ISSN 1590-2595
Anno 2017_Numero 144

Procedura *near real-time* per la valutazione dell'hazard da eruzioni laterali all'Etna (Sicilia, Italia)

Quaderni di Geofisica



144

Istituto Nazionale di
Geofisica e Vulcanologia

Quaderni di Geofisica

Direttore Responsabile
Silvia MATTONI

Editorial Board
Luigi CUCCI - Editor in Chief (INGV-RM1)
Raffaele AZZARO (INGV-CT)
Mario CASTELLANO (INGV-NA)
Viviana CASTELLI (INGV-BO)
Rosa Anna CORSARO (INGV-CT)
Mauro DI VITO (INGV-NA)
Marcello LIOTTA (INGV-PA)
Mario MATTIA (INGV-CT)
Milena MORETTI (INGV-CNT)
Nicola PAGLIUCA (INGV-RM1)
Umberto SCIACCA (INGV-RM2)
Alessandro SETTIMI (INGV-RM2)
Salvatore STRAMONDO (INGV-CNT)
Andrea TERTULLIANI (INGV-RM1)
Aldo WINKLER (INGV-RM2)

Segreteria di Redazione
Francesca Di Stefano - Referente
Rossella Celi
Tel. +39 06 51860068
redazionecen@ingv.it

in collaborazione con:
Barbara Angioni (RM1)

REGISTRAZIONE AL TRIBUNALE DI ROMA N.174|2014, 23 LUGLIO
© 2014 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Rappresentante legale: Carlo DOGLIONI
Sede: Via di Vigna Murata, 605 | Roma

ISSN 1590-2595
Anno **2017**_Numero **144**

Procedura *near real-time* per la valutazione dell'hazard da eruzioni laterali all'Etna (Sicilia, Italia)

A near real-time procedure to evaluate flank eruption hazard at Mt. Etna (Sicily, Italy)

Alfonso Brancato, Flavio Cannavò, Carmelo Cassisi, Mauro Coltelli, Mario Mattia, Placido Montalto, Domenico Patanè, Cristina Proietti, Danila Scandura

INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Catania, Osservatorio Etneo)

In copertina Densità di simulazioni (particolare)

Come citare: Brancato A. et al., (2017). Procedura near real-time per la valutazione dell'hazard da eruzioni laterali all'Etna (Sicilia, Italia). Quad. Geofis., 144: 1-20.

Procedura *near real-time* per la valutazione dell'hazard da eruzioni laterali all'Etna (Sicilia, Italia)

L'Etna è uno stratovulcano composito situato lungo la costa ionica della Sicilia. Le frequenti eruzioni laterali (soprattutto lungo i Rift NE, S e O) fanno sì che ad esso sia associata una elevata pericolosità vulcanica. Se valutiamo anche l'elevato tasso di urbanizzazione dei suoi fianchi risulta evidente il notevole valore esposto al pericolo.

Nel quadro del progetto PON SIGMA (Integrated Cloud-Sensor System for Advanced Multirisk Management), abbiamo sviluppato un'analisi in tempo quasi reale e completamente automatizzata volta alla valutazione delle aree soggette alla più alta probabilità di apertura di bocche effusive (vent) e il corrispondente hazard relativo all'accadimento di eruzioni effusive. L'algoritmo bayesiano BET_EF (Bayesian Event Tree_Eruption Forecasting), basato sull'albero degli eventi, è, nel nostro approccio, utilizzato inizialmente per la valutazione di una mappa di pericolosità a lungo termine sulla base dell'attività effusiva degli ultimi 4000 anni. L'analisi e l'inversione dei parametri monitorati in tempo reale, quali, ad esempio, dati sismici e sorgenti di tremore vulcanico, permette di valutare la funzione di densità di probabilità (PDF) a breve termine. Un'ulteriore applicazione dell'algoritmo BET_EF fornisce uno scenario, in termini di mappa di pericolosità, a breve termine per le simulazioni delle colate laviche. L'output della seconda applicazione del BET_EF costituisce l'input per simulare una serie di colate laviche e valutare il relativo hazard, definito in termini di impatto sul territorio.

Allo scopo di testare limiti e utilità del nostro approccio integrato, abbiamo utilizzato, come test case, la fase intrusiva iniziale dell'eruzione laterale accaduta all'Etna nel maggio 2008. La previsione di apertura di vent evidenzia la zona con maggiore probabilità e, dall'analisi dei risultati, si nota un buon accordo tra l'area a probabilità più alta e la posizione effettiva del vent.

È stata eseguita una serie di 200 simulazioni di colate per valutare le aree soggette a più alta probabilità di invasione lavica. Infine, è stata valutata la densità dei flussi simulati e i valori più alti sono risultati in accordo con l'area effettivamente coperta dal campo lavico dell'eruzione considerata.

Mt. Etna is a composite stratovolcano located along the Ionian coast of the Sicily. The frequent flank eruptions (mostly along the NE, S and W rift zones) lead to a high volcanic hazard that is getting worse by the intense urbanization on the flanks of the volcano. In the framework of the project PON SIGMA (Integrated Cloud-Sensor System for Advanced Multirisk Management), we developed a completely automatized computer-assisted analysis that evaluate in near real-time the areas prone to the highest vent opening probability and the corresponding hazard related to effusive eruptions. The Bayesian Event Tree_Eruption Forecasting (BET_EF) algorithm is firstly used to evaluate a long-term hazard map based on the last 4.0 ka flank effusive activity. The analysis and inversion of real time monitoring data, such as seismic location and tremor sources, allowed us to evaluate the short-term Probability Density Function (PDF). A further application of the BET_EF algorithm provided a short-term scenario for lava flow simulations. The short-term scenario and the application of a specific algorithm allowed us to estimate the hazard related to the expected effusive eruption. The final intrusion of the May 2008 – July 2009 flank eruption at Mt. Etna was selected as test case. The future vent forecast highlighted the area with higher probability. It is worth noting that a good accordance is evident if the highest probability area was compared with the real vent location. A series of 200 lava flow simulations was run to assess the areas prone to the highest lava invasion hazard. Finally, the density of the simulated flows was evaluated showing that the highest values are in accordance with the area actually covered by the 2008-2009 lava field.

Introduzione

L'Etna è uno stratovulcano caratterizzato da frequenti eruzioni basaltiche, sia effusive che esplosive, che si sono verificate nel corso di una complessa storia eruttiva nel corso degli ultimi 500 ka [Branca et al., 2008, 2011]. L'Etna si trova in una zona densamente abitata, e dunque la valutazione della pericolosità vulcanica è particolarmente rilevante per quelle Istituzioni che devono pianificare i cosiddetti piani d'emergenza. L'obiettivo del presente lavoro è quello di valutare la pericolosità, a breve termine, derivante dalle eruzioni laterali effusive all'Etna. A tal fine è stata realizzata una procedura in grado di valutare in tempo quasi reale l'area interessata dall'apertura di una bocca effusiva e di stimare la pericolosità connessa alla conseguente propagazione di campi lavici. Punto di partenza di tale valutazione è la stima dell'*hazard* vulcanico a lungo termine. Per questo è indispensabile conoscere con il maggior dettaglio possibile il comportamento pregresso del vulcano, disponendo di un catalogo adeguato e quanto più completo possibile delle eruzioni laterali già avvenute. Per l'Etna, è noto che tutte le eruzioni laterali avvenute nel passato sono da considerarsi monogeniche, vale a dire che il relativo *vent* non si è più attivato per eventi successivi. Ci si aspetta, allora, che le eruzioni future debbano accadere da nuove localizzazioni e pertanto una efficace previsione su basi probabilistiche, integrata con osservazioni provenienti dai vari parametri geofisici osservati, è da considerarsi uno strumento di primaria importanza ai fini della valutazione della pericolosità legata all'attività effusiva del vulcano.
In particolare, il catalogo e la localizzazione delle eruzioni laterali avvenute all'Etna devono essere elaborati per fornire una scenario a lungo termine. In assenza di ulteriori informazioni provenienti dal monitoraggio, tale scenario è l'unica fonte da considerare per definire la probabilità di apertura del prossimo *vent* sulla base della storia del vulcano. È evidente che tale stima dell'*hazard* vulcanico risulterà più qualitativa e meno raffinata, anche se va sottolineato che l'attività vulcanica futura mostrerà un comportamento simile a quello del passato (i.e. eruzioni future da *vent* non già attivati) se non si è verificato alcun cambiamento strutturale di particolare rilievo. In altre parole, la *PDF* a lungo termine descrive il comportamento del vulcano durante i periodi di quiescenza. Tale scenario deve essere integrato ed aggiornato con il calcolo di una *PDF* a breve termine che descriva più precisamente lo stato attuale del vulcano attraverso l'analisi del maggior numero possibile di dati di monitoraggio nel momento in cui il vulcano entri in una fase di *unrest*. A tale scopo, in questo lavoro sono stati considerati dati sismici (in dettaglio, dati di tremore) registrati in tempo reale da una delle reti di monitoraggio sismico più dense al mondo.
Una volta calcolata la probabilità di apertura del prossimo *vent*, sulla base dei dati di monitoraggio osservati, l'*hazard* relativo ad un'eruzione effusiva viene stimato in termini probabilistici utilizzando un algoritmo di simulazione numerica della propagazione di flussi lavici.

1. Procedura di valutazione della mappa di pericolosità

L'architettura dell'intero processo di elaborazione è basata su quattro moduli interconnessi (Figura 1) che, a partire

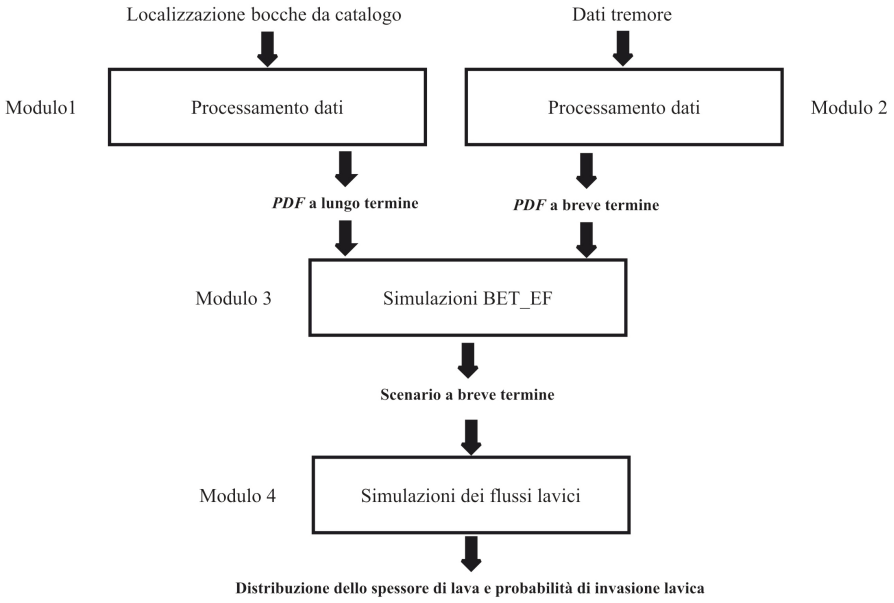


Figura 1 Diagramma a blocchi della procedura sviluppata.
Figure 1 Block diagram of the developed procedure.

dalla *PDF* a lungo termine di apertura delle bocche effusive e dai dati di monitoraggio registrati, permettono di valutare la pericolosità relativa alle eruzioni laterali effusive.

i) Il modulo 1 calcola la *PDF* a lungo termine elaborando la localizzazione delle bocche effusive delle eruzioni laterali degli ultimi 4000 anni, tramite un *kernel* gaussiano e il software BET_EF [Marzocchi et al., 2004, 2008].
ii) Il modulo 2 stima la *PDF* a breve termine dell'apertura di bocche effusive utilizzando i dati di monitoraggio. Le *PDF* in uscita dai moduli 1 e 2 costituiscono i dati di ingresso del modulo 3.
iii) Il modulo 3, utilizzando il software BET_EF ed i risultati relativi ai moduli 1 e 2, riproduce uno scenario a breve termine (*PDF* di apertura della bocca) che costituisce i dati di ingresso del modulo 4.
iv) Il modulo 4, utilizzando lo scenario a breve termine prodotto dal modulo 3, permette di valutare l'*hazard* relativo alle eruzioni laterali effusive all'Etna tramite un'applicazione probabilistica del codice di simulazione proposto in Connor et al., [2012]. Risultato finale della procedura è il calcolo della probabilità di invasione da colata lavica.

2. Modulo 1: calcolo della *PDF* a lungo termine

Il calcolo della *PDF* a lungo termine viene effettuato in due *step* successivi: i) un'applicazione di un *kernel* gaussiano bivariato [e.g. Parzen, 1962], basato sul catalogo degli ultimi 4000 anni di eruzioni laterali all'Etna, fornirà una stima dell'intensità spaziale (il numero atteso di eventi per unità di area), da cui si stimerà la probabilità condizionata di accadimento di un *vent* futuro; ii) un'applicazione dell'algoritmo BET_EF, basata sui valori di probabilità precedentemente calcolati, per fornire una mappatura delle aree che evidenziano l'*hazard* più probabile.

L'inferenza bayesiana consente, dato l'accadimento di un'eruzione laterale, la stima di una probabilità condizionata, dell'apertura di *vent* all'interno di una generica *j*-esima cella, tra tutte le possibili *K* celle in cui si suddivide l'area interessata dalle eruzioni laterali già accadute.

Considerare una *PDF* come stima della probabilità di apertura del *vent* in ogni cella ha importanti implicazioni fisiche. La presenza dell'incertezza aleatoria (legata alla complessità intrinseca del processo in esame) implica che una previsione deterministica a lungo termine è pressoché impossibile e l'apertura del *vent* rappresenta il risultato di un processo stocastico intrinseco. È evidente che l'affidabilità della stima dell'incertezza aleatoria dipende dal grado di conoscenza del processo e/o quantitativamente e qualitativamente (i.e. da quanti e quali dati) dal pregresso comportamento del sistema. Tale affidabilità è intrinsecamente connessa all'incertezza epistemologica (legata alla scarsa conoscenza del modello descritto dai dati) che diventa tanto più trascurabile quanto più è grande la quantità di dati a disposizione e/o la conoscenza specifica del vulcano.

Una breve spiegazione di come l'algoritmo BET_EF lavora rende più esplicito il perché del suo utilizzo nel contesto vulcanico analizzato. L'algoritmo calcola una distribuzione a posteriori utilizzando il teorema di Bayes e un *dataset* y, composto principalmente di dati del passato

$$[\theta] = [\theta \mid y] = \frac{[\theta]_{prior}[y \mid \theta]}{[y]} \quad (1)$$

dove la distribuzione di probabilità a priori $[\theta]_{prior}$ tiene in considerazione modelli teorici e opinioni di esperti, la funzione di verosimiglianza (i.e. *likelihood*) $[y \mid \theta]$ è la probabilità di osservare i dati y, data una specifica probabilità di accadimento, e il fattore di normalizzazione $[y]$ giustifica la probabilità di osservare i dati y.

La scelta della forma funzionale della distribuzione a priori e della funzione di verosimiglianza rappresenta il fondamento dell'inferenza bayesiana e richiede, quindi, assunzioni fisiche e statistiche ben motivate.

Nell'algoritmo BET_EF utilizzato, la distribuzione a priori è una distribuzione di *Dirichlet*, con K possibili esiti (i.e. il numero K di possibili celle), ognuno parametrizzato da una variabile positiva θ_j ($j = 1, \ldots, K$). Tale distribuzione è la generalizzazione multivariata della distribuzione univariata Beta e la relativa *PDF* rappresenta la fiducia (*belief*) che le probabilità di eventi mutuamente esclusivi siano descritte dalla variabile casuale θ_j (unimodale e con dominio (0, 1)). Ciò equivale a dire che la variabile casuale θ_j ($j = 1, \ldots, K$) rappresenta una probabilità. Inoltre, essendo i K possibili esiti mutuamente esclusivi ed esaustivi (la somma di tutti gli esiti è normalizzata a 1), allora il *vent* futuro si aprirà in una ed una sola delle K celle, risultando, tra l'altro, trascurabile l'accadimento simultaneo di *vent* all'interno della stessa cella. Una stima dell'incertezza epistemologica è rappresentata dal numero Λ di dati equivalenti, vale a dire la misura della dispersione nell'intorno delle migliori stime [per il relativo calcolo, si consulti Marzocchi et al., 2008].

La funzione di verosimiglianza $[y \mid \theta]$ è rappresentata da una distribuzione Multinomiale (con l'assunzione di base che ogni dato del *dataset* y sia indipendente da tutti gli altri); i parametri relativi sono il numero di *vent* in ogni cella ed il numero totale di *vent*. Questa funzione dipende fortemente dal numero di dati del passato. Infatti, un numero di dati del passato maggiore del numero di dati equivalenti influenzerà fortemente la distribuzione a posteriori, laddove, se il numero di dati del passato è confrontabile con il numero di dati equivalenti, allora la distribuzione a posteriori sarà un prodotto pesato di entrambe le componenti.

In definitiva, la distribuzione a posteriori (i.e. la probabilità di apertura di un *vent*) verrà calcolata come prodotto tra la distribuzione a priori (*Dirichlet*) e la funzione di verosimiglianza (Multinomiale) tramite l'equazione (1). In effetti, la

scelta di tali forme funzionali è strettamente legata al fatto che si tratta di distribuzioni congiunte; in altri termini, il prodotto di una distribuzione di *Dirichlet* per una distribuzione Multinomiale è ancora una distribuzione di *Dirichlet*, con nuovi parametri ricalcolati in base all'informazione dei dati del passato [Gelman et al., 1995]. In dettaglio, la forma funzionale della distribuzione a posteriori non è determinata analiticamente, ma tramite una simulazione Monte Carlo. Sia la distribuzione a priori sia la funzione di verosimiglianza sono campionate 1000 volte, vale a dire 1000 distribuzioni a posteriori da cui ricavare la relativa forma funzionale.

Il catalogo utilizzato nel presente studio è composto di 154 *main vent* (i.e. il punto da cui fuoriesce il maggiore volume di lava; Proietti et al., 2011) associati alle eruzioni laterali accadute all'Etna negli ultimi 4000 anni, distribuiti su un'area di 850 km^2 (corner: sinistro basso al punto di coordinate N 4˙156˙000 m e E 488˙000 m; destro alto al punto di coordinate N 4˙190˙000 m e E 513˙000 m, UTM zona 33). L'area è stata suddivisa in una griglia regolare di 850 celle quadrate (di lato 1 km; K = 850) e ogni cella ha caratteristiche omogenee, nel senso che ogni punto della cella ha la stessa probabilità di apertura del *vent*.

Per stimare la distribuzione a priori il catalogo è analizzato con un *kernel* gaussiano non parametrico

$$\hat{\lambda}(X,Y) = \frac{1}{2\pi n h^2}\sum_{i=1}^{n} exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{d_i}{h}\right)^2\right] \qquad (2)$$

con il fattore di *smoothing h* (*bandwidth* del *kernel*) fissato a 500 m (minima distanza tra lato della cella e relativo centroide); le distanze d_i sono calcolate tra le coordinate *(X, Y)* del centroide di ognuna delle 850 celle e il generico *vent* (coordinate *(x, y)*) e la sommatoria è calcolata considerando il numero totale di *vent* (i.e. n = 154).

Il *kernel* gaussiano calcola una intensità spaziale, i cui valori consentono la stima delle probabilità condizionata per ognuno dei punti di coordinate *(x, y)* attraverso l'equazione

$$P_{(X,Y)}\{N \geq 1|\text{vent}\} = 1 - exp\left[\hat{\lambda}(X,Y)\Delta X\Delta Y\right] \qquad (3)$$

dove *N* rappresenta il numero di *vent* che si apriranno all'interno della cella di area $\Delta X\Delta Y$ (i.e. 1 km^2), dato che un *vent* si è prodotto all'interno della cella stessa. È da sottolineare che i valori di probabilità stimati attraverso l'equazione (3) rappresentano un set completo di eventi mutuamente esclusivi, la cui somma è normalizzata sull'intera area. Ciò implica che l'assunzione di base che definisce la distribuzione di *Dirichlet* è formalmente soddisfatta.

Basandoci sull'affidabilità del catalogo degli ultimi 4000 anni delle eruzioni laterali all'Etna [Brancato et al., in preparazione], per la stima della distribuzione a priori il numero di dati equivalenti Λ è fissato a 10. In Figura 2 è rappresentata la distribuzione a posteriori a lungo termine.

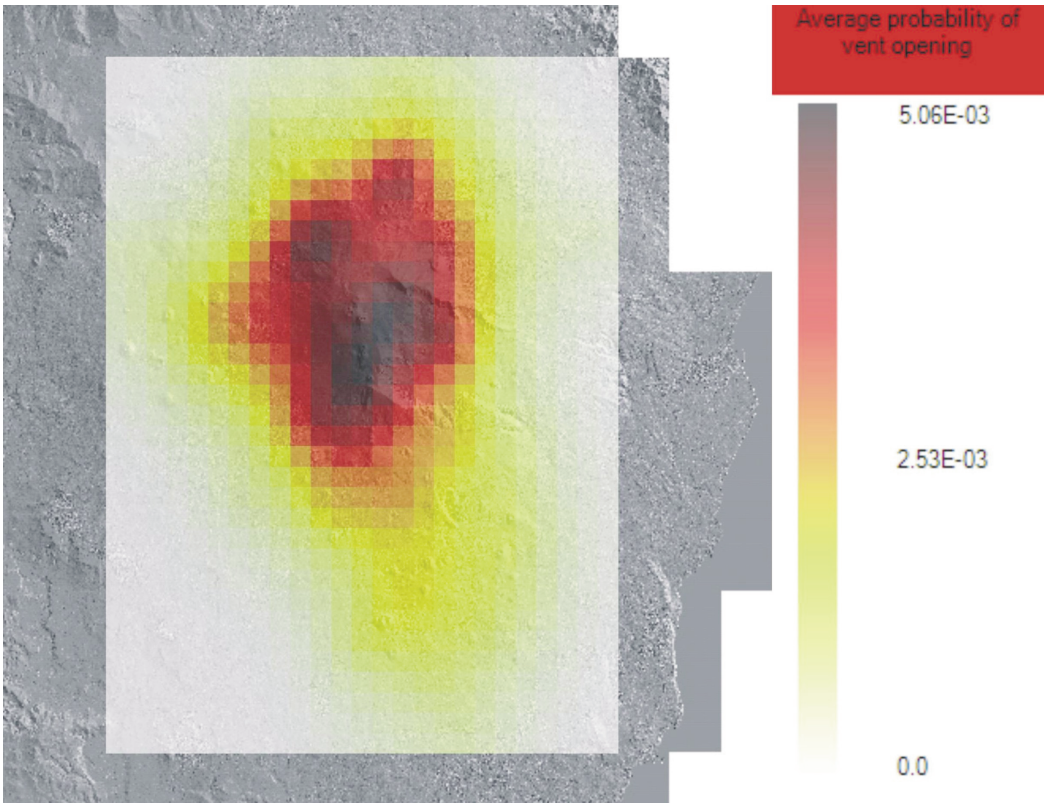


Figura 2 *Output* della distribuzione a posteriori a lungo termine all'Etna calcolata dall'algoritmo BET_EF.
Figure 2 Output of the long-term PDF at Mt. Etna as estimated by BET_EF algorithm.

Si nota come le aree più probabili siano quelle interessate dalla presenza dei *Rift* S (massimo valore di probabilità uguale a $5.06^{*}10^{-3}$), NE e O e della Valle del Bove, nonostante non sia trascurabile la probabilità di apertura del *vent* anche in zone più meridionali rispetto al *Rift* S, fino a raggiungere una quota intorno ai 500 m (s.l.m.).

3. Modulo 2: calcolo della *PDF* a breve termine

Il modulo 2 ingloba una serie di processi necessari per il calcolo della *PDF* a breve termine di apertura dei *vent* all'Etna a partire dall'analisi di dati di tremore vulcanico. Il modulo realizzato risulta suddiviso in due blocchi (Figura 3). Nel primo blocco viene effettuata l'elaborazione delle sorgenti di tremore, laddove il secondo blocco elabora la *PDF* a breve termine che rappresenta l'*input* per il modulo 3.
In dettaglio, nel primo blocco, l'area in analisi viene suddivisa in 850 celle di lato 1 km (stessa area utilizzata nel modulo 1). Viene quindi calcolato il numero di localizzazioni della sorgente del tremore vulcanico che cadono all'interno di ciascuna cella in cui resta diviso il dominio. Successivamente vengono eseguiti dei processi di trasformazione e normalizzazione dei dati elaborati che permettono di generare la relativa *PDF*, e, in particolare, di associare la massima probabilità di apertura di vent alla cella in cui viene contato il maggiore numero di sorgenti di tremore vulcanico.

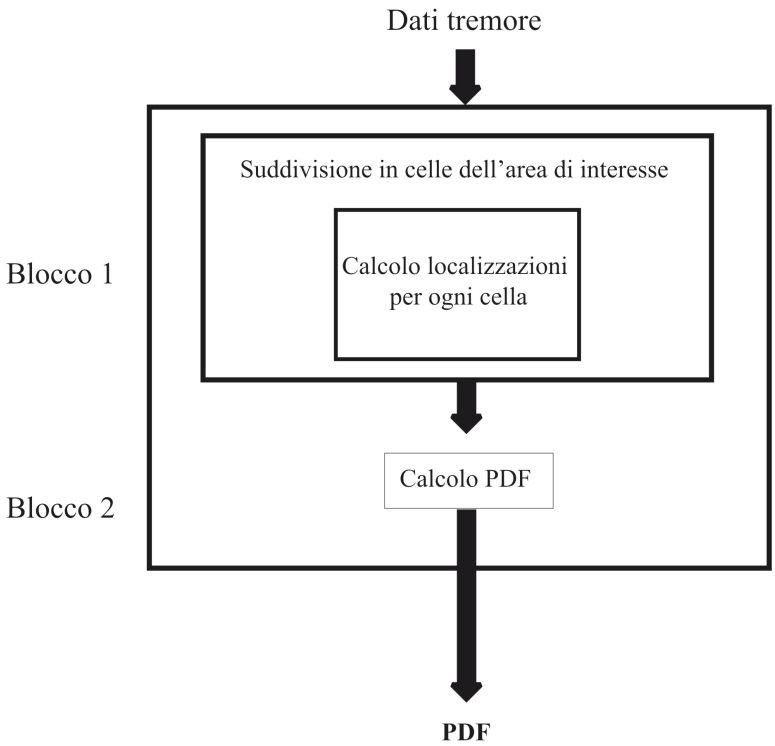


Figura 3 Schema a blocchi del modulo 2.
Figure 3 Block diagram of module 2.

4. Modulo 3: elaborazione dello scenario a breve termine

Il modulo 3 (anch'esso basato sul software BET_EF) ha come obbiettivo la valutazione di uno scenario a breve termine di apertura del *vent*. Tale scenario si basa su due differenti tipi di informazione: misure di monitoraggio (*dataset* **M**) e altre informazioni che non provengono direttamente dal monitoraggio (*dataset* $\bar{\mathbf{M}}$), che include dati del passato, modelli fisici e statistici). I due *dataset* sono inizialmente utilizzati per produrre due valutazioni differenti e poi combinati secondo la relazione [Marzocchi et al., 2008]

$$[\theta] = \gamma\left[\theta^{\{\mathbf{M}\}}\right] + (1-\gamma)\left[\theta^{\{\bar{\mathbf{M}}\}}\right] \qquad (4)$$

dove [.] indica la *PDF* e γ è una variabile nell'intervallo [0, 1] che rappresenta il peso relativo delle misure di monitoraggio rispetto a quelle del *dataset* (in particolare, se non si dispone di informazioni relative al monitoraggio, allora $\gamma = 0$). In dettaglio, tale variabile definisce il grado per cui i dati di monitoraggio (utili in prospettiva breve termine) controllano la probabilità a posteriori rispetto ai dati del *dataset* (utili in prospettiva lungo termine). In pratica, la variabile γ consente al codice BET_EF di cambiare dinamicamente da stime di probabilità a lungo termine, quando il vulcano è quiescente, a probabilità a breve termine durante una fase di *unrest* [Marzocchi et al., 2008]. È da sottolineare che non esiste a priori una prefissata percentuale da assegnare alle misure di monitoraggio rispetto a quelle di non monitoraggio e che la variabile di fatto rappresenta un'incognita che il codice calcola, rideterminandola ogni qualvolta siano presenti nuove informazioni disponibili.
L'input per il software BET_EF è costituito dalla *PDF* calcolata nel modulo 1 (*dataset* $\bar{\mathbf{M}}$) e dalla *PDF* calcolata nel modulo 2 (*dataset* **M**). In altre parole, la mappa a lungo termine, prodotto del modulo 1 (Figura 2), viene aggiornata ogni qualvolta il vulcano manifesta anomalie nei parametri di monitoraggio (*PDF* prodotta dal modulo 2), cambiando l'ottica temporale della previsione dal lungo a breve termine.
Lo scenario a breve termine così prodotto rappresenta l'*input* per il successivo modulo 4.

5. Modulo 4: valutazione della probabilità di invasione da colata lavica

L'*hazard* relativo alle eruzioni effusive laterali all'Etna viene valutato, dal modulo 4, tramite un algoritmo di simulazione numerica che utilizza come *input* lo scenario a breve termine calcolato nel modulo 3. Tale algoritmo di simulazione è stato utilizzato per valutare l'*hazard* connesso alla propagazione di flussi lavici prodotti da un campo vulcanico in prossimità di un impianto nucleare in Armenia [Connor et al., 2012].

Il modulo 4 necessita in ingresso di quattro file di testo: i) estensione dell'area di interesse (inteso come target; l'algoritmo indica, per ogni simulazione, se l'area di interesse è stata colpita o meno); ii) quote del terreno (in m), su cui effettuare le simulazioni, calcolate da un *Digital Elevation Model* (*DEM*); iii) intensità spaziale dei *vent* da simulare (*output* del modulo 3); iv) file di configurazione dei parametri di ingresso (estensione totale dell'area di simulazione, dimensione delle celle utilizzate, statistiche del volume da simulare e dello spessore residuo, numero *NV* di simulazioni da effettuare).

La probabilità di inondazione da colata lavica viene valutata effettuando una serie di *NV* simulazioni parallele (a partire da un unico file di configurazione) e contando quante volte ogni cella viene inondata da una colata lavica. Ogni simulazione inizia selezionando la posizione di una cella definita come punto di emissione (*vent*) e i valori di volume totale e spessore residuo (spessore minimo di lava che deve essere contenuto in una cella affinché essa possa cedere lava a quelle adiacenti) sulla base dei parametri definiti nel file di configurazione. In particolare, la posizione del *vent* viene selezionata casualmente in modo tale che la distribuzione di tutti gli *NV vent* simulati rispetti l'*output* del modulo 3. Il codice seleziona inoltre, stocasticamente, il volume totale e lo spessore residuo da utilizzare nella simulazione da due distribuzioni normali, i cui valori medi e deviazioni standard sono definiti nel file di configurazione. In ogni iterazione, la lava emessa dal *vent* viene distribuita alle celle adiacenti se la sua altezza effettiva (somma della quota della cella e dello spessore di lava) è maggiore rispetto a quella della cella adiacente proporzionalmente alla differenza di elevazione effettiva:

$$L_i = \frac{X_a D_i}{T} \qquad (5)$$

dove L_i si riferisce allo spessore di lava (in m) ricevuto da una cella adiacente, X_a è lo spessore di lava in eccesso (rispetto allo spessore residuo) in una cella attiva E_a, D_i rappresenta la differenza di quota tra l'elevazione effettiva di una cella attiva e di una cella adiacente ($D_i = E_a - E_i$) e T rappresenta la relativa somma $T = \sum_{i=1}^{NV} D_i$. Le iterazioni continuano finché non viene distribuito tutto il volume totale.

Risultato delle simulazioni sono *2 + NV* file di testo che definiscono: i) un file che riporta la posizione delle *NV* bocche eruttive simulate (coordinate E e N, in km); ii) un file dei relativi parametri di *input* selezionati (volume totale e spessore residuo) e se il corrispondente flusso ha colpito o meno l'area di interesse; iii) *n* file (uno per ogni flusso simulato) che riportano le coordinate E e N (in km) di ogni cella inondata dalla lava e il relativo spessore (in m) alla fine della simulazione. Questi file possono essere facilmente importati in un GIS permettendo, così, di valutare l'area totale coperta da ogni singola simulazione e la distribuzione dello spessore della stessa.

Gli *NV* file che definiscono la posizione delle celle inondate dalla lava e il relativo spessore sono poi utilizzati per calcolare la densità di simulazioni (numero di simulazioni che hanno interessato una determinata cella diviso per il numero totale *NV*). Si ottiene così una stima della probabilità di invasione da colata lavica che tiene conto della probabilità di apertura del *vent* (*output* del modulo 3).

6. Caso studio: simulazione della colata dell'eruzione maggio 2008 – luglio 2009

L'eruzione laterale dell'Etna, iniziata il 13 maggio 2008 e terminata il 6 luglio 2009, è stata scelta come caso studio per verificare la procedura oggetto del presente articolo definita per stimare la probabilità di invasione da colata lavica.

L'eruzione è stata preceduta da uno sciame sismico superficiale, i cui ipocentri, localizzati a NE dei crateri sommitali, tra 1.5 km sopra e 1.5 km sotto il livello del mare, hanno mostrato una diminuzione delle profondità focali verso N [Bonaccorso et al., 2011]. In particolare, il 13 Maggio 2008 la distribuzione degli ipocentri ha evidenziato una chiara migrazione degli eventi sismici verso la parte superiore del *Rift* di NE, suggerendo una propagazione verso N dell'intrusione magmatica. Un improvviso decremento dell'accadimento degli eventi sismici è coinciso con una propagazione a S delle fratture, verso la zona in cui la fessura eruttiva si è effettivamente aperta. I terremoti sono stati accompagnati da un graduale e forte aumento dell'intensità del tremore vulcanico [Di Grazia et al., 2009]. Poche ore prima dell'inizio dell'eruzione, il tremore vulcanico mostrava variazioni significative sia nell'ampiezza del segnale sia nella posizione della sorgente, sempre più superficiale e in spostamento verso E. Deformazioni del suolo di considerevole entità sono state inoltre registrate dalla rete GPS: le stazioni sommitali hanno rilevato spostamenti orizzontali di decine di centimetri, mentre piccole variazioni di pochi centimetri sono stati rilevate nelle altre stazioni [Aloisi et al., 2009].

L'eruzione del maggio 2008 – luglio 2009 ha prodotto, in Valle del Bove, un campo di lava composito che copre un'area di circa 5,5 x 10^6 m^2 e che ha raggiunto la distanza massima di 6,4 km già durante il primo giorno. Il volume finale relativo all'intero campo lavico è stato stimato tra 32 e 61 (x 10^6 m^3) e circa 2/3 sono stati messi in posto durante i primi quattro mesi dell'eruzione [Ganci et al., 2012]. Una piccola colata lavica è stata eruttata da una fessura apertasi il 13 maggio a circa 3000 metri s.l.m., localizzata immediatamente ad E dei crateri sommitali. Tale fessura è rimasta attiva solo durante i primi due giorni di eruzione, producendo un braccio localizzato nella parte più settentrionale della Valle del Bove che è arrivato nelle vicinanze di Monte Simone. Tale braccio ha coperto un'area di circa 0,8 x 10^6 m^2 e ha raggiunto una lunghezza di circa 2,9 km. Il campo lavi-

co principale è stato eruttato da una fessura apertasi, sempre il 13 maggio tra il Cratere di SE ed il Monte Rittmann, lungo la parete occidentale della Valle del Bove, tra 2900 e 2500 m s.l.m. [Behncke e Neri, 2008]. Tale campo lavico ha coperto un'area di circa 4,7 x 10^6 m^2, ha raggiunto una lunghezza di circa 6 km e i suoi fronti si sono arrestati nella parte meridionale della Valle del Bove (Figura 4). La breve durata, la limitatezza dell'area e la localizzazione del braccio lavico emesso dalla fessura posta a circa 3000 metri s.l.m. implicano che il relativo *hazard* sia poco significativo e quindi trascurabile. La lunga durata, la vasta area ricoperta e la localizzazione dei fronti del campo lavico principale, emesso dalla fessura tra 2900 e 2500 m s.l.m., comportano un *hazard* decisamente maggiore, giustificando la relativa simulazione oggetto del presente studio.

La *PDF* a breve termine è stata stimata applicando il modulo 2 alle localizzazioni delle sorgenti di tremore vulcanico registrate il 13 maggio 2008. Il risultato di tale analisi è la stima della probabilità, con valori superiori al 55%, per le celle interessate da anomalie nel tremore vulcanico; una probabilità nulla è calcolata al resto delle celle della griglia (Figura 5).

La *PDF* a breve termine così ottenuta è stata utilizzata come *input* per il modulo 3. Il codice BET_EF ha quindi elaborato lo scenario a breve termine mostrato in Figura 6 permettendo di individuare la cella più probabile (21.07%); in generale, altre due celle sono state caratterizzate da valori di probabilità pari a 19.66% e 9.94 %, rispettivamente. L'andamento spaziale del gruppo di celle si focalizza sul bordo della Valle del Bove (cella più probabile) e nell'area dei crateri sommitali (Figura 6).

È da sottolineare l'importanza della distribuzione di probabilità a lungo termine perché ridimensiona la stima per le celle più probabili poiché non esiste una cella per cui la probabilità stimata sia nulla (come prodotta nel modulo 2). In altre parole, la Figura 5 rappresenta una mappa che solo in apparenza è sovrapponibile a quella di Figura 6, dal momento che in quest'ultima sono stimate probabilità per tutte le celle della griglia a differenza di quanto accade nella Figura 5 che considera solo le celle interessate dall'anomalia in analisi.

La probabilità di invasione da colata lavica, relativa all'eruzione maggio 2008 - luglio 2009, è stata stimata lanciando una serie di 200 simulazioni dalla cella (di lato 1 km) che, nello scenario a breve termine calcolato nel modulo 3, è risultata avere la più alta densità di probabilità di apertura di *vent* (Figura 6). Tale cella è stata ricampionata utilizzando la griglia del *DEM* impiegato nelle simulazioni (cella 100 m).

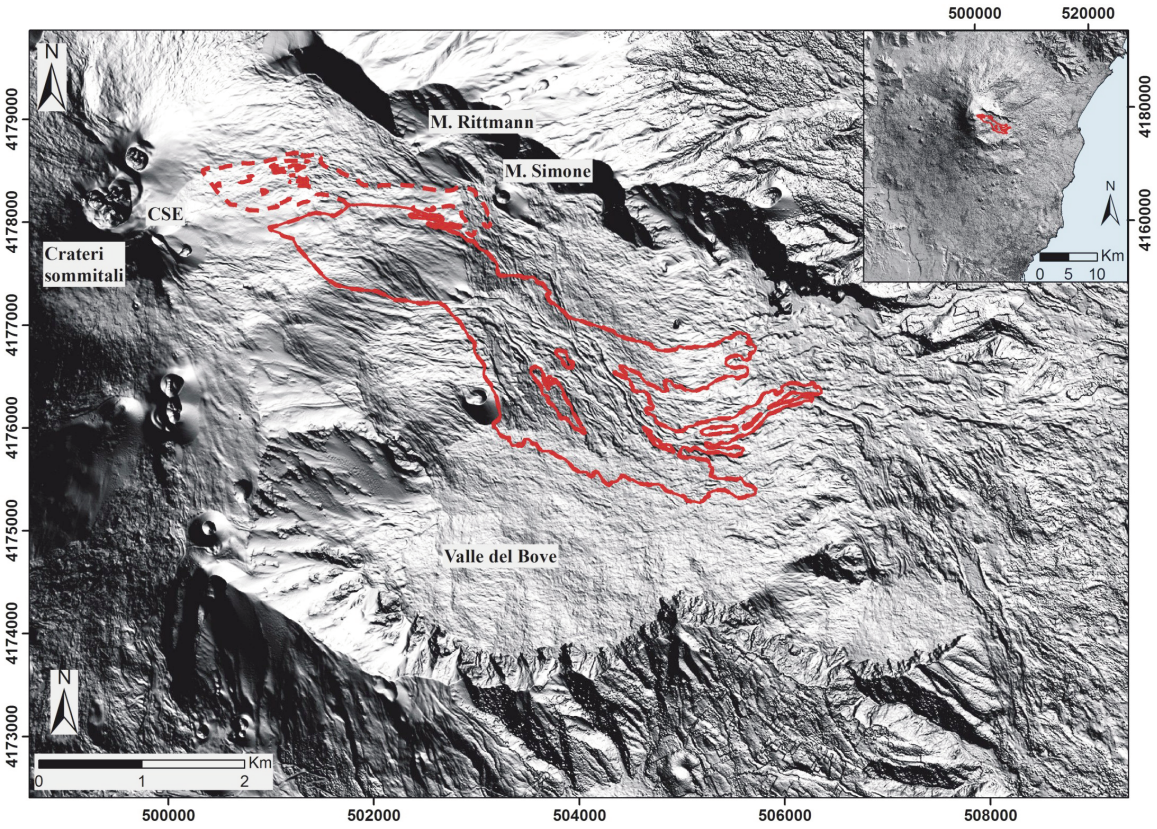


Figura 4 Campo lavico prodotto dall'eruzione del maggio 2008 – luglio 2009; le linee tratteggiate e continue delimitano le porzioni emesse rispettivamente dalle fessure eruttive a 3000 m e a 2900 m s.l.m (lungo cui è localizzato il *vent* principale). L'inserto in alto a destra mostra la posizione del campo lavico rispetto all'intero edificio vulcanico.

Figure 4 Lava field produced by the eruption of May 2008 - July 2009; the dotted and solid lines delimit the portions emitted by the fissures at 3000 m and 2900-2500 m a.s.l. (where the main vent is located), respectively. The upper right inset shows the location of the lava field on to the volcanic edifice.

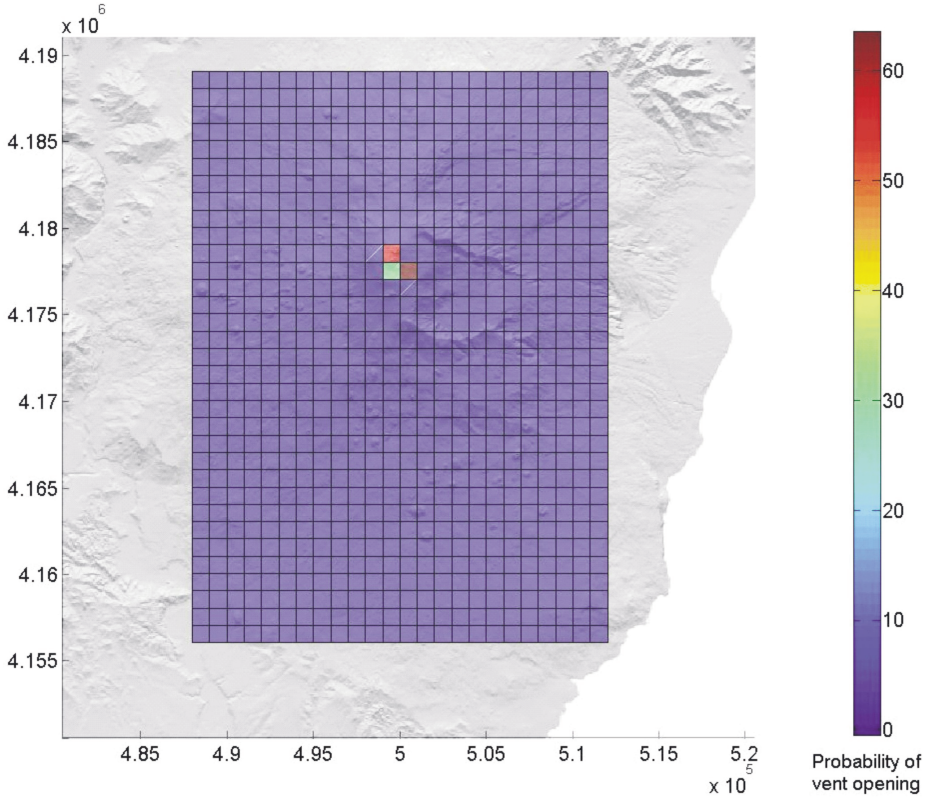


Figura 5 *PDF* a breve termine calcolata dalle localizzazioni delle sorgenti di tremore registrate il 13 maggio 2008. In rosso la cella cui viene associata la massima probabilità.
Figure 5 Short term *PDF* evaluated from the locations of tremor sources registered on May 13, 2008. The cell with the highest probability is coloured in dark red.

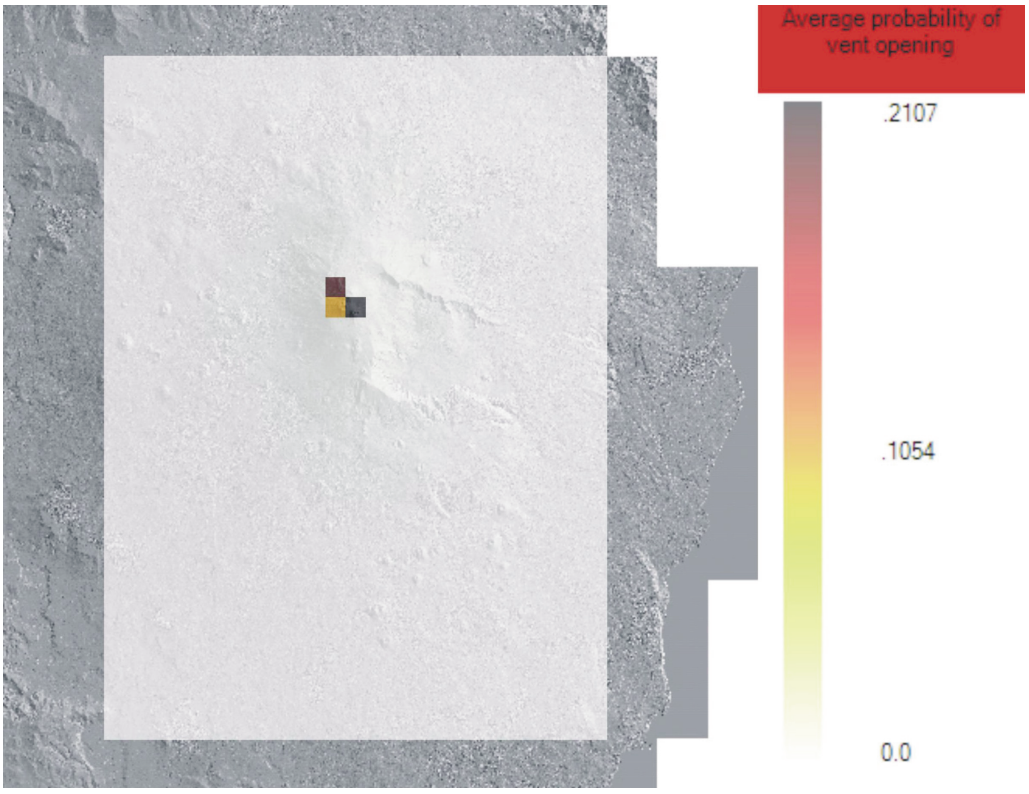


Figura 6 Scenario a breve termine di apertura di vent stimato in base alle anomalie nei parametri di monitoraggio (localizzazione delle sorgenti di tremore) registrate il 13 maggio 2008. In nero la cella cui è associata la massima probabilità.
Figure 6 Short-term scenario for vent opening evaluated based on anomalies of the monitoring parameters (the locations of tremor sources) recorded on May 13, 2008. The cell with the highest probability is black coloured.

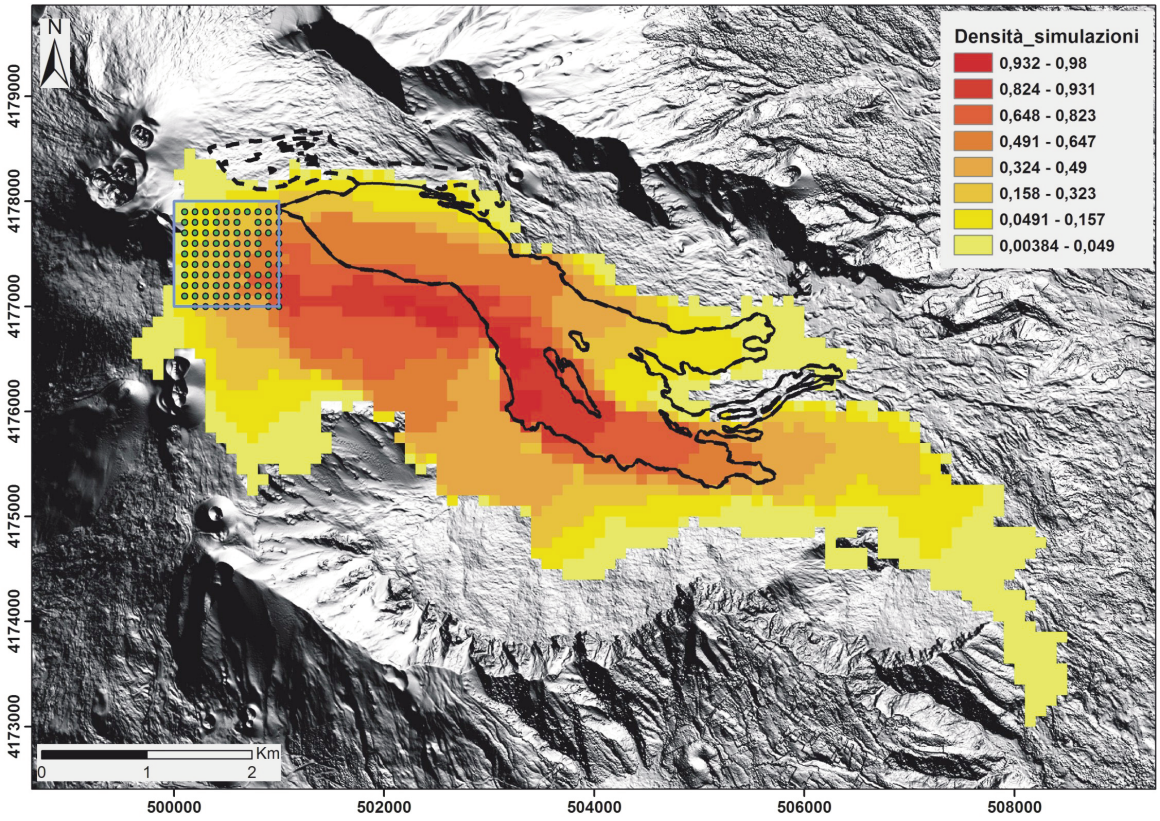


Figura 7 Densità di simulazioni, le classi dal giallo al rosso, così come riportate in legenda, corrispondono rispettivamente al 5°, 16°, 33°, 50°, 66°, 84°, 95° e 100° percentile. La linea nera delimita la porzione del campo lavico emessa dal *main vent;* i punti verdi rappresentano i *vent* simulati; il quadrato blu indica la cella a maggiore probabilità di apertura di *vent.*
Figure 7 Simulation density, classes from yellow to red, as shown in legend, correspond to 5th, 16th, 33rd, 50th, 66th, 84th, 95th and 100th percentile. The black line delimits the portion of the lava field emitted from the main vent; green dots represent the simulated vents; the blue square indicates the cell with the highest probability of vent opening.

È stato quindi estratto un file di testo contenente le coordinate dei centroidi di 100 celle ai quali è stata assegnata una densità di probabilità pari a 0,01 in modo tale che risultassero tutte equiprobabili. Il *main vent* dell'eruzione maggio 2008 – luglio 2009 è localizzato sul bordo NO della cella selezionata. I parametri (volume totale e spessore residuo) utilizzati per le simulazioni (Tabella 1) sono stati calcolati considerando i volumi riportati in Ganci et al. [2012] e calcolando lo spessore medio come volume diviso l'area del campo lavico emesso dal *vent* principale (Figura 5). La densità relativa alle 200 simulazioni è mostrata in Figura 7 in cui le varie classi sono suddivise in base ai percentili 5°, 16°, 33°, 50°, 66°, 84°, 95° e 100°. Il confronto tra la densità di probabilità ottenuta dalle simulazioni e la porzione del campo lavico maggio 2008 - luglio 2009 emessa dal *main vent* mostra che l'area coperta dalla colata in studio corrisponde ad una densità di probabilità variabile tra il 100° e il 16° percentile. Questa rappresentazione ci dimostra che le aree interessate da una probabilità di invasione da colata lavica che va dal 100% a circa il 20% coincide con l'area effettivamente coperta dal campo di lava dell'eruzione del maggio 2008 – luglio 2009.

La cella con probabilità pari a 19.66% ricopre l'area dei crateri sommitali (Figura 6) e la relativa simulazione dovrebbe essere effettuata considerando parametri di input (volume totale e spessore residuo) caratteristici delle eruzioni sommitali. Inoltre, è da rilevare che la frequente sovrapposizione dei campi lavici emessi dai crateri sommitali non consente di disporre di informazioni sufficientemente accurate e dettagliate riguardo i parametri necessari alla simulazione. Infine, la valutazione dell'*hazard* relativo ad eruzioni sommitali esula dallo scopo del nostro studio.

Log (vol.) (m3)			Spessore (m)		
min/max	*media*	*dev. standard*	*min/max*	*media*	*dev. standard*
7.4/7.7	7.6	7.2	5.9/11.2	8.5	3.8

Tabella 1 Statistiche sul logaritmo del volume e sullo spessore utilizzati come input del modulo 4.
Table 1 Statistics on the logarithm of volume and thickness used as input for module 4.

7. Automatizzazione del processo

L'intera procedura di calcolo è stata progettata in modo da automatizzare il processo presentato nel primo paragrafo del presente lavoro. Il diagramma di Figura 1 è stato automatizzato mediante la realizzazione di software, detti *unloader*, volti al *download* dei dati dal *database* dell'INGV-OE (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - Osservatorio Etneo), da una serie di *script batch* per la sincronizzazione dei moduli di processamento impiegati per il calcolo della *PDF* e per la generazione della mappa relativa alla probabilità di invasione da colata lavica.

L'intero processo è schedulato su un PC dedicato alle elaborazioni e viene eseguito con cadenza giornaliera.
Più in dettaglio, i moduli *unloader* sono dei software realizzati per il *download* dei dati sismo-vulcanici (localizzazione del tremore vulcanico). All'esecuzione, avviata mediante *script batch*, i moduli *unloader* eseguono una connessione al *database* dell'INGV-OE scaricando all'interno di un'opportuna cartella il file *tremor_loc.csv* relativo al giorno analizzato.
Eseguito il download dei dati, lo *script batch* eseguirà il processo di stima della *PDF* (modulo 2 e modulo 3 di Figura 1).
I moduli per la stima della *PDF* sono costituiti da processi realizzati in ambiente Matlab e compilati in file binari esegui-

E (m)	N (m)	probabilità
5.0005000e+005	4.1780500e+006	1.0000000e-001
5.0005000e+005	4.1781500e+006	1.0000000e-001
5.0005000e+005	4.1782500e+006	1.0000000e-001
5.0005000e+005	4.1783500e+006	1.0000000e-001
5.0005000e+005	4.1784500e+006	1.0000000e-001
5.0005000e+005	4.1785500e+006	1.0000000e-001
5.0005000e+005	4.1786500e+006	1.0000000e-001
5.0005000e+005	4.1787500e+006	1.0000000e-001
5.0005000e+005	4.1788500e+006	1.0000000e-001
5.0005000e+005	4.1789500e+006	1.0000000e-001
5.0015000e+005	4.1780500e+006	1.0000000e-001
5.0015000e+005	4.1781500e+006	1.0000000e-001
5.0015000e+005	4.1782500e+006	1.0000000e-001
5.0015000e+005	4.1783500e+006	1.0000000e-001
5.0015000e+005	4.1784500e+006	1.0000000e-001
5.0015000e+005	4.1785500e+006	1.0000000e-001
5.0015000e+005	4.1786500e+006	1.0000000e-001
5.0015000e+005	4.1787500e+006	1.0000000e-001
…	…	…

Figura 8 Esempio di file *ASCII* contenente la PDF in uscita dal modulo 3. Le prime due colonne contengono le coordinate E e N della cella e la terza colonna riporta la relativa probabilità.
Figure 8 Example of ASCII file output of module 3. First two columns contain the coordinates E and N of the cell and third column the associated probability.

E (m)	N (m)	Spessore (m)	Simulazione
500800	4177800	6.20000000	13
500800	4177700	6.23197174	13
500800	4177800	6.23197174	13
500800	4177600	6.23197174	13
500900	4177700	6.23197174	13
500900	4177800	6.23197174	13
500900	4177600	6.23197174	13
501000	4177700	6.23197174	13
500800	4177500	6.23197174	13
501000	4177800	6.23197174	13
501000	4177600	6.23197174	13
501100	4177700	6.36791941	13
500900	4177500	6.23197174	13
500800	4177900	6.47784321	13
501000	4177500	6.23197174	13
501100	4177600	6.23197174	13
501200	4177700	6.63817169	13
501100	4177800	6.23197174	13
…	…	…	…

Figura 9 Esempio di file *ASCII* in uscita dal modulo 4. Le prime due colonne contengono le coordinate E e N della cella, la terza colonna lo spessore della colata e la quarta il numero relativo alla simulazione effettuata.
Figure 9 Example of ASCII file output of module 4. The first two columns contain the coordinates E and N of the cell, the third column reports the lava thickness and the last one the simulation number.

bili direttamente sul sistema operativo; eseguita l'elaborazione, la matrice relativa alla *PDF* viene salvata all'interno di un file *ASCII* diviso in colonne dove vengono riportate le coordinate E e N della cella (coordinate UTM-WGS84 33N) e una terza colonna in cui viene riportata la probabilità stimata per la relativa cella (Figura 8).

Lo *step* successivo dello *script batch* consiste nell'esecuzione dello *script* costituente il modulo 4 (Figura 1), scritto in linguaggio *Perl* e proposto in Connor et al. [2012]. Infine, l'*output* del modulo 4 è costituito da un file *ASCII* diviso in colonne dove vengono riportate le coordinate E e N della cella (coordinate UTM-WGS84 33N), lo spessore della colata e il numero relativo alla simulazione effettuata (Figura 9).

Infine, tramite un opportuno modulo, sempre realizzato in Matlab, l'*output* del modulo 4 è convertito in un file *geotiff* che viene caricato all'interno del *geodatabase* dell'INGV-OE [Montalto et al., 2016] e viene visualizzato mediante *webgis* (Figura 10 e Figura 11).

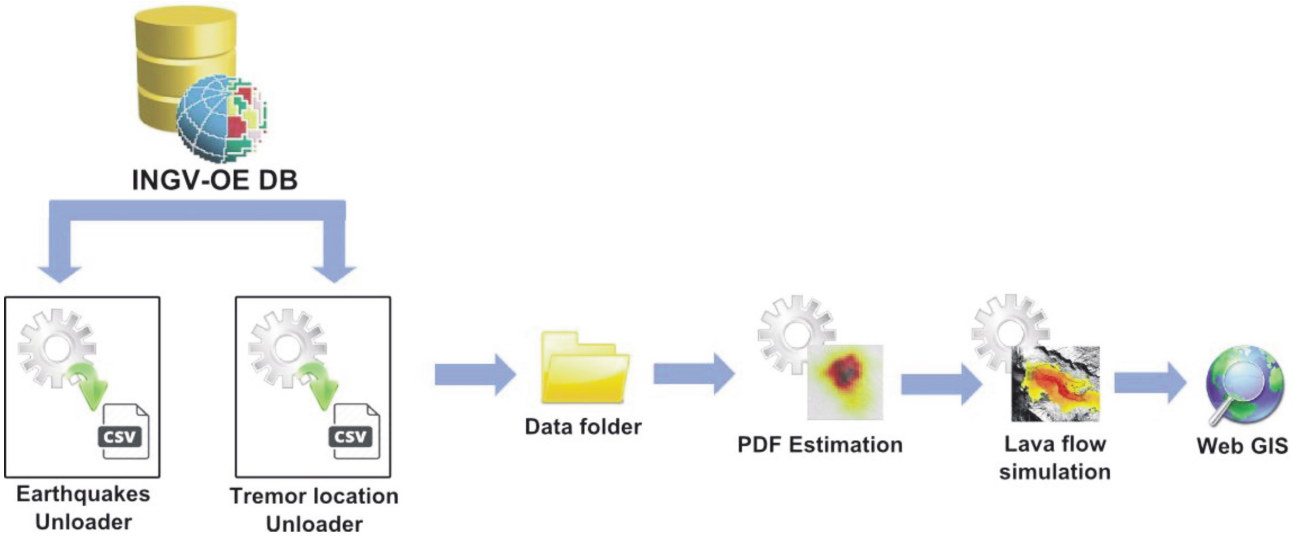


Figura 10 Automatizzazione del processo di generazione della mappa relativa alla probabilità di invasione da colata lavica.
Figure 10 Automatization of the process for generating probability map of lava flow invasion.

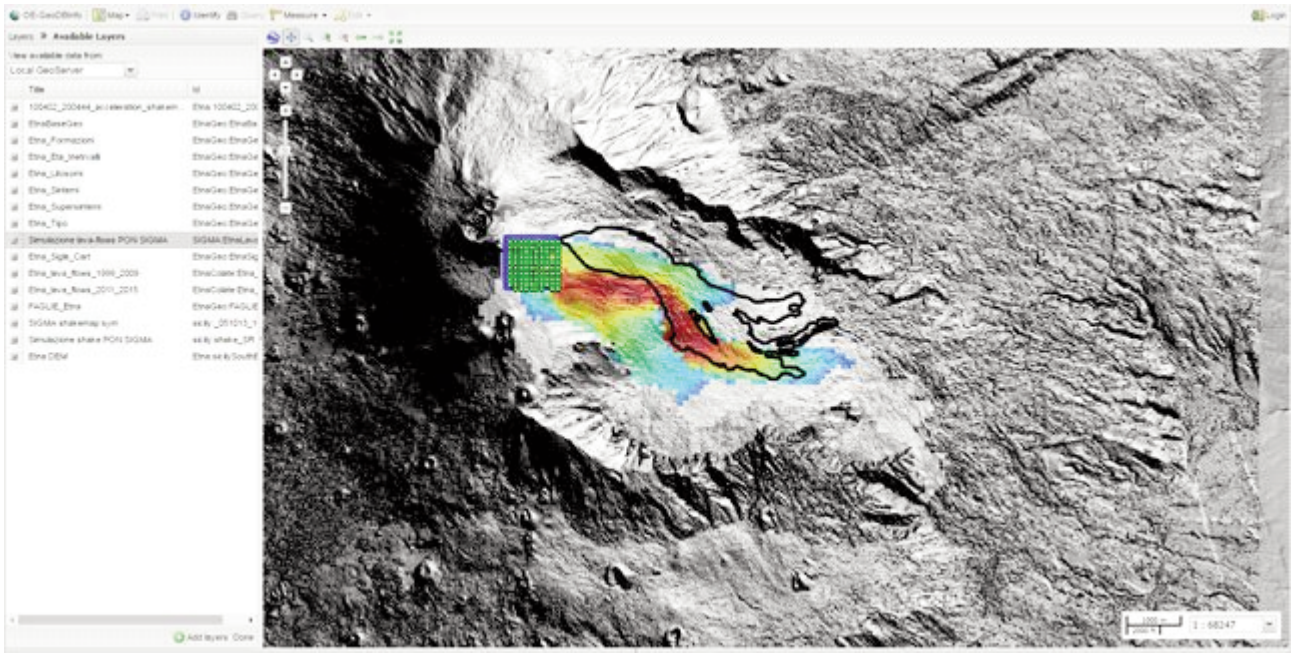


Figura 11 Visualizzazione della densità di simulazioni all'interno del webgis dell'INGV-OE.
Figure 11 Displaying of the simulation density on the INGV-OE webgis.

Conclusioni

In questo lavoro è stato presentato un sistema per la valutazione di mappe di pericolosità derivanti dall'accadimento di eruzioni effusive lungo i fianchi del vulcano Etna. Tali mappe vengono elaborate mediante una procedura automatizzata in grado di valutare in tempo quasi reale l'area interessata dall'apertura di una bocca effusiva e la probabilità che l'area adiacente tale bocca venga invasa da colate laviche. L'*hazard* vulcanico a lungo termine è stato stimato a partire dalla localizzazione dei *vent* delle eruzioni effusive laterali degli ultimi 4000 anni (i.e. 154). L'analisi dei dati di monitoraggio (tremore), che descrivono lo stato attuale del vulcano, ha permesso di integrare lo scenario a lungo termine trasformandolo in una *PDF* a breve termine. Tale *PDF* ha consentito di individuare la zona con maggiore probabilità di apertura di *vent*, aumentando la differenza nei valori relativi tra la stessa zona e il resto dell'edificio vulcanico. È stata quindi eseguita una serie di 200 simulazioni per valutare le aree soggette ad un più alto pericolo di invasione lavica.
L'intera procedura è stata testata analizzando l'intrusione finale dell'eruzione laterale dell'Etna verificatasi nel maggio 2008 - luglio 2009. La posizione del *vent* realmente apertosi ricade nella cella per la quale è stata calcolata la più alta probabilità di apertura di *vent*, così come calcolata nella *PDF* a breve termine (modulo 3). La densità dei flussi simulati a partire da tale cella ha mostrato che l'area caratterizzata da una più alta probabilità di invasione lavica ricade all'interno dell'area effettivamente coperta dal campo lavico dell'eruzione considerata. La parte sommitale della colata maggio 2008 – luglio 2009 non viene interessata dalla maggioranza delle simulazioni, che si concentrano più a sud, in quanto il *vent* realmente apertosi è localizzato vicino al vertice NE della cella caratterizzata dalla più alta probabilità di apertura e su cui sono distribuiti i *vent* simulati.

Ringraziamenti

I risultati di questo lavoro sono stati ottenuti nell'ambito del progetto PON01_00683 SIGMA (Sistema Integrato di sensori in ambiente cloud per la Gestione Multirischio Avanzata).

Bibliografia

Behncke B. e Neri M., (2008). Eruzione dell'Etna del 13-14 Maggio 2008 – sopralluoghi con elicottero. RPTVGSTR20080514.

Bonaccorso A., Bonforte A., Calvari S., Del Negro C., Di Grazia G., Ganci G., Neri M. Vicari A. and Boschi E., (2011). *The initial phases of the 2008–2009 Mount Etna eruption: A multidisciplinary approach for hazard assessment*. Journal of Geophysical Research, 116, B03203, doi:10.1029/2010JB007906.

Branca S., Coltelli M., De Beni E. and Wijbrans J., (2008). *Geological evolution of Mount Etna volcano (Italy) from earliest products until the first central volcanism (between 500 and 100 ka ago) inferred from geochronological and stratigraphic data*. International Journal of Earth Science (Geol. Rundsch.), 97, 135–152.

Branca S., Coltelli M. and Groppelli G., (2011). *Geological evolution of a complex basaltic stratovolcano: Mount Etna*. Italian Journal of Geoscience, 130 (3), 306-317.

Brancato A., Tusa G., Coltelli M., Proietti C., Branca S.. *Vent Pattern Analysis at Mount Etna volcano (Sicily): a tool to infer flank eruptions*. In preparazione.

Connor L.J., Connor C.B., Meliksetian K., Savov I. (2012). *Probabilistic approach to modeling lava flow inundation: a lava flow hazard assessment for a nuclear facility in Armenia*. Journal of Applied Volcanology, 1:3, doi:10.1186/2191-5040-1-3.

Di Grazia G., Cannata A., Montalto P., Patanè D., Privitera E., Zuccarello L., Boschi E. (2009). *A multiparameter approach to volcano monitoring based on 4D analyses of seismo volcanic and acoustic signals: The 2008 Mt. Etna eruption*. Geophysical Research Letters 36 (18), doi:10.1029/2009GL039567.

Ganci G., Vicari A., Cappello A., Del Negro C., (2012). *An emergent strategy for volcano hazard assessment: From thermal satellite monitoring to lava flow modeling*. Remote Sensing of Environment, 119, 197–207.

Gelman A., Carlin J.B., Stern H.S., Rubin D.B., (1995). *Bayesian Data Analysis*. Chapman and Hall/CRC, London.

Marzocchi W., Sandri L., Gasparini P., Newhall C., Boschi E., (2004). *Quantifying probabilities of volcanic events: The example of volcanic hazard at Mount Vesuvius*. Journal of Geophysical Research, 109 B11201, doi: 10.1029/2004JB00315U.

Marzocchi W., Sandri L., Selva J., (2008). *BET_EF: a probabilistic tool for long- and short-term eruption forecasting*. Bulletin of Volcanology, 70, 623-632.

Montalto P., De Beni E., Cassisi C., Aliotta M., D'Agostino M., Mangiagli S., Prestifilippo M. e Torrisi O., (2016). *Il geodatabse dell'INGV della Sezione di Catania – Osservatorio Etneo: progettazione ed implementazione*. Rapporti Tecnici INGV, n. 351.

Parzen E., (1962). *On estimation of a probability density function and mode*. Annals of Mathematical Statistics, doi:10.1214/aoms/1177704472.

Indice

Introduzione 5

1. Procedura di valutazione della mappa di pericolosità 5

2. Modulo 1: calcolo della PDF a lungo termine 6

3. Modulo 2: calcolo della PDF a breve termine 8

4. Modulo 3: elaborazione dello scenario a breve termine 8

5. Modulo 4: valutazione della probabilità di invasione da colata lavica 8

6. Caso studio: simulazione della colata dell'eruzione maggio 2008 – luglio 2009 9

7. Automatizzazione del processo 13

Conclusioni 15

Ringraziamenti 15

Bibliografia 15

ISSN 1590-2595

Quaderni di Geofisica

http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/quaderni-di-geofisica/

I Quaderni di Geofisica coprono tutti i campi disciplinari sviluppati all'interno dell'INGV, dando particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari, che per tipologia e dettaglio necessitano di una rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. La pubblicazione on-line fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

ISSN 2039-7941

rapporti tecnici INGV

http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/rapporti-tecnici-ingv/

I Rapporti Tecnici INGV pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico e di rilevante interesse tecnico-scientifico per gli ambiti disciplinari propri dell'INGV. La collana Rapporti Tecnici INGV pubblica esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

ISSN 2039-6651

miscellanea INGV

http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/miscellanea-ingv/

La collana Miscellanea INGV nasce con l'intento di favorire la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV (sismologia, vulcanologia, geologia, geomagnetismo, geochimica, aeronomia e innovazione tecnologica). In particolare, la collana Miscellanea INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli ecc..

Coordinamento editoriale e impaginazione
Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale
Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2017 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Via di Vigna Murata, 605
00143 Roma
Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

http://www.ingv.it



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia