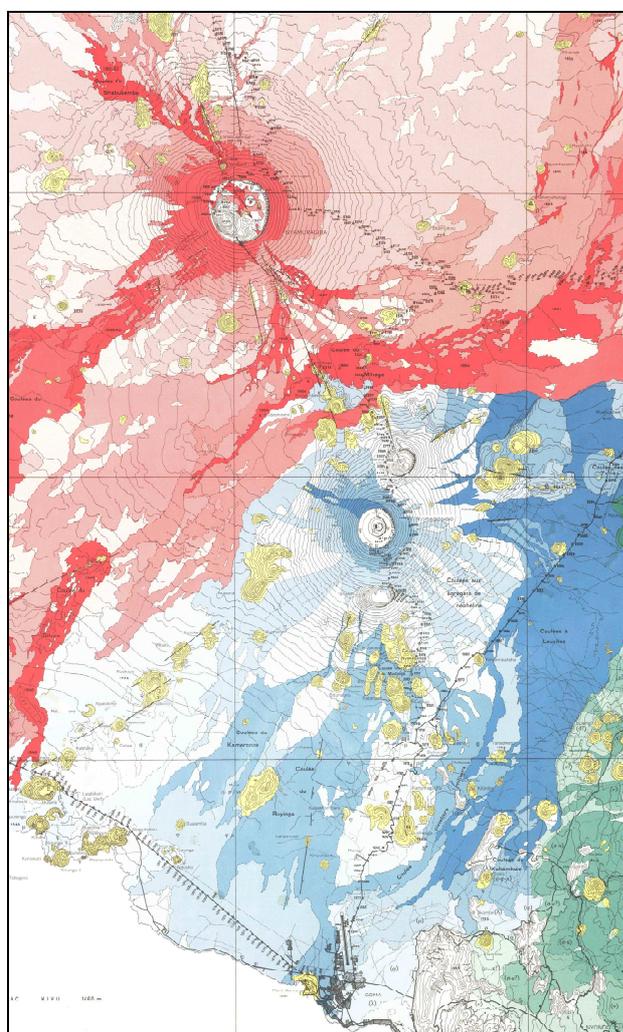


Figura 4.1. Mappa geologico geomorfologica, a scala 1:50.000, dei vulcani Nyiragongo e Nyamulagira (DRC). In giallo viene circoscritta l'area relativa ai numerosi conici vulcanici che caratterizzano i fianchi dei due vulcani (Thonnard et al., 1965).

Questa mappa, anche se molto valida dal punto di vista vulcanologico generale, poiché presenta l'ubicazione di tutti i coni relativi all'attività passata del vulcano, non lo è altrettanto dal punto di vista topografico vista l'impossibilità di ottenere un DEM accettabile a causa della presenza di curve di livello discontinue, che spesso si incrociano e a volte presentano un andamento a spirale. La seconda mappa, rappresentata da una carta topografica a scala 1:50.000, prodotta dalla NIMA (National Imagery and Mapping Agency) nel 1994, è stata digitalizzata e trasformata in un DEM, ma presenta una equidistanza tra le curve di livello (50 m) troppo elevata per apprezzare i percorsi delle colate di lava soprattutto in corrispondenza della costa nord del lago Kivu dove sono ubicati i centri abitati di Goma, Gisenyi e Sake e dove la topografia dell'area è praticamente piatta con pendenze di pochi gradi (Figura 4.2).

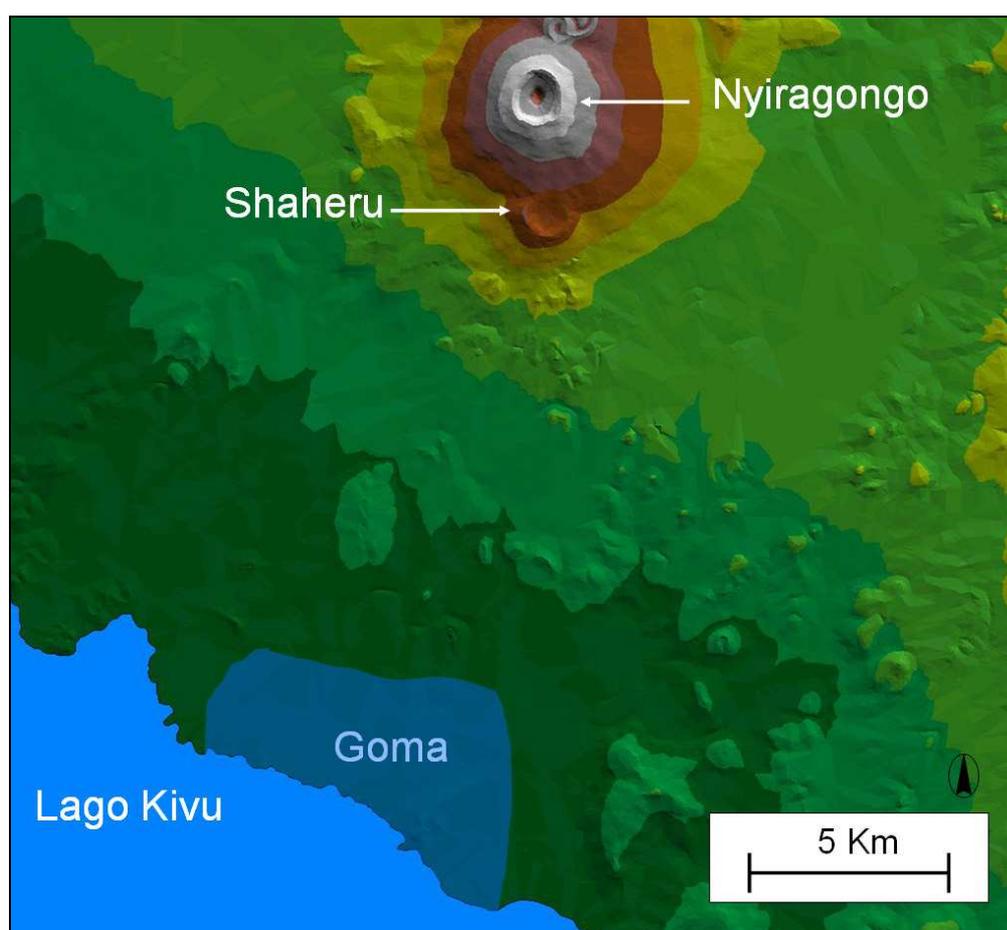


Figura 4.2. Modello digitale del terreno ottenuto dalla digitalizzazione della carta topografica 1:50.000, prodotta dalla NIMA.

4.2 – Il Modello Digitale del Terreno ricavato dalla mappa topografica 1:10.000, Ville de Goma

La terza mappa utilizzata è una carta topografica 1:10.000 della città di Goma con una equidistanza tra le isoipse di 5 m, prodotta dalla Photomap International Inc di Nairobi nel 1995. Grazie a questa mappa è stato possibile costruire un GIS della città di Goma, digitalizzando anche la rete viaria della città e le principali infrastrutture. La creazione del modello digitale del terreno è stata perfezionata grazie anche all'utilizzo di DEST (Favalli e Pareschi, 2004), un algoritmo che crea una rete a maglia triangolare irregolare (TIN) del dato sorgente usando una modifica del metodo di Delaunay. Questo metodo introduce delle breakline ausiliarie che permettono una maggiore definizione del DEM soprattutto in corrispondenza delle depressioni come si può notare dal confronto tra i due modelli digitali del terreno presentati in figura 4.3.

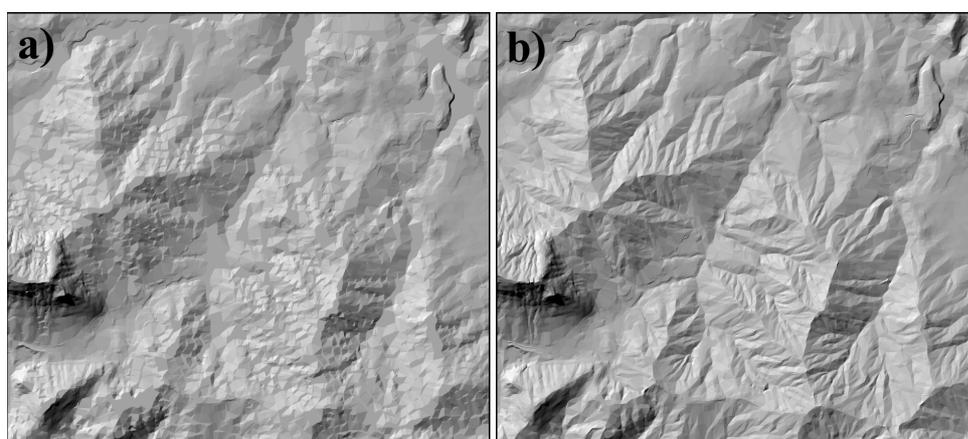


Figura 4.3. Confronto fra un modello digitale del terreno ottenuto utilizzando (a) l'algoritmo di Delaunay e quello ottenuto utilizzando (b) DEST (Favalli e Pareschi, 2004; Favalli et al., 2006).

Il TIN creato dalla mappa di Goma 1:10.000 include circa 100.000 nodi (che corrispondono ad un'area media del triangolo di circa 138 m^2). Da questo TIN è stato ottenuto un DEM con un passo della griglia di 5 m (Figura 4.4). Per la topografia dell'Etna, che si presenta significativamente più articolata rispetto a quella dei fianchi del Nyiragongo, interpolazioni al di sotto dei 10 m di risoluzione verticale generano un errore quadratico medio nella quota di circa 3,5 m (Favalli et al., 2005),

corrispondente a circa 1/3 dell'equidistanza tra le curve di livello. Nel caso di questa mappa, con 5 m di equidistanza e una topografia relativamente non complessa, si è assunto un errore massimo medio di 1,5 m. In ogni caso, l'accuratezza della validità del dato topografico per le simulazioni dei percorsi delle colate di lava può essere valutato a posteriori, in base all'accordo fra i percorsi simulati e quelli reali (vedi Capitolo 5).

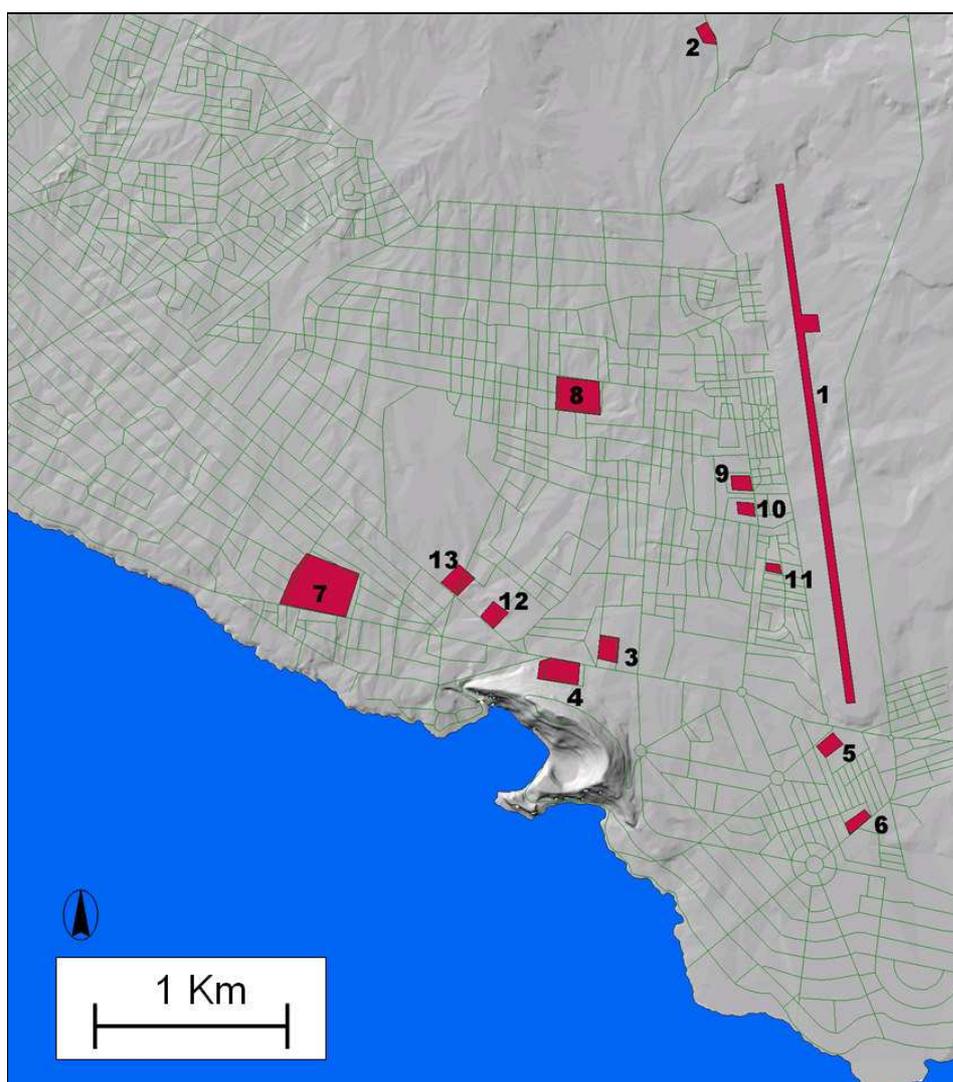


Figura 4.4. Modello digitale del terreno ottenuto dalla digitalizzazione della carta topografica 1:10.000, Ville De Goma. In verde sono indicate le strade mentre in rosso le principali strutture della città: (1) Aeroporto, (2) Centro Ngangi, (3) Stadio dell'Unità, (4) Ospedale, (5) Stadio Volcans, (6) Mairie, (7) RVA Domain, (8) Parrocchia N.D. d'Afrique, (9) Virunga Market, (10) Cattedrale, (11) Fayer Social, (12) Centro operativo delle Nazioni Unite, (13) Centrale elettrica.

4.3 – Il Modello Digitale del Terreno ottenuto dalla missione satellitare SRTM

La missione SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) è stata dedicata all'osservazione della Terra dallo spazio ed è stata realizzata in collaborazione tra la NASA, il Dipartimento della Difesa americano (DoD), la National Imaging and Mapping Agency (NIMA), l'Agenzia Spaziale Tedesca (DLR) e l'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) (Coltelli et al., 1996; Farr e Kobrick, 2000; Werner, 2001; Rabus et al., 2003; Rodriguez et al., 2005). Durante la missione sono state utilizzate versioni modificate delle antenne SIR-C e X-SAR, con lo scopo di creare una mappa topografica digitale dell'80% delle terre emerse sulla Terra (tutte le terre emerse comprese tra 60° di latitudine nord e 56° di latitudine sud, e con una spaziatura dei dati ogni arco-secondo di latitudine e di longitudine, cioè approssimativamente 30 metri (figura 4.5). Le risoluzioni, orizzontale e verticale, sono rispettivamente di 20 m e di 16 m.

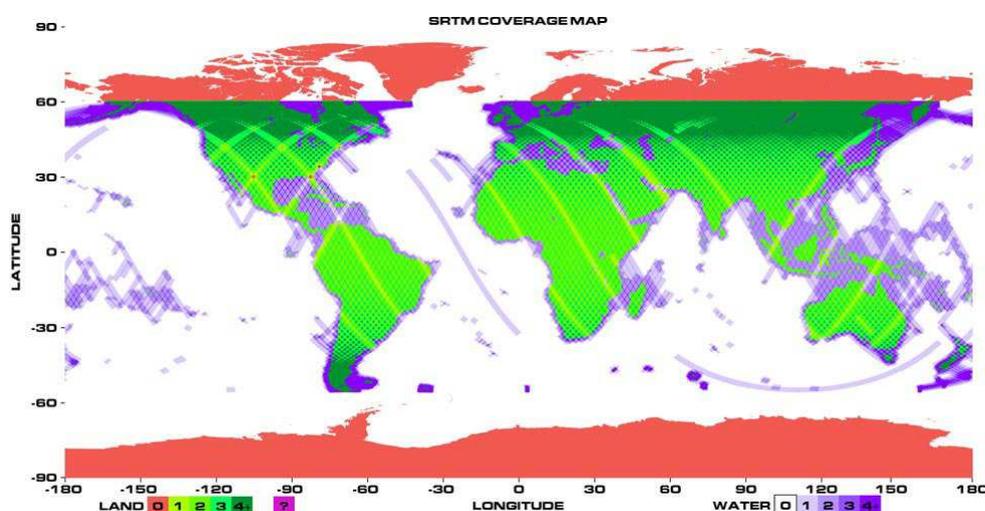


Figura 4.5. Copertura geografica del DEM ottenuto dalla missione SRTM (<http://www2.jpl.nasa.gov>).

Nella missione SRTM, è stata adoperata una tecnica che utilizza due antenne separate, di cui una trasmittente ed entrambe riceventi, che osservavano la superficie terrestre simultaneamente in modo tale da ottenere i dati interferometrici relativi alla striscia illuminata in un unico passaggio (Figura 4.6). Questa tecnica ha il vantaggio

di eliminare la decorrelazione temporale causata dai cambiamenti della scena tra due diversi passaggi, di lasciare invariata la distanza tra le antenne e di determinare con buona precisione il puntamento dell'antenna. In pratica quello che veniva effettuato era una operazione di interferometria a singolo passaggio, cioè le due immagini radar venivano acquisite contemporaneamente, una dall'antenna alloggiata nella stiva dello Space Shuttle e l'altra dall'antenna posta alla fine del traliccio di 60 m che si estendeva dalla stiva. Combinando le due immagini veniva realizzata una singola immagine 3D.

Questo modello digitale del terreno è stato reso disponibile nel 2004. Esiste inoltre un DEM con una risoluzione di 30 m che non è stato ancora declassificato dalle strutture governative statunitensi, per il continente africano.

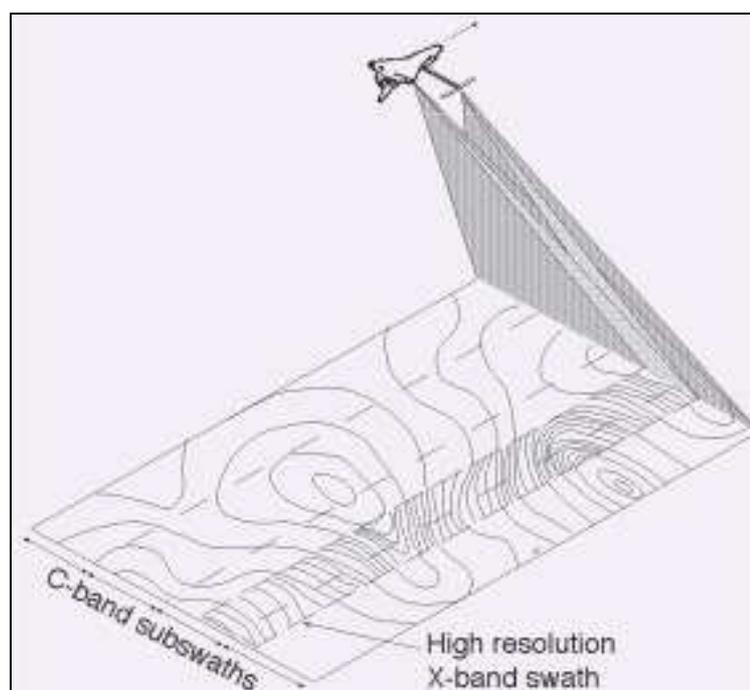


Figura 4.6. Tecnica di rilevamento dei dati dallo Shuttle.

Grazie alla disponibilità di questo DEM a 90 m è stato così possibile simulare tutte le colate di lava che hanno caratterizzato l'intero fianco sud del vulcano nel 2002, ma anche fare un'attenta analisi morfometrica sui rapporti esistenti fra le colate di lava e il territorio coperto dai flussi.

Nella figura 4.7 è stata riportata un immagine del DEM SRTM relativo all'area del Nyiragongo, dove è possibile osservare, oltre alla morfologia del Nyiragongo, il vicino vulcano a scudo Nyamulagira, e i numerosissimi coni vulcanici che caratterizzano i fianchi di questi due vulcani che ricordiamo rappresentano la porzione attiva della catena del Virunga. Un altro aspetto che emerge è inoltre la notevole differenza di risoluzione tra questo DEM e quello presentato precedentemente nella figura 4.2.

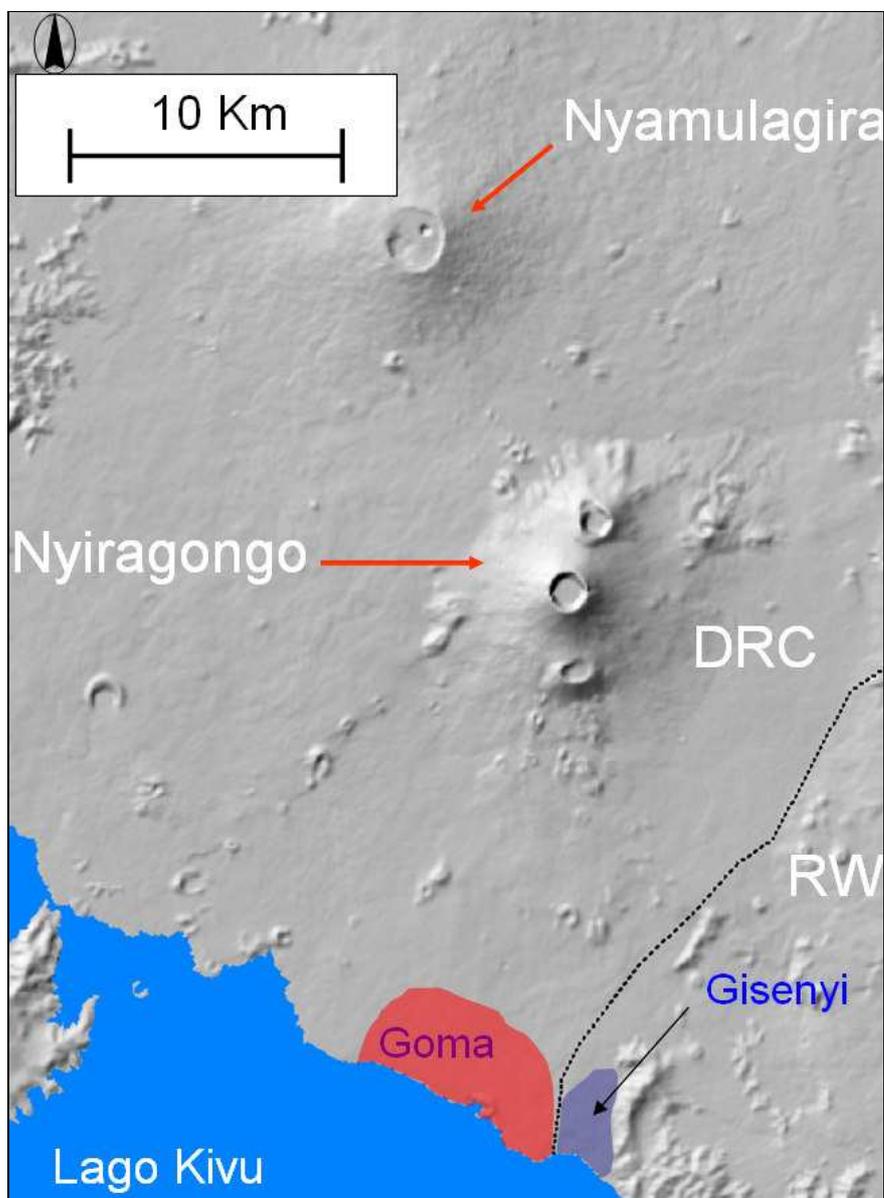


Figura 4.7. Il DEM ottenuto dalla missione satellitare SRTM, relativo all'area del Nyiragongo.

Capitolo 5

Il codice Downflow e le simulazioni delle colate di lava nella città di Goma

In questo capitolo verrà descritto il codice numerico utilizzato nel corso del presente lavoro di tesi, la sua calibrazione per le colate di lava del Nyiragongo, e i risultati delle simulazioni di dettaglio relative alla città di Goma ed effettuate utilizzando come base topografica il DEM 1:10.000, descritto nel capitolo precedente. Le simulazioni a scala maggiore, effettuate utilizzando il DEM SRTM, saranno descritte nei capitoli 6 e 8.

5.1 – Il codice Downflow

Il codice numerico DOWNFLOW (Favalli et al., 2005, 2006) calcola il percorso di massima pendenza su una topografia digitale tridimensionale, determinando in modo probabilistico l'espansione laterale di un flusso (*spreading*) e la sua capacità di superare ostacoli. Partendo da un punto di emissione (*vent*), DOWNFLOW traccia un grande numero N di percorsi, ognuno dei quali rappresenta un percorso di massima pendenza su una topografia perturbata casualmente. Tale perturbazione viene effettuata nel seguente modo: per ogni percorso simulato, la quota di ogni punto del modello digitale del terreno viene variata in un intervallo di altezza $\pm \Delta h$. L'uso di un Δh più grande dà origine a percorsi simulati aventi una maggiore capacità di superare ostacoli e di espandersi lateralmente (Figura 5.1).

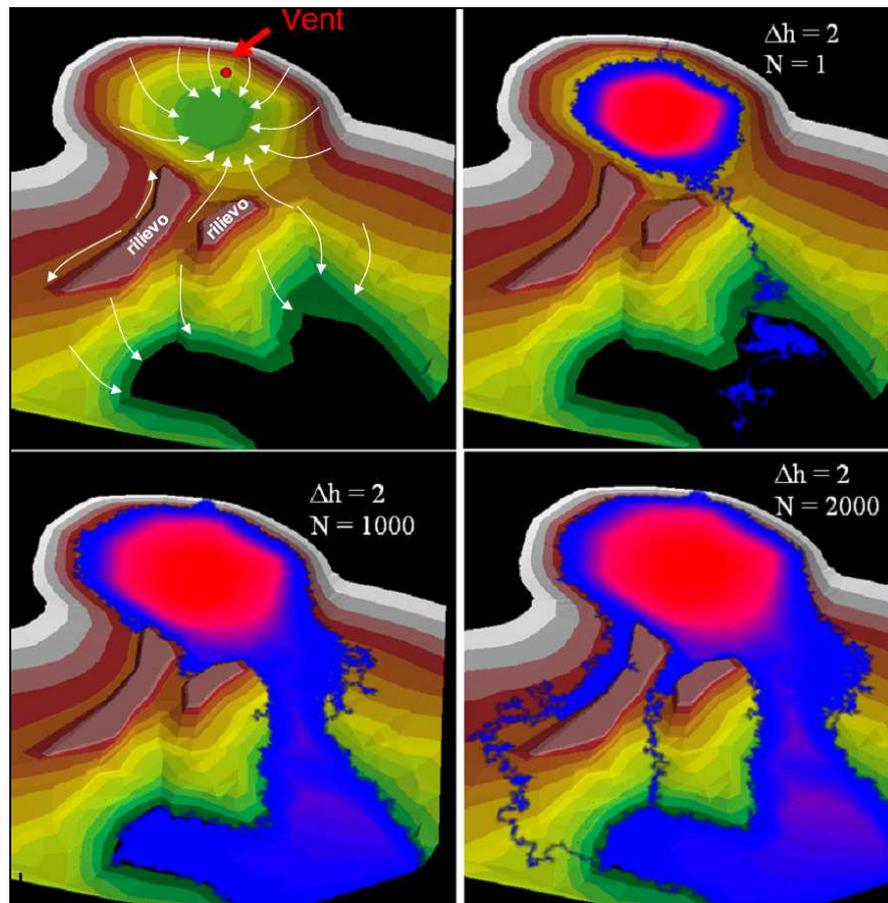


Figura 5.1. Funzionamento del codice DOWNFLOW. Nel riquadro in alto a sinistra viene rappresentata un depressione (area circolare in verde). Questa zona è separata da un area topograficamente più bassa da una serie di rilievi. Le frecce bianche indicano approssimativamente la pendenza della morfologia. Viene posizionato un vent sul fianco della prima depressione. I colori rosso e blu indicano una maggiore e minore probabilità di invasione da colate di lava, rispettivamente. All'aumentare del numero di percorsi simulati (N) aumenta l'espansione del campo lavico, e la probabilità di realizzare ulteriori percorsi lavici. La probabilità di superamento di ostacoli morfologici diminuisce con l'aumento dell'altezza dell'ostacolo ed aumenta al crescere di N.

Da notare che il codice prevede un parametro di deposizione, che entra in gioco quando un percorso simulato penetra all'interno di un bacino chiuso che non ne permette l'ulteriore propagazione. In questo caso, il percorso internamente al bacino avviene seguendo direzioni casuali, lungo le quali la quota del DEM viene modificata dall'aggiunta di una quantità piccola, pari a 0,01 m nelle simulazioni effettuate nel presente lavoro di tesi. In questo modo il bacino viene progressivamente colmato, e il percorso si propagherà al di fuori di esso dal primo

punto del suo bordo che lo permetterà. In altre parole, la fuoriuscita della lava dal bacino viene simulata come un processo che contiene un elemento casuale (la propagazione in direzioni casuali del percorso al suo interno) e uno deterministico (la quota sufficientemente bassa di un punto del bordo), approssimando il comportamento delle colate di lava reali.

Il percorso di massima pendenza è determinato considerando il flusso come una quantità vettoriale attraverso un DEM raster, invece di considerarlo, secondo un approccio più comune, una quantità raster. Questa tecnica presenta un certo numero di vantaggi, compreso quello di evitare direzioni preferenziali di propagazione e deviazioni artificiali dovute alla struttura a griglia del dato topografico. Sebbene un aumento di entrambi i parametri produca uno spreading maggiore dei percorsi calcolati, il ruolo e il significato di N e Δh è differente. Infatti, Δh definisce l'area massima che può essere invasa dal flusso, indipendentemente dalla sua probabilità. Questa area è invasa nel limite di un numero infinito N di percorsi. Selezionando valori progressivamente più grandi di N , vengono quindi incluse zone che hanno probabilità progressivamente più basse di essere invase.

La definizione di un appropriato valore di Δh è legata all'errore verticale nel DEM e all'altezza caratteristica degli ostacoli capaci di divergere il flusso (a sua volta dipendente dallo spessore tipico delle colate di lava). Nella figura 5.2 viene mostrato l'effetto sui percorsi simulati dell'aumento del valore di Δh mantenendo costante il numero dei percorsi (N).

Anche se il codice numerico impiegato non include equazioni fisiche, la coppia di parametri utilizzati tiene conto in modo effettivo della varietà dei comportamenti delle colate di lava e in particolare della loro capacità di espandersi sulla topografia, di superare ostacoli topografici, e di riempire e quindi superare depressioni. La mancanza di una descrizione fisica della propagazione delle colate di lava non permette una descrizione dell'evoluzione temporale dei flussi di lava, come anche delle lunghezze massime percorse. Di conseguenza, i percorsi simulati delle colate di lava devono essere considerati come conservativi, poiché si estendono sempre fino alla quota topografica più bassa possibile. Nel caso della città di Goma, e in particolare della colata partita dalla frattura di Munigi, questo può essere considerato come marginale, visto che la colata ha coperto l'intera lunghezza del dominio computazionale utilizzato fino a raggiungere il lago Kivu.

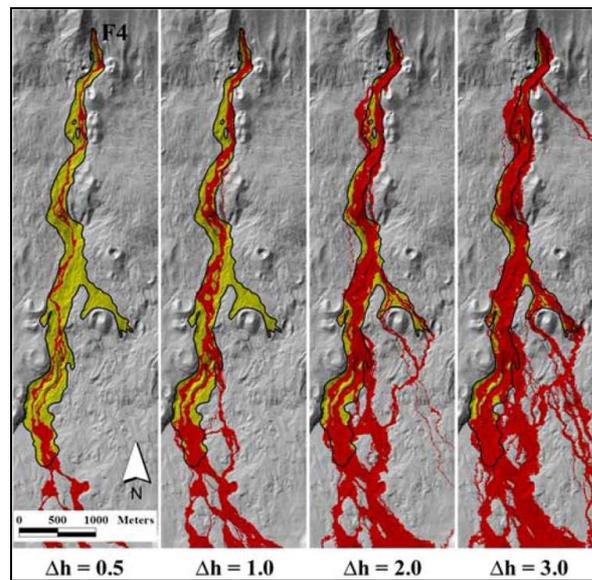


Figura 5.2. Effetto dell'aumento del valore del parametro Δh sui percorsi simulati mantenendo costante il valore di N . La colata simulata, in verde in figura, è relativa all'eruzione dell'Etna del 2001 (Favalli et al., 2005).

I risultati delle simulazioni numeriche sono rappresentati da grid georeferenziati della frequenza di passaggio dei percorsi dei flussi. Più grande è questa frequenza, più alta risulta la probabilità che i flussi di lava che provengono da un dato vent possano invadere l'area corrispondente, sempre considerando che le colate raggiungano il limite del dominio simulato.

5.2 - Calibrazione del codice Downflow

Come spiegato nel sottocapitolo precedente, il valore di Δh definisce la capacità della colata di lava di superare barriere morfologiche, e quindi il massimo bacino invadibile (nel limite $N \rightarrow \infty$). L'altezza massima di un ostacolo superabile è uguale a $2\Delta h$, con probabilità progressivamente decrescente man mano che l'ostacolo incontrato aumenta di spessore da 0 a $2\Delta h$, valore oltre il quale tale probabilità è zero.

L'esperienza maturata nel corso delle precedenti applicazioni alle colate dell'Etna (Favalli et al., 2005), e in particolare durante il lavoro di questa tesi, ha mostrato che

il valore di Δh corrisponde al valore più grande tra l'incertezza nella quota del DEM e lo spessore tipico delle colate di lava. Dopo una fase di studio, durante la quale si è compreso più chiaramente quanto sopra, è stato quindi possibile selezionare il Δh ottimale per le simulazioni effettuate utilizzando come base il DEM di Goma 1:10.000. L'errore verticale di tale DEM è stimato a 1,5 m (vedi capitolo precedente), il che suggerirebbe un Δh pari a 1,5 m. Tale valore corrisponde a colate di spessore tipico intorno ai 3 m ($=2\Delta h$), molto simile allo spessore delle colate nella città di Goma (tabella 3.1). Tale valore è stato quindi utilizzato per le presenti simulazioni. Vedremo nel capitolo successivo che il valore ottimale di Δh si relaziona in modo più complesso al DEM, dipendendo anche dalla sua risoluzione orizzontale e verticale (ovvero dalla disponibilità nel modello digitale del terreno, delle informazioni rilevanti sugli elementi topografici in grado di modificare il percorso delle colate di lava).

Il parametro N è stato ottenuto sulla base del fitting tra le colate reali e quelle simulate considerando sia l'estensione laterale del flusso reale che l'identificazione di rami secondari e delle isole lasciate dalle colate di lava. I risultati delle simulazioni che meglio approssimano le colate reali sono riportati nella figura 5.3.

Per quanto riguarda la simulazione della colata di lava originatasi dalla frattura di Munigi sono stati scelti tre vent di partenza ubicati in corrispondenza di tale frattura (Figura 5.3). Per quanto riguarda invece la colata West (si veda la tabella 3.1), poiché essa si era originata molto lontano da Goma, al di fuori del dominio computazionale, sono stati scelti tre vent in corrispondenza dell'area in cui la colata West incontra la parte nord del DEM utilizzato (Figura 5.3). La scelta dei giusti parametri da utilizzare è stata fatta attraverso la massimizzazione del rapporto tra le aree di intersezione ed unione dei percorsi simulati e reali. Per queste simulazioni è stato selezionato un valore di N pari a 10.000 per vent, per quanto riguarda la colata partita da Munigi, mentre un valore di N pari a 1.400 per vent per la colata West. Al fine di ottenere una comparazione tra le simulazioni delle due colate presentate nella figura 5.3, in grigio sono indicati i percorsi nel caso fosse stato utilizzato, per la simulazione della colata West, un valore di N pari a 10.000. Come si nota dalla figura, questo porterebbe all'identificazione di un nuovo ramo in direzione sud-ovest originatosi approssimativamente 1.500 m prima del fronte lavico.

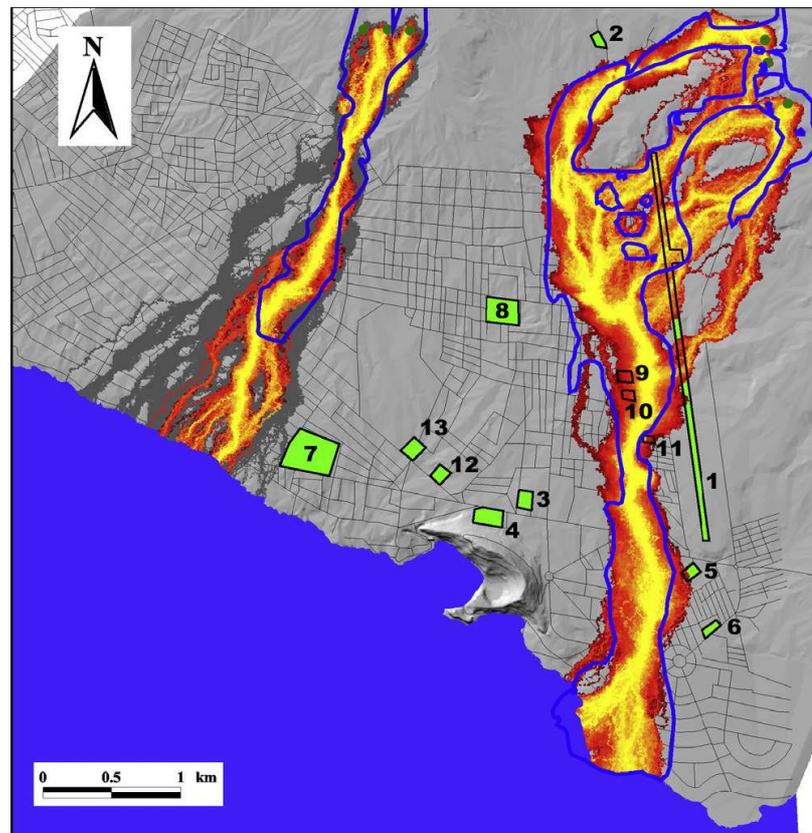


Figura 5.3. Simulazioni delle colate che hanno invaso la città di Goma nel 2002. I contorni delle colate reali sono indicati in figura con la linea blu, mentre in giallo e in rosso sono presentati i risultati delle simulazioni, con la frequenza dei percorsi simulati (probabilità di invasione) che aumenta dal rosso al il giallo. I cerchi in verde indicano i vent di partenza utilizzati per le simulazioni. Le aree numerate in verde indicano le principali strutture della città, già indicate in figura 4.4.

I percorsi simulati per la colata di lava di Goma mostrano correttamente due rami iniziali principali che convergono in un unico flusso in corrispondenza dell'aeroporto di Goma e un ramo diretto verso sud che nel caso reale si è arrestato prima di unirsi con il flusso principale originatosi dall'unione dei primi due rami. Dalle simulazioni si riscontra inoltre come le isole di terreno lasciate dalla colata reale ben si accordano con i percorsi computati. Infine, in corrispondenza della costa del lago Kivu, dove la colata reale ha formato un piccolo delta di lava, anche i percorsi simulati tendono ad allargarsi.

Anche i percorsi simulati della colata West corrispondono bene a quelli reali e si estendono verso sud fino al lago Kivu, secondo le caratteristiche conservative del modello precedentemente descritte. I risultati numerici delle simulazioni

suggeriscono che le caratteristiche topografiche potrebbero generare uno spreading maggiore della colata di lava man mano che ci si avvicina al lago.

Queste simulazioni non includono la presenza nel modello digitale del terreno delle abitazioni e delle strade della città di Goma. Le informazioni ottenute da indagini direttamente sul campo lavico e dalla mappatura presentata nella figura 5.3 indicano che la presenza di strade che formano ampi angoli con la direzione di flusso, fa sì che si sviluppino lobi di lava molto piccoli e localizzati di estensione non superiore ad 1/10 dell'estensione laterale della colata principale nella data area. Gli effetti delle strade che formano piccoli angoli con la direzione di propagazione sono molto più difficili da valutare. In alcuni punti i margini delle colate di lava sembrano seguire le strade preesistenti per decine e anche centinaia di metri. Tuttavia, questo possibile effetto non produce uno scostamento significativo fra le aree coperte dalla colata reale e quelle interessate dai percorsi simulati.

Un valore di N pari a 10.000, verrà utilizzato per tutte le successive simulazioni effettuate con il DEM di Goma, seguendo un principio conservativo nella valutazione della pericolosità

5.3 - Simulazioni dei percorsi da ipotetiche bocche effimere sui bordi della colata di lava

Un set di simulazioni è stato dedicato ad analizzare i percorsi di possibili flussi secondari nel caso di apertura di bocche effimere in punti specifici lungo il bordo occidentale della colata di lava di Goma. I bordi dei campi lavici a volte sono caratterizzati dalla presenza di bocche effimere, o di fratture nella crosta raffreddata, da cui la lava calda e fluida può fuoriuscire. Le colate di lava originate da bocche effimere coprono tipicamente distanze da qualche metro a centinaia di metri, ma in taluni casi possono drenare la maggior parte del flusso lavico e determinare nuove importanti espansioni del campo lavico attivo.

Il lato occidentale del flusso principale di Goma presenta due lingue principali (Figura 5.3), la più grande delle quali è lunga quasi 400 m, e tende a dirigersi verso

zone della città non invase dalle colate di lava. E' stata quindi considerata l'apertura di bocche effimere sul bordo di tali lingue, per simulare il caso di una loro ulteriore propagazione. La figura 5.4 mostra che in entrambi casi i percorsi simulati divergono dalla direzione principale assunta dalla colata del gennaio 2002, dirigendosi verso sud-ovest. Dopo aver lambito l'ospedale di Goma (edificio identificato dal numero 4 nelle figure 5.3 e 5.4) e lo stadio di calcio (edificio 3), questi percorsi tendono a dirigersi verso sud, lungo il bordo occidentale del Monte Goma, per poi entrare nel lago. Particolarmente rilevante è il fatto che un'ipotetica colata originatasi dalla lingua più a nord (Figura 5.4a) impatterebbe la centrale elettrica della città (edificio 13).

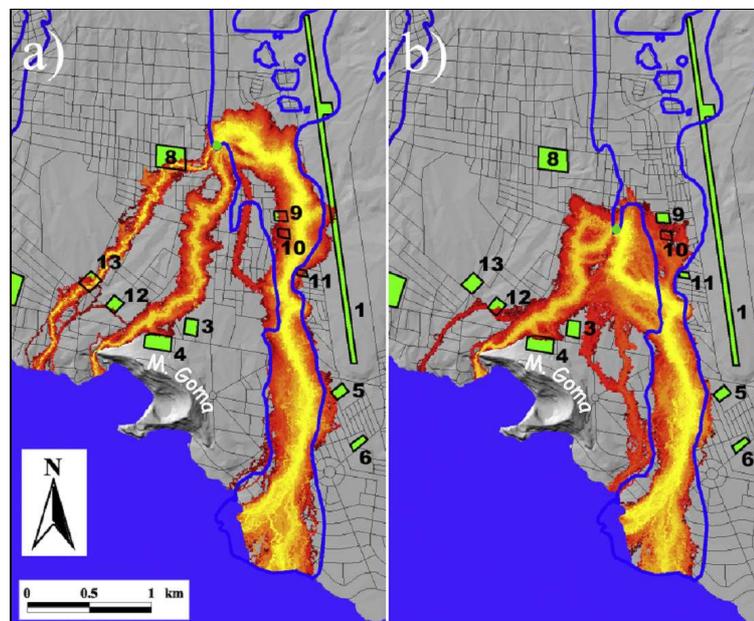


Figura 5.4. Simulazioni dei flussi originati da vent posti lungo il bordo occidentale della colata di Goma.

Nel caso che le lingue sul lato ovest della colata di Goma si fossero ulteriormente propagate, le simulazioni mostrano che il Monte Goma e le zone densamente abitate poste ai suoi piedi, compreso l'Osservatorio Vulcanologico di Goma (GVO), l'ospedale della città e molte costruzioni dell'Università, sarebbero rimaste isolate. Le simulazioni inoltre indicano che le colate di lava potrebbero entrare nel lago Kivu nei pressi del porto di Goma, all'estrema propaggine ovest del Monte Goma, scombusolando probabilmente il suo funzionamento.

5.4 - Simulazione dei percorsi da vent lungo l'estensione della frattura di Munigi

Il sistema di fratture eruttive del gennaio 2002 è legato ad un evento di rifting vulcano-tettonico che ha riguardato l'intero fianco sud del Monte Nyiragongo (Komorowski et al., 2004). Questa interpretazione è sostenuta dalla sequenza sismica registrata prima, durante e dopo l'eruzione e che era insolita per un evento puramente vulcanico (Kavotha et al., 2004). Durante i primi 5 giorni seguenti l'eruzione furono registrati circa 100 eventi sismici con una magnitudo compresa fra 3,5 e 5, con una sequenza tipica delle scosse ad alta frequenza seguite da ore di eventi di lungo periodo, e successivamente da molte ore di tremore vulcanico. Gli epicentri sono stati localizzati all'incirca fra il cratere del Nyiragongo e Goma, e cioè in pratica approssimativamente lungo il sistema di fratture dell'eruzione del 2002. Nelle settimane e nei mesi successivi all'eruzione, gli epicentri sono sembrati migrare sotto il lago Kivu, con un secondo gruppo vicino al lato occidentale della Rift Valley (Kavotha et al., 2004). Questa attività culminò in un evento sismico di magnitudo 6,2 il 22 ottobre 2004, localizzato circa 40 km a sud-ovest di Goma, lungo il sistema di faglie che borda il lago Kivu verso ovest (GVO, 2002). Queste osservazioni, insieme alla riattivazione e all'estensione del sistema di frattura del 1977, suggeriscono che una futura estensione verso sud delle fratture eruttive costituisce uno scenario possibile. Sono state così realizzate una serie di simulazioni utilizzando come vent di partenza l'estensione della frattura di Munigi, che rappresenta la porzione più meridionale del sistema di fratture attive dell'evento del 2002. In figura 5.5 sono mostrati i risultati di questo set di simulazioni.

Per i vent posti al di sopra dei 1.540 m slm, i percorsi simulati si orientano verso sud-ovest, per poi convergere verso l'area occupata dalla colata del 2002, dopo aver attraversato la pista aeroportuale. In questo caso l'aeroporto di Goma andrebbe completamente distrutto. Per i vent al di sotto di questa elevazione, i percorsi dei flussi presentano dei trend principalmente verso sud. In tal caso, si andrebbe incontro alla distruzione delle zone urbane ad est di quelle interessate dalle colate di lava del 2002, mentre l'aeroporto di Goma sarebbe interessato in maniera minore. Va ricordato il fatto che i percorsi simulati ubicati nell'angolo inferiore della figura 5.5,

non devono essere considerati, poiché in questa zona il DEM è incompleto (area in grigio scuro in figura 5.5) a causa della mancanza di curve di livello sulla mappa topografica utilizzata. Sempre per lo stesso motivo, non è stato possibile posizionare degli ipotetici vent a sud della pista dell'aeroporto.

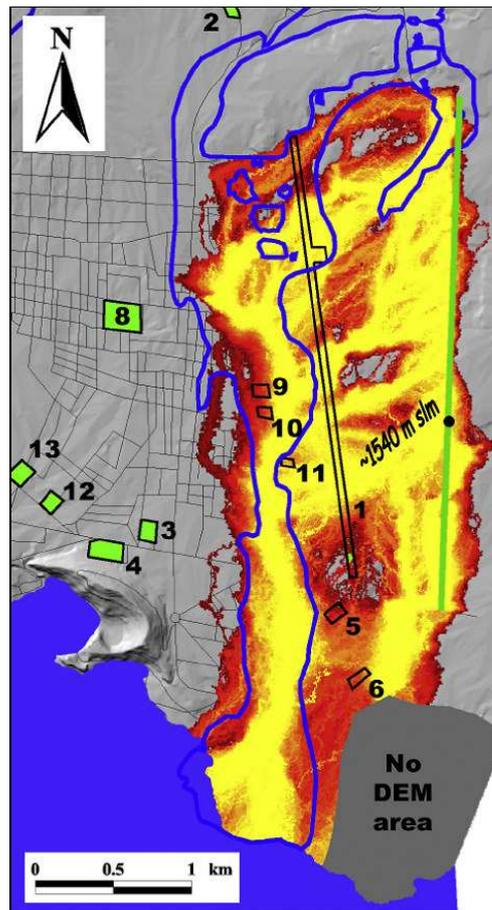


Figura 5.5. Simulazioni dei percorsi dei flussi in caso di venting lungo l'estensione del sistema di fratture di Munigi.

In base a queste simulazioni non è possibile fare una completa valutazione sulla possibilità che flussi originati da vent ubicati nell'area dove il DEM è assente possano dirigersi verso la vicina città di Gisenyi in territorio ruandese (vedi figura 4.7), anche se va detto che la quasi totalità dei percorsi simulati non presenta trend verso est. In seguito, con le simulazioni con il DEM SRTM, si otterrà un dato più completo riguardo l'importante aspetto della pericolosità da invasione di colate di lava in tutta l'area urbana a cavallo tra Repubblica Democratica del Congo e Ruanda.

5.5 - Valutazione degli effetti topografici delle colate del 2002

Al fine di valutare i possibili effetti dei cambiamenti topografici dovuti alla presenza dei flussi solidificati del 2002 sui percorsi delle future colate di lava, è stata apportata una modifica al DEM di Goma aggiungendo al grid base quello della colata di Goma attraverso una ricostruzione 3-D del flusso orientale che ha colpito la città nel 2002. La distribuzione degli spessori, rappresentata in figura 5.6, è stata effettuata sulla base di osservazioni visive e di misure rilevate sui bordi della colata di lava ed in corrispondenza di fessure generate dal raffreddamento direttamente all'interno del campo lavico.

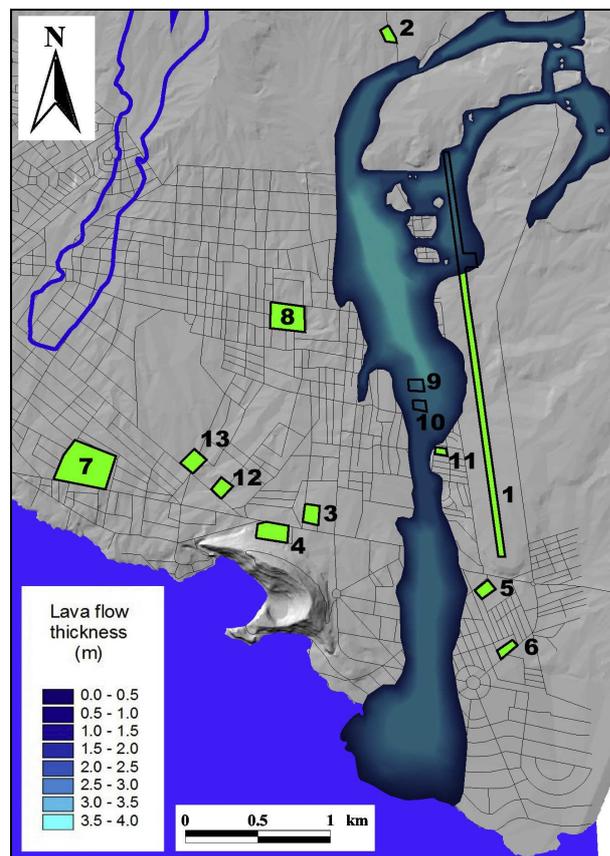


Figura 5.6. Distribuzione degli spessori stimati per la colata principale che ha colpito Goma nel 2002, basata su osservazioni visive e rilevamenti direttamente sul campo lavico.

La figura 5.7 mostra i risultati delle simulazioni effettuate considerando il DEM originario (Figura 5.7a) e quello modificato con la presenza della colata di lava del

2002 (Figura 5.7b), presentato nella figura 5.6. Come si osserva dalla figura, la presenza dei flussi del 2002 produce cambiamenti minori nei percorsi simulati.

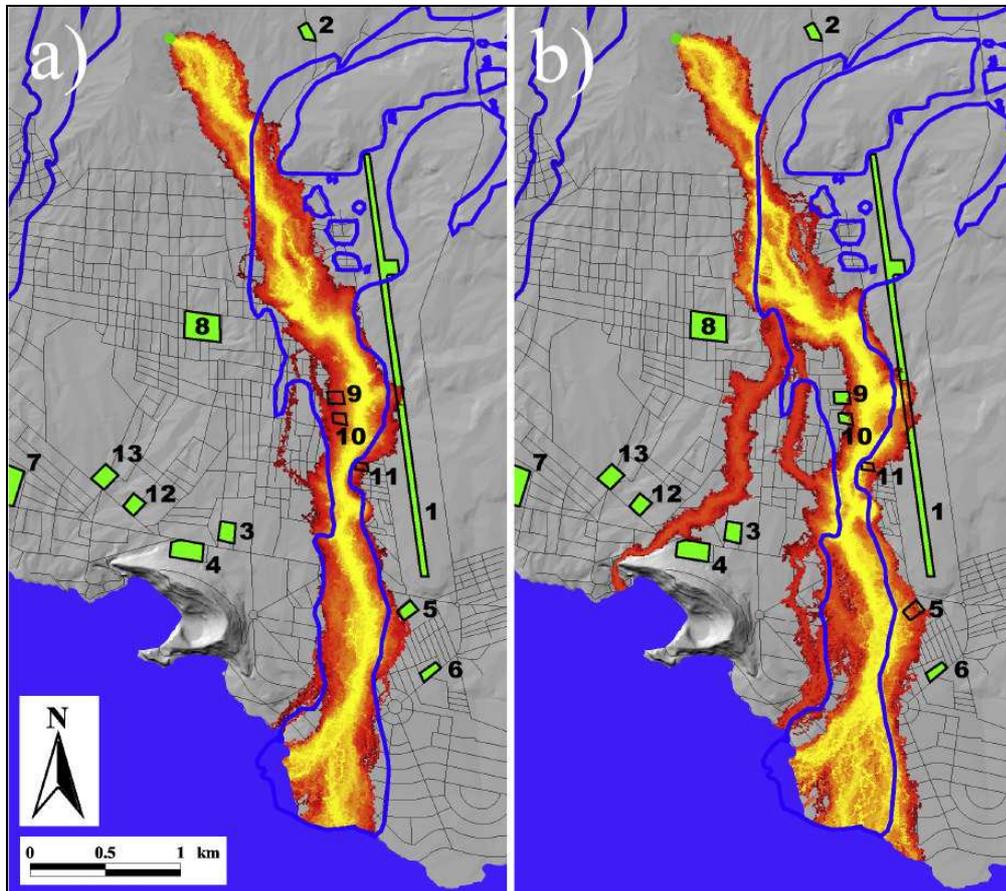


Figura 5.7. Simulazione dei flussi originati da un vent arbitrario su una topografia (a) senza e (b) con la presenza della colata principale di Goma.

Questo risultato è in accordo con quello che si nota in altri punti del campo lavico del 2002 immediatamente a nord di Goma, dove si è osservato che flussi differenti tendono ad incrociarsi l'uno con l'altro senza cambiare sostanzialmente la propria direzione di propagazione. Questo risultato assume un significato più importante se si considera il largo grado di sovrapposizione che presentano, in molti punti del fianco sud del vulcano, i campi lavici dell'eruzione del 2002 e del 1977 (Figura 3.7). L'unico effetto significativo della presenza della colata di lava del 2002 che emerge dalla figura 5.7, è la formazione di uno spreading maggiore sulla topografia, che favorisce lo sviluppo di alcuni lobi che partono dal flusso principale. Questo

suggerisce il fatto che future colate di lava aventi gli stessi cammini di quelli del 2002 potrebbero colpire aree non interessate dalle colate del 2002.

5.6 – Mappa di suscettibilità da invasione di colate di lava a Goma

Le eruzioni del 1977 e del 2002 hanno indicato che Goma può essere invasa da flussi di lava che provengono da punti differenti dislocati sul fianco sud del vulcano Nyiragongo. Al fine di studiare la suscettibilità da invasione di colate di lava dei differenti settori della città, è stata realizzata una serie di simulazioni dei percorsi dei flussi lavici considerando l'arrivo di colate di lava da una serie di punti ubicati lungo il margine nord della città. In pratica, assumendo una uguale probabilità di arrivo di colate di lava da ciascun punto a nord della città, si è studiato l'effetto della morfologia del terreno nell'area urbana nel determinare lo sviluppo dei campi lavici. Simulazioni più a grande scala dedicate allo studio della pericolosità sull'intero fianco sud del vulcano, comprendente le città di Goma (DRC) e Gisenyi (RW), saranno presentate nei capitoli 6, 7 e 8.

Sono stati considerati una serie di vent punti distanti uno dall'altro circa 20 m per una lunghezza totale di 5 km e rappresentanti possibili punti di passaggio di colate di lava entranti in città da nord (Figura 5.8). Le simulazioni numeriche sono state ripetute considerando $N = 10.000$ per vent e due valori differenti del Δh pari a 1,5 m e 3 m, per considerare cautelativamente il possibile arrivo di flussi di lava con una maggiore capacità di superare ostacoli. Il valore di $\Delta h = 1,5$ m corrisponde a quello adottato per tutte le simulazioni effettuate con il DEM ottenuto dalla carta topografica 1:10.000, mentre il valore di 3 m corrisponde ad una colata con uno spessore tipico di 6 m, assunto come limite superiore per le colate di lava che possono colpire Goma. D'altra parte, un valore progressivamente crescente di Δh tiene inoltre conto in modo efficace del controllo progressivamente più basso esercitato dalla topografia sui percorsi delle colate di lava. Da questo punto di vista, valori elevati di Δh possono essere visti come un proxy per velocità elevate dei flussi, e quindi per l'arrivo di lava

a viscosità più bassa che si avvicina a quella delle colate di lava partite da zone topograficamente più elevate durante l'eruzione del 2002.

I risultati delle simulazioni, riportati in figura 5.8, mostrano le aree invase da colate di lava associate ad un particolare valore di Δh . Per ridurre il rumore nei risultati simulati per ogni Δh assunto sono stati tagliati i percorsi che avevano una frequenza di passaggio minore di 4×10^{-6} , corrispondente a meno di 100 passaggi per pixel su oltre 25.000.000 di percorsi simulati.

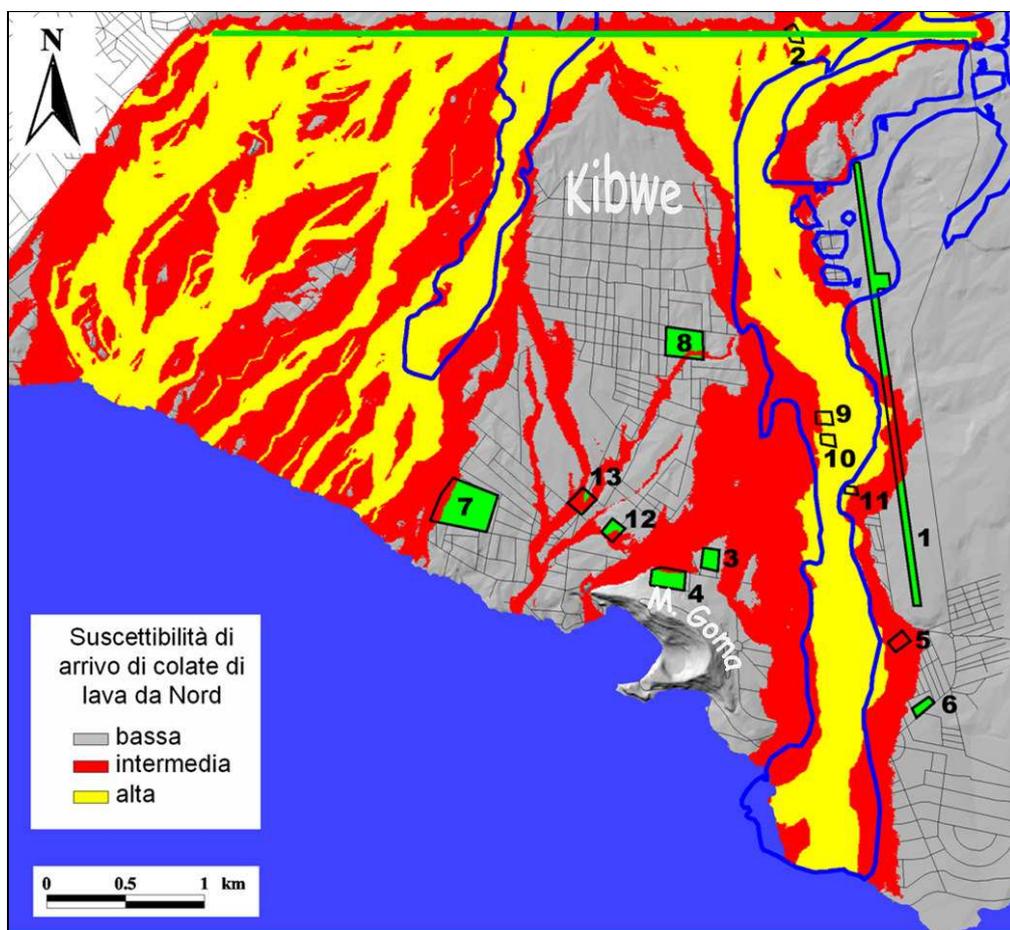


Figura 5.8. Mappa della suscettibilità da invasione da colate di lava nella città di Goma nel caso di arrivo di flussi lavici da nord, assumendo uguale probabilità di arrivo di flussi lungo una serie di punti ubicati sul bordo nord del DEM utilizzato ed una lunghezza delle colate maggiore del dominio simulato. I colori giallo e rosso corrispondono rispettivamente ad un Δh uguale a 1,5 e 3 m, qui utilizzati per definire diverse probabilità da invasione di colate di lava. La barra verde in alto identifica l'ubicazione dei vent simulati.

La mappa in figura 5.8 rappresenta la suscettibilità da invasione di colate di lava provenienti da nord per la città di Goma. Dalla figura si nota come tutte le colate passanti per la fascia di territorio che si estende dalla frattura di Munigi, per circa 1,4 km verso ovest, tendano a convergere verso l'area occupata dalla colata di lava reale, mentre i possibili flussi passanti per punti più occidentali hanno una vergenza verso sud-ovest, formando una serie di rami sostanzialmente sub-paralleli alla colata West. Il principale risultato di questo studio è quindi l'identificazione di un'area in città, oltre al Monte Goma, che non viene invasa da colate di lava provenienti da nord. Questa area ha una superficie di circa 1,8 km² e corrisponde approssimativamente all'area occupata dal distretto di Kibwe.

L'invasione da colate di lava in questa zona è possibile solo in seguito all'apertura di vent direttamente all'interno di essa. La zona fra il Monte Goma e il distretto di Kibwe, che include l'ospedale della città ed altre importanti infrastrutture, è caratterizzata da una suscettibilità da invasione di colate di lava da bassa ad intermedia. In questa area le colate di lava possono svilupparsi nel caso di formazione di piccole lingue partite dalla colata principale, o nel caso di arrivo di colate di lava fluide con maggiore inerzia e controllo topografico più basso. La zona coperta dai flussi del 2002 e l'intera area sud-ovest della colata West, sono caratterizzate da una alta suscettibilità alla invasione di colate di lava provenienti da nord.

5.7 – Considerazioni generali sulle simulazioni di colate di lava nella città di Goma

Il risultato principale delle simulazioni condotte utilizzando il DEM 1:10.000 è senza dubbio l'identificazione di un area a bassa suscettibilità di invasione in città. L'area in oggetto corrisponde a quella occupata dal distretto di Kibwe ed è ubicata tra le due colate laviche che nel 2002 hanno invaso la città (Figura 5.8). L'identificazione di questa area riveste una notevole importanza ai fini sia dei piani di emergenza, viste le enormi difficoltà nella gestione dello spostamento della popolazione (ricordiamo che

Goma è caratterizzata da una popolazione di circa 500.000 abitanti), sia per l'eventuale sviluppo futuro della città. A tal proposito dalla mappa di suscettibilità emerge come l'area immediatamente a nord della colata partita da Munigi rappresenti il collettore di un ampio bacino, la cui estensione sarà valutata più approfonditamente nei capitoli seguenti. Tutto il settore nord-est della città sembra quindi presentare una notevole propensione al passaggio di futuri flussi lavici. Va ricordato inoltre che questa area comprende anche la zona delle fratture più meridionali che potrebbero essere nuovamente riattivate, con una loro eventuale estensione verso sud, viste le caratteristiche delle due ultime eruzioni al Nyiragongo. Lo studio fin qui effettuato è comunque da considerarsi parziale, in quanto il DEM utilizzato è relativo solamente alla città di Goma. Effettuando uno studio a più grande scala verranno riconsiderate le aree in città a maggiore suscettibilità di invasione da colate di lava, ed alcuni degli argomenti di questo capitolo verranno discussi in una prospettiva più ampia fino a giungere alla definizione della pericolosità da invasione di colate di lava sull'intero fianco sud del Nyiragongo.

Capitolo 6

Simulazioni dei percorsi delle colate di lava utilizzando il DEM SRTM

In questo capitolo verranno mostrati e discussi i risultati delle simulazione dei percorsi delle colate di lava utilizzando il modello digitale del terreno ottenuto dalla missione satellitare SRTM. Grazie all'utilizzo di questo DEM sarà possibile investigare l'intera area del Nyiragongo e valutare in questo modo la pericolosità da invasione di colate di lava. Il presente capitolo prende in esame i cammini delle colate del fianco sud del vulcano, considerando numerosi casi rilevanti per valutare la capacità delle simulazioni di riprodurre i cammini reali. Nel successivo capitolo verrà invece più direttamente affrontata la questione relativa alla creazione di una mappa di pericolosità.

6.1 - Confronto fra DEM

Come detto più volte, la risoluzione della base topografica da utilizzare per le simulazioni dei percorsi delle colate di lava è uno dei punti cardine nell'utilizzo del codice DOWNFLOW, nel senso che maggiore è questa risoluzione più corretti saranno i risultati ottenuti dalle simulazioni. Con la declassificazione del DEM ottenuto dalla missione satellitare SRTM è stato così possibile verificare l'affidabilità del codice su tutta l'area circostante il vulcano Nyiragongo. La risoluzione di questo DEM è di 90 m per pixel con una risoluzione verticale di circa 16 m. Rispetto al DEM di Goma, questo DEM ha una risoluzione minore ma ha il vantaggio di

includere l'intera regione, e quindi di permettere uno studio a più ampia scala, necessario per la valutazione della pericolosità.

Prima di procedere alle simulazioni è necessario valutare le caratteristiche del DEM SRTM, attraverso il confronto con quello a più alta risoluzione e relativo all'area urbana di Goma utilizzato nel capitolo precedente.

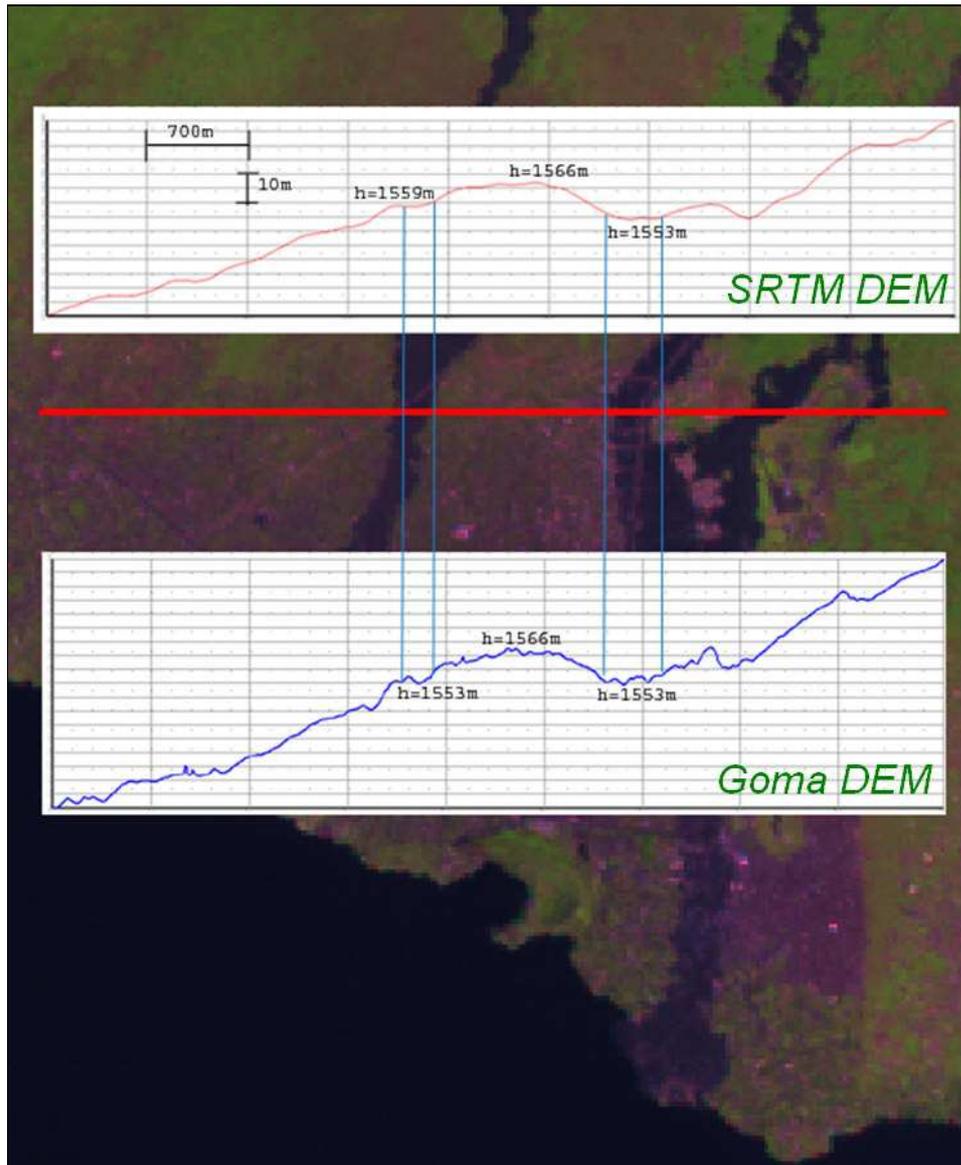


Figura 6.1. Confronto fra il DEM SRTM e il DEM di Goma. La linea rossa corrisponde alla traccia della sezione utilizzata per ricavare i due profili topografici sui due DEM. Le linee blu verticali delimitano i tratti dei profili caratterizzati dalla presenza delle due colate di lava del 2002.

Nella figura 6.1 sono messe a confronto due sezioni topografiche, relative al territorio di Goma e ricavate automaticamente attraverso un software G.I.S. Come si osserva, le caratteristiche morfologiche generali rappresentate dai due DEM sono in buon accordo, ma il DEM 1:10.000 risulta molto più ricco di elementi morfologici a piccola scala dell'ordine dei metri. In riferimento alle due colate di lava nella città di Goma, attraversate dalla sezione in figura (vedi aree delimitate dalle linee blu verticali), e all'alto morfologico che le separa, si vede che le quote possono essere simili o dissimili di alcuni metri, in funzione delle peculiarità morfologiche locali. Per entrambe le colate la zona di scorrimento corrisponde ad un locale avvallamento nei due DEM, ma nel DEM a più alta risoluzione tali valli sono più marcate (in particolare per la colata più a ovest). Vedremo in seguito che questa diversa ricchezza di elementi morfologici nei due DEM considerati comporta delle conseguenze per quanto riguarda la calibrazione del modello e l'accuratezza delle simulazioni.

6.2 - Le simulazioni dei percorsi delle colate dell'eruzione del 2002

Il primo step che è stato eseguito è stato un ricampionamento del passo del grid SRTM fino a 30 m in modo da aver un dettaglio maggiore nell'analisi dei percorsi simulati. Successivamente sono state effettuate delle simulazioni preliminari con Δh variabile ai fini di una prima valutazione della capacità del codice di calcolo di riprodurre i percorsi osservati delle colate di lava del 2002.

In questa fase dello studio è immediatamente emerso che al fine di ottenere una buona corrispondenza tra percorsi simulati e osservati, era necessario l'uso di Δh significativamente più piccoli di quello utilizzato per il DEM 1:10.000, e uguale a 1,5 m. Questo in parte contrasta con quello precedentemente detto (vedi capitolo 5), secondo cui a parità di spessore caratteristico della lava, una maggiore incertezza nella rappresentazione della quota topografica si traduce in un incremento di Δh . La spiegazione, come anticipato, sta nell'importanza della risoluzione del DEM in

termini di elementi morfologici alla scala dello spessore della colata. Per chiarire questo concetto, possiamo osservare l'area su cui scorre la colata West nei due profili di figura 6.1. Mentre il DEM a maggiore risoluzione presenta una valle profonda circa 4 m, in grado quindi di contenere una colata simulata con un valore di $\Delta h = 1,5$ m (che può superare al massimo ostacoli dello spessore di $2\Delta h = 3$ m), il DEM SRTM mostra un debole avallamento, profondo meno di 1 m. In tali condizioni, è chiaro che un valore di $\Delta h = 1,5$ m produrrebbe un'ampia fuoriuscita di lava dalla valle, contrariamente a quanto verificatosi.

In conclusione, sebbene il valore ottimale di Δh tenda ad essere proporzionale all'incertezza sulla quota, una minore risoluzione generale del DEM, in termini di elementi morfologici rappresentati tende a lavorare in senso opposto, riducendo il valore di Δh ottimale. In generale, l'esperienza guadagnata nel corso del lavoro di tesi porta a concludere che nel caso ideale di un DEM ad altissima risoluzione dell'ordine del centimetro, il valore di Δh tende a coincidere con lo spessore reale della colata, mentre tale valore progressivamente diminuisce al diminuire della risoluzione del DEM.

Un secondo elemento che è emerso dalle simulazioni preliminari effettuate in questa fase di studio è che le colate prodotte dalle varie fratture eruttive del vulcano tendono a corrispondere a valori diversi di Δh . Questo è probabilmente dovuto ad una combinazione di fattori quali la rugosità locale della topografia e il diverso spessore medio delle colate emesse dai vari punti del vulcano (vedi tabella 3.1).

Come detto in precedenza, gli episodi eruttivi al Nyiragongo associati a colate di lava, sia per quanto riguarda l'eruzione del 2002, che per la precedente eruzione del 1977, sono stati caratterizzati da una durata di circa 24 ore, molto inferiore quindi alla durata degli eventi eruttivi in altri vulcani, come ad esempio all'Etna, dove le colate di lava possono fluire anche per parecchie settimane. L'alta velocità raggiungibile da queste colate e il difficile reperimento di informazioni utili durante gli eventi eruttivi, come ad esempio le aree sorgenti dei flussi, suggeriscono bassi tempi per l'individuazione delle vie di fuga ottimali e per la realizzazione dei piani di emergenza. Da qui l'esigenza di individuare un valore unico di Δh , utilizzabile per l'intero vulcano, ai fini di una maggiore rapidità di questo tipo di indagini durante un futuro evento eruttivo. Il procedimento utilizzato è stato quindi quello di identificare

dei range validi di Δh per ogni colata lavica simulata per poi utilizzare un valore comune a tutte le simulazioni effettuate.

6.2.1 - Calibrazione dello spazio parametrico (N, Δh)

Per l'individuazione dei parametri ottimali da utilizzare per le simulazioni delle varie colate è stato effettuato un confronto tra la forma della colata e la simulazione. In pratica è stata effettuata la massimizzazione del rapporto tra l'intersezione colata-simulazione e l'unione colata-simulazione come mostrato dal disegno in figura 6.2.

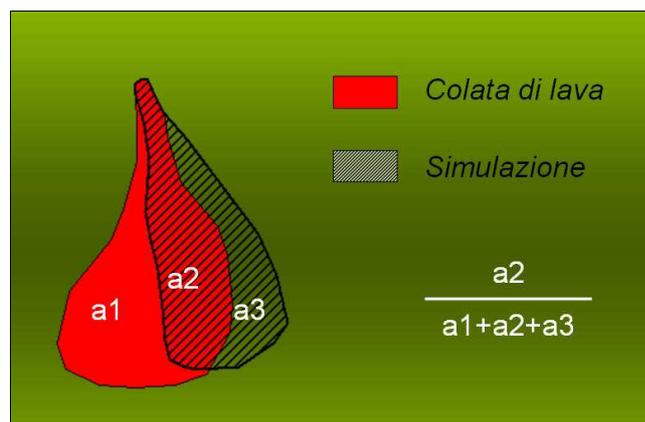


Figura 6.2. Rappresentazione grafica del rapporto tra l'intersezione (a_2) e unione ($a_1+a_2+a_3$) della colata di lava e della simulazione. La massimizzazione di tale rapporto è stata utilizzata come procedura per l'individuazione dei parametri più appropriati da impiegare nelle simulazioni col DEM SRTM.

Questo studio ha portato all'identificazione di una griglia di coppie di valori di N e Δh . Ad ogni punto di questa griglia è associato un valore rappresentativo del rapporto tra colata reale e simulazione, variabile da 0 ad 1. Quindi, più alto è questo rapporto, maggiore è l'accordo tra percorsi simulati e colata reale. In questa griglia di valori è stata individuata l'area che presenta valori di questo rapporto maggiori di 0,9 volte il suo valore massimo, e che è indicativa delle coppie di N e Δh che meglio riproducono la colata osservata. Nella figura 6.3 viene riportato un esempio di questo tipo di studio relativo alla colata West (vedi tabella 3.1).

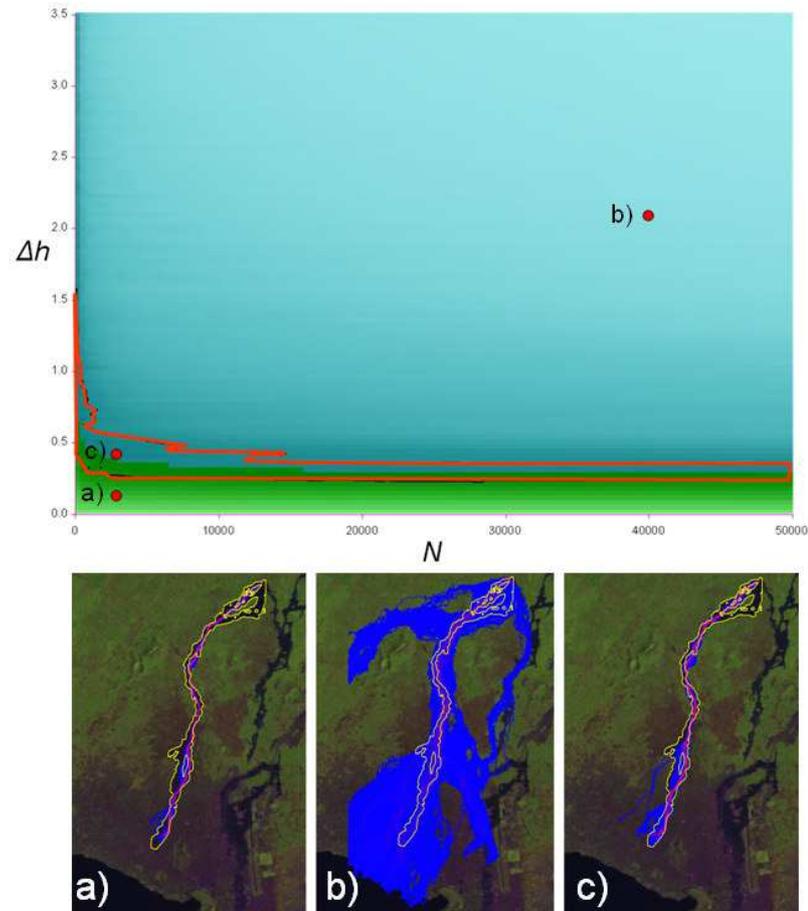


Figura 6.3. Massimizzazione del rapporto tra l'intersezione colata-simulazione e l'unione colata-simulazione per l'identificazione dei valori più appropriati da utilizzare nella simulazione della colata West. La colata di lava è indicata con la linea gialla. L'area circoscritta dalla linea in rosso è indicativa di coppie di valori di Δh e N per cui i risultati delle simulazioni ben si accordano con la colata reale, come si evince dalla simulazione "c", in basso in figura. Le simulazioni "a" e "b" rappresentano invece simulazioni che rispettivamente sottostimano e sovrastimano la colata reale.

L'area con i valori più alti è bordata in figura dalla linea rossa e corrisponde all'insieme delle coppie N e Δh che meglio simulano la colata reale. Le zone del grafico soprastanti e sottostanti questa area indicano rispettivamente coppie di parametri che sovrastimano (celeste) e sottostimano (verde) la colata reale. In basso in figura sono presentati degli esempi di simulazioni utilizzando coppie di N e Δh relativi a queste tre fasce, indicati con i punti a), b) e c) nella figura in alto. Come risulta dalla figura, la simulazione "c" è quella che mostra i risultati migliori. Un'altra considerazione che emerge da questo tipo di studio è la maggiore

dipendenza del rapporto indicato nella figura 6.2 dal valore di Δh piuttosto che dal numero di percorsi N . In pratica oltre un certo valore di N ci si avvicina alla saturazione del massimo bacino inondabile definito da Δh , e il risultato delle simulazioni non cambia più in maniera significativa.

In sintesi possiamo quindi concludere che la colata West viene ottimamente riprodotta utilizzando un Δh variabile tra 0,25 m e 0,45 m, e $N > \sim 6000$.

Questo tipo di studio è stato applicato a tutte le altre colate dell'eruzione del 2002 e, come anticipato precedentemente, i risultati sono quantitativamente diversi. In ogni caso, per tutte le simulazioni emerge un controllo maggiore del valore di Δh rispetto a N , sebbene per alcune, tale conclusione appaia meno chiara. Di seguito vengono presentati i risultati relativi a tutte le altre colate considerate.

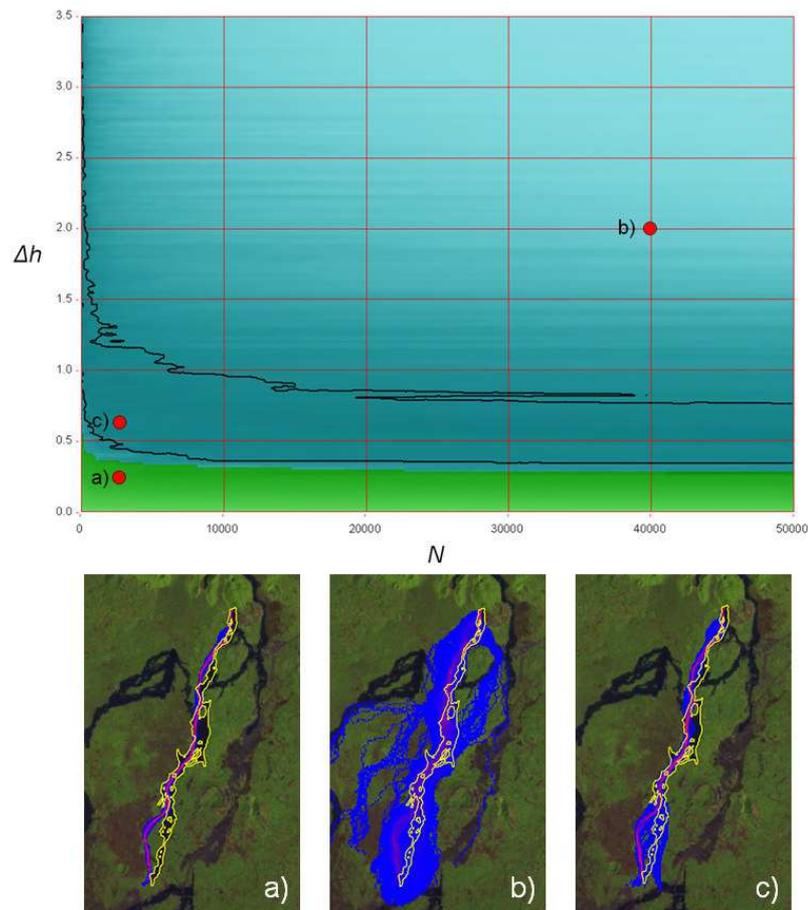


Figura 6.4. Massimizzazione del rapporto tra l'intersezione colata-simulazione e l'unione colata-simulazione per l'identificazione dei valori più appropriati da utilizzare nella simulazione della colata partita dalla frattura sul fianco occidentale del cono Mudjoga.

La figura 6.4 mostra lo studio relativo alla colata Mudjoga (vedi tabella 3.1). In questo caso, il range dei valori di Δh che bordano l'area a maggiore corrispondenza tra percorsi simulati osservati, è più ampio, con un valore minimo intorno a 0,35 m ed uno massimo intorno ai 0,85 m, per $N > \sim 13000$. Anche in questo caso, come nei casi successivi, vengono mostrati esempi di simulazioni corrispondenti a coppie N - Δh , al di sopra, al di sotto, e all'interno dell'area ottimale.

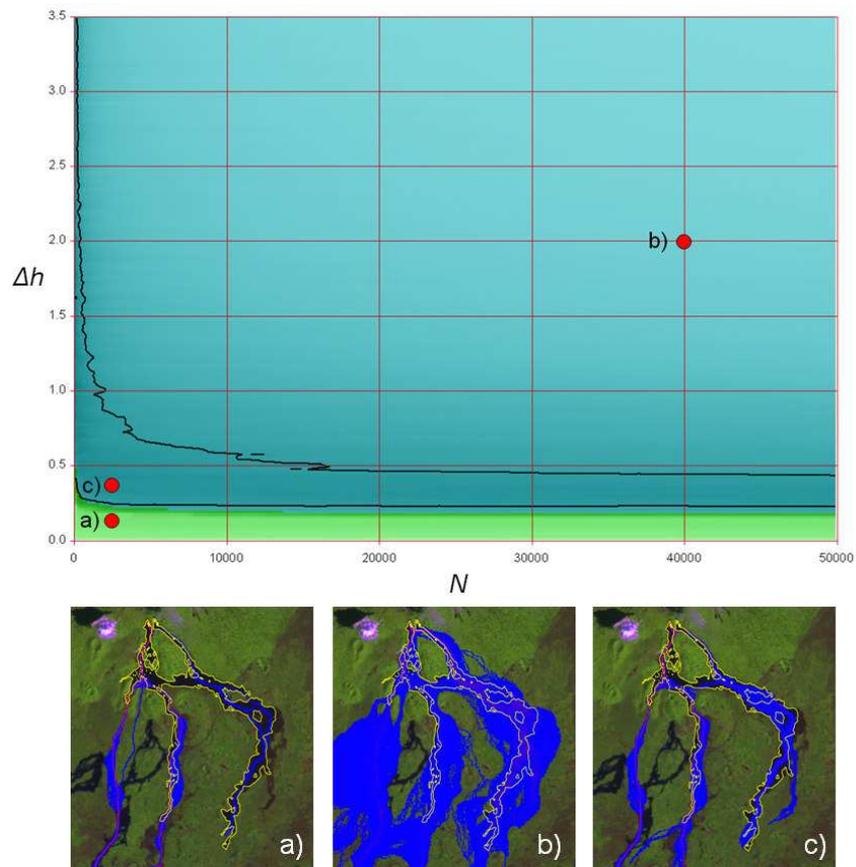


Figura 6.5. Massimizzazione del rapporto tra l'intersezione colata-simulazione e l'unione colata-simulazione per l'identificazione dei valori più appropriati da utilizzare nella simulazione delle colate partita dalle fratture alla base del cono Shaheru.

Il medesimo studio, applicato alle colate partite alla base del cono Shaheru, ha presentato dei risultati intermedi rispetto a quelli ottenuti per la colata West e per quella di Mudjoga, con un Δh minimo corrispondente a 0,25 m ed uno massimo intorno ai 0,6 m, per $N > \sim 10000$ (Figura 6.5). I risultati sono eccellenti soprattutto per quanto riguarda la colata più orientale. Una particolarità emersa da questo studio

e che i percorsi simulati nella parte distale individuano un ramo parallelo a quello reale ma che nella realtà non esiste. Se andiamo però ad osservare il campo lavico della precedente eruzione del 1977 notiamo come questi percorsi corrispondano perfettamente a quelli delle colate di lava più orientali (ben visibili nel pannello in basso a sinistra della figura 6.5). Questo suggerisce quindi che il ramo più orientale della colata simulata nel caso c) sia un ramo comunque probabile, sebbene non realizzato nell'eruzione del 2002.

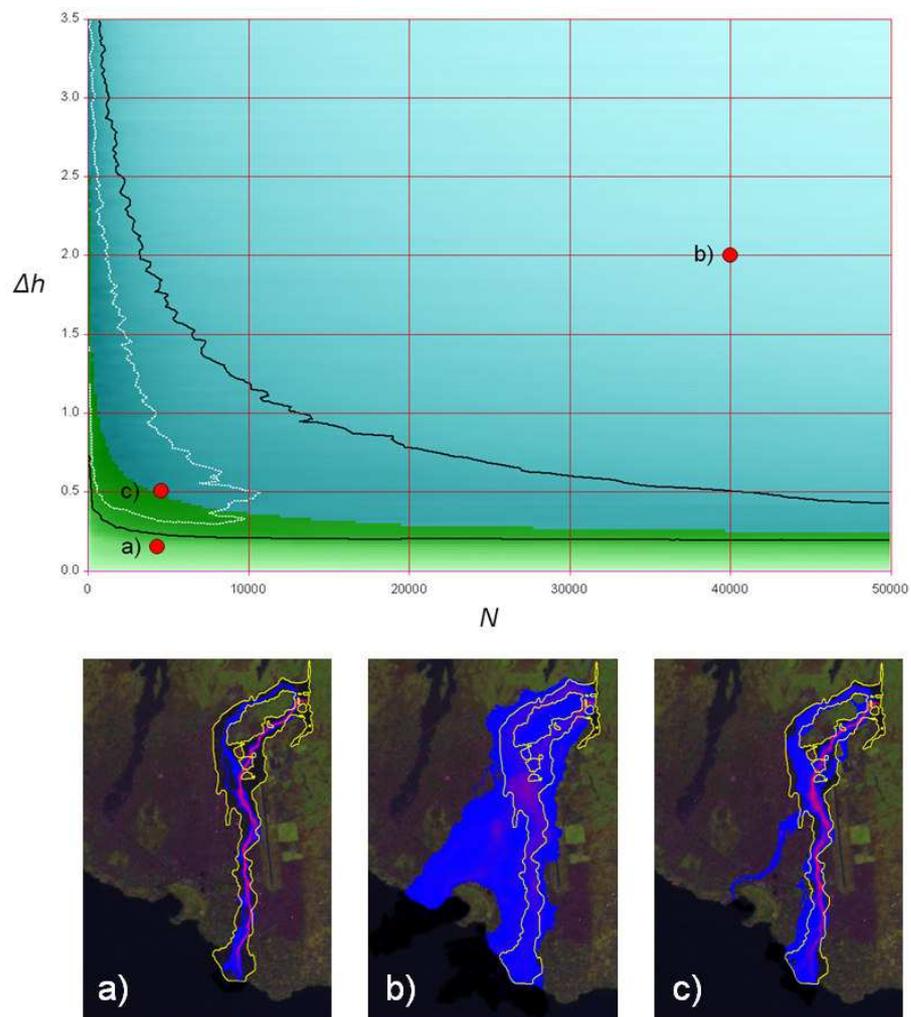


Figura 6.6. Massimizzazione del rapporto tra l'intersezione colata-simulazione e l'unione colata-simulazione per l'identificazione dei valori più appropriati da utilizzare nella simulazione della colata partita dalla frattura di Munigi che ha devastato la città di Goma. L'area con rapporto maggiore di 0,9 volte il suo valore massimo è indicata in figura con la linea bianca, mentre la linea nera rappresenta l'area con rapporto maggiore di 0,8.

In figura 6.6 viene infine mostrato, il risultato nel caso della colata orientale entrata in Goma nel 2002. A differenza dei casi precedenti l'area con i valori più alti ($> 0,9$), indicata dalla linea bianca in figura, è molto ridotta rispetto agli altri casi. Per confronto è stata indicata l'area corrispondente a valori del rapporto in figura 6.2 leggermente inferiori ($> 0,8$), che ha una forma più simile a quella delle altre colate. La ragione di questo andamento può essere vista nella forte tendenza da parte dei percorsi simulati a fuoriuscire dal cammino reale lungo il bordo occidentale della colata reale. Questa tendenza provoca un forte spreading che fa sì che la corrispondenza tra colata e simulazione sia piuttosto bassa. Comunque, come si può osservare dalla figura, utilizzando un valore di Δh di 0,5 m e $N \sim 5000$ (caso c) si ottiene un risultato soddisfacente.

Per quanto riguarda invece le colate partite a nord del cono di Shاهرu e quelle partite sul versante ovest del vulcano (Kabanga) non sono state fatte delle simulazioni considerando il fatto che queste colate presentano volume esigui, distanze percorse brevi e soprattutto sono molto lontane dai centri abitati. Si è preferito quindi non rischiare di alterare il comportamento delle colate di lava in grado di penetrare nelle zone abitate, includendo tali piccole e sommitali colate nella selezione dei parametri ottimali.

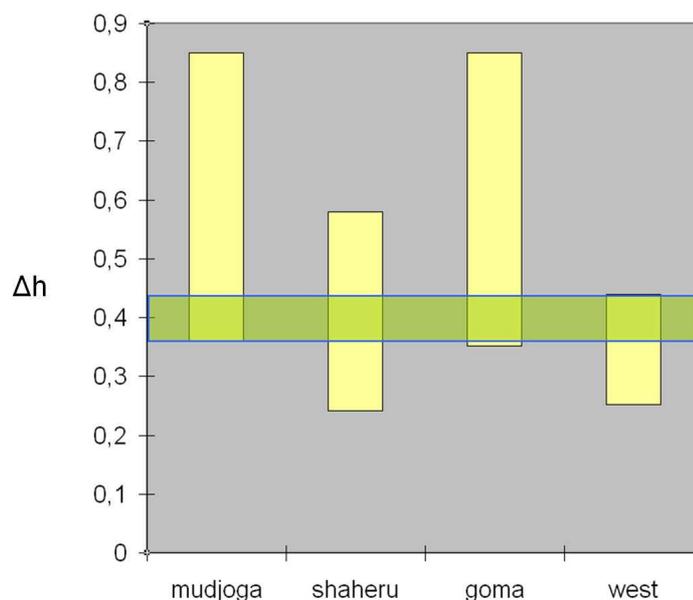


Figura 6.7. Rappresentazione grafica della variazione di Δh per tutti i quattro casi simulati. Come si evince dalla figura, un Δh pari a 0,4 m risulta un valore appropriato, da utilizzare su tutto il vulcano.

Una volta identificati i range di Δh per le varie colate, si è cercato di individuare un valore comune che possa essere utilizzato in maniera efficace per le simulazioni effettuate con il DEM SRTM indipendentemente dalle caratteristiche locali. Per quanto riguarda il valore di Δh si è scelto il valore di 0,4 m, comune a tutte le simulazioni (Figura 6.7).

Per quanto riguarda invece il numero di percorsi da utilizzare nelle simulazioni, si è scelto un numero di percorsi pari a 15.000 per vent, che rappresenta un buon compromesso tra qualità delle simulazioni in relazione alle osservazioni, e tempi di calcolo.

6.2.2 - Simulazioni delle colate del fianco sud del Monte Nyiragongo

In seguito all'identificazione dei parametri più appropriati per le colate del fianco sud del Nyiragongo, sono state eseguite una serie di simulazioni utilizzando vent in corrispondenza delle fratture eruttive. Poiché il codice DOWNFLOW produce percorsi che si estendono lungo l'intero dominio di calcolo, al fine di permettere il confronto tra percorsi reali e percorsi simulati quest'ultimi sono stati bloccati in corrispondenza della distanza massima percorsa dalle colate. La figura 6.8 mostra una generale buona corrispondenza tra simulazioni e osservazioni, sebbene localmente emergano alcune differenze, in particolare relative alla tendenza delle colate simulate a produrre ulteriori lobi non presenti nelle colate reali. Considerando la risoluzione del DEM di 90 m per pixel, i risultati ottenuti appaiono comunque notevoli, sia per quanto riguarda l'estensione laterale del flusso e quindi la capacità di spreading di un flusso lavico, come per l'identificazione delle isole lasciate dalle colate di lava. Tali risultati incoraggiano quindi all'utilizzo del DEM SRTM come base adeguata per uno studio mirato alla realizzazione di una mappa generale di pericolosità da invasione di colate di lava al Nyiragongo.

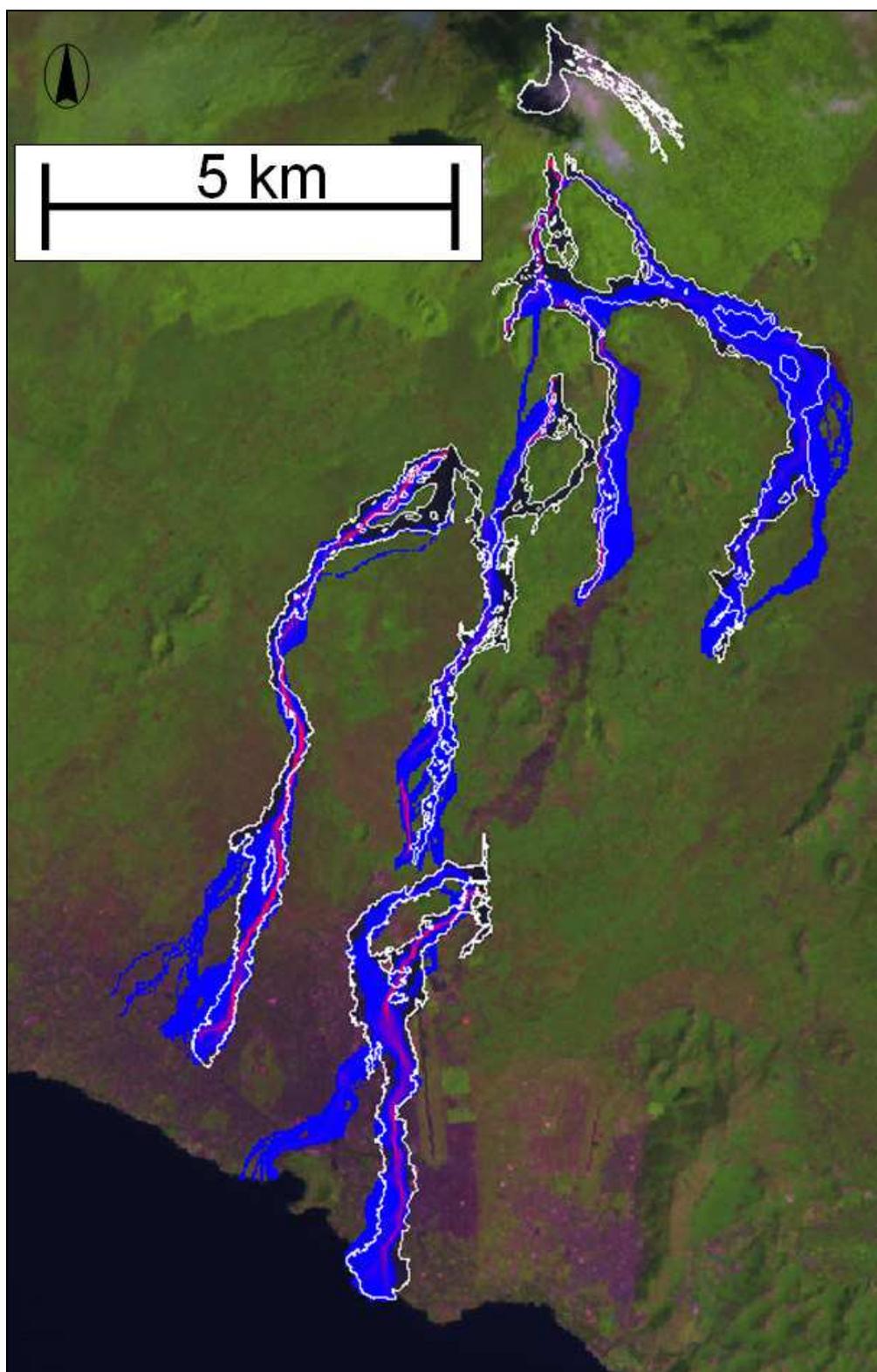


Figura 6.8. Simulazione dei percorsi delle principali colate di lave dell'eruzione del 2002 al Nyiragongo. Le colate di lava sono indicate con la linea bianca. Mentre in blu e rosso le simulazioni.

6.3 – Identificazione delle aree di accesso alla città di Goma delle colate di lava

Il DEM SRTM è stato utilizzato per valutare i risultati ottenuti nel capitolo 5, in particolare la mappa di suscettibilità da invasione di colate di lava presentata in figura 5.8. Tale mappa è stata ottenuta assumendo uguale probabilità di arrivo di colate di lava lungo l'intero margine nord della città, corrispondente al margine del DEM. Adesso, la calibrazione effettuata per il DEM SRTM e la buona corrispondenza tra percorsi simulati e osservati (Figura 6.8) permette di includere nello studio gli elementi morfologici a nord di Goma, fuori dal DEM 1:10.000 precedentemente utilizzato. Vedremo che questo studio permetterà di identificare con chiarezza le aree preferenziali di ingresso delle colate di lava nella città di Goma.

Questa fase dello studio è proceduta in maniera analoga allo studio che ha portato alla mappa di suscettibilità in figura 5.8, ma senza ripetere, come in questo caso, le simulazioni assumendo diversi possibili valori di Δh . Nel presente caso infatti lo scopo è principalmente quello di valutare se gli elementi morfologici a nord di Goma possono in qualche modo alterare i cammini di lava attesi in città, rispetto a quelli in figura 5.8. Si è quindi definito un allineamento, esteso per 12 km, di vent, distanti l'uno dall'altro 30 m (dimensioni del pixel).

I risultati mostrati in figura 6.9 rivelano numerosi aspetti di rilievo sul controllo esercitato dalla morfologia del terreno sulle colate che si propagano lungo il fianco sud del Nyiragongo. Innanzitutto, viene confermato che l'area dal quartiere di Kibwe fino al monte Goma e al lago Kivu risulta schermata alla propagazione delle colate di lava. Oltre a quest'area, ne emerge una ulteriore, ancora più ampia, che comprende la zona più occidentale della città, e che risulta anch'essa largamente schermata. In questo caso l'effetto di schermo si deve alla presenza di due grossi coni (il Katwa e il Muja in figura 6.9), che a partire da una quota di circa 1750 m s.l.m., risultano in una efficiente deviazione dei percorsi delle colate in direzione sud-ovest. A ovest di tali coni la vergenza delle valli si mantiene in tale direzione (sud-ovest), per cui, una volta deviate, le colate si mantengono oltre il perimetro della città, arrivando al massimo a lambire l'estremo margine occidentale.

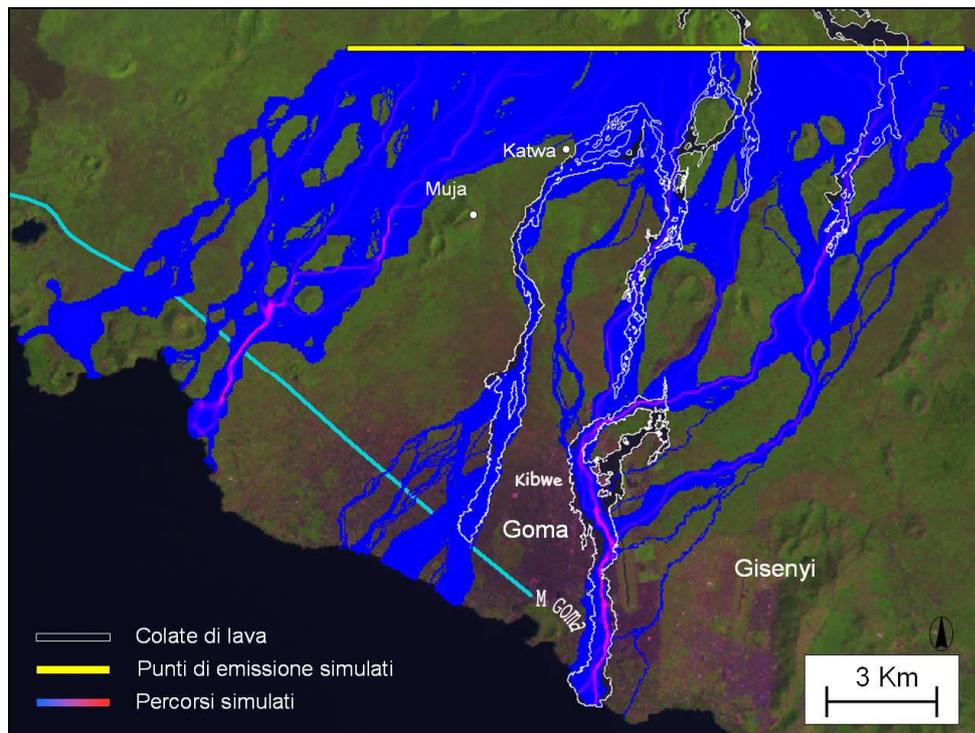


Figura 6.9. Simulazioni dei percorsi delle colate laviche utilizzando come area di partenza una fascia di vent lunga 12 km che attraversa l'intero fianco sud del vulcano. I due punti bianchi rappresentano i coni, Katwa e Muja, la cui presenza influenza fortemente la direzione dei percorsi simulati.

Un ulteriore elemento di grande rilevanza che emerge dalle simulazioni in figura 6.9 è rappresentato dal fatto che la colata principale nella città di Goma in corrispondenza dell'aeroporto, costituisce un bacino di raccolta per le colate provenienti da un'ampia porzione del fianco sud del vulcano. Ci si attende quindi che tale area possa essere ripetutamente invasa da colate di lava durante future eruzioni eccentriche.

Infine, le simulazioni in figura 6.9 mostrano che le due colate di lava penetrate nella città di Goma durante l'eruzione del gennaio 2002 seguono i due principali percorsi di accesso alla città. Questo è un risultato particolarmente significativo, in quanto implica che future colate di lava in grado di minacciare la città tenderanno a ripresentarsi secondo i medesimi percorsi. Ulteriori aree della città di Goma possono essere invase da colate di lava con caratteristiche simili a quelle dell'eruzione del 2002 soltanto se un vent si aprisse direttamente in città, o entro certi limiti, all'interno delle aree attraversate dalle colate in figura 6.9 e immediatamente a nord della città.

Suscettibilità da invasione di colate di lava della città di Gisenyi (Ruanda)

Come già visto precedentemente, lungo il margine est di Goma corre il confine tra la Repubblica Democratica del Congo e il Ruanda, e immediatamente al di là di tale confine si trova la città ruandese di Gisenyi (circa 85.000 abitanti), teatro dell'arrivo di centinaia di migliaia di profughi dalla città di Goma durante l'esodo spontaneo del 17 gennaio 2002, quando la lava iniziò a scorrere nel centro abitato. E' quindi rilevante valutare la suscettibilità di invasione di colate di lava nella città di Gisenyi. Sebbene le due città siano praticamente in continuità (esse sono divise da una sbarra in prossimità del lago, e da un'area non costruita di 2-300 m di larghezza a 1-2 km a nord di esso), esiste un alto morfologico che le separa e che corre parallelo al fianco est della colata principale in Goma del 2002. Di conseguenza il grande bacino di raccolta di tale colata, ben visibile in figura 6.9, tende a concentrare la lava in Goma risparmiando Gisenyi, che viene raggiunta solo da un numero molto limitato di percorsi simulati (figura 6.9).

Al fine di valutare le aree in cui la formazione di una frattura eruttiva produca colate di lava con potenzialità di invadere la città di Gisenyi, sono state compiute le simulazioni in figura 6.10. La linea in verde borda il più probabile bacino di raccolta per Gisenyi. Eventuali colate di lava subito a nord di tale bacino possono avere la capacità di produrre flussi secondari in grado di drenare lava verso la città, ma la probabilità che ciò si verifichi è comunque ridotta, come testimoniato dal basso numero di cammini che attraversano la linea verde.

Va considerato anche che i dati relativi alle uniche eruzioni eccentriche osservate, quelle del 1977 e del 2002, suggeriscono che colate di lava che si originano ad alta quota in prossimità del cratere centrale del Nyiragongo scorrono generalmente per brevi distanze (in accordo al modello interpretativo corrente secondo cui il sistema di fratture nella sua parte più alta drena magma inizialmente contenuto a quota maggiore all'interno del condotto centrale, Komorowski et al, 2004; Giordano et al., 2007; Tedesco et al., 2007). Sembra quindi poco probabile che una eventuale emissione di lava direttamente dal fianco est del cratere centrale del Nyiragongo, come in figura 6.10, possa generare colate in grado di percorrere grandi distanze fino

ai centri abitati. Di conseguenza colate di lava in grado di penetrare Gisenyi da nord dovrebbero generarsi da fratture eruttive svariati chilometri più ad est rispetto al sistema di fratture attivo nel 1977 e nel 2002, a meno che tale sistema non si propaghi ulteriormente verso sud. In tal caso la città di Gisenyi potrebbe addirittura essere interessata dal sistema di fratture, e abbondanti colate potrebbero riversarsi in città.

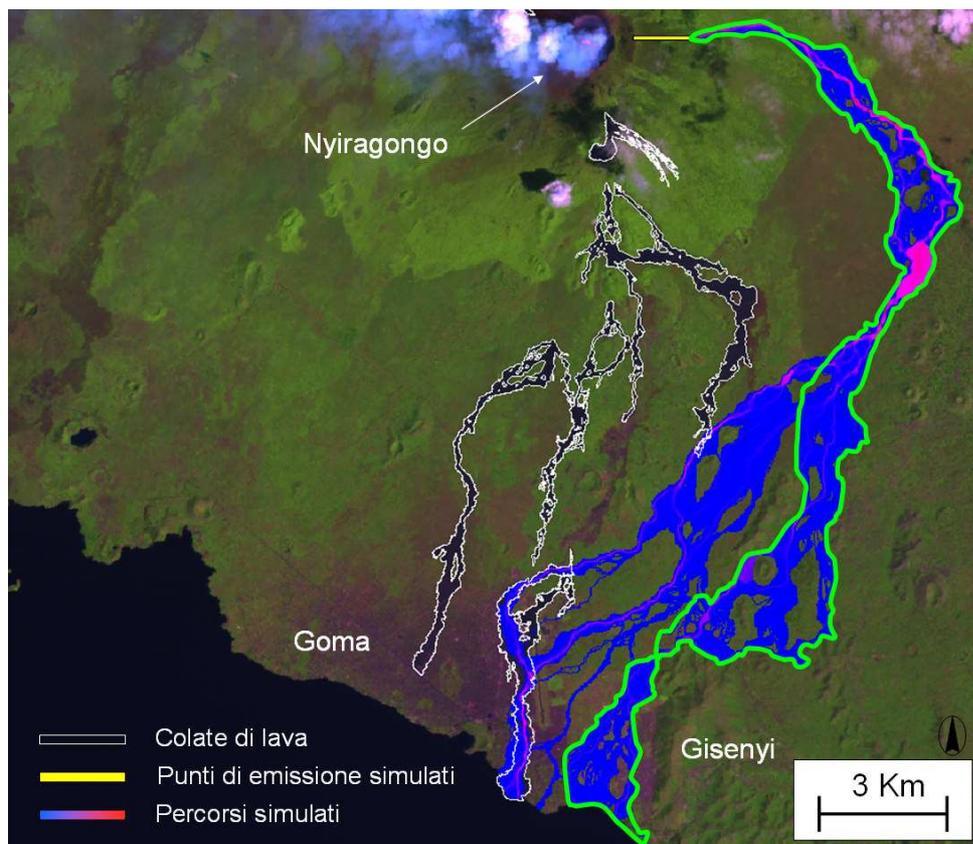


Figura 6.10. Simulazioni dei percorsi delle colate laviche utilizzando come area di partenza una fascia di vent ubicata a breve distanza dal cratere centrale del Nyiragongo, sul fianco est del vulcano. Le linee in verde bordano il più probabile bacino di raccolta per Gisenyi.

In conclusione, sembra poco probabile che colate di lava possano giungere a Gisenyi, a meno che queste non si originino direttamente in città o immediatamente a nord di essa, situazione questa che appare non trascurabile vista l'attuale orientazione del sistema di fratture e la sua tendenza ad estendersi verso sud.

Capitolo 7

Mappa di pericolosità da invasione di colate di lava

In questo capitolo viene presentata la mappa di pericolosità da invasione di colate di lava per il vulcano Nyiragongo. La mappa di pericolosità rappresenta lo strumento più efficace per la pianificazione del territorio e per la preparazione dei piani di emergenza. La sua realizzazione richiede tuttavia un lungo studio al fine di comprendere a fondo i limiti e le potenzialità dei metodi utilizzati. Nel presente caso tale studio ha impiegato praticamente una intera tesi di dottorato, durante la quale i metodi fondamentali utilizzati, rappresentati dal codice di calcolo DOWNFLOW e dalla base topografica su cui si applica, sono stati sistematicamente investigati. In questo senso, gli studi riportati nei capitoli precedenti possono essere considerati come il lungo percorso necessario per giungere alla mappa di pericolosità presentata in questo capitolo

7.1 - Metodologia

Nei capitoli precedenti la procedura utilizzata per la calibrazione del codice DOWNFLOW e le sue potenzialità di utilizzo per simulare i percorsi delle colate di lava al Nyiragongo, sono state descritte in dettaglio. Al fine di utilizzare il codice per la realizzazione di una mappa di pericolosità, è necessario disporre di ulteriori informazioni, costituite dalla distribuzione delle probabilità di apertura di vent, e

dalla lunghezza delle colate associate. I paragrafi 7.1.1 e 7.1.2 trattano questi argomenti. E' utile sottolineare fin da subito che nel definire tali quantità è stato utilizzato il criterio della massima semplicità, al fine di evitare quanto più possibile il rischio che scelte troppo specifiche o fortemente condizionate da modelli e schemi mentali possano in qualche modo introdurre elementi di artificiosità nella mappa di pericolosità. Il successivo paragrafo 7.1.3 illustra invece i metodi seguiti per la quantificazione della pericolosità vulcanica. Infine il sottocapitolo 7.2 illustra la mappa di pericolosità e ne discute alcuni aspetti di maggior rilievo.

7.1.1 - Probabilità relativa di apertura di futuri vent

Il Monte Nyiragongo è noto alla comunità scientifica solamente dal 1896 (Von Gotzen, 1896) e da allora le uniche eruzioni che hanno prodotto colate di lava sono rappresentate dagli eventi del 1977 e del 2002. L'intero fianco sud del vulcano è comunque caratterizzato dalla presenza di numerosi coni, spesso allineati, a testimonianza di un'intensa attività eruttiva eccentrica passata, che mostra che nella storia geologica del vulcano varie zone lungo i suoi fianchi, lontane dai sistemi di frattura delle due ultime eruzioni, sono state sede di attività eruttiva.

Purtroppo non ci sono datazioni di tali fasi di attività che possano mostrare un'evoluzione temporale, ne esistono studi strutturali che evidenzino importanti zone di debolezza o di concentrazione di stress e deformazioni, ulteriori ai sistemi di frattura formati nel corso delle eruzioni del 1977 e 2002. Le uniche informazioni affidabili provengono quindi da tali due eruzioni.

Sebbene la mancanza degli studi di cui sopra rappresenti un limite, che ci si augura possa essere superato nei prossimi anni, gli eventi di fratturazione che hanno accompagnato le ultime due eruzioni sembrano comunque sufficientemente rilevanti da fornire indicazioni di primo ordine sugli eventi attesi per una futura eruzione eccentrica che avvenga nell'arco dei prossimi anni o decine di anni. Infatti, tutti gli studi recenti citati nel corso di questa tesi concorrono ad interpretare le eruzioni del 1977 e del 2002 come eventi di origine vulcano tettonica, nella quale le dinamiche di rifting rappresentano l'elemento dominante (Tazieff, 1977; GVO, 2002; Tedesco et

al., 2002, 2007; Komorowski et al., 2004). Appare logico concludere che l'area corrispondente all'allineamento delle fratture, formatesi nel corso di tali eruzioni costituisca anche l'area dove si concentrano gli sforzi tettonici. L'eruzione del 2002 ha di fatto ripreso la medesima dinamica del 1977, estendendola ulteriormente a sud. Il principio che viene utilizzato in questa tesi è quindi che una futura eruzione a breve-medio termine segua lo stesso trend di quelle del 1977 e 2002.

Su questa base e seguendo il principio di massima semplicità annunciato nell'introduzione al presente capitolo, sono state identificate tre fasce di territorio alle quali sono state assegnate probabilità relative di apertura di nuove bocche eruttive (Figura 7.1). La fascia riguardante la probabilità più elevata è quella relativa all'area occupata dai sistemi di fratture del 1977 e del 2002. Questa si estende in pratica in direzione nord-sud secondo la direttrice passante per il cratere centrale e la città di Goma. Nella parte alta di questa fascia è stato inserito un ramo in direzione nord-ovest in corrispondenza dell'area occupata dalle fratture da cui sono partite le colate denominate Kabanga e Sud Kabanga (vedi tabelle 3.1 e 3.3). Il margine superiore di questa fascia è stato invece fissato a nord della frattura relativa alla colata che si è originata in corrispondenza dell'antico cono Baruta nel 1977, che comunque ha interessato zone disabitate. La larghezza di tale fascia a più alta probabilità di apertura di bocche eruttive è stata fissata in maniera sostanzialmente arbitraria, utilizzando un criterio cautelativo che tiene conto di possibili ulteriori espansioni laterali del campo di fratture simili a quelle osservate tra l'eruzione del 1977 e quella del 2002. A questa fascia ne è stata associata un'altra contigua, con probabilità di apertura 10 volte minore, con lo scopo di rappresentare una zona di raccordo tra aree a massima, e aree a minima probabilità di apertura di bocche eruttive. A questo proposito si può notare che l'eruzione del 2002 non solo ha esteso a sud il sistema di fratture del 1977 ma anche che la porzione sud del campo di fratture totale appare più spostata ad ovest rispetto alla porzione nord (Figura 7.1). Alle zone al di fuori di queste due fasce è stata invece assegnata una probabilità 100 volte minore rispetto a quella centrale. Le zone al di fuori del rift sono state assunte come caratterizzate da probabilità nulla.



Figura 7.1. Probabilità relativa di apertura di futuri vent, utilizzata in questo lavoro di tesi. Le fratture delle eruzioni del 1977 e del 2002 sono indicate in figura in arancione e giallo, rispettivamente.

7.1.2 - Identificazione delle distanze massime e minime percorribili dalle colate di lava

Come più volte ricordato in questa tesi, le caratteristiche del codice DOWNFLOW non consentono la determinazione della distanza percorsa dalle colate di lava. Di fatto, i percorsi simulati si estendono comunque fino al margine del dominio di calcolo. Tuttavia, le distanze percorse dalle colate di lava durante le due eruzioni del 1977 e 2002 sono molto variabili. Come emerge dai dati della tabella 7.1, esse variano dalle poche centinaia di metri percorsi dalle colate di Nord Shaheru nel 1977, sino ai quasi 10 km della colata West nel 2002, anche se va notato che la lunghezza della colata di Goma del 2002, che giunge fino al lago, va considerata sottostimata rispetto a quella che si sarebbe realizzata in terraferma.

Colate di lava	Quota del vent	Distanze percorse
Kabanga 2002	2828	2854
N Shaheru 2002	2825	2218
N Shaheru 1977	2785	420
Shaheru W 2002	2402	6423
Shaheru E 2002	2402	8702
Shaheru E 1977	2310	7700
N Baruta 1977	2272	8837
S Kabanga 1977	2230	2610
S Shaheru 1977	2120	8860
Mudjoga 2002	2020	7166
West 2002	1864	9825
Goma 2002	1606	7211

Tabella 7.1. Altimetria delle fratture eruttive (m slm) e relative distanze percorse (m) dalle colate di lava delle eruzioni del 1977 e del 2002.

Se andiamo a posizionare su un grafico i dati relativi alla tabella 7.1, si notano due principali raggruppamenti (Figura 7.2a). Il primo gruppo comprende le colate che sono partite da fratture apertesi a quote comprese tra il cratere centrale del Nyiragongo e il cono Shaheru. Queste colate hanno percorso distanze relativamente brevi, tendono ad essere più allungate (basso rapporto d'aspetto) e presentano spessori molto esigui sia in ragione della forte pendenza delle zone più elevate del vulcano che non permette un accumulo notevole, sia e soprattutto a causa della

elevata fluidità di queste colate (Giordano et al., 2007). La ragione per la quale queste colate sono caratterizzate da brevi distanze percorse, è chiaramente legata ai piccoli volumi di lava fuoriusciti dalle rispettive fratture. Come già menzionato, secondo l'interpretazione dominante negli studi in seguito all'eruzione del 2002, queste colate, si sono generate in seguito allo svuotamento dei condotti nella parte sommitale del vulcano. Il volume limitato di magma sarebbe quindi il riflesso della quota elevata e quindi delle limitate disponibilità di magma a quote superiori all'interno del condotto. In ogni caso, per gli scopi di questa tesi è sufficiente l'osservazione che colate di lava prodotte ad alta quota tendono a realizzare brevi percorsi. Una conferma di questo può essere osservata dal grafico presente in figura 7.2b, dove è stata rappresentata la distanza percorsa dalle colate in relazione alla distanza dei relativi vent dal cratere centrale.

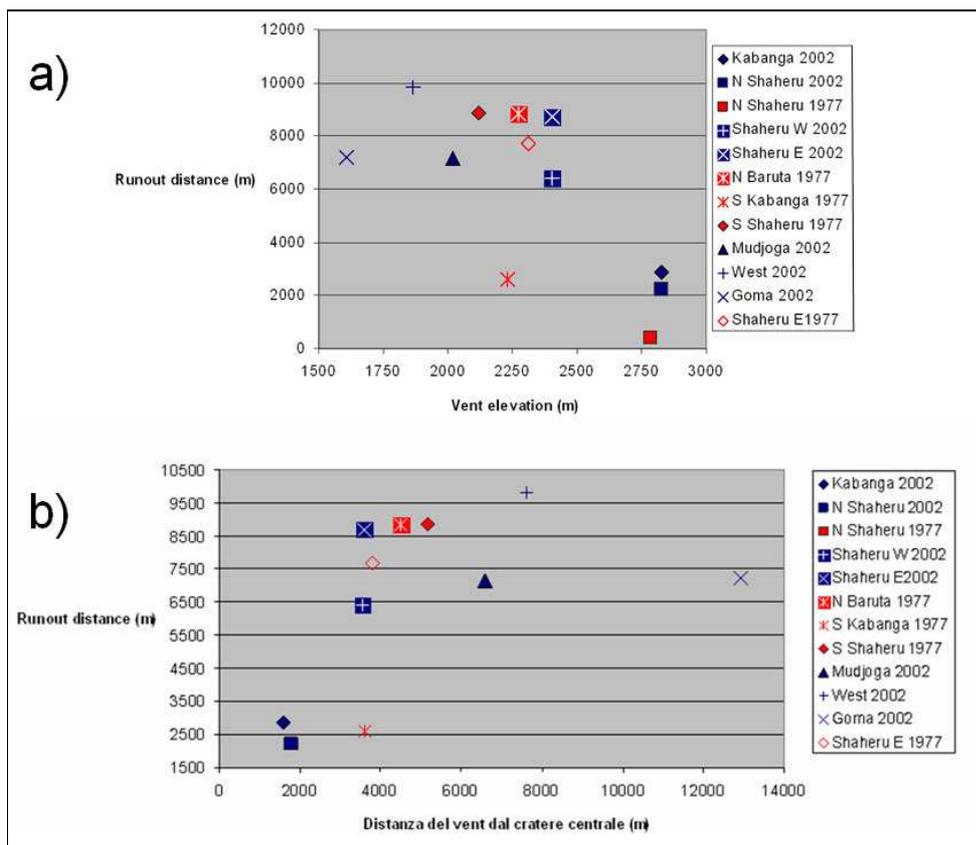


Figura 7.2. Distanze percorse dalle colate di lava delle due eruzioni osservate al Nyiragongo in funzione di (a) quota del vent di partenza e (b) distanza del vent dal cratere centrale. Le colate dell'eruzione del 1977 sono indicate nel grafico con simboli rossi, mentre quelle del 2002 con simboli blu.

Il secondo gruppo di colate in figura 7.2 comprende quelle originatesi a quote inferiori al cratere del cono Shaheru. Ad eccezione di un caso, comunque posizionato ad una quota relativamente alta, queste colate hanno percorso distanze notevoli comprese fra 6 e 10 km.

Questo andamento è confermato dal grafico presentato in figura 7.3, dalla quale si evince un aumento del volume delle colate man mano che si abbassa la quota del vent di partenza. Risultati simili emergono anche dal grafico presentato nella figura 7.4, in cui viene rapportato il volume delle colate di lava con la distanza dal cratere centrale. Anche in questo caso, come nel precedente, è possibile riconoscere un trend ben definito che suggerisce un meccanismo secondo il quale il drenaggio del magma dal sistema dei condotti centrali determina la quantità di lava disponibile ad ogni quota ove si trovi una frattura eruttiva, in accordo alla interpretazione generale secondo cui la dinamica di rifting determina la fratturazione del vulcano, mentre il magma gioca un ruolo sostanzialmente passivo. In ogni caso, anche per la lunghezza delle colate di lava, come per la distribuzione dei vent vista precedentemente, per gli scopi di questa tesi sono sufficienti le informazioni provenienti dalle pure osservazioni.

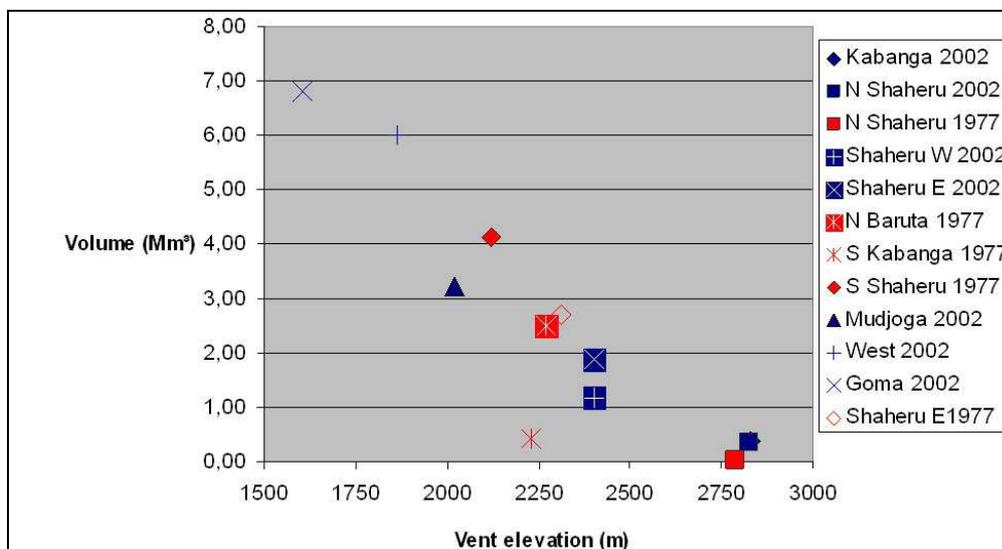


Figura 7.3. Volume delle colate di lava delle due eruzioni osservate al Nyiragongo in funzione della quota del vent di partenza.

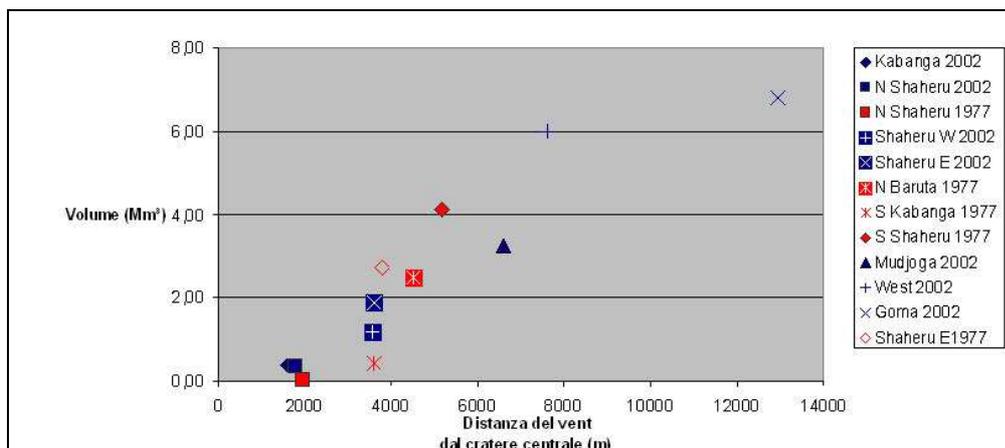


Figura 7.4. Volume delle colate di lava delle due eruzioni osservate al Nyiragongo in funzione della distanza del vent dal cratere centrale.

Sulla base di tali informazioni è stata effettuata una divisione in settori dell'area circostante il vulcano (Figura 7.5). Questa suddivisione definisce la distanza percorribile dalle colate di lava in funzione della distanza dal cratere centrale. Per ciascuna area è stata definita una semplice distribuzione di probabilità per la lunghezza delle colate ivi generate, definendo una lunghezza minima e una massima. La probabilità di avere colate di lunghezza pari alla lunghezza minima è stata posta uguale a 1, quella di avere colate di lunghezza pari alla lunghezza massima è stata posta uguale a zero. Tali valori di probabilità estremi sono poi raccordati con una legge lineare.

La prima zona si estenda fino a 3,5 km dal cratere centrale ed è associata a colate in grado di percorrere distanze comprese fra 1 e 4 km. Al secondo settore, che si estenda tra 3,5 e 6.5 km dal cratere centrale, sono invece associate colate di lava che possono percorrere distanze fra 5 e 10 km. Infine il terzo settore, a distanze maggiori di 6,5 km, è associato a colate leggermente più lunghe, in grado di percorrere distanze fra 6 e 12 km.

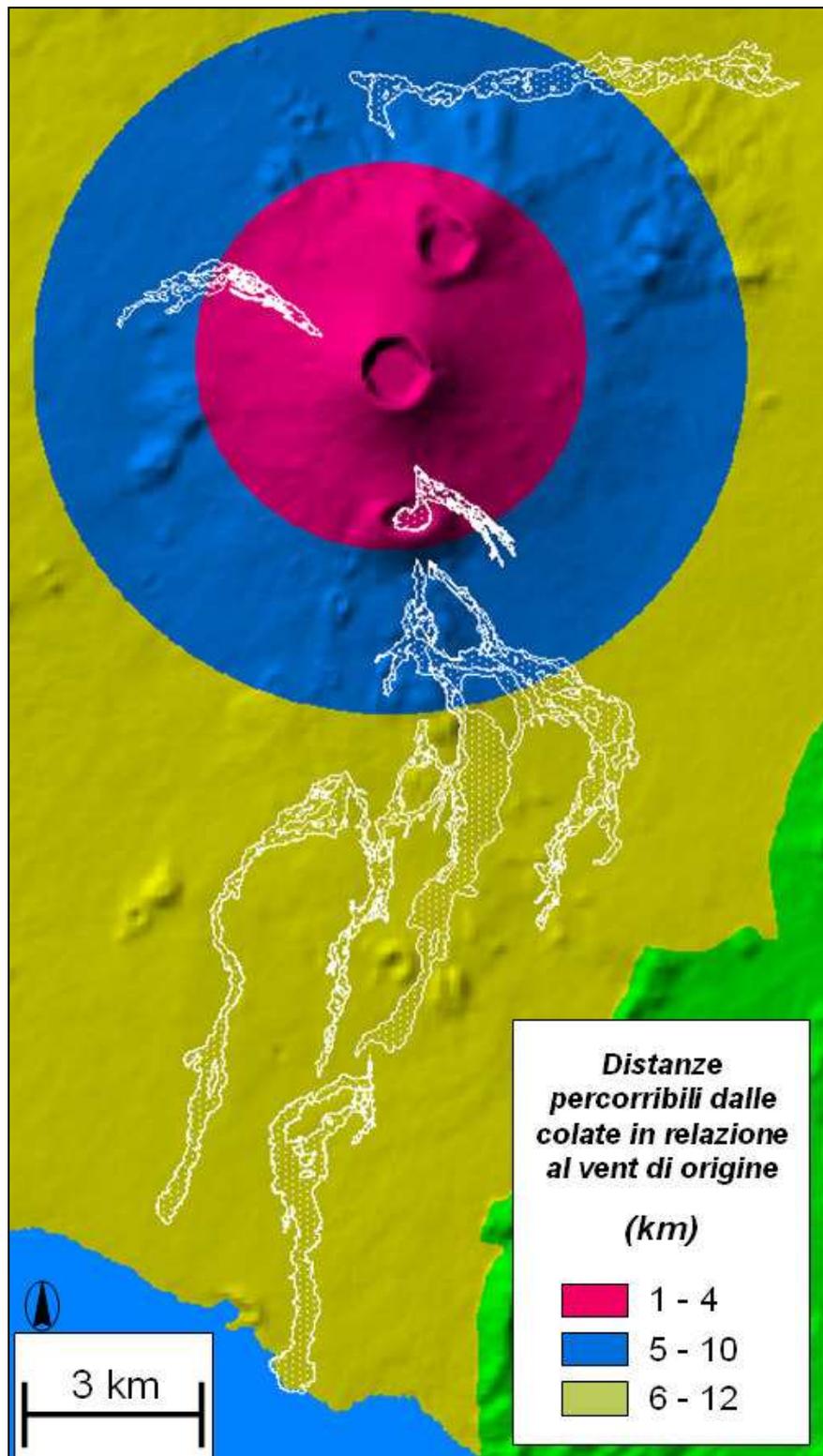


Figura 7.5. Settori corrispondenti alla generazione di colate di lava in grado di percorrere diverse distanze dal vent di partenza.

7.1.3 - Metodo di quantificazione della pericolosità vulcanica

Al fine di quantificare la pericolosità da invasione di colate di lava è stata creata una griglia con dimensioni 18×27 km, relativa all'area che va dalla costa del lago Kivu sino alle zone immediatamente a nord del cratere centrale del Nyiragongo (è utile ricordare che la zona a nord del cratere centrale è completamente disabitata). Successivamente è stato creato un grid di vent interno alla griglia, con un vent ogni 30 m per un totale di 540.000 vent, o un uguale numero di colate simulate, con lo scopo di calcolare la probabilità di passaggio su ciascun pixel utilizzando le caratteristiche del codice DOWNFLOW unitamente alle probabilità di apertura dei vent e di lunghezza delle colate sopra descritte. In accordo alla calibrazione del codice per il DEM SRTM descritta nel capitolo 6, per ogni simulazione è stato utilizzato un numero di percorsi $N = 15.000$, e un valore di $\Delta h = 0,4$ m. La probabilità (P_S) che un dato pixel i sia raggiunto da una colata di lava è data da:

$$P_S = \sum_j P_{V_j} \cdot P_{L_{i,j}} \cdot P_{i,j}$$

con

$$P_{i,j} = \frac{n_i}{N}$$

dove:

n_i = numero di passaggi di una singola colata sul pixel i .

N = numero totale di percorsi per ciascun colata (= 15.000).

$P_{i,j}$ = probabilità di invasione del pixel i da parte di una colata originata nel pixel j , indipendentemente dalla distanza tra i e j .

P_{V_j} = probabilità di apertura di vent nel pixel j .

$P_{L_{i,j}}$ = probabilità che la colata originatasi nel pixel j copra la distanza fino al pixel i .

7.2 - Mappa di pericolosità

La figura 7.6 rappresenta la mappa di pericolosità ottenuta nel presente lavoro di tesi. Tale mappa va intesa come rappresentativa della probabilità condizionata al verificarsi di un'eruzione. In altre parole non ci si pone la questione relativa alla probabilità che una eruzione si verifichi in un dato intervallo di tempo, ma solo quella relativa alle aree invase da colate di lava in caso di eruzione.

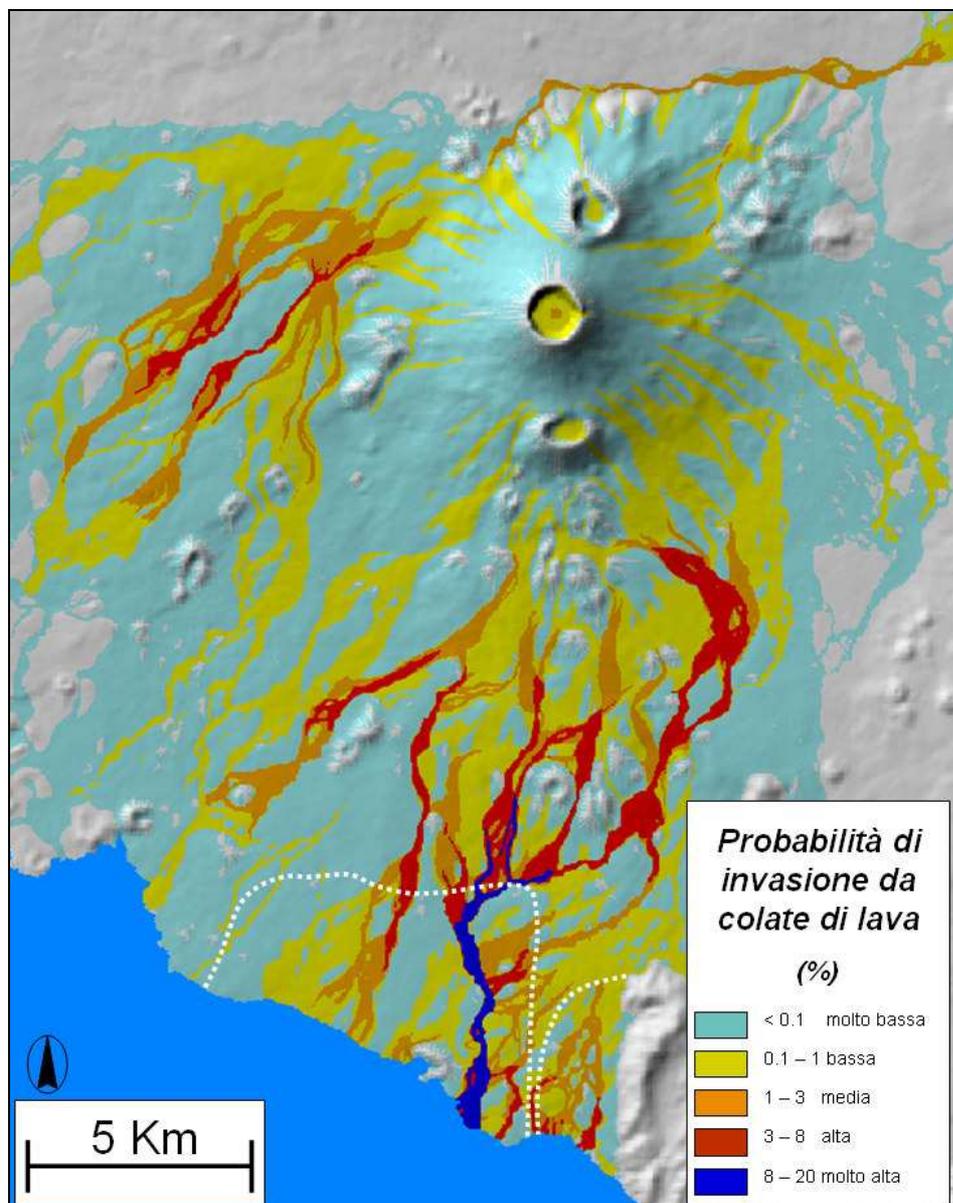


Figura 7.6. Mappa di pericolosità da invasione di colate di lava.

E' utile rimarcare che le informazioni utilizzate per la produzione della mappa di pericolosità sono costituite unicamente dalla morfologia del terreno e dalle distribuzioni di probabilità relative all'apertura di vent e alla lunghezza percorsa dalle colate di lava, rappresentate nelle figure 7.1 e 7.5, cui si aggiunge la calibrazione del codice di calcolo in termini di valori ottimali dei parametri N e Δh .

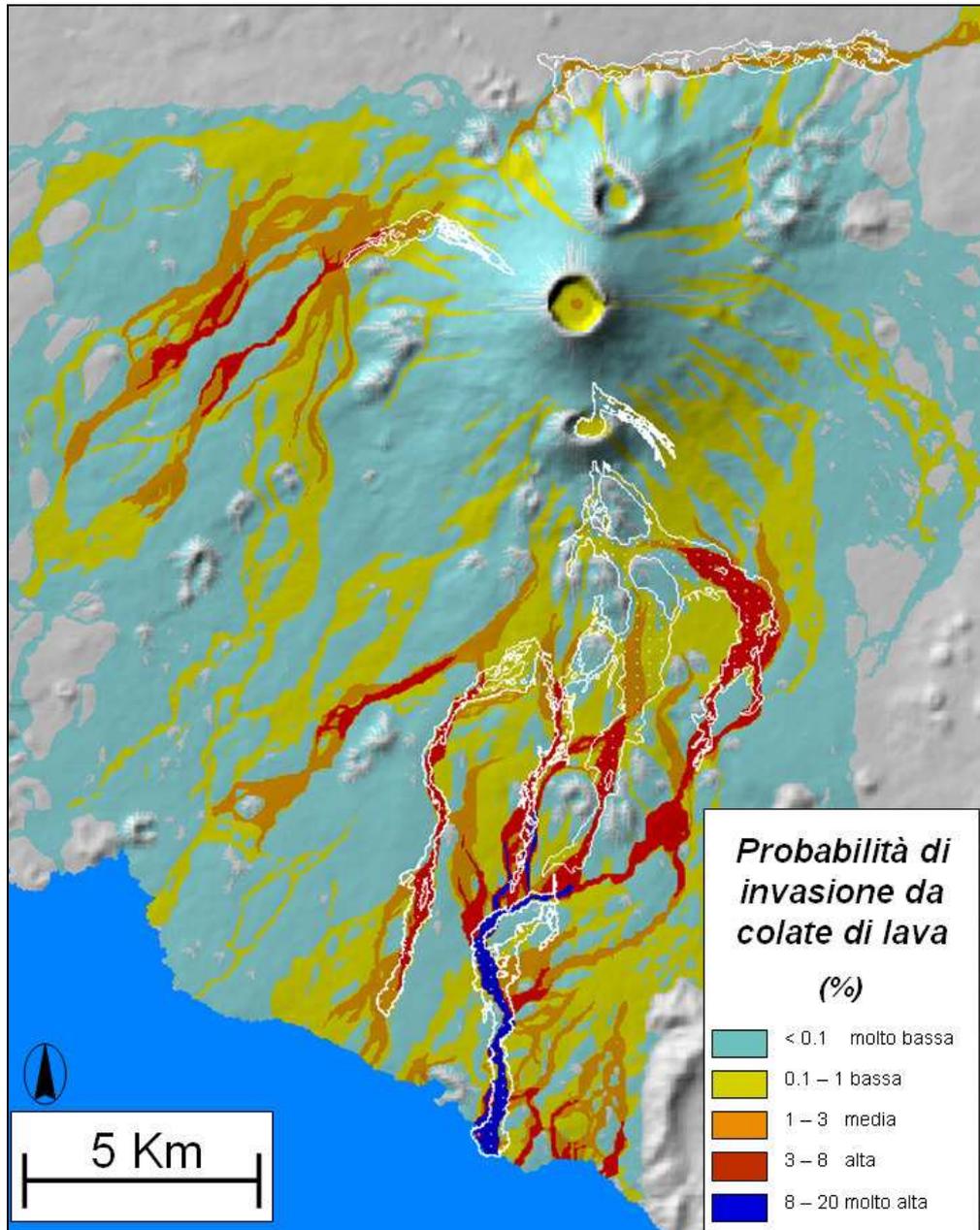


Figura 7.7. Confronto fra la mappa di pericolosità e il campo lavico delle due ultime eruzioni. I contorni delle colate di lava sono indicate in bianco.

In altre parole, le informazioni su cui si basa la mappa sono relativamente semplici, criterio questo che, come già spiegato, si è voluto seguire al fine di evitare, per quanto possibile, artificiosità nel risultato finale e dare massima importanza a semplici criteri facilmente individuabili, tra cui il principale è costituito dal controllo morfologico sui percorsi delle colate di lava.

La figura 7.7 mostra il confronto fra la distribuzione della pericolosità in figura 7.6 e la distribuzione delle colate di lava reali formatesi in seguito alle eruzioni del 1977 e del 2002. Come si vede, ciascuna colata reale (con l'eccezione di quelle poco estese, a più alta quota che sono discusse nel seguito), corrisponde bene ad un'area a elevata probabilità, sebbene la mappa identifichi ulteriori aree di probabile invasione non raggiunte da colate reali nel corso delle due eruzioni osservate. Tale buona corrispondenza conforta ulteriormente nel ritenere il codice DOWNFLOW uno strumento adeguato per la simulazione dei percorsi delle colate di lava, e i criteri seguiti per la realizzazione della mappa di pericolosità come sostanzialmente adeguati.

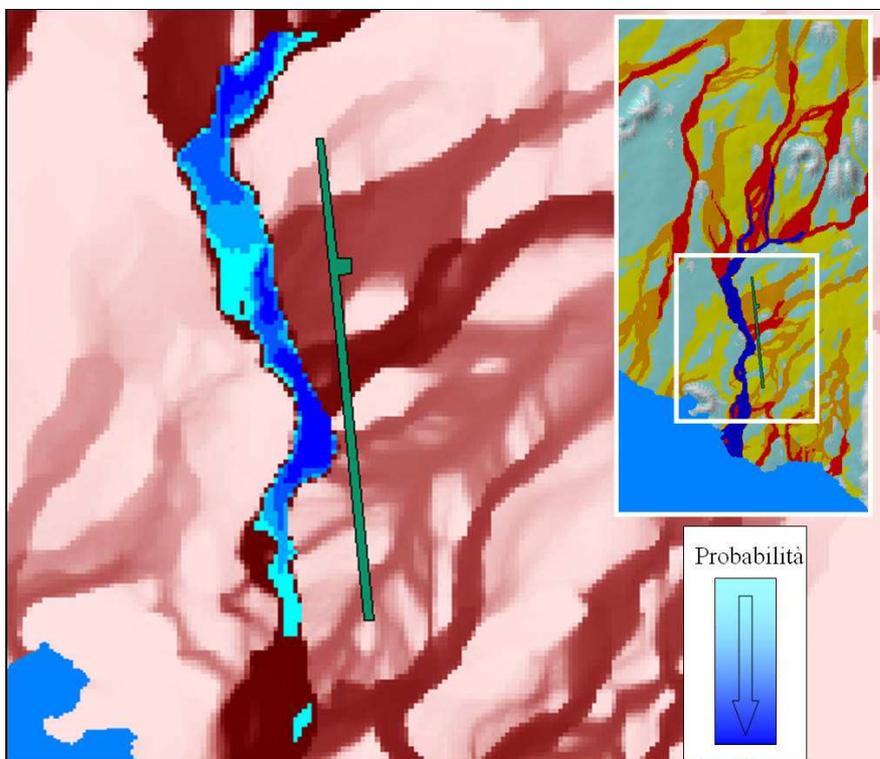


Figura 7.8. Particolare della zona blu in Goma. E' riportato l'aeroporto internazionale (barra in verde).

Come l'esempio mostra, la mappa di pericolosità, presentata in un numero limitato di classi in figura 7.7, contiene in realtà una ricchezza di informazioni molto più vasta di quella percepibile dalla figura. Ai fini della valutazione della pericolosità da invasione di colate di lava, il dettaglio della figura 7.7 è più che sufficiente. Tuttavia, come mostrato, la stessa mappa può essere utilizzata per una analisi di dettaglio della distribuzione di probabilità da invasione di colate di lava contenente informazioni sulle complesse relazioni tra i vari bacini di potenziale scorrimento delle colate.

Sebbene i criteri di base per la sua realizzazione siano relativamente semplici, la mappa mostra una distribuzione complessa della pericolosità, da cui emergono alcuni elementi rilevanti che vengono di seguito discussi.

Innanzitutto, le due aree di accesso delle colate di lava in Goma, evidenziate nel precedente capitolo e effettivamente invase dalle colate di lava del gennaio 2002, emergono chiaramente come le zone a più alta pericolosità. Anche l'area relativamente sicura del quartiere di Kibwe (vedi figura 5.8) e la più ampia area sicura nella porzione ovest della città (vedi figura 6.9) sono evidenziate, a ulteriore conferma che i principi seguiti per la realizzazione della mappa sono consistenti con l'insieme delle conoscenze ottenute nel lungo lavoro propedeutico alla sua realizzazione. L'area occupata dalla colata più orientale in corrispondenza dell'aeroporto, risulta essere quella a massima pericolosità sull'intero vulcano, a causa della particolare conformazione del territorio che ne fa il naturale bacino per le colate originate in un'ampia porzione del fianco sud del vulcano, come già evidenziato in figura 6.9. La probabilità di invasione raggiunge in tal caso valori estremamente alti fino quasi al 20%, stando a significare che in future eruzioni eccentriche al Nyiragongo, presupposto che non avvenga un significativo cambiamento del sistema che invalidi i principi base della mappa, in un caso su cinque si osserverà l'invasione della stessa area in Goma. L'area della colata occidentale in città, seppure caratterizzata da valori minori, risulta comunque ad elevata pericolosità. In questo caso avremo una nuova colata in questa area, in quasi un caso su dieci.

Una seconda osservazione di rilievo, meglio evidenziata nell'ingrandimento in figura 7.9, riguarda l'aeroporto internazionale di Goma, che rappresenta un elemento di grande rilevanza economica e sociale. Nel 2002 le colate di lava ne hanno distrutto solo l'estrema porzione nord, cancellando circa 1000 m di pista, mentre il grosso

della colata si è limitato a costeggiarlo per tutta la sua lunghezza (vedi figura 3.1). Tuttavia la mappa di pericolosità evidenzia una elevata probabilità che l'aeroporto venga impattato da colate in grado di distruggere la pista tagliandola trasversalmente circa alla sua metà. La tabella 7.2 riporta i valori di probabilità d'impatto da parte di colate di lava per una serie di strutture sensibili nella città di Goma.

Struttura	Probabilità massima di invasione da colate di lava
(1) Aeroporto	9.53%
(2) Centro Ngangi	6.86%
(3) Stadio dell'Unità	0.85%
(4) Ospedale	0.62%
(5) Stadio Volcans	1.15%
(6) Mairie	3.04%
(7) RVA Domain	0.96%
(8) Parrocchia N.D. d'Afrique	0.39%
(9) Virunga Market	0.02%
(10) Cattedrale	0.04%
(11) Fayer Social	0.26%
(12) Centro operativo dell'ONU	0.65%
(13) Centrale elettrica	0.79%

Tabella 7.2. Probabilità massima di invasione da colate di lava per le principali strutture presenti a Goma.

Infine la mappa mostra aree ulteriori rispetto a quelle invase dalle colate di lava nel corso delle eruzioni del 1977 e 2002, e caratterizzate da alta pericolosità. Tra queste spiccano per rilevanza le aree in rosso nella città di Gisenyi. In questo caso gli elevati valori di probabilità da invasione di colate di lava derivano principalmente dal fatto che tale città si trova non distante dall'asse del sistema di fratture eruttive, per cui l'area ricade, secondo i criteri in figura 7.1, tra quelle a maggiore apertura di futuri vent. La morfologia locale determina poi la concentrazione dei percorsi delle colate in alcuni settori, risultando in una locale alta pericolosità.

Altre aree ad elevata pericolosità non invase nel corso delle due ultime eruzioni, sono ben visibili in rosso in figura 7.7. L'area ad ovest dei campi lavici, che borda l'estremo margine nord occidentale di Goma; l'ampia area a nord-est di Munigi; l'area già evidenziata nel dettaglio di figura 7.8 e che taglia trasversalmente

l'aeroporto; e le due aree in alto a sinistra nelle figure 7.6 e 7.7, che costituiscono i principali bacini di raccolta in caso di estensione della frattura eruttiva lungo il fianco nord-ovest del cratere centrale del Nyiragongo.

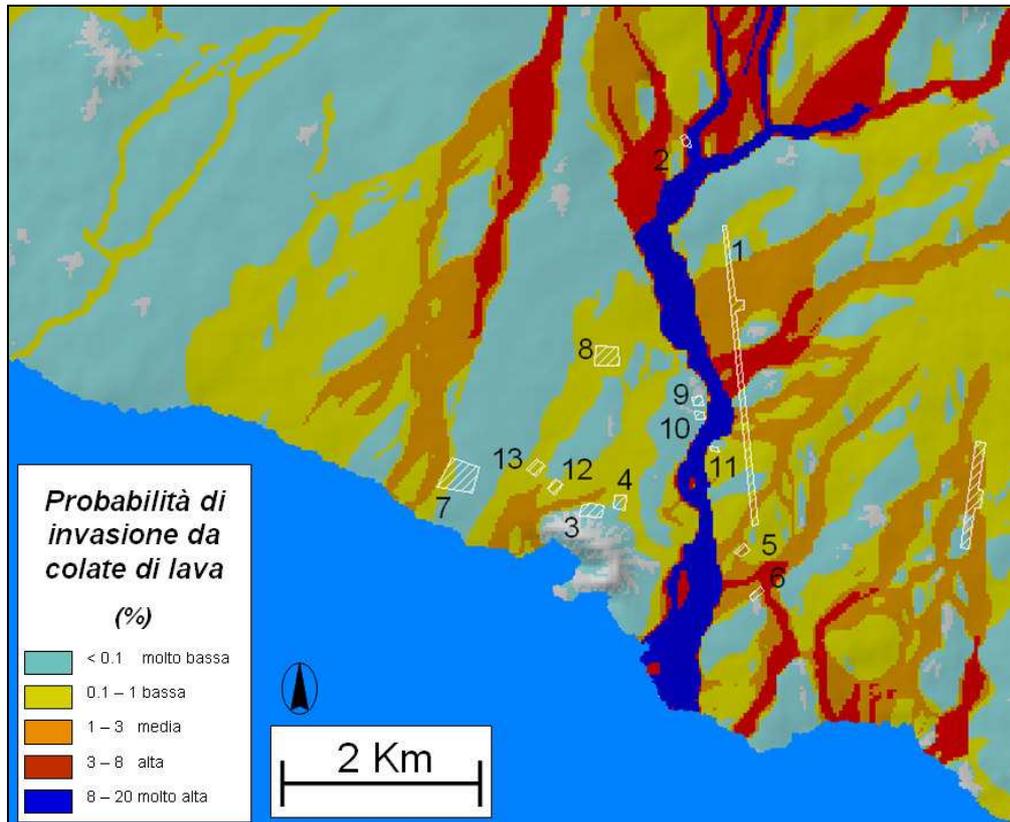


Figura 7.9. Particolare della mappa di pericolosità relativo all'area di Goma e Gisenyi. Le principali strutture della città sono indicate in figura con poligoni a tratto bianco. La numerazione corrisponde a quella presentata nella tabella 7.2. All'estrema destra è riportato l'aeroporto di Gisenyi.

E' utile infine ricordare che le colate di lava originate da fratture eruttive a più alta quota nel corso delle eruzioni del 1977 e 2002, corrispondono nella mappa ad aree a bassa pericolosità. Poiché le fratture da cui tali colate si originano sono comprese nell'aree a più alta probabilità di apertura di vent (vedi figura 7.1), la ragione di tale discrepanza sta nel fatto che la morfologia locale è tale che solo un basso numero di vent è in grado di produrre percorsi in tali aree. Tuttavia, l'esperienza mostra che in due casi su due tali zone sono state ricoperte da colate di lava. Poiché le fratture eruttive ad alta quota hanno emesso lava sia nel 1977 che nel 2002, sembra legittimo attendersi che anche in una futura eruzione questo avvenga, e che la pericolosità

locale sia più alta di quella rappresentata nella presente mappa. Tutto ciò suggerisce che i criteri adottati per la costruzione della mappa di pericolosità possano essere troppo semplicistici nelle aree del vulcano ad alta quota e elevate pendenze dei versanti, dove la pericolosità è scarsamente dipendente dalla morfologia mentre è più direttamente controllata dall'apertura di vent. In altre parole in tali aree sembra necessario un maggiore dettaglio nella definizione delle probabilità di apertura dei vent, rispetto a quello di ordine zero utilizzato in questo lavoro. Al contrario, l'alto grado di coincidenza tra colate reali e le zone a più alta pericolosità nella maggior parte dei casi in figura 7.7, suggerisce che allontanandosi dalla sommità del vulcano il numero di percorsi su ciascun pixel sia sufficientemente elevato da rendere il controllo morfologico dominante nella definizione della pericolosità. Sebbene tali argomenti mostrino chiaramente la necessità di implementare in futuro la conoscenza della distribuzione di probabilità per l'apertura di nuovo vent, si ritiene che l'approccio semplice seguito in questa tesi sia sufficiente per catturare gli elementi essenziali della pericolosità da invasione di colate di lava nelle aree densamente popolate a quote intermedie e basse del vulcano.

Capitolo 8

Studio dell'effetto di barriere protettive sui percorsi delle colate di lava

Questo capitolo è dedicato allo studio di fattibilità di barriere protettive volte a deviare possibili future colate di lava e a ridurre la pericolosità nella città di Goma, e parzialmente, nella città di Gisenyi in territorio ruandese. L'eruzione del Nyiragongo del 17 gennaio 2002 rappresenta il caso di più distruttivo impatto di colate di lava con una grande città. Il ripetersi di eventi dalle caratteristiche molto simili nel 1977 e nel 2002 suggerisce una possibilità non trascurabile che nuovi simili eventi accadano ancora nel prossimo futuro. Queste considerazioni, l'esperienza maturata nel corso di questa tesi sulla simulazione dei percorsi delle colate di lava al Nyiragongo, e la tendenza attuale della città di Goma ad espandersi ulteriormente, rendono tale caso ideale per lo studio delle possibili misure di riduzione della pericolosità e mitigazione del rischio vulcanico attraverso la costruzione di barriere artificiali. A questo si aggiunge la particolare reologia della lava, che essendo particolarmente fluida tende a scorrere aggirando l'ostacolo piuttosto che a produrre accumuli locali in grado di sormontarli, come testimoniato dalle osservazioni di terreno e dalle numerose isole lasciate dalle colate di lava nel 2002 in corrispondenza dei piccoli alti morfologici locali. Vedremo nel seguito che tale caratteristica suggerisce una maggiore efficienza di possibili barriere protettive.

Prima di affrontare lo studio degli effetti di barriere artificiali sui percorsi delle colate di lava al Nyiragongo, è utile passare brevemente in rassegna le esperienze passate di interventi volti a bloccare o deviare le colate di lava attraverso la costruzione di barriere.

8.1 – Utilizzo di barriere protettive durante le eruzioni dell’Etna e di altri vulcani basaltici

Il monte Etna in Sicilia è il vulcano dove negli ultimi decenni sono stati effettuati i tentativi più importanti di contenimento e deviazione di flussi lavici attraverso l’utilizzo di barriere protettive (Colombrita, 1984; Barberi e Villari, 1984, 1994; Barberi et al., 1992b, 1993, 2003; Barberi e Carapezza, 2004).

Le prime fonti storiche relative ad un intervento di deviazione di una colata di lava risalgono a quella che viene considerata una delle maggiori eruzioni del Monte Etna in tempi storici. L’eruzione del 1669 fu caratterizzata infatti dall’apertura di una bocca eruttiva a soli 800 m di quota, con un’attività di tipo stromboliano che produsse i coni dei Monti Rossi (Alessi, 1832; De Fiore, 1916). L’attività effusiva iniziò l’11 marzo e la colata lavica raggiunse la città di Catania il 16 aprile prima di riversarsi in mare. In occasione dell’eruzione del 1669 fu effettuato il primo rudimentale tentativo di deviazione di una colata lavica da parte dell’uomo. Fonti storiche riferiscono che un gruppo di persone, armate di pale e picconi, riuscì a creare una breccia nel canale lavico in prossimità di Nicolosi e a far defluire parzialmente la colata verso ovest, anche se successivamente questo tentativo fu fatto cessare poiché metteva a rischio la vicina città di Paternò. Questo fece sì che la breccia creata nel canale originario si rimarginasse rapidamente e la colata continuò il suo cammino verso Catania che venne in parte distrutta, accumulandosi tuttavia sul fianco dei bastioni della città, alti 18 m, che limitarono largamente i danni alle strutture urbane.

Il tentativo di divergere la lava nel 1669 portò alla creazione di una legislazione specifica che impedì questo tipo di operazione all’Etna, e che è rimasta valida fino al 1983. Durante l’eruzione del 1971 furono erette delle piccole barriere a difesa della cabinovia, ma queste furono fatte clandestinamente proprio a causa di questa legge. Nel maggio del 1983, una colata di lava, apertasi da una frattura sul fianco sud del vulcano ad una quota di circa 2300 m, si diresse lentamente verso le città di Belpasso e Nicolosi (Frazzetta e Romano, 1984). La colata distrusse alcuni skilift, parecchi ristoranti ed altre infrastrutture turistiche, case isolate e varie sezioni della strada che conduceva da Nicolosi alla zona del Rifugio Sapienza, ad un’altezza di circa 1900 m.

Il primo reale intervento al mondo di deviazione di una colata lavica da parte dell'uomo venne realizzato dal Dipartimento della Protezione Civile Italiana proprio durante l'eruzione del 1983 durante la quale furono costruite quattro barriere in terra, alte dagli 8 m ai 20 m, che fecero sì che le colate non raggiungessero importanti strutture come l'Osservatorio di Astrofisica, il Rifugio Sapienza ed altri edifici (Barberi e Villari, 1984; Colombrita, 1984; Lockwood e Romano, 1985). Successivamente, tale tipo di intervento è stato ripetuto in occasione delle eruzioni del 1992, 2001 e 2002 (Barberi et al., 1992b, 1993, 2003; Barberi e Carapezza, 2004). In occasione dell'eruzione del 1991-1993 fu costruito un terrapieno disposto grosso modo ortogonalmente alla direzione di avanzamento della colata, con lo scopo di favorirne l'espansione laterale e quindi di impedirne o rallentarne l'avanzamento. La posizione del terrapieno fu decisa sulla base dei risultati delle simulazioni dei possibili percorsi delle colate (Barberi et al., 1993). Il terrapieno risultò efficace nell'arco di alcuni mesi, durante i quali la lava invase un'ampia zona a monte di esso. Tuttavia, l'eruzione fu particolarmente lunga e l'alimentazione dei flussi lavici particolarmente intensa, e nei primi mesi del 1992 il terrapieno fu superato e la lava si riversò in una stretta valle che conduceva direttamente al centro abitato di Zafferana Etnea. Vennero quindi costruiti ulteriori terrapieni ortogonali al flusso all'interno della stessa valle, ma non dettero risultati importanti in quanto la colata rapidamente riusciva a superarli e a proseguire nel suo avanzamento verso il paese. Dopo numerosi interventi di varia natura descritti in dettaglio da Barberi et al., 1992b, e in Barberi e Carapezza, 2004, la crisi fu risolta attraverso l'uso di esplosivi nella parte alta del flusso lavico, che ebbero il risultato di interrompere o comunque fortemente ridurre l'alimentazione dei fronti lavici (Vassale, 1994; Barberi et al., 1993; Di Palma et al., 1993). Infatti, nel momento in cui viene ridotta la spinta alle spalle esercitata dalla lava che fuoriesce dai vent eruttivi, si genera un rallentamento o un arresto dei fronti più avanzati. (Hulme, 1974; Chester et al, 1985; Barberi et al., 1993, 2003). In pratica lo scopo prefissato era quello di far fuoriuscire la lava dal suo canale naturale in modo da resettare in pratica l'eruzione, assicurandosi naturalmente che il nuovo flusso scorresse per lo più sovrapponendosi al campo lavico creato dalla stesso evento eruttivo. Interventi di questo tipo naturalmente devono essere condotti in prossimità del vent eruttivo dove la colata è ancora confinata in un unico canale. Le operazioni condotte all'Etna nel 1991-92 rappresentano ancora oggi il principale

caso di intervento da parte dell'uomo per fermare o ritardare l'avanzamento di una colata di lava. L'esperienza guadagnata nel corso dell'eruzione rappresenta senza dubbio il principale riferimento per le possibili azioni e i loro effetti durante le fasi cruciali dell'emergenza vulcanica.

Anche durante l'eruzione dell'Etna del 2001 sono state utilizzate barriere protettive per impedire alla colata di lava di procurare danni alle strutture presenti sui fianchi del vulcano. Le colate di lava si originarono in quel caso da numerosi vent ubicati sul fianco sud dell'Etna (Behncke e Neri, 2003). Tra queste, quella partita dal vent a quota 2100 m minacciava il Rifugio Sapienza e, secondo i modelli di simulazione dei percorsi più probabili (Crisci et al., 2004; Favalli et al., 2004), avrebbe potuto raggiungere i centri urbani di Nicolosi e Belpasso nel caso l'eruzione fosse durata sufficientemente a lungo e con tassi eruttivi sostenuti. Furono eretti due tipi di barriere: il primo tipo era rappresentato da barriere disposte lateralmente alla direzione di propagazione e avevano il compito di deviare il flusso verso ampie depressioni; il secondo tipo invece fu disposto ortogonalmente alla direzione di avanzamento e aveva il compito di aumentare la capacità di contenimento, come già durante le precedenti eruzioni del 1983 e del 1991-1993. L'utilizzo di queste barriere fece sì che i danni alle strutture si limitassero solamente alla cabinovia e allo skilift nella zona del Rifugio Sapienza (Barberi et al., 2003).

Anche durante l'eruzione dell'Etna del 2002 vennero utilizzate alcune barriere protettive, una delle quali fu posizionata a nord-est del vulcano senza però essere impattata dalla colata di lava. Non ci sono comunque rapporti dettagliati a tale riguardo.

Alle Hawaii in parecchie occasioni sono stati effettuati tentativi di deviazione delle colate di lava (Moore, 1982; Macdonald, 1972; Macdonald et al., 1986; Lockwood e Romano, 1985; Heliker, 1992). Nel 1881, fu proposto di creare una barriera per rallentare una colata del Mauna Loa che stava minacciando la città di Hilo, ma l'eruzione cessò prima che i lavori fossero ultimati (Emerson, 1881). Negli anni '30 e '40, e più recentemente negli anni '70, l'aviazione degli Stati Uniti ha effettuato una serie di bombardamenti aerei delle colate di lava del Mauna Loa col fine di deviare i percorsi dei flussi (Jaggar, 1936, 1945; Lockwood e Torgerson, 1980). Nel 1960 presso il villaggio di Kapoho fu costruito un dosso naturale volto alla protezione di un faro. In questo caso, l'altezza degli argini non superava gli 8 m e anche se la lava

scavalcò l'ostacolo morfologico, parte del flusso lavico fu deviato lateralmente (Lachman e Bonk, 1960; Macdonald, 1962).

Durante l'eruzione del 1973 ad Heimaey, nell'arcipelago Vestmannaeyjar in Islanda, furono effettuati una serie di interventi nel tentativo di fermare l'avanzamento della lava. Le operazioni furono incentrate principalmente nel tentativo di raffreddare la colata con l'acqua del mare, ed iniziarono 15 giorni dopo che l'eruzione era partita, nel momento in cui la lava minacciava il porto della città (Einarsson, 1974; Sigurgeirsson, 1974). Oltre a questo tentativo fu anche costruita una barriera protettiva alta 25 m che però venne superata dalla colata di lava (Jónsson, 1993). Nel 1977, nella zona del vulcano Krafla nel nord dell'Islanda, furono realizzate due barriere, una per proteggere un villaggio di 200 abitanti e l'altra per uno stabilimento di diatomite (Bjornsson, 1979).

Le esperienze di tali eventi, in particolare di quelli a più riprese effettuati all'Etna, dimostrano che è possibile intervenire per mitigare i danni da colate di lava. Sebbene emerga che i tipi di intervento che possono essere richiesti non si limitino alla sola costruzione di barriere protettive, tali barriere si sono in più casi dimostrate efficaci. Nel proseguo del capitolo, la possibilità di intervenire preventivamente con la costruzione di barriere protettive nella città di Goma (e in parte, nella città di Gisenyi in Ruanda) sarà analizzata in dettaglio. I risultati dello studio mostreranno che è possibile ridurre significativamente la pericolosità da invasione di colate di lava nelle aree urbane, suggerendo l'importanza di effettuare studi specifici preventivi per l'ottimale posizionamento di barriere artificiali.

8.2 – Obiettivo delle barriere protettive

Lo scopo che ci si è proposto nello studio di possibili barriere protettive è principalmente quello di deviare il flusso lavico verso zone prefissate. Le esperienze sopra descritte mostrano infatti che la possibilità di contenere una colata di lava è vincolata all'esistenza di un bacino chiuso e sufficientemente ampio per permettere l'espansione laterale della lava, e alla durata dell'eruzione che deve essere sufficientemente breve in relazione alle dimensioni del bacino di contenimento.

Sebbene le eruzioni del 1977 e 2002 siano entrambe state molto brevi (dell'ordine del giorno), la morfologia sostanzialmente piana del terreno immediatamente a nord di Goma limita fortemente la possibilità di contenere significative quantità di lava, mentre più a nord, dove la morfologia è più accidentata, le eruzioni passate e la mappa di pericolosità in figura 7.6 mostrano numerosi possibili percorsi per le colate di lava, rendendo problematico immaginare di poter intervenire su ciascuno di essi. Inoltre, va tenuto presente il fatto che un futuro scenario eruttivo comprende come forte possibilità l'estensione verso sud, e quindi all'interno della città di Goma e, possibilmente, di Gisenyi, delle fratture eruttive. Di fatto le spiccate tendenze delle colate di lava a dirigersi verso l'area blu in figura 7.6, caratterizzata da massima probabilità di invasione, e il fatto che tale area si trovi lungo il prolungamento delle fratture eruttive, lasciano ben poco margine alla possibilità di proteggere la porzione più orientale della città di Goma. Sebbene in una prima fase sia stata valutata la possibilità di dislocare, attraverso barriere volte a deviare il percorso lavico, l'area a massima pericolosità verso la zona a cavallo del confine di stato, nella sottile striscia tra le due città che costituisce una sorta di "no man's land" ben visibile ad esempio in figura 8.4, è risultato presto chiaro che una soluzione in tal senso non è possibile. Lo studio si è quindi concentrato sulla possibilità di intervenire sulla grossa parte della città di Goma ad ovest dell'area massima pericolosità, dove si è cercato di minimizzare la probabilità di invasione da colate di lava. In misura minore, si è poi valutata la possibilità di interventi a favore della città ruandese di Gisenyi.

8.3 – Metodologia

La metodologia di studio seguita consiste nell'ipotizzare il posizionamento di barriere protettive di una data geometria e orientazione, modificare in accordo il modello digitale del terreno, e ripetere le simulazioni dei percorsi delle colate di lava per analizzarne gli effetti. In questo senso, una barriera artificiale viene trattata nelle simulazioni come un qualunque altro elemento morfologico in grado, a seconda dei casi, di deviare o contenere la colata o di essere da essa superato.

Una volta delineato lo sviluppo longitudinale della barriera, attraverso delle tecniche di *buffering* viene scelta l'estensione laterale. Viene così creato uno shapefile, dal quale successivamente vengono ricavati il TIN e il Grid. Infine, il modello digitale ottenuto per la barriera viene sommato al DEM della topografia. Nella figura 8.1 viene rappresentato un esempio di TIN di una barriera.

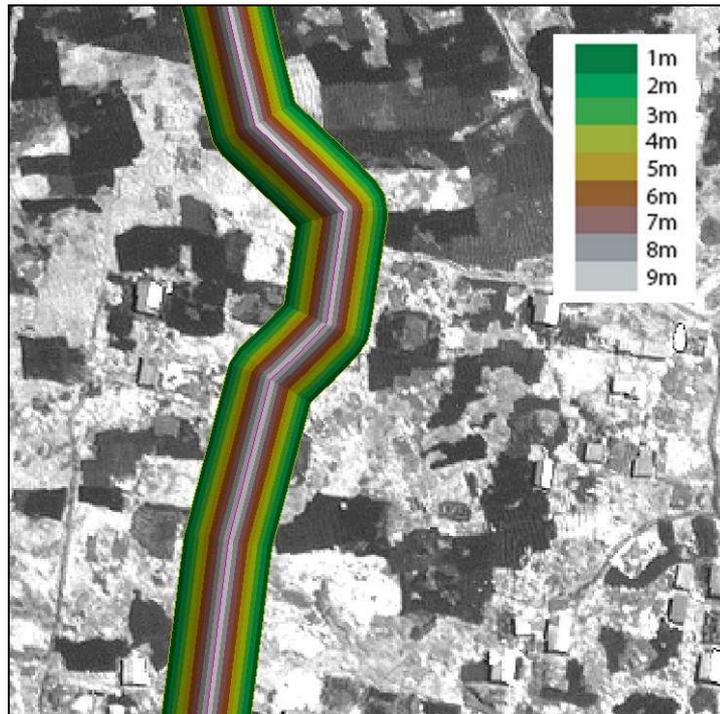


Figura 8.1. Esempio di TIN di una barriera protettiva.

Poiché l'obiettivo principe è quello di deviare i percorsi delle colate si è scelto di utilizzare un'altezza delle barriere di 10 m, equivalente a più del doppio dello spessore massimo rilevato sulle colate che hanno devastato Goma. Come vedremo il codice è comunque in grado di prevedere accumuli locali di lava e il superamento di tali barriere, che avviene nelle simulazioni quando la morfologia del terreno non è adeguata al posizionamento di una barriera e/o quando la barriera ha una disposizione lontana da quella ottimale.

Durante la fase di studio è stato anche preso in considerazione il profilo ottimale delle barriere, e sono state ripetute alcune simulazioni test utilizzando profili diversi quali quelli in figura 8.2.

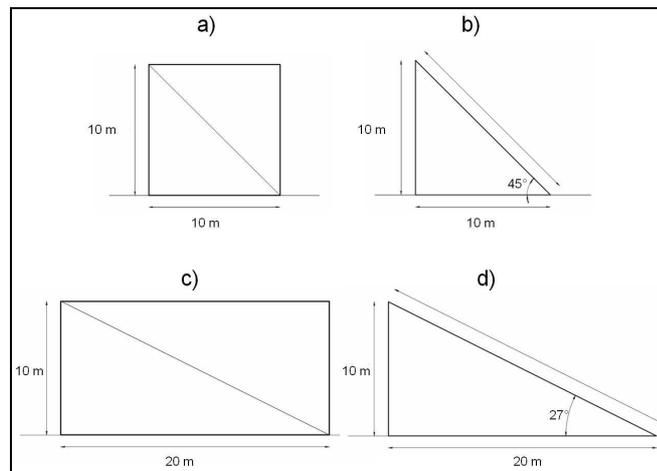


Figura 8.2. Geometrie considerate per le barriere protettive.

Nei casi a) e c) in figura la lava incontra dei muri verticali, mentre nei casi b) e d) la lava incontra un ostacolo che produce una variazione del pendio ugualmente alta ma più graduale.

Le simulazioni test effettuate hanno invariabilmente mostrato che la geometria migliore per la deviazione dei percorsi delle colate laviche è quella di tipo “a” o “c”, quindi nel proseguo degli studi si sono utilizzate barriere provviste di un muro verticale. Si è inoltre cercato di identificare soluzioni ottimali che prevedessero barriere di estensione minima, allo scopo di minimizzare l’impatto sul territorio di tali barriere preventive di protezione.

La scelta dell’ubicazione delle barriere protettive è stata principalmente valutata attraverso un controllo della topografia e attraverso numerose simulazioni di prova. Per quanto riguarda la scelta del modello digitale del terreno si è scelto di utilizzare il DEM SRTM visto che quello di Goma presenta un’estensione limitata e quindi non permette di investigare una porzione di territorio ampia come nel caso del DEM SRTM. Questa scelta è stata effettuata per tutte le simulazioni, eccezion fatta per il caso presentato nel paragrafo seguente, dove è stato utilizzato il DEM di Goma. Un altro aspetto importante che è stato valutato, è legato all’estensione laterale delle barriere, infatti, visto che lo scopo prescelto è quello principalmente di contenere e deviare le colate di lava, i modelli digitali delle barriere risultano più estesi di quanto dovrebbe essere in realtà. Questa scelta ha motivazioni solamente visive visto la risoluzione di 90 m del DEM SRTM.

8.3.1 – Goma, settore est a più alta probabilità

Come precedentemente rimarcato, e come discusso in maggiore dettaglio nel seguito, l'area di Goma a massima probabilità di invasione di colate di lava (area blu in figura 7.6) non può essere ragionevolmente protetta dall'arrivo di colate di lava. Tale area include parte del centro storico della città, ed è molto prossima all'aeroporto internazionale, parzialmente distrutto dalla lava nel 2002. Si tratta quindi di un'area di elevato valore, e per questa ragione gli studi volti a valutare l'efficacia di barriere protettive compiuti nel corso di questa tesi vi si sono inizialmente concentrati. Sebbene una eventuale futura estensione a sud del sistema di fratture eruttive passerebbe per questa area, si è ritenuto comunque di interesse iniziare lo studio esaminando la possibilità di intervenire sull'area a più alta pericolosità. La figura 8.3 mostra alcuni risultati rilevanti di questa prima fase di studio.

Come emerge dalla figura 8.3a, teoricamente è possibile posizionare una barriera in maniera tale da deviare la colata verso il margine estremo della città, forzandola a scorrere prevalentemente lungo la "no man's land" a cavallo del confine di stato. Tale area non è abitata per una larghezza di poche centinaia di metri, larghezza che progressivamente decresce fino ad azzerarsi nelle ultime centinaia di metri dal lago Kivu, dove le aree urbane di Goma e Gisenyi sono in continuità. Un primo elemento critico è quindi dato dal fatto che un simile intervento avrebbe come conseguenza la distruzione di un'area urbana certamente di estensione molto minore, ma che comunque avrebbe potuto non essere raggiunta dalla lava, con l'aggravante che lo scorrimento delle colate verrebbe ad essere forzato attraverso un confine di stato. Già questa considerazione è sufficiente a ritenere l'intervento di fatto impraticabile.

Si potrebbe argomentare che una seconda barriera parallela alla prima e posta sul lato ruandese servirebbe a garantire ai due paesi uguale protezione, soprattutto se un'opera di sbarramento più ampia fosse condotta al fine di convogliare nella "no man's land" colate in territorio ruandese in grado di minacciare la città. In questo caso i due paesi dovrebbero accordarsi per rimuovere le abitazioni nell'area compresa tra le due barriere (vedi ad esempio in figura 8.3a). Le simulazioni mostrano tuttavia che a causa della naturale vergenza a ovest del territorio in quell'area, non è possibile interrompere la barriera sul lato di Goma in nessuno dei suoi punti, senza causare fuoriuscita di lava diretta in città. In altre parole la barriera

dovrebbe essere estesa come in figura 8.3a per circa 7,5 km senza soluzione di continuità, costituendo una struttura di impatto enorme, in grado di tagliare le comunicazioni tra i due stati confinanti fino al lago. In una situazione geopolitica delicata e complessa come quella del Nord Kivu, una tale prospettiva non è nemmeno immaginabile.

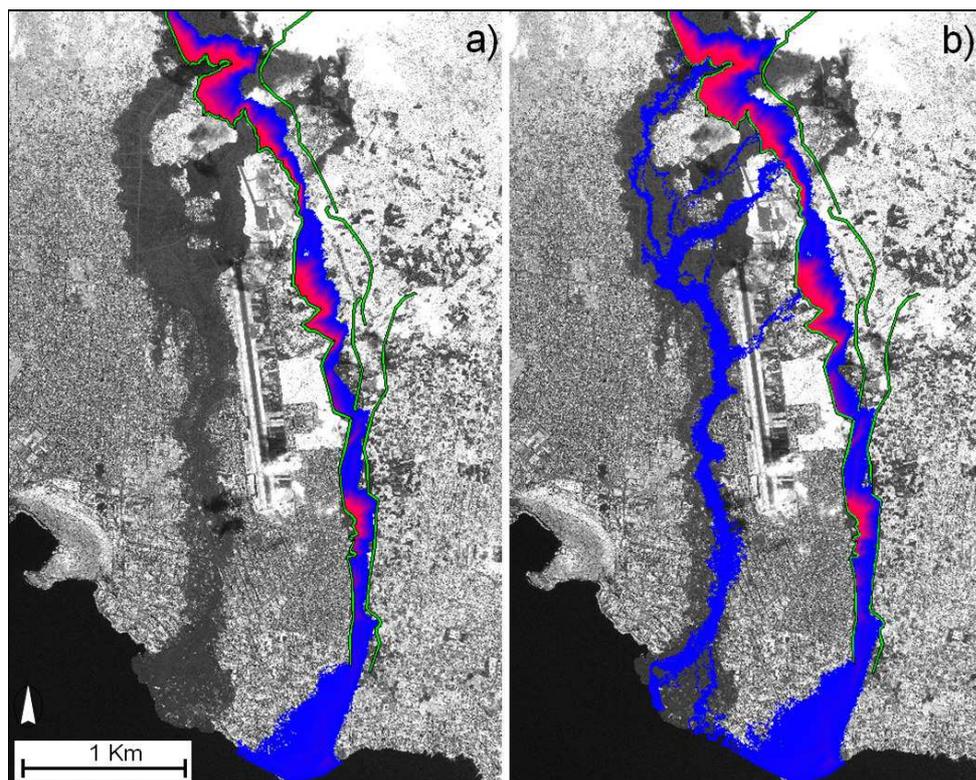


Figura 8.3. Effetto sui percorsi simulati delle barriere disposte nella zona orientale di Goma utilizzando nelle simulazioni valori di Δh corrispondenti a (a) 1,5 m e (b) 2 m, rispettivamente.

Come se non bastasse, una barriera continua di 7,5 km di lunghezza e di 10 m di altezza non sarebbe sufficiente in tale area a dare garanzie di contenimento delle colate di lava. Infatti, come mostrato in figura 8.3b, è sufficiente che una futura colata sia caratterizzata da un valore di Δh di non molto superiore, ovvero da una capacità non eccessivamente maggiore di scavalcare ostacoli morfologici, rispetto alle colate del 2002, e già la probabilità di superamento della barriera diventerebbe non trascurabile in alcuni settori. Infine, la barriera verrebbe comunque a trovarsi sul probabile futuro allineamento di fratture, che potrebbero tagliarla o addirittura aprirsi

sul lato congolese (o sul lato ruandese al di là della seconda barriera), rendendola così inutile.

L'analisi di cui sopra, come anticipato, dimostra, se mai non ce ne fosse stato bisogno, che allo stato attuale l'area a più alta pericolosità in Goma non può essere protetta mediante l'uso di barriere. Tale area dovrebbe pertanto essere abbandonata, e le strutture importanti, primo fra tutti l'aeroporto internazionale, dovrebbero essere riposizionate altrove. Tale analisi è comunque utile in questa sede per introdurre gli studi effettuati sulle possibili barriere protettive, in quanto contribuisce ad evidenziare i numerosi e diversi aspetti connessi allo studio di fattibilità relativo alle barriere stesse. Vedremo nel seguito che è invece possibile intervenire efficacemente sulla seconda area di ingresso delle colate di lava in Goma, caratterizzata da pericolosità da media ad alta in figura 7.6, ed effettivamente invasa dalle colate di lava del gennaio 2002.

Prima di passare agli studi effettuati in tale settore, è utile rimarcare che la particolare geometria della barriera artificiale sul lato Goma in figura 8.3a non è frutto di una scelta bizzarra, ma rappresenta la geometria più efficace per il contenimento della lava sul suo lato orientale. Tale geometria è il risultato di un numero elevato di tentativi che hanno chiaramente mostrato come la capacità di contenimento di una barriera dipenda in maniera sostanziale dall'assenza di locali contropendenze in grado di produrre accumuli di lava di lava. La geometria in figura 8.3a è quindi quella che più efficacemente minimizza tali contropendenze. Il superamento della barriera in figura 8.3b avviene in corrispondenza delle contropendenze più marcate, che non è comunque stato possibile rimuovere a causa della generale vergenza ad ovest del terreno in tale zona.

8.3.2 – Goma, settore ovest ad alta pericolosità

Esaminando i risultati delle simulazioni presentate in figura 6.9 e la mappa di pericolosità in figura 7.6 si nota che il ramo di colata in grado di penetrare (ed effettivamente penetrato nel 2002) all'interno dell'area urbana di Goma ad ovest dell'area a più alta pericolosità, e caratterizzato anch'esso da alta pericolosità, si

trova a scorrere a nord della città molto vicino a una valle a vergenza sud-est sul suo lato orientale, che sfocia poi nel bacino a pericolosità massima considerato nel sottocapitolo precedente. La valle ad ovest e quella orientata a sud-est sono separate da un alto morfologico in corrispondenza di uno dei tanti coni di scorie presenti nell'area. L'idea di base è stata quindi quella di indurre, attraverso l'opportuno posizionamento di una barriera artificiale, la deviazione dei percorsi delle colate di lava in modo da farli confluire verso il bacino a più alta pericolosità. Come illustrato in precedenza, l'area a più alta pericolosità non può comunque essere ragionevolmente protetta, per cui andrebbe abbandonata. La deviazione all'interno di tale area di ulteriori colate di lava dirette in città lungo altre direttrici, se fattibile, avrebbe l'effetto di creare un'ampia zona continua a bassa pericolosità entro cui la città di Goma potrebbe più serenamente svilupparsi.

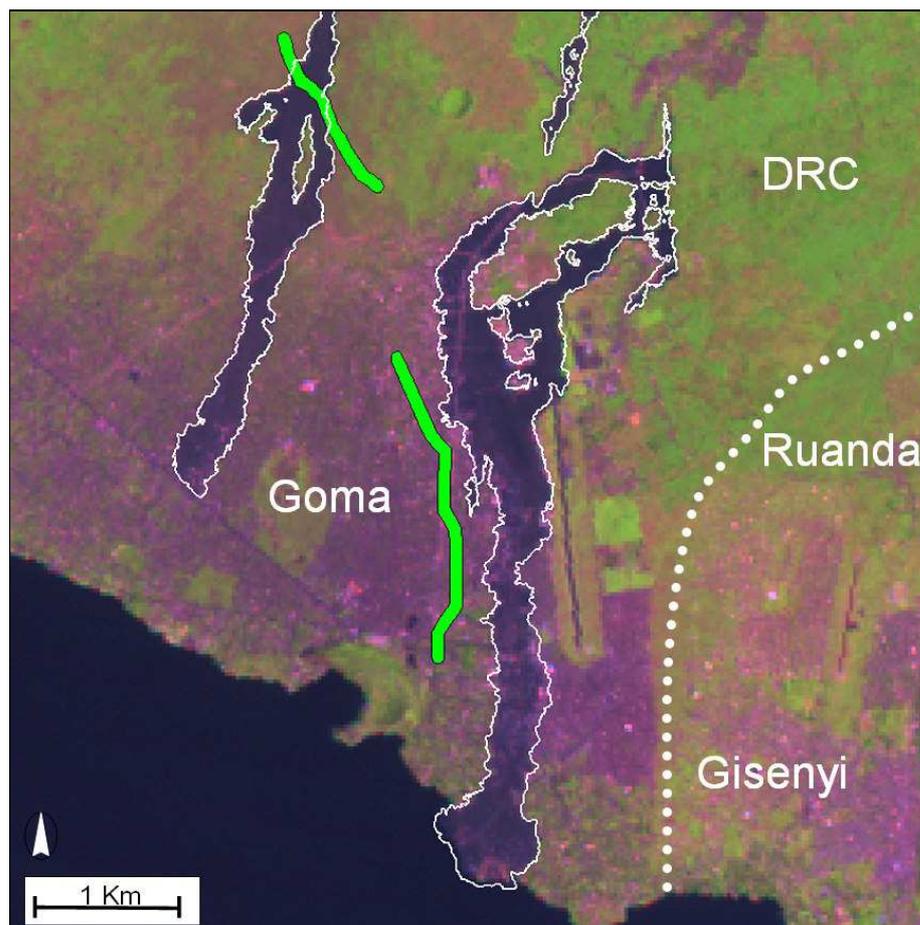


Figura 8.4. Ubicazione delle due barriere protettive ideate per la deviazione dei percorsi delle colate di lava. In verde sono rappresentate le barriere mentre la linea bianca indica le colate del 2002.

La figura 8.4 mostra la posizione, la geometria e orientamento ottimali di una barriera artificiale avente tale scopo. Si tratta di una barriera di 1,5 km di lunghezza, posizionata fuori dalla città in un'area disabitata. Oltre a queste barriere le simulazioni sono state effettuate considerandone una seconda più meridionale di 2,5 km di lunghezza. Lo scopo di tale barriera è quello di garantire una maggiore sicurezza per l'area adiacente al Monte Goma, dove si trovano molte strutture sensibili tra cui l'ospedale della città che, come visto in precedenza, potrebbe essere invaso da lingue di lava che si dipartissero lateralmente dal bacino a più alta pericolosità (figura 7.9). Il confronto tra la simulazione in figura 8.5a, effettuata includendo le barriere, e quella in figura 8.5b, che non comprende le barriere, ne mostra chiaramente l'effetto di schermo per un'ampia porzione urbana di Goma.

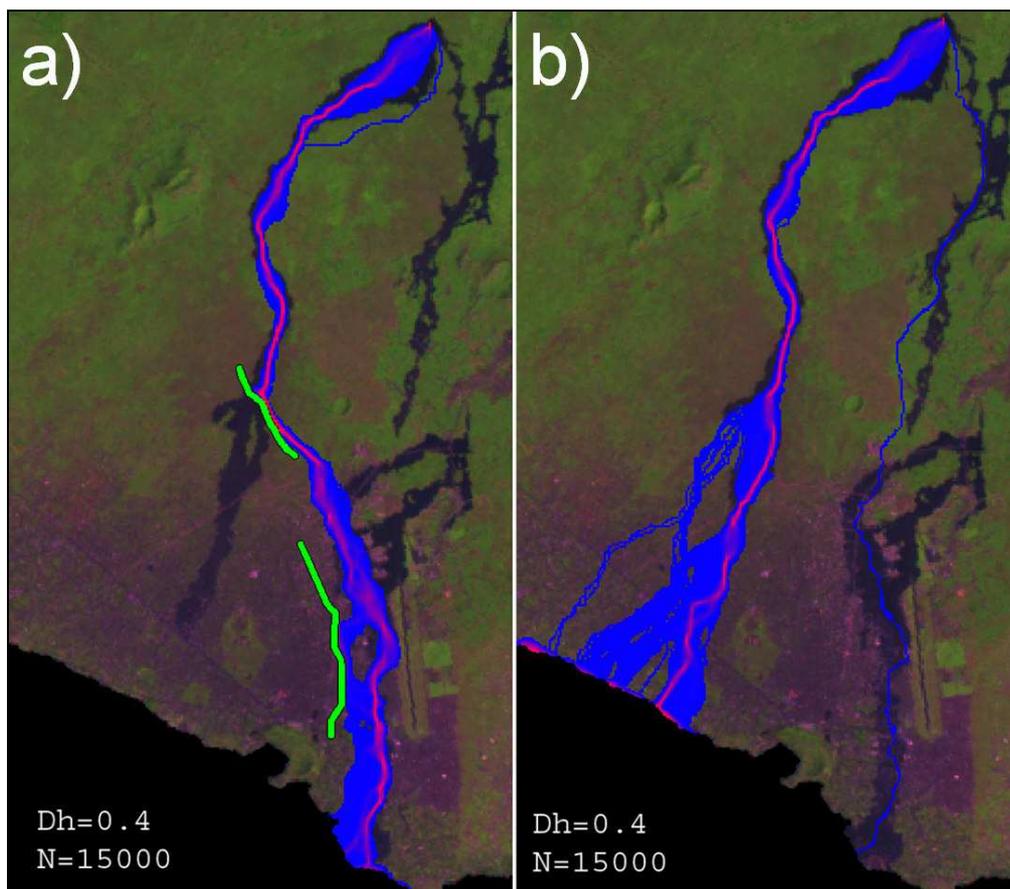


Figura 8.5. Confronto fra le simulazioni effettuate con (a) il DEM modificato con le barriere e (b) il DEM SRTM.

Entrambe le barriere nella figura presentano fattori di sicurezza molto elevati, come visibile in figura 8.6 dove la stessa simulazione di figura 8.5 è stata ripetuta con (sopra) e senza (sotto) barriere, progressivamente incrementando i valori dei parametri Δh e N fino a considerare colate con una capacità di spreading e di superamento di ostacoli morfologici enormemente maggiore di quella caratterizzante le colate del 2002. In tutti i casi considerati, le due barriere appaiono in grado di deviare e contenere efficacemente le colate di lava.

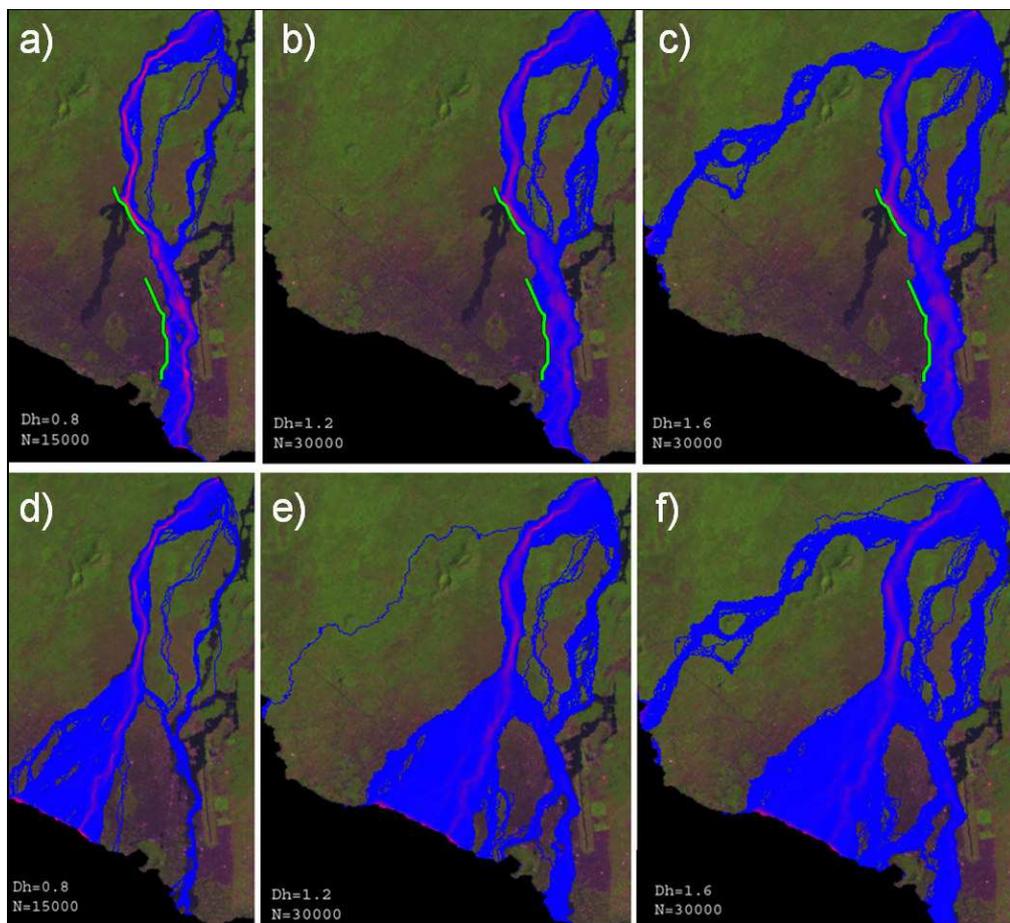


Figura 8.6. Confronto fra le simulazioni effettuate con (a, b, c) il DEM modificato con le barriere e (d, e, f) con il DEM SRTM, utilizzando valori crescenti dei parametri N e Δh e un vent in corrispondenza dell'area da cui è partita la colata West.

Come già discusso precedentemente, la posizione, orientazione e geometria delle barriere nelle figure 8.5 e 8.6 costituisce una scelta ottimale, risultato di un gran numero di simulazioni effettuate e dell'esperienza acquisita. Un esempio di come

un'orientazione diversa per la barriera più a nord risulterebbe meno efficace è riportato in figura 8.7. In questo caso la barriera è posizionata ortogonalmente alla direzione di flusso della colata che la impatta. Già nelle figure 8.7a e b si nota un'espansione del colore rosso, corrispondente ad una maggiore frequenza di passaggio dei percorsi simulati e indirettamente indice di accumulo locale di lava. Per un valore di Δh pari a 1,2 m (Figura 8.7c) si ha infine il superamento della barriera e l'invasione di Goma da parte della lava. Da notare che nel caso in figura 8.6 la barriera non viene superata fino a un maggior valore di Δh pari a 1,6 m, confermando il maggiore fattore di sicurezza associato a tale barriera rispetto a quella in figura 8.7.

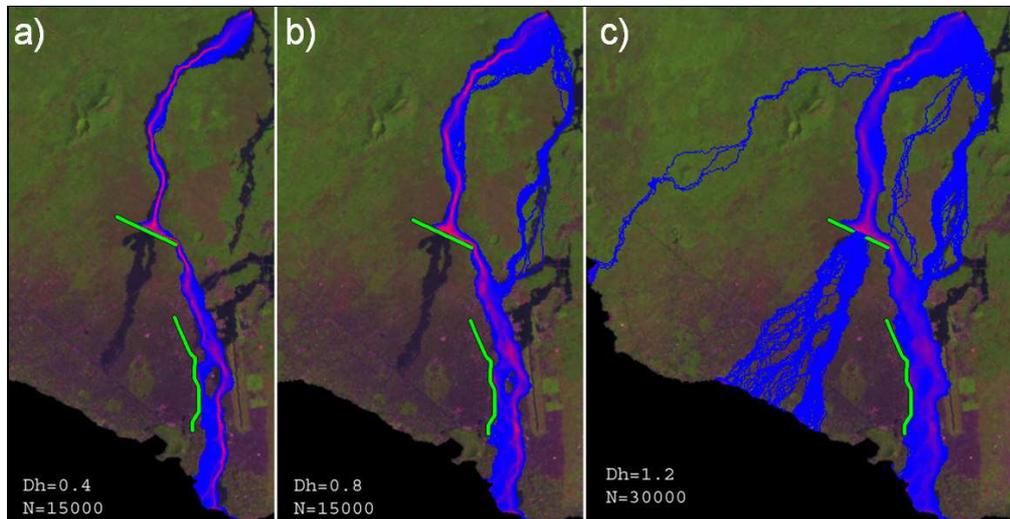


Figura 8.7. Effetti di una barriera posta perpendicolarmente alla direzione di flusso sui percorsi simulati. Utilizzando Δh e N crescenti si ha il superamento della barriera.

Volendo quantificare, una definizione del fattore di sicurezza (ρ) potrebbe essere la seguente:

$$\rho = \frac{[\Delta h_{\max}]_{N \rightarrow \infty}}{\Delta h}$$

dove Δh rappresenta il parametro calibrato per confronto tra colate simulate e colate reali (nel presente caso 0,4 m) e $[\Delta h_{\max}]_{N \rightarrow \infty}$ rappresenta il più alto valore di Δh associato a un numero molto grande N di percorsi simulati che produce una colata non in grado di superare la barriera. In questo modo, nel caso delle barriere di figura

8.5 e 8.6 si ha $\rho > 4$, mentre la barriera in figura 8.6 corrisponde a ρ compreso tra 2 e 3. La barriera di figura 8.3 corrisponde invece a $\rho < 1,3$.

Infine, si è valutato il fattore di sicurezza relativo alla barriera più meridionale nelle figure 8.4-8.7, considerandone la capacità di contenere l'espansione del campo lavico in un caso conservativo costituito dalla formazione di una frattura eruttiva estesa per 6,5 km come in figura 8.8, e dalla quale fuoriesce lava per tutta la sua lunghezza. Anche in tale caso limite la barriera risulta molto efficace, mostrando un fattore di sicurezza $\rho > 3$. E' da notare il fatto che il posizionamento della barriera è stato selezionato in modo da offrire un ottimo fattore di sicurezza pur senza compromettere le possibilità di spostamento lungo il bordo del lago e ai piedi del Monte Goma. Si è inteso in questo modo minimizzare l'impatto esercitato dalla barriera per gli abitanti di Goma e per i delicati equilibri fra gli stati confinanti, pur senza comprometterne l'efficacia.

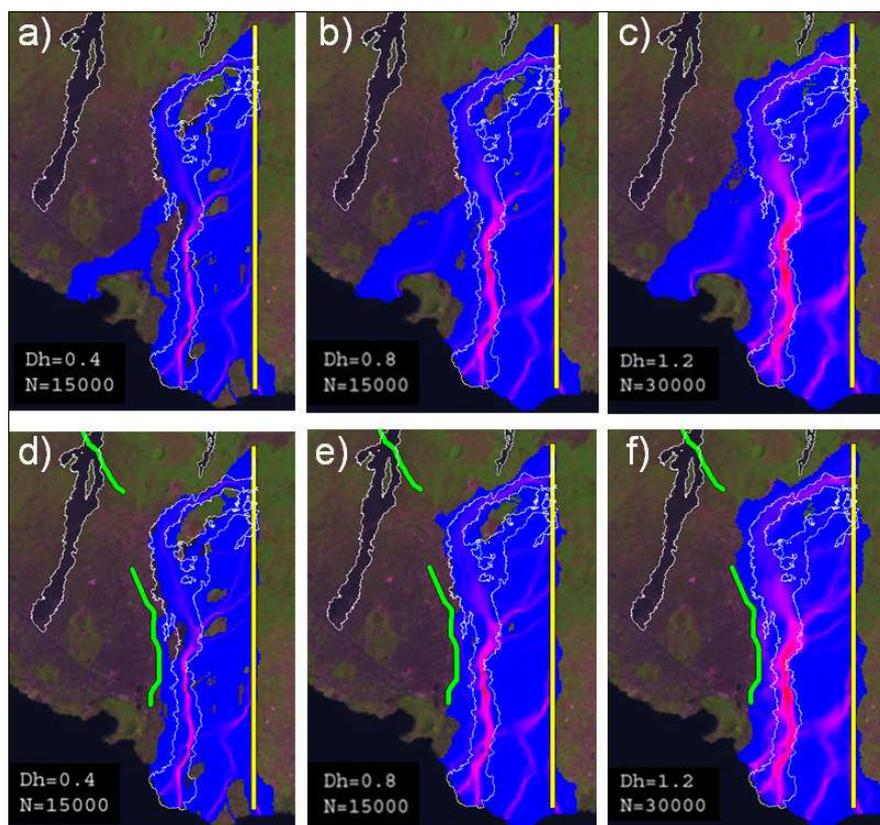


Figura 8.8. Confronto fra le simulazioni effettuate con (a,b,c) il DEM SRTM e (d, e, f) con il DEM modificato con le barriere, utilizzando valori crescenti dei parametri N e Δh e come vent il prolungamento della frattura di Munigi.

8.3.3 –Gisenyi

La mappa di pericolosità in figura 7.6 mostra che la città di Gisenyi presenta un'area ad alta probabilità di invasione da colate di lava. Poiché, come mostrato in figura 6.10, il bacino di raccolta delle colate di lava di Gisenyi presenta una superficie relativamente piccola e soprattutto è in gran parte esteso in aree distanti dalla fascia centrale a più alta pericolosità di formazione di fratture eruttive, l'alta pericolosità deriva essenzialmente da fratture che si formano direttamente in città o immediatamente a nord di essa, all'interno della fascia ad alta probabilità di venting. In tal senso, possibili barriere volte a deviare colate di lava sono attese avere efficacia limitata.

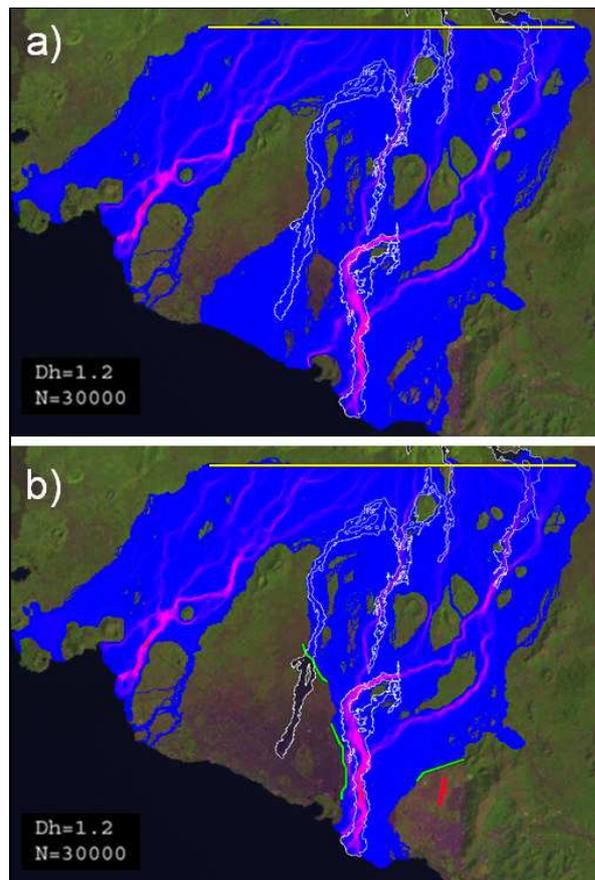


Figura 8.9. Confronto fra le simulazioni effettuate con (a) il DEM SRTM e (b) con il DEM modificato con le barriere. L'area di partenza corrisponde ad una fascia di vent lunga 12 km che attraversa l'intero fianco sud del vulcano. Per queste simulazioni è stato utilizzato un Δh di 1,2 m e 30.000 percorsi. L'aeroporto di Gisenyi è indicato in rosso nella figura b.

La figura 8.9 mostra il posizionamento di una possibile barriera protettiva immediatamente a nord dell'aeroporto di Gisenyi e dell'area urbana, e la sua capacità di deviare le colate di lava verso ovest, in una serie di simulazioni simili a quelle di figura 8.6-8-8 con $\Delta h = 1,2$ m. Come la figura mostra, nel caso di arrivo di colate da nord, anche caratterizzate da notevole capacità di superare ostacoli morfologici, la barriera offre un ottimo schermo alla città. Vedremo successivamente che tale barriera risulta in una sensibile diminuzione della pericolosità nell'area urbana di Gisenyi, senza tuttavia ridurla a livelli bassi per le ragioni sopra esposte.

8.4 - Mappa di pericolosità da invasione di colate di lava modificata attraverso l'uso di barriere protettive.

Le simulazioni dei percorsi delle colate di lava effettuate in presenza di barriere protettive hanno mostrato che tali barriere possono effettivamente determinare una sensibile diminuzione della probabilità di invasione.

Lo studio ha mostrato chiaramente sia i limiti che le potenzialità dell'uso di barriere artificiali, e in particolare suggerisce l'importanza di operare un'analisi dettagliata e sistematica dei possibili effetti di tali barriere. Tra i risultati più rilevanti ottenuti in questa fase di studio, vale la pena rimarcare il fatto che la posizione, geometria e orientazione di una barriera protettiva sono tutti fattori in grado di modificarne sensibilmente l'efficacia. L'esistenza di contropendenze locali a monte di una barriera è un elemento che ne riduce l'efficacia in termini di fattore di sicurezza, e deve essere per quanto possibile evitato, richiedendo una cura speciale per le relazioni tra la struttura artificiale e la morfologia locale che si riflettono in geometrie ottimali solitamente non lineari, come mostrato dalle barriere utilizzate per le simulazioni fin qui effettuate. Al fine di valutare l'effetto mitigante della pericolosità da invasione di colate di lava introdotto dalle barriere artificiali, la mappa di pericolosità in figura 7.6 è stata nuovamente realizzata considerando la presenza di tre barriere protettive come in figura 8.9b. Sono state quindi nuovamente effettuate 540.000 simulazioni di colate di lava secondo la procedura descritta nel capitolo 7.

La figura 8.10 mostra la nuova mappa di pericolosità, modificata attraverso l'uso di barriere protettive.

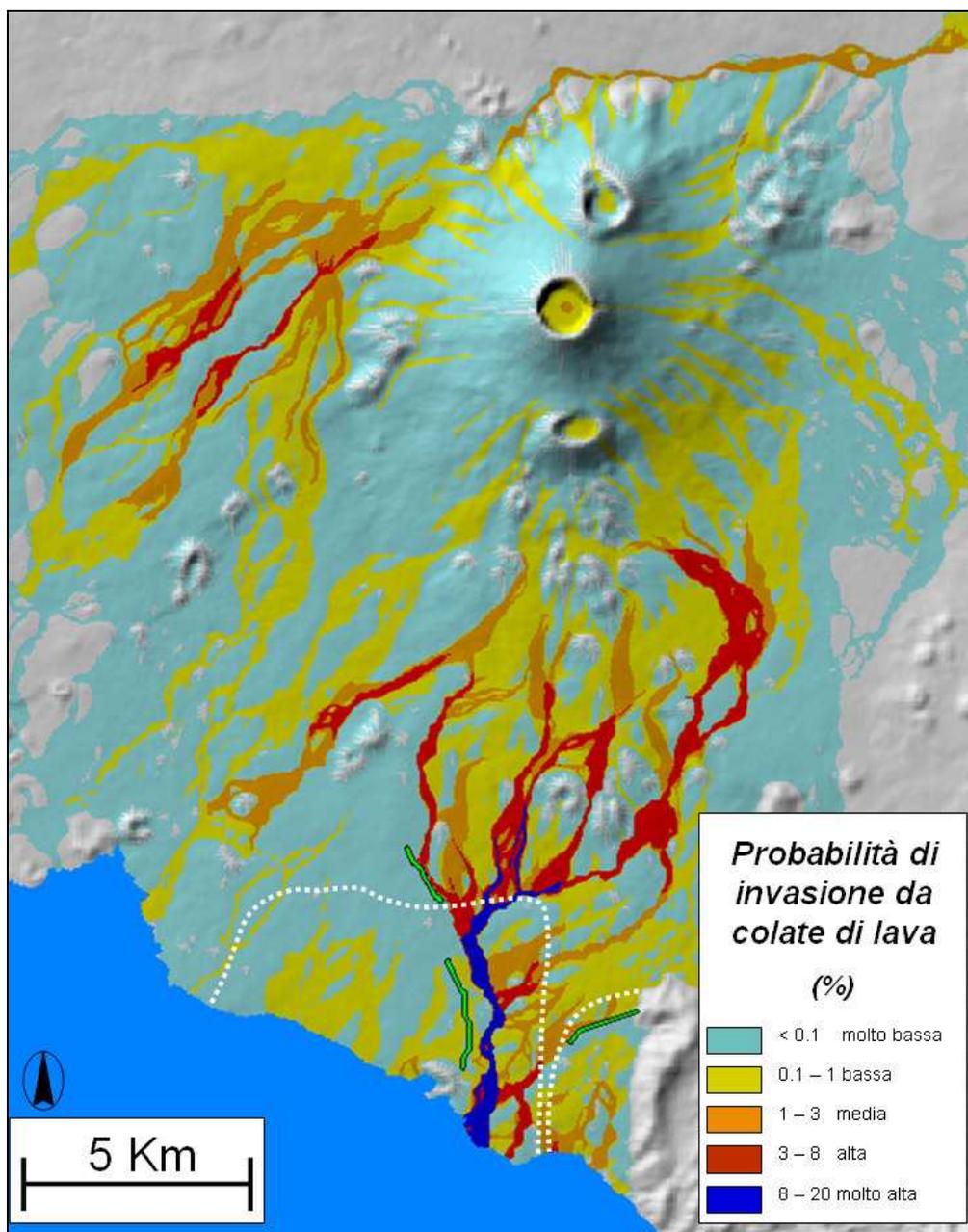


Figura 8.11. Mappa di pericolosità da invasione di colate di lava modificata attraverso l'uso di barriere protettive. Le barriere sono indicate in figura in verde.

La prima osservazione riguarda l'area centrale della città di Goma. In tale area, parzialmente distrutta nel 2002, la pericolosità da invasione di colate di lava viene

ridotta da valori medio alti (1-8%) a valori bassi o molto bassi (<1%), essenzialmente dovuti alla possibilità di apertura di fratture eruttive direttamente in luogo. Tale riduzione della pericolosità è ottenuta sbarrando l'ingresso delle colate in città, deviandole verso l'area est a massima pericolosità. La pericolosità in quest'ultima area tuttavia non cambia significativamente, né in valore né in distribuzione areale. La seconda osservazione riguarda l'area immediatamente a nord del Monte Goma ad ovest della seconda barriera in Goma. In tale area si nota una sensibile riduzione dell'estensione dell'area e pericolosità media (1-3%), che nella nuova mappa di pericolosità in figura 8.10 non coinvolge più l'ospedale della città. Rimane tuttavia una piccola area a pericolosità media in corrispondenza del porto (immediatamente a ovest del Monte Goma), dovuta alla possibilità di apertura di fratture eruttive al di qua della barriera protettiva, e alla morfologia locale che tende a convogliare verso il porto eventuali colate di lava generate di conseguenza.

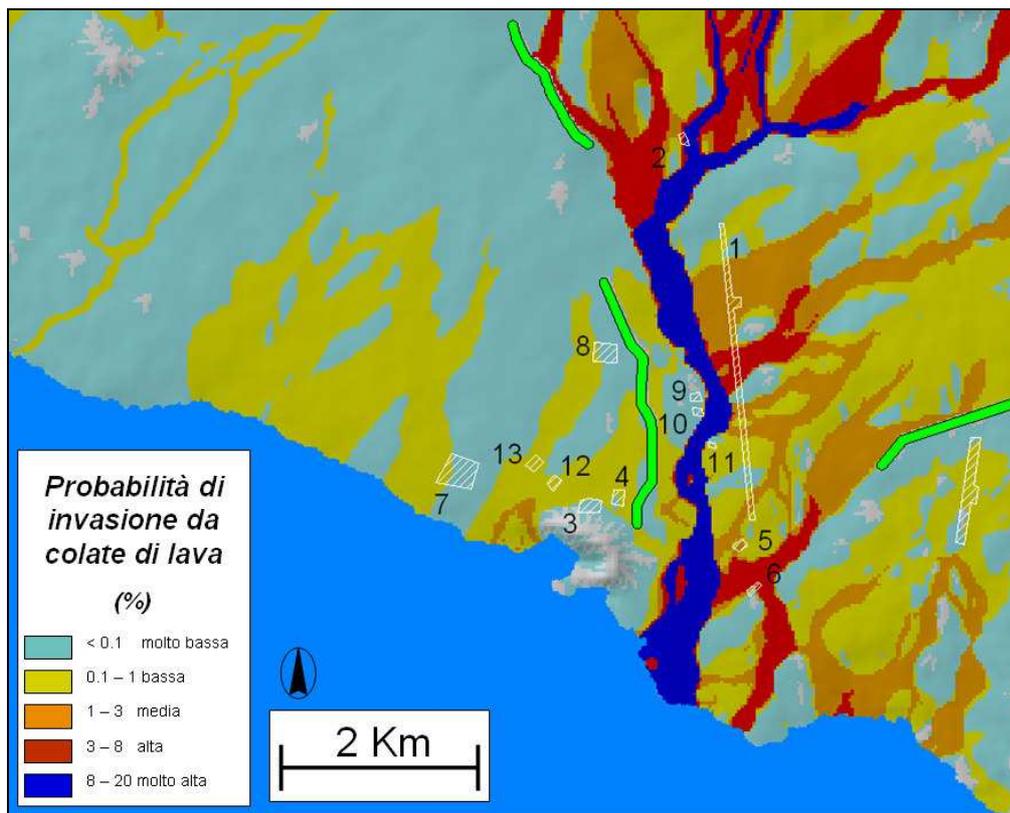


Figura 8.12. Riquadro relativo all'area di Goma e Gisenyi della mappa di pericolosità modificata. La numerazione delle strutture indicate in figura corrisponde a quella presentata nella tabella 7.2.

La terza considerazione riguarda l'area di Gisenyi in territorio ruandese. Anche in questa zona la pericolosità viene sensibilmente ridotta, in particolare in corrispondenza dell'aeroporto che passa da una pericolosità media (1-3%) a una bassa (<1%, localmente 0,6%). Tuttavia, sebbene significativamente ridotta come estensione areale, a causa dell'alta probabilità di apertura di fratture eruttive direttamente in Gisenyi, permane un'ampia area in città a pericolosità media, e una piccola area a pericolosità alta sulla costa dove le colate tendono a convogliarsi. La figura 8.11 mostra il dettaglio della nuova mappa di pericolosità nelle città di Goma e Gisenyi, con riportate alcune strutture particolarmente rilevanti. Il confronto con la figura 7.9 permette di apprezzare ancor più in dettaglio l'effetto di riduzione della pericolosità dovuto alla presenza delle barriere protettive ipotizzate in questo studio. In conclusione, la nuova mappa di pericolosità attraverso il posizionamento della barriere di protezione presenta una situazione decisamente meno critica per le due città di Goma e Gisenyi, sebbene una certa imprevedibilità nello sviluppo di future fratture eruttive, e la conseguente scelta conservativa rappresentata dalla distribuzione di probabilità di apertura di nuovi vent in figura 7.1, non consentano di ridurre la pericolosità al di sotto di quella delle figure 8.10 e 8.11. Vanno ricercati qui due aspetti importanti: 1) le barriere ipotizzate sono state posizionate per essere le più efficaci possibili e al contempo determinanti un impatto relativamente ridotto per la città; 2) in ogni caso, la pericolosità nella fascia più orientale della città di Goma rimane a livelli molto alti, e non si intravedono misure ragionevolmente realizzabili in grado di portarla a valori più bassi. Quest'ultima considerazione è particolarmente critica e determina una delle conclusioni dell'intero lavoro di tesi, già precedentemente anticipate: tale fascia andrebbe abbandonata, e le strutture ivi presenti, incluso l'aeroporto internazionale, andrebbero riposizionate in aree più sicure. Al contempo, le barriere protettive ipotizzate e ottimizzate nel corso di questa tesi sono in grado di ridurre notevolmente la pericolosità in un'ampia area urbana di Goma e nell'area essenzialmente pianeggiante a nord della città. La figura 8.12 mostra il suggerimento che emerge da questa tesi per lo sviluppo della città, una volta posizionate le barriere protettive. La linea tratteggiata in figura mostra l'attuale bordo dell'area urbana e sub-urbana. La linea continua bianca mostra invece l'area nella quale la città dovrebbe in futuro estendersi e svilupparsi. La nuova area ha una superficie di circa 30 km², mentre la superficie attuale della città è di circa 24 km².

L'area in tratteggio rappresenta la zona a massima pericolosità che dovrebbe essere abbandonata o meglio ancora, trasformata in area verde, o parco, e lasciata libera per il futuro scorrimento di nuove colate di lava.

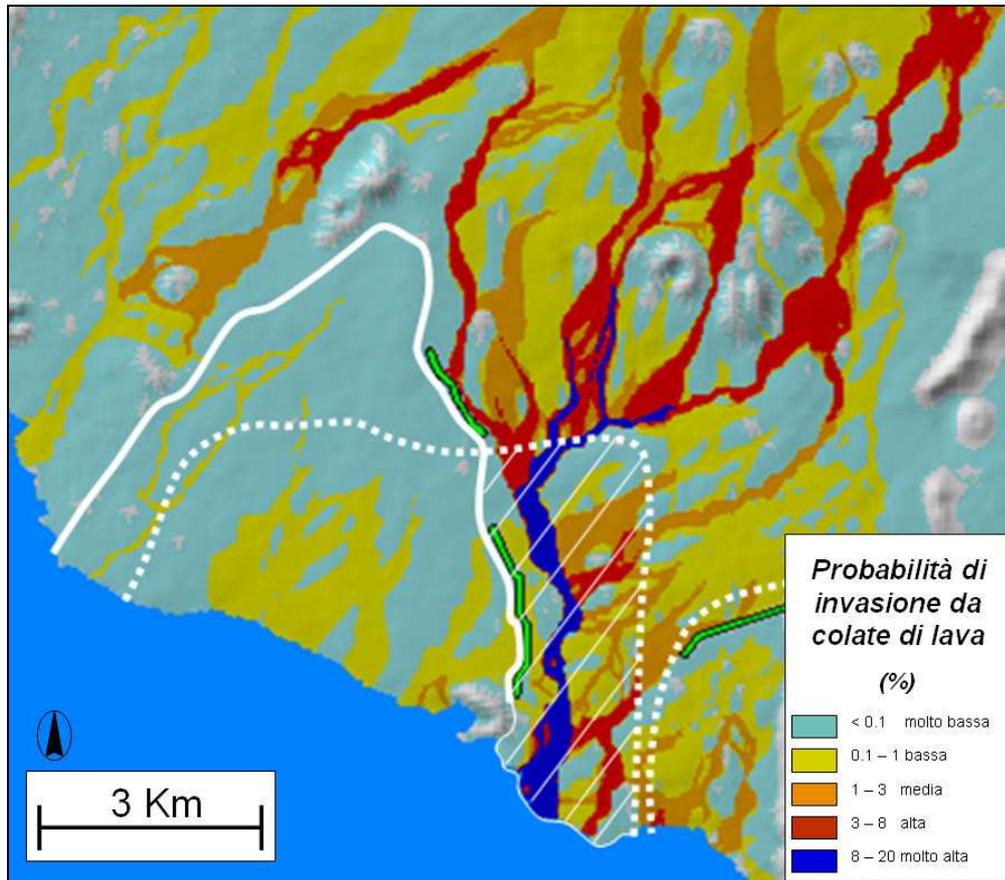


Figura 8.13. Estensione areale dell'area urbana di Goma (linea tratteggiata), e suggerimento del presente lavoro di tesi per la ripianificazione e lo sviluppo della città (linea continua). L'area in tratteggio identifica la zona a più elevata pericolosità. La linea tratteggiata in basso a destra nella figura identifica il contorno della città di Gisenyi (Ruanda).

Capitolo 9

Conclusioni

La mappa di pericolosità in figura 7.6 e quella modificata con l'inserimento delle barriere protettive in figura 8.11, rappresentano il prodotto principale di questa tesi di dottorato. Lo studio è stato condotto unendo le enormi potenzialità che offre il mondo del GIS all'efficacia di un codice numerico semplice e di rapida esecuzione come DOWNFLOW.

La mancanza nell'approccio seguito di una descrizione fisica della propagazione delle colate di lava non permette la definizione dell'evoluzione temporale dei flussi lavici, né il calcolo della loro lunghezza massima. D'altra parte, una completa descrizione fisica implicherebbe la conoscenza di un numero elevato di quantità, ancora poco note per le lave del Nyiragongo, aumentando enormemente i tempi di calcolo e di fatto impedendo l'approccio sistematico richiesto per la realizzazione delle mappe di pericolosità. In effetti, un modello fisico completo che descriva l'evoluzione e la propagazione delle colate di lava su una topografia 3D potrebbe non essere più efficace per gli scopi del lavoro di tesi rispetto ad un modello più semplice, basato su pochi, ma ben noti fattori di controllo, ed in grado di riprodurre con buona approssimazione i percorsi delle colate di lava.

La prima parte del lavoro di tesi è stata dedicata alla mappatura delle colate di lava prodotte dalle due uniche eruzioni eccentriche osservate, quella del 1977 e quella del 2002. Successivamente tali mappe sono state utilizzate per la calibrazione del codice di calcolo, dapprima su un DEM a più alta risoluzione rappresentante la sola città di Goma, poi sul DEM SRTM dell'intera area del vulcano Nyiragongo.

L'ottima corrispondenza tra percorsi simulati e osservati ha creato quindi i presupposti per la realizzazione della mappa di pericolosità. La caratteristica principale che ha accompagnato il lungo lavoro di tesi è senza dubbio costituita dall'approccio semplice utilizzato nell'analisi dei dati, grazie al quale si è cercato per quanto possibile di limitare artificiosità dovute a scelte eccessivamente basate su modelli interpretativi. Nel presente studio è stata data massima importanza a semplici criteri facilmente individuabili, tra cui il principale è costituito dal controllo morfologico sui percorsi delle colate di lava. È opportuno ricordare che le informazioni utilizzate per la produzione delle mappe di pericolosità sono costituite unicamente dalla morfologia del terreno, dalle distribuzioni di probabilità relative all'apertura di vent e alla lunghezza percorsa dalle colate di lava, cui si aggiunge la calibrazione del codice di calcolo in termini di valori ottimali dei parametri N e Δh .

Le considerazioni sopra esposte hanno creato le basi per la realizzazione delle mappe di pericolosità da invasione di colate di lava, che confermano come la zona est di Goma, maggiormente distrutta nell'eruzione del 2002, presenti i valori più alti con percentuali che arrivano fino al 20%. Le aree a più alta pericolosità inoltre coincidono molto bene con i campi lavici delle due ultime eruzioni. Questo confronto rafforza ancora di più il concetto di come la gravità e la topografia siano il principale fattore di controllo nel definire i percorsi delle colate di lava.

In sostanza, gli elementi rilevanti che possono essere estratti dal presente lavoro di tesi sono i seguenti:

- 1) l'utilizzo congiunto di modelli digitali del terreno e del codice di calcolo DOWNFLOW permette una rapida ed accurata simulazione dei percorsi delle colate di lava su morfologie a vario grado di complessità;
- 2) l'area orientale di Goma, maggiormente distrutta dalle lave del 2002, rappresenta il naturale bacino di raccolta per le colate provenienti da un'ampia area sul fianco sud del vulcano, e presenta i massimi valori di pericolosità;
- 3) tale area, e l'area più a ovest, anch'essa invasa dalle colate di lava del 2002, rappresentano le due principali zone di ingresso della lava in Goma, e le due aree urbane a più alta pericolosità di invasione da future colate di lava;
- 4) la città ruandese di Gisenyi presenta anch'essa alta pericolosità;

- 5) la costruzione di barriere artificiali principalmente volte a deviare le colate di lava rappresenta un mezzo efficace per ridurre la pericolosità nelle città di Goma e Gisenyi;
- 6) la posizione, geometria, e orientazione di tali barriere devono essere accuratamente studiate al fine di aumentarne l'efficienza e il fattore di sicurezza associato, e contemporaneamente ridurre l'impatto ambientale;
- 7) in ogni caso, l'area est di Goma a massima pericolosità da invasione di colate di lava, non può ragionevolmente essere messa in sicurezza; al contrario, è possibile intervenire efficacemente riducendo sostanzialmente la pericolosità nell'area centrale della città;
- 8) sulla base dei risultati del lavoro di tesi, è stato formulato un suggerimento per lo sviluppo futuro della città di Goma rappresentato in figura 8.13. Tale suggerimento consiste nella costruzione di due barriere protettive, l'abbandono della fascia orientale della città a massima pericolosità, e l'espansione verso nord della parte occidentale della città.

E' utile rimarcare come in molte parti del mondo, compresa l'Italia, la costruzione di barriere preventive di protezione come quelle qui ipotizzate porrebbe senza dubbio infiniti problemi legali e sociali. Ad esempio, le popolazioni che vivono nei paesi etnei hanno sviluppato nel corso dei secoli l'attitudine a ritenere che la lava debba seguire il proprio naturale cammino, e tendono a reagire negativamente alla prospettiva di deviarne il percorso. Sebbene gli interventi di contenimento effettuati durante le emergenze vulcaniche del 1983, 1991-93, 2001, 2002 abbiano senza dubbio contribuito a modificare in parte tale atteggiamento, favorendo il diffondersi dell'idea che si possa e si debba intervenire a difesa del valore esposto, sarebbe arduo pensare che suggerimenti simili a quelli che emergono da questa tesi per la città di Goma potrebbero avere un qualche seguito all'Etna.

Nella Repubblica Democratica del Congo la situazione è molto diversa. Il paese ha attraversato negli ultimi anni, e attraversa tuttora, periodi di guerre con i paesi confinanti (Uganda e Ruanda), e guerre civili che ne hanno devastato l'assetto sociale. La città di Goma rappresenta nell'area un elemento chiave, posta com'è addossata al confine col Ruanda. L'intera fascia congolese al confine col Ruanda è stata fino al 2002 quasi uno stato autonomo sotto il controllo del governo e delle

truppe ruandesi, con un proprio presidente e con capitale Goma. Questi elementi suggeriscono un valore aggiunto della città di Goma per i governanti congolese. Sarebbe quanto meno ingenuo pensare che la morte di 160 persone in seguito all'eruzione del Nyiragongo del 2002 rappresenti un reale elemento di preoccupazione in un paese e un'area che conta milioni di morti negli ultimi dieci anni. Al contrario, la sicurezza delle infrastrutture della città, in particolare dell'aeroporto che rappresenta un elemento strategico per il rapido trasporto di materiali e persone nell'area, e per la sicurezza nazionale, può di fatto rappresentare un elemento in grado di spingere il paese a considerare la possibilità di un intervento volto a ridurre la pericolosità da invasione di colate di lava nella città di Goma. Intervento per il quale il paese potrebbe facilmente ottenere un supporto e un aiuto da strutture internazionali, prima fra tutte le Nazioni Unite che dal 2002 sostengono un programma di potenziamento e sviluppo dell'Osservatorio Vulcanologico di Goma. In conclusione, sebbene il presente studio sugli effetti protettivi di barriere artificiali tragga comunque senso dalla necessità di studiare il problema generale della riduzione della pericolosità vulcanica in un'area urbana, non è escluso che possa in futuro suscitare interesse la sua messa in opera nella città di Goma. In tal senso, qualunque decisione sugli aspetti tecnico-scientifici di un tale intervento dovrebbe essere preceduta da ulteriori studi, effettuati con un nuovo DEM a più alta risoluzione, oggi non disponibile, da uno studio dettagliato dell'assetto strutturale e della probabilità di apertura di nuove fratture eruttive, e da una più ampia discussione e validazione dei risultati degli studi da parte della comunità scientifica internazionale.

Bibliografia

- Alessi, G. (1832), *Storia critica dell'eruzioni dell'Etna*, Atti Acc Gioenia Sci Nat I 8:115–125.
- Balmforth, N.J., S.G. Llewellyn Smith, e W.R. Young (2001), *Disturbing vortices*, J. Fluid Mech., 426, 95–133.
- Baloga, S., (1987), *Lava flows as kinematic waves*, J. Geophys. Res., 92, 9271-9279.
- Baloga, S., P.D. Spudis, e J.E. Guest, (1995), *The dynamics of rapidly emplaced terrestrial lava flows and implications for planetary volcanism*, J. Geophys. Res., 100, 24,509–24,519.
- Barberi, F., e L. Villari (1984), *Mt. Etna and its 1983 eruption*, Bull. Volcanol. 47, 877-1177.
- Barberi, F., e L. Villari (1994), *Volcano monitoring and civil protection problems during the 1991–1993 Etna eruption*, Acta Vulcanologica, v. 4, p. 157–165.
- Barberi, F., P. Caruso, G. Macedonio, M. Pareschi, e R. Rosi (1992a), *Reconstruction and numerical simulation of the lahar of the 1877 eruption of Cotopaxi volcano (Ecuador)*, Acta Vulcanologica, v. 2, p. 35–44.
- Barberi, F., G. Macedonio, M. Pareschi, e R. Santacroce (1992b), *Lava hazard assessment at Mt. Etna: The case of 1991–1992 eruption*, European Geophysical Union, XVII General Assembly, University of Edinburgh, also on Annales Geophysicae Supplement no. 1 to v. 10, Part 1, p. C107.
- Barberi, F., M. Carapezza, M. Valenza, e L. Villari (1993), *The control of lava flow during the 1991–1992 eruption of Mt. Etna*, Journal of Volcanology and Geothermal Research, v. 56, p. 1–34, doi: 10.1016/0377-0273(93)90048-V.
- Barberi, F., F. Brondi, M.L. Carapezza, L. Cavarra, e C. Murgia (2003), *Earthen barriers to control lava flows in the 2001 eruption of Mt. Etna*, Journal of Volcanology and Geothermal Research v. 123, p. 231-243.
- Barberi, F., e M.L. Carapezza (2004), *The control of Lava Flows at Mt. Etna*, Mt. Etna: Volcano Laboratory, Geophysical Monograph Series 143, doi: 10.1029/143GM22.
- Barca, D., G.M. Crisci, S. Di Gregorio, F.P. Nicoletta (1987), *Lava flow simulation by cellular automata: Pantelleria's examples*, in *Proceedings, International Applied Modelling and Simulation: Cairo, Egypt*, International Association of Science and Technology for Development (IASTED), v. 4A, p. 9–15.

- Barca, D., G.M. Crisci, S. Di Gregorio, S. Marabini, e F.P. Nicoletta (1988), *Lava flow simulation by Cellular Automata and Pantelleria's example*, Proc. Kagoshima Int. Conf. on Volcanoes, pp. 475-478.
- Barca, D., G.M. Crisci, S. Di Gregorio, F.P. Nicoletta (1993), *Cellular Automata methods for modeling lava flow: Simulation of the 1986[^]1987 Etnean eruption*. In: Kilburn, C., Luongo, G. (Eds.), *Active Lavas*. UCL Press, London, pp. 283-301.
- Barca, D., G.M. Crisci, S. Di Gregorio, F.P. Nicoletta (1994), *Cellular Automata for simulating lava flows: A method and examples of the Etnean eruptions*, Transp. Theory Stat. Phys. 23, 195-232.
- Baxter, P., e A. Ancia (2002), *Human health and vulnerability in the Nyiragongo Crisis, Democratic Republic of Congo, 2002*, a report to the World Health Organization, United Nations World Health Organization, Geneva, internet report, 1-49 pp, 13 figures, <http://www.who.int/disasters/repo/7827.doc> and <http://www.who.int/disasters/repo/7828.pdf>.
- Baxter, P., P. Allard, M. Halbwachs, J.C. Komorowski, A. Woods, e A. Ancia (2004), *Human health and vulnerability in the Nyiragongo volcano eruption and humanitarian crisis at Goma, Democratic Republic of Congo*, Acta Vulcanol., 14, 8-14.
- Behncke, B., e M. Neri (2003), *The July-August 2001 eruption of Mt. Etna (Sicily)*, Bull. Volcanol., DOI: 10.1007/s00445-003-0274-1.
- Bjornsson, A., G. Johnsen, S. Sigurdsson, G. Thorbergsson, E. Trygvasson (1979), *Rifting of the plate boundary in North Iceland 1975-1978*, J. Geophys. Res. 84, 3029-3038.
- Burguete, J., P. Garcia-Navarro, e R. Aliod (2002), *Numerical simulation of runoff from extreme rainfall events in a mountain water catchment*, Natural Hazards and Earth System Sciences, v. 2, p. 109-117.
- Boussinesq, J. (1872), *Theorie des onde et des resous qui se propagent le long d'un canal rectangulaire horizontal, en communiquant au liquide contenu dans ce canal des vitesses sensiblement pareilles de la surface au fond*, Journal de Math. Pures et Appl., Deuxieme Serie, 17, 55-108.
- Capaccioni, B., O. Vaselli, A.P. Santo, e M.M. Yalire (2004), *Monogenic and polygenic volcanoes in the area between the Nyiragongo summit crater and the Lake Kivu shoreline*, Acta Vulcanol., 14, 1-8.
- Carroll, M.R. e J.R. Holloway, (1994), *Volatiles in magma*. Mineral. Soc. An. Rev. mineral 30.
- Cashman, K.V., C. Thornber, e J.P. Kauahikaua (1999), *Cooling and crystallization of lava in open channels, and the transition of pahoehoe to aa*, Bull. Volcanol., 61, 306- 323.

- Cashman, K.V., B. Sturtevant, P. Papale, O. Navon (2000), *Magmatic Fragmentation*, In Sigurdsson, H., Houghton, B.F., McNutt, S., Rhymer, H., Stix, J. (eds.) *Encyclopedia of Volcanology* Academic Press, San Diego, 419-430.
- Chester, D.K., A.M. Duncan, J.E. Guest., e C.R.J. Kilburn, (1985), *Mount Etna: The Anatomy of a Volcano*, Chapman and Hall, London, 404 pp.
- Coltelli, M., G. Fornaro, G. Franceschetti, R. Lanari, M. Migliaccio, J.R. Moreira, K.P. Papathanassiou, G. Puglisi, D. Riccio, e M. Schwabisch (1996), *SIR-C/X-SAR multifrequency multipass interferometry: A new tool for geological interpretation*, *Journal Of Geophysical Research*, vol. 101, pp. 23127-23148.
- Colombrita, R. (1984), *Methodology for the construction of earth barriers to divert lava flows: the Mt. Etna 1983 eruption*. *Bull. Volcanol.* 47, 1009-1038.
- Costa, A., e G. Macedonio (2005), *Numerical simulation of lava flows based on depth-averaged equations*, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L05304, doi:10.1029/2004GL021817.
- Crisci, G.M., S. Di Gregorio, e G. Ranieri (1982), *A cellular space model of basaltic lava flow*, *Proc. Int. Conf. Applied Modelling and Simulation 82*, Paris, vol. 11, pp. 65-67.
- Crisci, G.M., S. Di Gregorio, O. Pindaro, e G. Ranieri (1986), *Lava flow simulation by a discrete cellular model: First implementation*, *Int. J. Model. Simul.* 6, 137-140.
- Crisci, G.M., S. Di Gregorio, F. Nicoletta, R. Rongo, e W. Spataro (1999a), *Analysing lava risk for the Etnean area by Cellular Automata methods of simulation*, *Nat. Hazards* 20, 215-229.
- Crisci, G.M., S. Di Gregorio, R. Rongo, M. Scarpelli, W. Spataro e S. Calvari (2003), *Revisiting the 1669 Etnean eruptive crisis using a cellular automata model and implications for M.L. Damiani et al. / Computers & Geosciences 32 (2006) 512–526* *volcanic hazard in the Catania area*, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 123, 211–230.
- Crisci, G.M., R. Rongo, S. Di Gregorio, e W. Spataro (2004), *The simulation model SCIARA: The 1991 and 2001 lava flows at Mt. Etna*, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 132, 253– 267.
- Crisp, J. e S. Baloga, (1990a). *A method for estimating eruption rates of planetary lava flows*, *Icarus*, 85:512-515.
- Crisp, J., e S. Baloga, (1990b), *A model for lava flows with two thermal components*, *J. Geophys. Res.*, 95, 1255– 1270.
- De Fiore, O. (1916), *Relazione sull'eruzione dell'Etna nel 1669*, *Rend Mem R Acc Sci Lett Arti degli Zelanti Acireale III* 7–8:187–197.

- Del Negro, C., L. Fortuna, e A. Vicari (2005), *Modelling lava flows by Cellular Nonlinear Networks (CNN): preliminary results*, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 12, 505–513
- Delvaux, D. (1991), *The Karoo to Recent rifting in the western branch of the East-African Rift System: a bibliographical synthesis*, Rapport Annuel 1989-1990, pp 63-83, Département de Géologie et Minéralogie, Musée Royal de l’Afrique Centrale, Tervuren, Belgium.
- Demant, A., P. Lestrade, T.L. Ruananza, A.B. Kampunzu, e J. Durieux (1994), *Volcanological and petrological evolution of Nyiragongo volcano, Virunga volcanic field, Zaire*, *Bull. Volcanol.*, 56, 47– 61.
- Di Gregorio, S., R. Serra, e M. Villani (1998), *Simulation of soil contamination and bioremediation by a Cellular Automaton model*, *Complex Syst.* 11, 31-54.
- Di Palma S., F. Drago, E. Galanti, e V. Pennisi (1994) *Earthern barriers and explosion tests to delay the lava advance: the 1992 Mt. Etna experience*, in *Acta Vulcanologica, The 1991-93 Etna Eruption*, L. Villari Editore, pagg. 167-72, vol. 4.
- Dobran, F., e G. Macedonio (1992), *Lava modeling contributions of the Volcanic Simulation Group during the 1991–1992 eruption of Mt. Etna*: Giardini, Pisa, Italy, Volcanic Simulation Group Report 92-7, Gruppo Nazionale per la Vulcanologia (GNV) Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), p. 28.
- Dragoni, M., M. Bonafede, e E. Boschi (1986), *Downslope flow models of a Bingham liquid: Implications for lava flows*, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 30, 305–325.
- Dragoni, M. (1993), *Modelling the rheology and cooling of lava flows*, in *Active Lavas: Monitoring and Modelling*, edito da: Kilburn, C. R. J. e Luongo, G., (UCL Press. London), 235–261.
- Durieux, J. (2004a), *Nyiragongo: The January 10th 1977 eruption*, *Acta Vulcanol.*, 14, 141– 143.
- Durieux, J. (2004b), *Volcano Nyiragongo (D. R. Congo): Evolution of the crater and lava lakes from the discovery to the present*, *Acta Vulcanol.*, 14, 133– 140.
- Einarsson, T. (1974), *The Heimaey eruption in words and pictures*, Heimskringla, Reykjavik, 56 p.
- Emerson, N. B. (1881), *On the 1881 lava flow of Mauna Loa*, in: *Hawaiian Gazette*, Aug. 31, p. 3.
- Farr, T.G., e M. Kobrick (2000), *Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data*, *Amer. Geophys. Union Eos*, v. 81, p. 583-585.

- Favalli, M., e M.T. Pareschi (2004), *Digital elevation model construction from structured topographic data: The DEST algorithm*, J. Geophys. Res., 109, F04004, doi:10.1029/2004JF000150.
- Favalli, M., M.T. Pareschi, A. Neri, e I. Isola (2005), *Forecasting lava flow paths by a stochastic approach*, Geophys. Res. Lett., 32, L03305, doi:10.1029/2004GL021718.
- Favalli, M., G.D. Chirico, P. Papale, M.T. Pareschi, M. Coltelli, N. Lucaya, e E. Boschi (2006), *Computer simulations of lava flow paths in the town of Goma, Nyiragongo volcano, Democratic Republic of Congo*, J. Geophys. Res., 111, B06202, doi:10.1029/2004JB003527.
- Frazzetta, G., e R. Romano (1984), *The 1983 Etna eruption event chronology and morphological evolution of lava flows*, Bull. Volc., 47, 4, 2, 1079-1096
- Frisch, U., B. Hasslacher, e Y. Pomeau (1986), *Lattice-gas automata for navier stokes equation*, Phys. Rev. Lett. 56, 1505-1508.
- Fujita, E., M. Hidaka, S. Umino, e A. Goto (2004), *Lava flow simulation code: LavaSIM by VTFS-project*, in Western Pacific Geophysical Meeting Supplement [abs.], Eos (Transactions, American Geophysical Union), 444, v. 85(28).
- Giordano, D., M. Polacci, A. Longo, P. Papale, D. Dingwell, E. Boschi e M. Kasereka (2007), *Thermo-rheological magma control on the impact of highly fluid lava flows at Mt Nyiragongo*, Geophys. Res. Lett., 34, doi: 10.1029/2006GL028459.
- Goma Volcano Observatory, (2002), *Nyiragongo*, Bull. Global Volcan. Network, 10– 27.
- Griffiths, R.W., (2000). *The dynamics of lava flows*, Annual Review of Fluid Mechanics 32, 477–518.
- Griffiths, R.W., e J.H. Fink (1993), *Effects of surface cooling on the spreading of lava flows and domes*, J. Fluid Mech., 252, 667– 702.
- Guest, J., e J. Murray (1979), *An analysis of hazard from the Mount Etna Volcano*, Journal of the Geological Society of London, v. 136, p. 347–354.
- Guest, J.E., C.R.J. Kilburn, H. Pinkerton, e A.M. Duncan, (1987), *The evolution of lava flow-fields: observations of the 1981 and 1983 eruptions of Mount Etna, Sicily*, Bull. Volcanol. 49, 527– 540.
- Harris, A.J.L., e S.K. Rowland (2001), *FLOWGO: A kinematic thermrheological model for lava flowing in a channel*, Bull. Volcanol., 63, 20–44.
- Heinrich, P., A. Piatanesi, e H. Hébert, (2001), *Numerical modelling of tsunami generation and propagation from submarine slumps: The 1998 Papua New Guinea*

- event, *Geophysical Journal International*, v. 145, p. 97–111, doi: 10.1111/j.1365-246X.2001.00336.x.
- Heliker, C. (1992), *Volcanic and seismic hazards on the Island of Hawaii*, U.S. Geological Survey Scientific Booklet, 48 p.
- Hidaka, M., e H. Ujita (2001), *Verification for flow analysis capability in the model of three-dimensional natural convection with simultaneous spreading, melting and solidification for debris coolability analysis module in the severe accident analysis code 'SAMPSON', (I)*, *Journal of Nuclear Science and Technology*, v. 38, no. 9, p. 745–756.
- Hidaka, M., N. Sato, e H. Ujita (2002), *Verification for flow analysis capability in the model of three-dimensional natural convection with simultaneous spreading, melting and solidification for debris coolability analysis module in the severe accident analysis code 'SAMPSON', (II)*, *Journal of Nuclear Science and Technology*, v. 39, no. 5, p. 520–530.
- Hulme G., (1974). *The interpretation of lava flow morphology*, *Geophys. J. Roy. Astro. Soc.* 39: pp. 361.
- Huppert, H.E., (1982), *The propagation of two-dimensional and axisymmetric viscous gravity currents over a rigid horizontal surface*, *J. Fluid Mech.*, 121, 43-58.
- Ishihara, K., M. Iguchi, e K. Kamo (1988), *Numerical simulation of lava flows at Sakurajima*, in *Proceedings, International Conference on Volcanoes*, Kagoshima, Japan: Kagoshima, Kagoshima Prefectural Government, p. 475–478.
- Ishihara, K., M. Iguchi, e K. Kamo (1989), *Numerical simulation of lava flows on some volcanoes in Japan*, in Fink, J., ed., *Lava flows and domes: New York*, Springer-Verlag, p. 174–07.
- Ishihara, K., M. Iguchi, e K. Kamo (1990), *Numerical simulation of lava flows on some volcanoes in Japan*, in: *Lava Flows and Domes: Emplacement Mechanisms and Hazard Implications*, edited by: Fink, J. K (Springer, Berlin), 174–207, 1990.
- Jaggard, T.A., Jr. (1936), *The bombing operation at Mauna Loa: The Volcano Letter*, no. 431, p. 4-7. [In *The Volcano Letter*, compiled and reprinted in 1987 by Fiske, R.S., Simkin, T., and Nielsen, E.A., eds., Smithsonian Institution Press, 539 p.
- Jaggard, T.A., Jr. (1945), *Protection of harbors from lava flow*, *American Journal of Science*, v. 243-A (Daly Volume), p. 333-351.
- Jónsson, B. (1993), *The role of man-made dykes in diverting lava flows*, Case study: The Heimaey eruption 1973: in *Proceedings of the International Conference on Preparedness and Mitigation for Natural Disasters '92* (Reykjavík, Iceland; 28-29 May 1992).

- Kavotha, K.S., T. Mavonga, J. Durieux, e K. Mukambilwa (2004), *Towards a more detailed seismic picture of the January 17th, 2002 Nyiragongo eruption*, Acta Vulcanol., 14, 15–28.
- Keszthelyi, L., e R. Denlinger (1996), *The initial cooling of pahoehoe flow lobes*, Bull. Volcanol., 58, 5–18.
- Komorowski, J.C., et al. (2004), *The January 2002 flank eruption of Nyiragongo volcano (Democratic Republic of Congo): Chronology, evidence for a tectonic rift trigger, and impact of lava flows on the city of Goma*, Acta Vulcanol., 14, 29–64.
- Lachman, R., e W.J. Bonk (1960), *Behavior and beliefs during the recent volcanic eruption at Kapoho, Hawaii*, Science, v. 131, Apr., p. 1095-1096.
- Lacroix, A., (1904), *La Montagne Pelee et ses Eruptions*, Masson, Paris, 662 pp.
- Landi, P., M. Polacci, e M. Pompilio (2004), *Final stages of cooling and crystallization in magmas feeding the January 2002 Nyiragongo eruption*, paper presented at the EGU 1st General Assembly, Nice, France, 25–30 April.
- Lockwood, J.P., e F.A. Torgerson, (1980), *Diversion of lava flows by aerial bombing--lessons from Mauna Loa Volcano, Hawaii*, in Garcia, M.O. and Decker, R.W., ed(s)., G.A. Macdonald Special Memorial Issue: Bulletin Volcanologique, v. 43, no. 4, p. 727-741.
- Lockwood, J.P., e R. Romano (1985), *Diversion of lava during the 1983 eruption of Mount Etna*, Earthquake Information Bull., v. 17, no. 4, p. 124-133.
- Lockwood, J.P., e T.J. Casadevall (1994), *Status of active volcanoes in the Goma area, Eastern Zaire, and associated hazards to residents and refugees*, U.S. Geol. Surv. Open File Rep., 94-581, 18 pp.
- Macdonald, G.A. (1962), *The 1959 and 1960 eruption of Kilauea volcano, Hawaii and the construction of walls to restrict the spread of lava flow*, Bull. Volcanol., 2, 24, 249-294.
- Macdonald, G.A. (1972), *Volcanoes*, Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 510 p.
- Macdonald, G.A., A.T. Abbott, e F.L. Peterson, (1986), *Volcanoes in the sea. The geology of Hawaii: Second Edition*, Honolulu, University of Hawaii Press, 517 p.
- Macedonio, G., M. Pareschi, e R. Santacroce (1990), *A simple model for lava hazard assessment: Mount Etna*, in Proceedings: Mainz, Germany, International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior (IAVCEI).
- Malin, M.C. (1980), *Lengths of Hawaiian flows*, Geology 8, 306–308.
- Miyamoto, H., e S. Sasaki (1997), *Simulating lava flows by an improved cellular automata method*, Comput. Geosci., 23, 283–292.

- Miyamoto, H. e S Sasaki, (1998), *Numerical simulations of flood basalt lava flows: roles of some parameters on lava flow morphologies*, J. Geophys. Res., 103, 27 489–27 502.
- Miyamoto, H., and K.R. Papp (2004), *Rheology and topography control the path of a lava flow: Insight from numerical simulations over a preexisting topography*, Geophys. Res. Lett., 31, L16608, doi:10.1029/2004GL020626.
- Moore, H.J. (1982), *A geologic evaluation of proposed lava diversion barriers for the Mauna Loa Observatory, Mauna Loa Volcano, Hawaii*, U.S. Geological Survey Open-File Report 82–314, 17 p.
- Naranjo, J.L., H. Sigurdson, J.N. Carey, e W.J. Fritz (1986), *Eruption of Nevado del Ruiz volcano (Colombia), 13 Nov 1985: tephra fall and lahars*, Science 233 : 961–963.
- Neri, A. (1998), *A local heat transfer analysis of lava cooling in the atmosphere: Application to thermal diffusion-dominated lava flows*, J. Volcanol. Geotherm. Res., 81, 215–243.
- Patrick, M.R., J. Dehn, e K. Dean (2004), *Numerical modeling of lava flow cooling applied to the 1997 Okmok eruption: Approach and analysis*, J. Geophys. Res., 109, B03202, doi:10.1029/2003JB002537.
- Pieri, D.C. (1986), *Eruption rate, area, and length relationship for some Hawaiian lava flows*, J. Volc. Geotherm. Res., 30, 29–45.
- Rabus, B., M. Eineder, A. Roth, e R. Bamler (2003), *The shuttle radar topography mission- a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar*, Photogramm. Rem. Sens., v. 57, p. 241-262.
- Rodriguez, E., C.S. Morris, J.E. Belz, E.C. Chapin, J.M. Martin, W. Daffer, e S. Hensley, (2005), *An assessment of the SRTM topographic products*, Technical Report JPL D-31639, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 143 pp.
- Rose, W.I. Jr. (1973), *Pattern and mechanism of volcanic activity at the Santiaguito volcanic dome, Guatemala*, Bull. Volcanol., 37, 73-94.
- Saar, M.O., M. Manga, K.V. Cashman, e S. Fremouw (2001), *Numerical models of the onset of yield strength in crystal-melt suspensions*, Earth Planet. Sci. Lett., 187, 367–379.
- Santo, A.P., B. Capaccioni, D. Tedesco, e O. Vaselli (2004), *Petrographic and geochemical features of the 2002 Nyiragongo lava flows*, Acta Vulcanol., 14, 59–61.
- Serao F., (1738), *Istoria dell'incendio del Vesuvio accaduto nel mese di maggio dell'anno 1737*, ed. Novello De Bonis, Napoli.

- Sigurgeirsson, T. (1974), *The battle of Heimaey; in Ísland 1974, Welcome to Iceland*, Denmark, Anders Nyborg A/S, p. 63, 64, 66, 68–69, and 71.
- Succi, S., R. Benzi, e F. Higuera (1991), *The lattice Boltzmann equation: A new tool for computational fluid dynamics*, *Physica* 47, 219-230.
- Tallarico, A., e M. Dragoni (2000), *A three-dimensional Bingham model for channeled lava flows*, *J. Geophys. Res.*, 105, 25,969–25,980.
- Tazieff, H. (1949), *Première exploration du cratère du volcan Nyiragongo*, *Bull. Soc. Belge Géol.*, 58, 165– 172.
- Tazieff, H. (1977), *An exceptional eruption: Mt. Nyiragongo, January 10th, 1977*, *Bull. Volcanol.*, 40, 1– 12.
- Tazieff, H. (1979), *Nyiragongo, the Forbidden Volcano*, 287 pp., Barron's Educ. Ser., Inc., Woodbury, N.Y. (tradotto dal francese da J. F. Barnard, *Nyiragongo: Le volcan interdit*, Flammarion, Paris, 1975).
- Tazieff, H. (1984), *Mt. Nyiragongo: Renewed activity of the lava lake*, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 20, 267–280.
- Tedesco, D. (2004), *1995 Nyiragongo and Nyamulagira activity in the Virunga National Park: A volcanic crisis*, *Acta Vulcanol.*, 14, 149– 156.
- Tedesco, D., P. Papale, O. Vaselli, e J. Durieux (2002), *The January 17th, 2002 eruption of Nyiragongo, Democratic Republic of Congo*, final report, 17 pp., UN Off. for the Coord. of Humanit. Affairs, Geneva.
- Tedesco, D., O. Vaselli, P. Papale, S.A. Carn, M. Voltaggio, G.M. Sawyer, J. Durieux, M. Kasereka, e F. Tassi (2007), *The January 2002 volcano-tectonic eruption of Nyiragongo 244 volcano, Democratic Republic of Congo*, *J. Geophys. Res.*, sottomesso.
- Thonnard, R.L.G., M.E. Denaeyer, e P. Antun (1965), *Carte volcanologique des Virunga, Afrique Centrale, Feuille 1, 1:50,000 scale*, *Cent. Natl. de Volcanol.*, Belgique, Missions Géol. et Géophys. aux Virunga, Minist.e de l'Educ. et de la Culture, Brussels.
- Thorarinsson, S. (1969). *Glacier surges in Iceland, with special reference to the surges of Brùarjökull*, *Canadian Journal of Earth Sciences* 6, 875–882.
- Vassale R. (1994), *The use of explosive for the diversion of the 1992 Mt. Etna lava flow*, in *Acta Vulcanologica, The 1991-93 Etna Eruption*, L. Villari Editore, pagg. 173-77, vol. 4.
- Villari, L., R. Rasà, A. Caccamo (1988), *Volcanic hazard at Mt. Etna (Sicily, Italy): Some insight from the geostructural pattern constraining flank eruptions*, in *Proceedings, International Conference on Volcanoes, Kagoshima, Japan: Kagoshima, Kagoshima Prefectural Government*, p. 491–494.

- Von Götzen, A. (1896), *Durch Afrika von Ost nach West*, Dietrich Reimer, Berlin.
- Von Neumann, J. (1966), *Theory of Self-Reproducing Automat*, University of Illinois Press, Illinois. Edito e completato da A. W. Burks.
- Wadge, G. (1978), *Effusion rate control of aa lava flow-fields on Etna*, *Geology* 6, 503-506.
- Wadge, G. e Lopes, R.M.C. (1991), *The lobes of lava flows on Earth and Olympus Mons, Mars*, *Bulletin of Volcanology*, 54, 10-24.
- Wadge, G., P.A.V. Young, e I. J. McKendrick (1994), *Mapping lava flow hazards using computer simulation*, *J. Geophys. Res.*, 99, 489– 504.
- Walker, G.P.L., (1973), *Lengths of lava flows*, *Philos. Trans. R. Soc. London* 274, 107–118.
- Werner, M. (2001), *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), Mission overview*, *J. Telecom. (Frequenz)*, v. 55, p. 75-79.
- Wu, F. (1998), *Simulating urban encroachment on rural land with fuzzy-logic-controlled cellular automata in a geographical information system*, *J. Environ. Manage.* 53, 293-308.
- Young, P. e G. Wadge (1990), *FLOWFRONT: simulation of a lava flow*, *Computers & Geosciences*, 16, 8, 1171–1191.