

PRIME STIME MEDIANTE SIMULAZIONI NUMERICHE DELLE VELOCITA' DI LANCIO DI EJECTA ALLO STROMBOLI E VALUTAZIONI SUL RISCHIO VULCANICO INDOTTO

RICCARDO RASÀ, *^[a] ALESSANDRO TRIPODO,^[a] SERGIO CASELLA,^[a] GERMANA PISACANE,^[a]
SALVATORE PROVENZANO,^[a] AND MONICA LIA SZILAGYI^[b]

(Nota presentata dal Socio Ordinario Laura Bonfiglio)

ABSTRACT. The typical strombolian activity of Stromboli volcano ranges from a nearly continuous venting of ash and gases (*normal strombolian activity*) to moderate, up to violent explosive pulses (*violent strombolian activity*). Moreover, both regimes are sometimes punctuated without warning by phases of scaled up, distinct and more energetic huge bursts separated by time intervals ranging from minutes to hours (*paroxysmal activity*). As this eruptive style causes the blasting from the summit vents of hot fragments of new lava and blocks with different velocities, densities and impact sites, the main volcanic risk at Stromboli is related to the hazard due to ballistic showers of these ejecta on the built-up areas of the island (Stromboli and Ginostra villages).

For that reason i) a land use map of the island has been produced and ii) a number of numerical simulations of ballistic trajectories for to constrain the velocity ranges of the three different explosive regimes has been performed with the "Eject!" software (L.G. Mastin, 2001) by using the average density of dense blocks (2800 kg/m^3) and juvenile bombs (1970 kg/m^3) from a set of 44 ejecta that we collected on the flanks of the volcano.

The reliable ranges of initial velocity at the takeoff point (summit vents) that we obtained are: $40 \text{ m/s} \div 60 \text{ m/s}$ for normal strombolian activity, $70 \text{ m/s} \div 100 \text{ m/s}$ for violent strombolian activity and $120 \text{ m/s} \div 200 \text{ m/s}$ for paroxysmal strombolian activity.

Without wind, the cross-correlation of the land use - velocity data indicates that both for the villages of Stromboli and Ginostra an ejecta impact probability is realistic only in paroxysmal activity periods, while it's definitively absent during normal and violent strombolian regimes.

Following tail-winds = 25 m/s simulations (wind velocity sometimes observed at the Stromboli island), the resulting hazard increases with respect to the tail-winds = 0 m/s simulations for both Stromboli and Ginostra during the paroxysmal regime, and become appreciable for the Ginostra village even during violent strombolian activity.

1. Introduzione

Lo stile eruttivo tipico di Stromboli [1 - 11] è l'espulsione con traiettorie balistiche di brandelli di lava, scorie di lancio, bombe e blocchi dalle bocche sommitali sotto regimi esplosivi a differente energia, classificati per lo Stromboli come stromboliano normale,

violento e parossistico essenzialmente sulla base delle distanze raggiunte dagli ejecta durante gli impulsi esplosivi nel corso della sua attività storicamente documentata [6, 11-14]. Ne consegue che la quantificazione del rischio vulcanico a Stromboli è strettamente legata sia all'impatto di questi ejecta durante i differenti regimi sulle aree dell'isola a diverse tipologie d'uso, ed in particolare sulle due aree edificate rappresentate dai villaggi di Stromboli e Ginostra, sia ad una accurata quantificazione dei parametri caratteristici dei tre regimi eruttivi in termini di stime fisicamente plausibili delle velocità di lancio che a questi competono.

In altre parole, la capacità di prevedere gli effetti di questi differenti regimi esplosivi in termini di impatto sulle vite umane e sulle strutture antropiche, dipende in prima analisi da: *i*) livello di significatività delle modellizzazioni numeriche di lanci balistici in aria tramite metodi di back analysis su parametri realmente attendibili misurati su un ampio set di ejecta raccolti in pieno campo (come ad es., distanze dei siti di impatto dalle bocche eruttive, dimensioni e peso di volume dei clasti eiettati [15]); *ii*) conoscenza del reale assetto territoriale dell'area indagata con particolare riferimento agli elementi territoriali di natura edificatoria.

In questo lavoro sono stati vincolati gli intervalli di velocità di lancio che competono ai diversi regimi esplosivi tramite numerose simulazioni numeriche di lanci balistici mediante il software dedicato Eject! di L.G. Mastin [16], utilizzando dati di laboratorio e di campagna ricavati da un set di 44 ejecta raccolti allo Stromboli nell'estate del 2004 insieme a plausibili, anche se preliminari, dati termo-barometrici. Sono stati inoltre redatti due documenti cartografici tematici (uso reale del suolo; aree di massima vulnerabilità ai lanci balistici) che, insieme alle simulazioni effettuate, hanno consentito una prima valutazione del livello di esposizione dei centri abitati dell'isola alla caduta balistica di ejecta nei vari regimi eruttivi ed una prima caratterizzazione delle velocità di lancio durante gli stessi regimi.

2. Rilevamenti di campo e campionatura di ejecta

Analizzando gli aspetti fisici dei lanci balistici in aria [17 - 20], emerge come nel calcolo delle traiettorie e delle distanze massime raggiunte, oltre all'angolo di lancio, dimensione e forma dei frammenti, giochi un ruolo cruciale il peso di volume (bulk density) dei clasti eiettati [21]. Altrettanto utili ai fini di una analisi del rischio associato ai lanci balistici stromboliani sono poi le distanze critiche dalla bocca di lancio delle aree ritenute significative in termini di valore oggettivo.

Considerato che in letteratura non esistono dati attendibili sul peso di volume dei clasti balistici di Stromboli, si è proceduto ad una raccolta sistematica in pieno campo di ejecta il più possibile riconducibili all'attività di lancio delle attuali bocche eruttive. Il campionamento, che comprende scorie di lancio, blocchi densi rigettati e bombe più o meno vescicolate con forme aerodinamiche (in totale 44 campioni), è stato effettuato in tre differenti località sui settori medio-bassi del vulcano (Fig. 1) poichè, per motivi di sicurezza, la Protezione Civile non ha consentito l'accesso alle aree sommitali. Per ogni campione è stata redatta, al momento del prelievo, una scheda tecnica ad uso interno comprendente: *a*) morfologia e morfometria dell'eietto; *b*) caratteristiche fisiografico-clivometriche del sito di impatto; *c*) coordinate geografiche mediante posizionamento GPS; *d*) quota topografica;

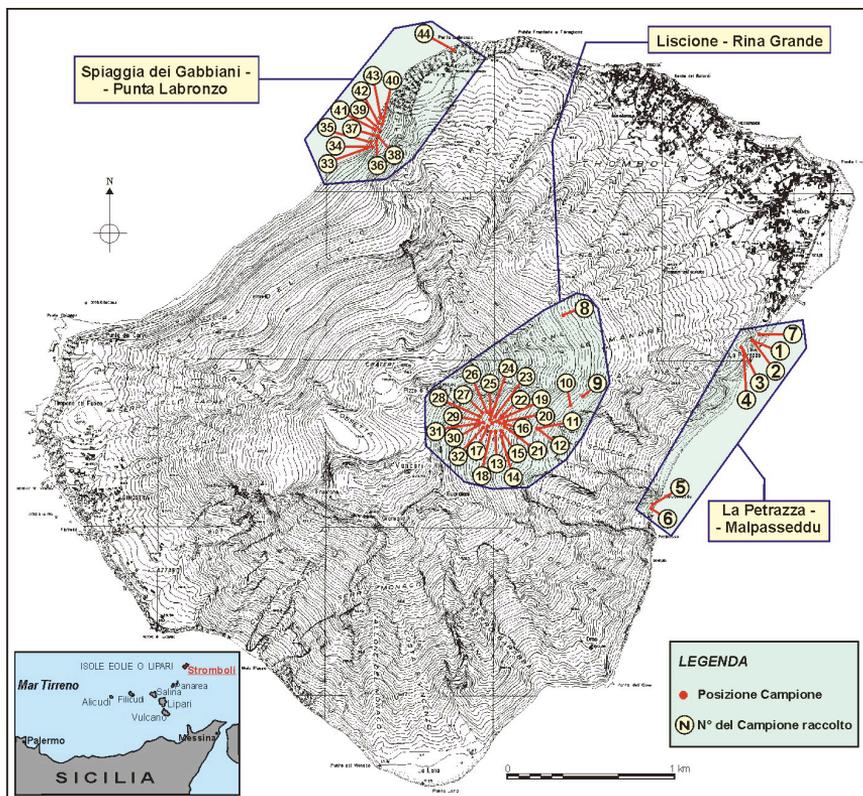


Fig. 1 - Localizzazione dei punti di campionamento degli ejecta raccolti.

e) distanza planimetrica dalle attuali bocche eruttive. Una parte di queste informazioni sono state poi utilizzate per le successive simulazioni numeriche.

Contestualmente all'attività di individuazione e raccolta degli ejecta, sono state individuate e cartografate in modo speditivo le principali tipologie d'uso del suolo (con particolare riferimento agli elementi d'uso legati agli aspetti di natura edificatoria), che successivamente sono state implementate con l'analisi di foto aeree per la realizzazione di una carta dell'uso reale del suolo dell'intera isola (scala 1:10.000) e di una ulteriore carta derivata da quest'ultima, che riassume graficamente le informazioni plano-altimetriche ed angolari sulle zone a massima vulnerabilità ai lanci balistici con riferimento alle attuali bocche di lancio.

3. Carta dell'Uso Reale del Suolo

Per la realizzazione della Carta dell'Uso Reale del Suolo (Fig. 2) sono stati utilizzati stereomodelli da foto aeree pancromatiche colore e B/N (sorvolo ATA del 05/07/87, id. 253, quota media di volo 3000 m s.l.m.; sorvolo ATA del 06/09/97, id. 3022, quota media di volo 3400 m s.l.m.) ad integrazione dei rilevamenti speditivi preliminarmente condotti in pieno campo. La prima macrodistinzione effettuata sul campo tra le tipologie individuate

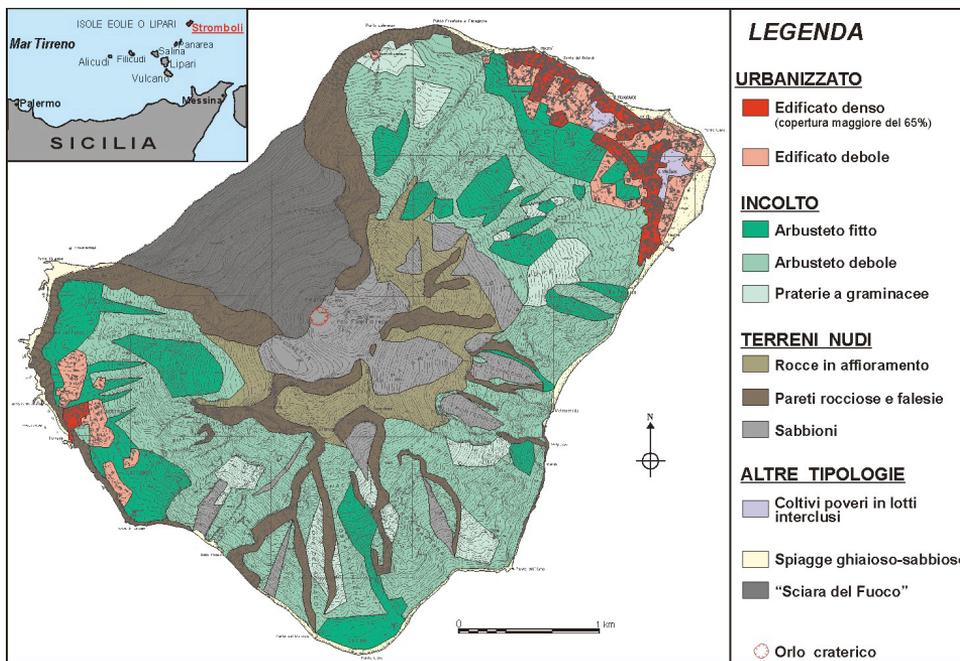


Fig. 2 - Carta dell'Uso Reale del Suolo dell'isola di Stromboli.

(urbanizzato, incolto e terreni nudi), è servita essenzialmente per tarare lo studio aerofotogrammetrico attraverso il quale, con successivi gradi di approfondimento, si è giunti al frazionamento dei tre macrotipi in ulteriori tipologie distinte fino a coprire l'intera isola. La carta finale è stata successivamente validata attraverso controlli di verità al suolo.

In particolare le aree urbanizzate, che possono essere individuate esclusivamente nei due villaggi di Stromboli e Ginostra (il Semaforo di Punta Labronzo, punto di osservazione della Marina Militare, è abbandonato da anni), rispettivamente lungo la costa nord-orientale e sud-occidentale dell'isola, sono state classificate in:

- *Edificato denso* (2,57% della superficie totale);
- *Edificato debole* (3,93% della superficie totale).

Se consideriamo il rapporto di urbanizzazione (R_U), e cioè il rapporto tra le percentuali delle due tipologie di edificato relativamente a ciascun centro abitato, risulta chiaramente che solo il villaggio di Stromboli ($R_U = 0,81$) può essere considerato un vero centro abitato con un nucleo abitativo storico, mentre Ginostra, con un valore di R_U quasi cinque volte più basso (0,17), si presenta come un insieme di nuclei sparsi di abitazioni. Occorre sottolineare che la copertura di edificato è comunque estremamente bassa rispetto all'intero areale insulare ($\sim 12,5 \text{ km}^2$), con uno sviluppo complessivo di $0,81 \text{ km}^2$.

4. Carta delle aree di massima vulnerabilità ai lanci balistici

Dall'analisi della carta dell'uso reale del suolo emerge con chiarezza come le aree di massima vulnerabilità ai lanci balistici di scorie, bombe e blocchi siano strettamente connesse con la localizzazione plano-altimetrica delle limitate aree edificate dell'isola rispetto alle attuali bocche di lancio,

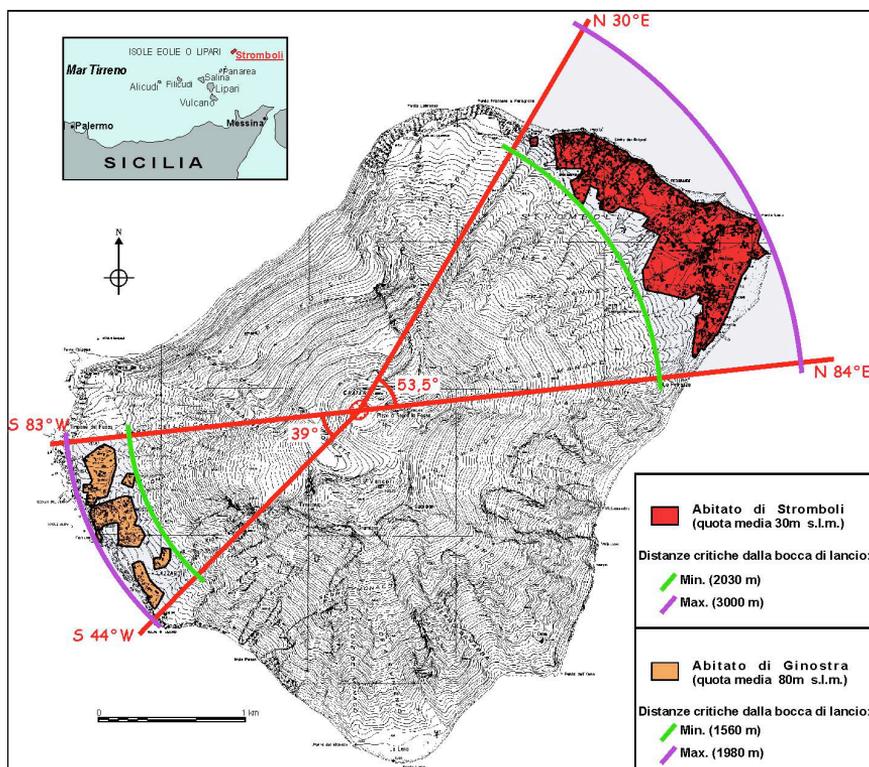


Fig. 3 - Aree di massima vulnerabilità ai lanci balistici.

considerato che il resto del territorio non ha emergenze antropiche e/o patrimoniali di particolare rilievo.

Ciò ci ha indotto ad elaborare un secondo documento cartografico, derivato dal primo, che esplicita tali informazioni e dà una immediata visione delle zone di massima vulnerabilità dell'isola con riferimento agli insediamenti abitativi (Fig. 3). In particolare, questa mappa tematica evidenzia come la zona vulnerabile dell'abitato di Stromboli (quota media 30 m s.l.m.) è rappresentata da una fascia lateralmente confinata all'interno di un settore di lancio critico tra gli Azimut $N30^\circ E \div N84^\circ E$ rispetto alle bocche di lancio (ampiezza angolare $53^\circ 5'$), e compresa tra distanze planimetriche minima e massima dalle bocche rispettivamente di 2030 m e 3000 m; per l'abitato di Ginostra, invece (quota media 80 m s.l.m.), la zona di vulnerabilità è rappresentata da una fascia compresa tra gli Azimut $S44^\circ W \div S83^\circ W$ rispetto alle bocche di lancio (ampiezza angolare 39°), e tra le distanze planimetriche minima e massima dalle bocche rispettivamente di 1560 m e 1980 m.

5. Stima dei pesi volumici

Per la determinazione del peso di volume dei 44 ejecta raccolti è stato utilizzato il *metodo di sostituzione con acqua* (water displacement method), costruendo per tale scopo un apparato strumentale di misura (volumetro ad acqua; Fig. 4) in accordo con le specifiche tecniche della normativa British Standards 1377 [22]. La scelta di questo metodo è stata dettata dalla buona affidabilità dimostrata dallo stesso rispetto al metodo di sostituzione con sabbia (sand displacement method) inizialmente adottato, il quale aveva dato misure con valori eccessivamente dispersi su corpi di taratura a volume



Fig. 4 - Volumometro ad acqua realizzato per la misura del peso di volume degli ejecta di Stromboli.

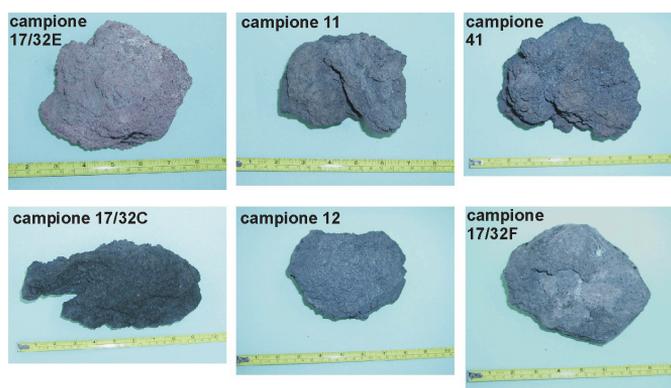


Fig. 5 - Esempi di ejecta utilizzati per la determinazione dei pesi volumici.

noto ($\pm 6\%$ rispetto a $\pm 2\%$ del metodo di sostituzione con acqua). La determinazione del peso volumico degli ejecta è stata effettuata previa pulitura e asciugatura in stufa degli stessi; pesatura su bilancia analitica; paraffinatura dei campioni (peso volumico della paraffina = $0,9 \text{ gr/cm}^3$); successiva ripesatura dei campioni paraffinati; immersione nel volumometro con acqua a sfioro nel sifone connesso al rubinetto di spurgo; raccolta e pesatura dell'acqua distillata in eccesso il cui volume è stato assunto corrispondente al volume dei campioni paraffinati. Ovviamente nel calcolo è stato poi sottratto per ogni campione il volume occupato dalla paraffina.

Lo spettro degli ejecta balistici esaminati comprende (Fig. 5):

- Scorie di lancio (campioni 17/32E; 11) a basso peso di volume medio pari a 1570 kg/m^3 ;
- Brandelli di lava (campione 41) eiettati e bombe vulcaniche ss, con forme dovute all'interazione con l'aria durante il volo (campione 17/32C), o da impatto al suolo allo stato plastico (campione 12 "a focaccia"), con peso di volume medio pari a 1970 kg/m^3 ;
- Blocchi rigettati per erosione di condotto (campione 17/32F), con peso di volume max pari a 2800 kg/m^3 ;

Considerate le minori energie cinetiche per unità di volume ed i forti effetti di ritardazione per attrito con l'aria che le scorie di lancio subiscono a causa del loro basso peso volumico, con conseguente ridotta gittata balistica e bassa energia d'impatto, per le simulazioni numeriche dei lanci balistici ai fini di analisi del rischio sono stati considerati significativi come valori di input solo i pesi volumici di bombe e brandelli di lava (1970 kg/m^3) e di blocchi rigettati (2800 kg/m^3).

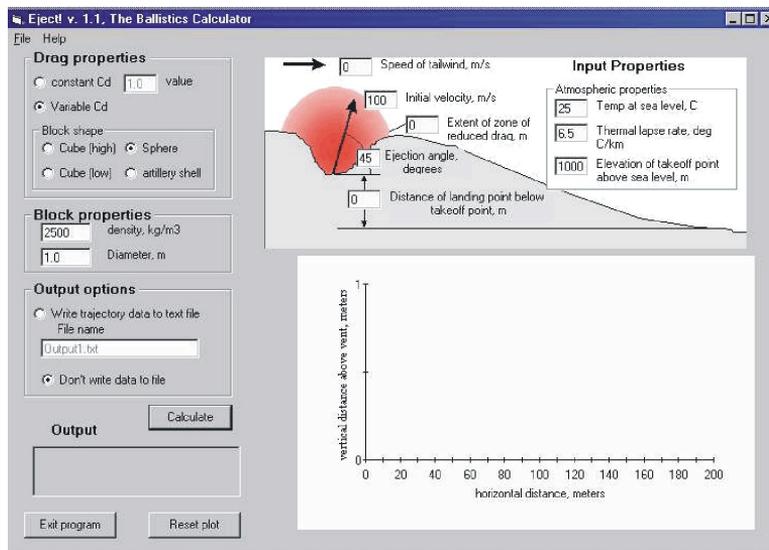


Fig. 6 - Interfaccia grafica del software di simulazione Eject! V.1.1.0 di Mastin [16].

6. Programma di simulazione Eject! 1.1.0

Per le simulazioni numeriche dei lanci balistici è stato utilizzato il software Eject! V.1.1.0 di L.G. Mastin [16]. Il programma effettua il calcolo numerico del sistema di equazioni di governo della fisica dei lanci balistici in aria discretizzando la traiettoria dell'egetto a partire dai dati iniziali di input attraverso una procedura iterativa alle differenze finite che assume intervalli spaziali predefiniti.

Il programma è dotato di un'interfaccia grafica amichevole (Fig. 6) che prevede una serie di parametri in input per la simulazione numerica del lancio balistico. Questi sono:

- proprietà del clasto (peso di volume in kg/m^3 e diametro D in metri) e forma del clasto (sferico, proiettile di artiglieria, cubico con faccia o spigolo perpendicolari alla direzione di lancio);
- proprietà atmosferiche (temperatura al livello del mare in $^{\circ}\text{C}$, gradiente termico verticale in $^{\circ}\text{C/Km}$, quota sul livello del mare del punto di lancio);
- velocità del vento di coda (in m/s);
- quota di lancio (in m);
- velocità di lancio (in m/s);
- angolo di lancio γ (dall'orizzontale, in gradi sessagesimali);
- dislivello Δh tra bocca di lancio e punto di impatto (in m);

Gli ultimi tre parametri vengono utilizzati dal programma per definire il numero di iterazioni di calcolo necessarie alla discretizzazione della traiettoria balistica.

I dati di output per ogni simulazione sono la distanza planimetrica bocca di lancio - punto d'impatto (gittata planimetrica, e cioè la proiezione sul piano orizzontale della gittata vera, quest'ultima rappresentata dalla congiungente del punto di lancio con il punto di impatto), la velocità di impatto e la massima altezza raggiunta dall'egetto rispetto alla quota della bocca di lancio, oltre al grafico della traiettoria restituito in una specifica sottofinestra dell'interfaccia grafica (Fig. 7). Per ogni simulazione il programma prevede anche la possibilità di salvataggio come file testo del tabulato analitico del calcolo.

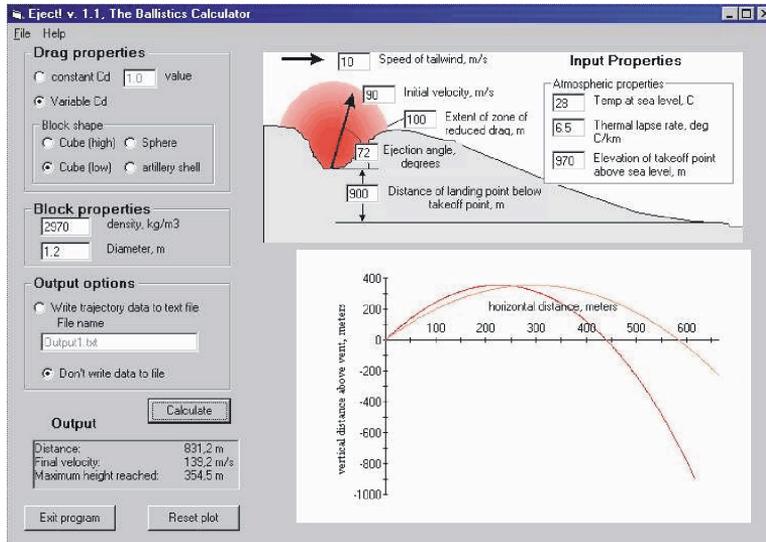


Fig. 7 - Esempio di simulazioni di lanci balistici con il software Eject!. Notare come il valore nominale zero della quota del punto di lancio nel grafico, corrisponda in realtà alla quota assegnata come valore di input.

7. Simulazioni numeriche

Considerata l'estrema variabilità dei possibili valori numerici assegnabili ai parametri in input, le esperienze di simulazione condotte (circa 1000) sono state confinate utilizzando:

- valore del peso volumico medio dei blocchi rigettati (2800 kg/m^3) e delle bombe e brandelli di lava (1970 kg/m^3);
- gradiente termico verticale standard di $0,65 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$;
- temperatura media del mese di Agosto al suolo (condizione di massima frequentazione dell'isola) di $30 \text{ }^\circ\text{C}$;
- quota del punto di lancio (quota media delle bocche crateriche) di 750 m s.l.m. ;
- forme poliedriche con massima resistenza fluidodinamica (cube low);
- assunzioni sul differente rapporto ejecta juvenili/litici nei tre differenti regimi basati su dati di letteratura e sulla conoscenza personale che gli AA. hanno della attività del vulcano.

Tutte le simulazioni sono state poi effettuate utilizzando come variabili di lavoro:

- (1) velocità di lancio, con valori crescenti e passo di 10 m/s ;
- (2) angoli di lancio γ compresi tra $40^\circ \div 65^\circ$ (range angolare dominante nei lanci balistici allo Stromboli) con valori crescenti e passo di 5° ;
- (3) diametri variabili nell'intervallo $0,05 \text{ m} - 1,00 \text{ m}$;
- (4) dislivelli Δh tra bocca di lancio e punto di impatto con passo di 50 m nell'intervallo $100 \text{ m} - 750 \text{ m}$ (cioè fino a quota zero s.l.m.), valutati sulla base delle distanze planimetriche medie e massime dalle bocche di lancio raggiunte dagli ejecta nel corso dei regimi eruttivi tipici dell'attività dello Stromboli [6, 11 - 14].

Gli intervalli di velocità di lancio che competono ai tre regimi sono stati poi vincolati utilizzando le simulazioni nelle quali gli insiemi dei valori numerici assegnati alle variabili di lavoro mostrano

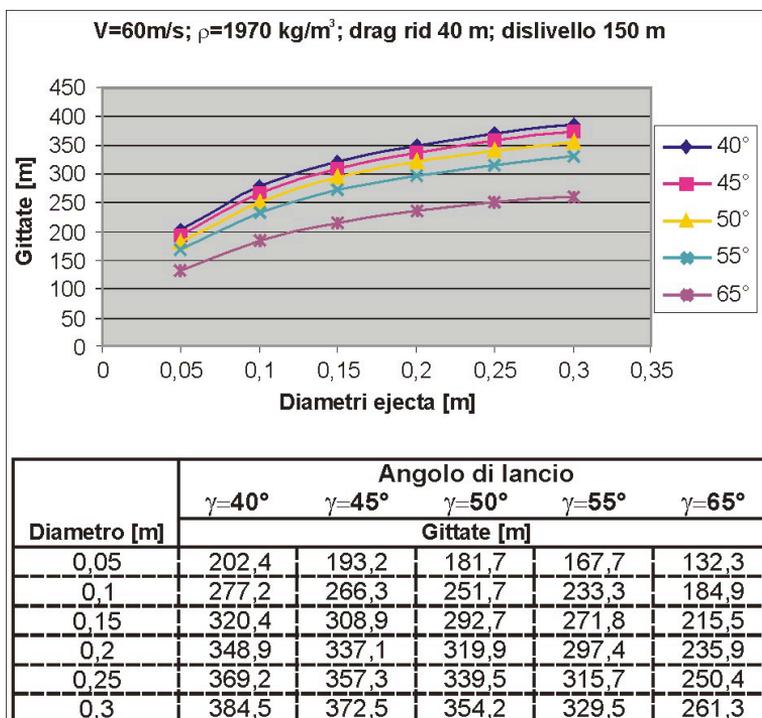


Fig. 8 - Velocità di lancio (60 m/s) in aria ferma e dislivello ($\Delta h = 150 \text{ m}$) che danno gittate planimetriche compatibili con il regime stromboliano normale per bombe con diametri compresi nell'intervallo $0,05 \text{ m} \div 0,3 \text{ m}$.

coerenza con i dati di letteratura per quanto riguarda gittata planimetrica - quota di impatto di lanci balistici allo Stromboli in occasione di attività storica sotto gli stessi regimi esplosivi.

Gli altri dati di output forniti dal programma, e cioè la massima altezza raggiunta dall'egetto rispetto alla quota della bocca di lancio, ed in particolare la velocità di impatto, dato che consente il calcolo dell'energia cinetica e quindi fornisce informazioni sulla possibile entità del danneggiamento indotto, sono stati esclusi da questa prima analisi destinata ad una migliore qualificazione e quantificazione delle caratteristiche dei tre regimi esplosivi, riservandosi gli autori di approfondire questi ultimi aspetti in un successivo e previsto approfondimento di indagine.

Il quadro complessivo che emerge per i tre regimi dalle simulazioni effettuate, integrato da valutazioni desunte dalla letteratura sugli stessi regimi e dalla personale conoscenza che alcuni degli AA hanno della attività dello Stromboli, è nel seguito esplicitato, e consente possibili comparazioni con l'attività di altri vulcani caratterizzati da prevalente attività stromboliana oltre che concrete valutazioni operative sul rischio vulcanico per gli abitati dell'isola.

Regime Stromboliano Normale

È il regime a più bassa energia (attività persistente). Le gittate tipiche non superano i 300-350 m dalle bocche eruttive, con dislivelli medi tra quota di lancio e quota del punto di impatto intorno ai 150 m. Data la bassa energia, il rapporto juvenili/litici è sempre estremamente alto, ragione per cui nelle simulazioni si è scelto di operare con peso volumico di 1970 kg/m^3 (peso volumico medio di bombe e brandelli di lava), ritenuto statisticamente più significativo per questa attività.

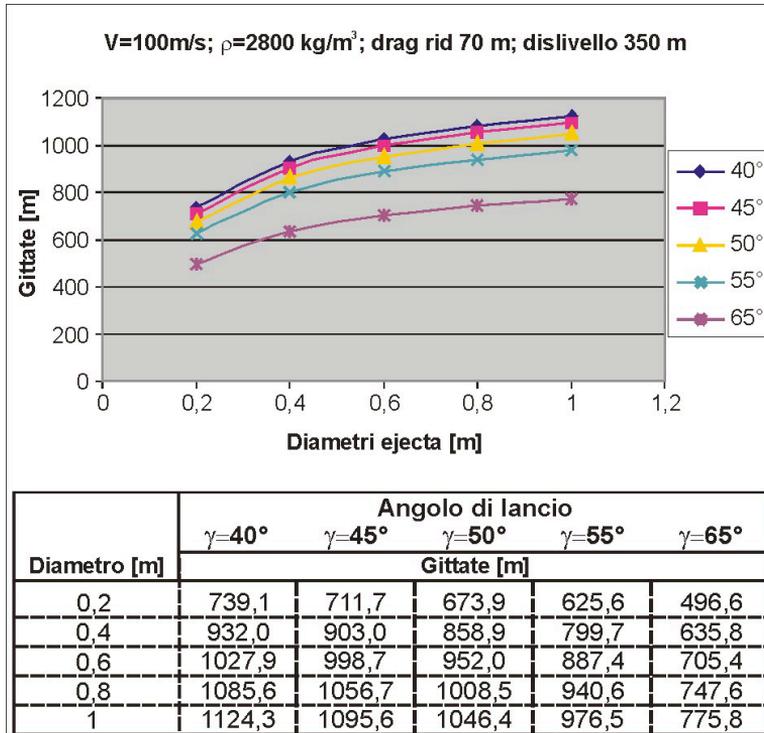


Fig. 9 - Velocità di lancio (100 m/s) in aria ferma e dislivello ($\Delta h = 350$ m) che danno gittate planimetriche compatibili con il regime stromboliano violento per blocchi rigettati con diametri compresi nell'intervallo 0,2 m ÷ 1,00 m.

Le simulazioni effettuate (Fig. 8), in condizioni di aria ferma, indicano ottima coerenza dell'insieme di dati solo per velocità di lancio comprese tra 40 m/s e 60 m/s, che rappresentano quindi l'intervallo di velocità di lancio tipico dell'attività stromboliana normale. Pericolosità (probabilità di impatti balistici) e rischio associato per gli abitanti di Stromboli e Ginostra sono ovviamente nulli.

Regime Stromboliano Violento

Aperiodicamente il regime stromboliano normale transita ad un regime dinamico sempre di tipo esplosivo, ma di maggior energia, che si mantiene anche per settimane (attività stromboliana violenta). Le gittate tipiche subiscono un brusco incremento e sono comprese tra 400 m e 1200 m, con dislivelli tra quota di lancio e quota del punto d'impatto da 200 m a 500 m. Dato il carattere maggiormente energetico di questa attività, l'erosione di condotto diventa significativa ed il rapporto juvenili/litici diminuisce. Per tale ragione nelle simulazioni si è scelto di operare con peso volumico di 2800 kg/m^3 (peso volumico dei litici).

Le simulazioni effettuate in condizioni di aria ferma (Fig. 9), indicano ottima coerenza dell'insieme di dati solo per velocità di lancio comprese tra 70 m/s e 100 m/s, che rappresentano quindi l'intervallo di velocità di lancio tipico dell'attività stromboliana violenta. La pericolosità per i villaggi di Stromboli e Ginostra è da nulla ad estremamente bassa.

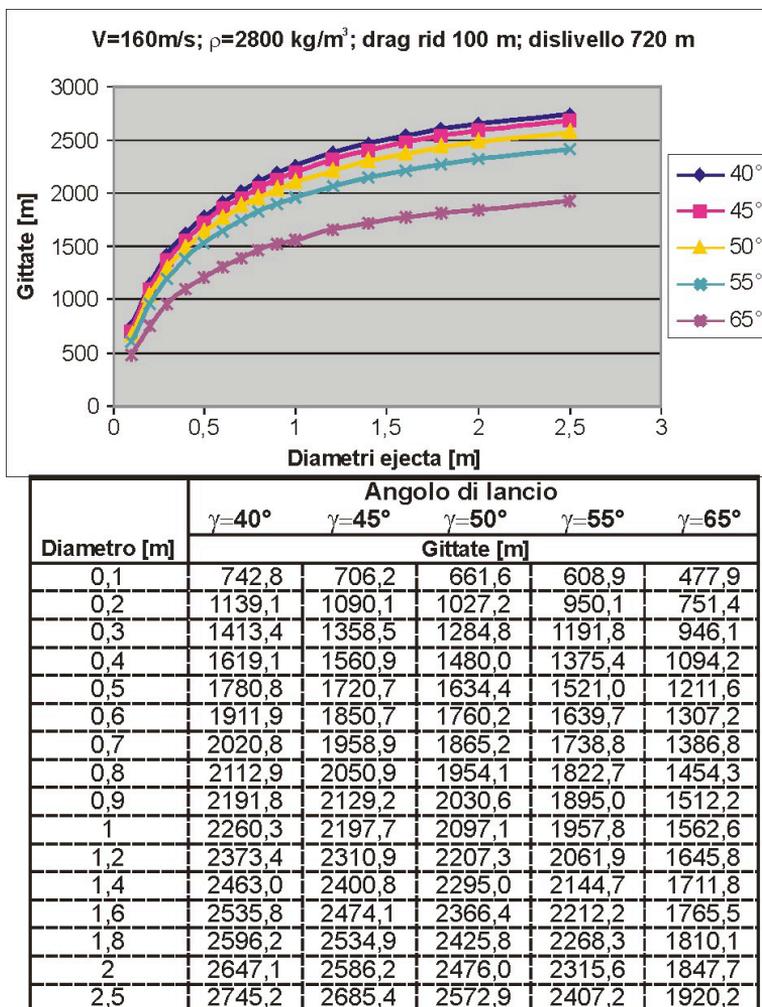


Fig. 10 - Velocità di lancio (160 m/s) in aria ferma e dislivello ($\Delta h = 720$ m) che danno gittate planimetriche compatibili con il regime parossistico per blocchi rigettati con diametri compresi nell'intervallo 0,1 m ÷ 2,5 m.

Regime Parossistico

Saltuariamente, con cadenza anche decennale e senza nessuna apparente relazione con il precedente stato eruttivo, lo Stromboli entra senza preavviso in una fase di attività parossistica che può durare da ore a qualche giorno. Esempi tipici sono la crisi parossistica del 1919 descritta da Ponte [8] e la violenta eruzione del 1930 [13]. Tuttavia, episodici impulsi esplosivi di forte intensità si possono verificare anche durante fasi di attività stromboliana normale o violenta per improvviso incremento del tasso di emissione gassosa. Durante isolati parossismi nel 1941 e nel 1943, blocchi caddero sui centri abitati [9], mentre il più recente di questi disastrosi eventi impulsivi si è verificato alle ore 9:15 (ora locale) del 5 Aprile 2003; in tale occasione due abitazioni nel villaggio di Ginostra furono vulnerate da bombe di dimensioni metriche.

Si tratta dell'attività più energetica dello Stromboli, caratterizzata dal rapido succedersi di impulsi esplosivi da violenti a violentissimi con frequenze fino a 1000 l'ora nei casi estremi, forte erosione di condotto ed espulsione di ingenti quantità di litici, testimoniata anche dalla frequente riorganizzazione geometrica del sistema di bocche emmissive in occasione di tali eventi. Le gittate medie coprono l'intero raggio dell'isola (>3000 m) e di conseguenza, i dislivelli tra quota di lancio e quota d'impatto sono equivalenti alla quota del punto di emissione (750 m s.l.m.) o prossimi a questi. Gli ejecta juvenili sono percentualmente poco significativi, e per tale ragione nelle simulazioni si è scelto di operare con il peso volumico da noi misurato per i litici (2800 kg/m³).

Le simulazioni effettuate in condizioni di aria ferma (Fig. 10), indicano che le eruzioni parossistiche dello Stromboli sono associate a velocità di lancio non inferiori ai 120 m/s e, probabilmente, non superiori ai 200 m/s, valori che rappresentano quindi gli estremi dell'intervallo di velocità di lancio tipico dell'attività parossistica, anche di tipo episodico. Questo regime eruttivo è l'unico che impone vere condizioni di rischio in aria ferma per entrambi i centri abitati dell'isola.

Simulazioni con vento di coda

Poichè le simulazioni fin qui descritte non tenevano conto della possibile influenza esercitata da venti di coda, per completezza sono state reperite informazioni sui venti al suolo che spirano sull'isola. Da una preliminare analisi dei dati raccolti emerge che non sono rari venti di burrasca che possono raggiungere anche i 25 m/s al suolo (grado 9 della scala Beaufort); si è deciso pertanto di effettuare alcune simulazioni con vento di coda pari a 25 m/s (Fig. 11).

I risultati ottenuti evidenziano un deciso incremento delle gittate, ed in particolare per l'attività stromboliana normale gli incrementi, anche se notevoli (circa 200 m), non sono in grado di spingere gli ejecta fin sui centri abitati; per l'attività stromboliana violenta invece, gli incrementi sono tali da poter vulnerare solo gli edifici del villaggio di Ginostra (planimetricamente più vicino alle bocche crateriche); infine per l'attività parossistica, poichè i lanci balistici raggiungono entrambi i centri abitati anche in condizioni di aria ferma, l'influenza del vento può solo determinare la caduta di un maggior numero di ejecta sia su Stromboli che su Ginostra aumentando sensibilmente quindi il livello di rischio per entrambi i centri abitati.

8. Conclusioni

I risultati delle simulazioni effettuate possono essere così sintetizzati:

A) Le simulazioni condotte con parametro vento di coda pari a zero evidenziano che:

- per il regime stromboliano normale la velocità di lancio alle bocche eruttive è compresa tra 40 m/s e 60 m/s; la pericolosità (probabilità di impatti balistici significativi) per entrambi i centri abitati è nulla;
- per il regime stromboliano violento la velocità di lancio è compresa tra 70 m/s e 100 m/s, e la pericolosità per entrambi i centri abitati è nulla o, comunque, scarsamente significativa;
- per il regime parossistico la velocità di lancio è compresa tra 120 m/s e 200 m/s; la pericolosità diventa rilevante sia per Stromboli che per Ginostra, e conseguentemente il rischio associato.

B) Le simulazioni condotte con vento di coda significativo (25 m/s) evidenziano che:

- per l'attività stromboliana normale, il rischio rimane nullo per entrambi i centri abitati;
- per l'attività stromboliana violenta il rischio diventa sensibile per Ginostra con venti da NE, e cioè di grecale e levante, mentre rimane nullo per Stromboli anche con venti da SO, e cioè di ponente o di libeccio;
- per l'attività parossistica, la pericolosità aumenta ulteriormente per entrambi i centri abitati rispetto ad analoghe condizioni eruttive in aria ferma ed il rischio è massimo.

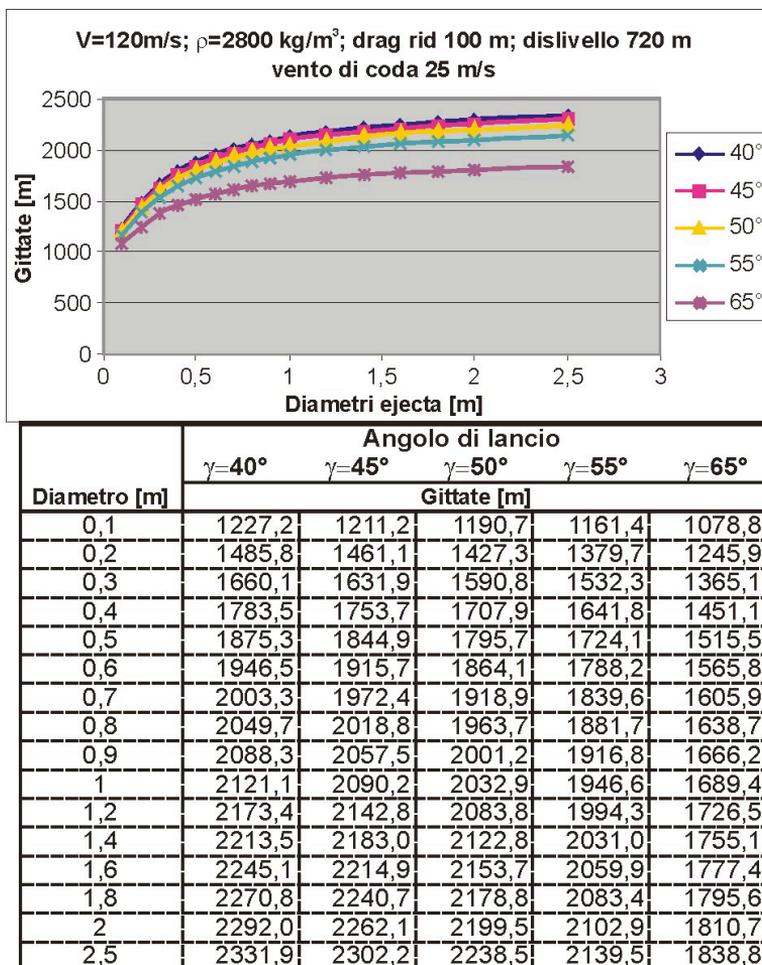


Fig. 11 - Velocità di lancio (120 m/s) e dislivello ($\Delta h = 720\text{ m}$) che danno gittate planimetriche compatibili con il regime parossistico per blocchi rigettati con diametri compresi nell'intervallo 0,1 m ÷ 2,5 m con vento di coda pari a 25 m/s.

L'unico tipo di regime stromboliano che impone sempre condizioni di pericolosità vulcanica per i centri abitati dell'isola di Stromboli - sia in aria ferma che con vento di coda - è quindi quello parossistico, continuo o di tipo episodico, mentre l'attività stromboliana violenta crea condizioni di rischio solo per l'abitato di Ginostra, e solo quando si verifica in concomitanza con forti venti provenienti da quadranti nord-orientali.

Si sottolinea poi come lo scenario di massimo danneggiamento dovuto ad impatti balistici per l'abitato di Stromboli è quello di una attività stromboliana parossistica con contemporanei forti venti da SO, mentre per Ginostra le simulazioni indicano che la massima probabilità di impatti balistici significativi ai fini del rischio (litici) si verifica sempre in regime parossistico ma sotto forti venti da NE.

Ringraziamenti

Lavoro effettuato con fondi PRA 2003, Università degli Studi di Messina. Gli autori intendono esprimere un sentito ringraziamento ai Proff. Renato Cristofolini e Gaetano Dongarrà per gli utili suggerimenti che hanno permesso, in fase di rielaborazione e redazione finale, un sensibile miglioramento del testo, sia in termini di comprensibilità che di contenuti.

References

- [1] C. Cavallaro, "L'attività' dello Stromboli dal 1940 al 1953," *Boll. Acc. Gioenia Sci. Nat., Catania Ser. 4*, **3**, 1-7 (1957).
- [2] M. De Fino, L. La Volpe, S. Falsaperla, G. Frazzetta, G. Neri, L. Francalanci, M. Rosi, A. Sbrana, "Strombolian eruption of December 6, 1985-April 1986: volcanological, petrological and seismological data," *Rend. Soc. Min. Petrol.* **3**, 1021-1038 (1988).
- [3] L. Francalanci, P. Manetti, A. Peccerillo, "Volcanological and magmatological evolution of Stromboli volcano (Aeolian Islands): the role of fractional crystallization, magma mixing, crustal contamination and source heterogeneity," *Bull. Volcanol.* **51**, 355-378 (1989).
- [4] I. Hornig-Kjarsgaard, J. Keller, U. Koberiski, E. Stadlbauer, L. Francalanci, R. Lenhart, "Geology, stratigraphy and volcanological evolution of the island of Stromboli (Aeolian Arc, Italy)," *Acta Vulcanol.* **3**, 21-68 (1993).
- [5] J. Keller, I. Hornig-Kjarsgaard, U. Koberiski, E. Stadlbauer, L. Francalanci, R. Lenhart, "Geological Map of the Island of Stromboli," *Acta Vulcanol.* **3**, (Appendix) (1993).
- [6] C.G. Newhall, S. Self, "The volcanic explosivity index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism," *Geophys. Res. (Oceans and Atmospheres)* **87**, 1231-1238 (1982).
- [7] G. Pasquare', L. Francalanci, V.H. Garduna, A. Tibaldi, "Structure and geologic evolution of the Stromboli volcano, Aeolian Islands, Italy," *Acta Vulcanol.* **3**, 79-89 (1993).
- [8] G. Ponte, "La catastrofica esplosione dello Stromboli" *R. Accad. dei Lincei* **28**, 89-94 (1919).
- [9] G. Ponte, "Attività' straordinaria dello Stromboli" *Ann. Geofis.* **1**, 200-202 (1948).
- [10] D.M. Pyle, *Sizes of volcanic eruptions* In "Encyclopedia of Volcanoes", H. Sigurdsson ed., 263-269 (Academic Press, N.Y. 2000).
- [11] S. Vergniolle, M. Mangan, *Hawaiian and Strombolian eruptions* In "Encyclopedia of Volcanoes", H. Sigurdsson ed., 447-475 (Academic Press, N.Y. 2000).
- [12] F. Barberi, M. Rosi, A. Sodi, "Volcanic hazard assessment at Stromboli based on review of historical data" *Acta Vulcanol.* **3**, 173-187 (1993).
- [13] A. Rittmann, "Der Ausbruch Stromboli 11 September 1930" *Zeits Vulkanol.* **14**, 47-77 (1931).
- [14] A. Rittmann, *I vulcani e la loro attività'* (Ed. Cappelli, Bologna 1967).
- [15] T. Minakami, "On the distribution of volcanic ejecta (Part I). The distributions of volcanic bombs ejected by the recent explosions of Asama" *Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo* **20**, 65-91 (1942).
- [16] L.G. Mastin, "A simple calculator of ballistic trajectories for block ejected during volcanic eruptions," *U.S. Geological Survey Open-file report*, 01-45 (2001).
- [17] R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lighfoot, *Transport phenomena* (New York, John Wiley and Sons, 1960).
- [18] S.F. Hoerner, *Fluid dynamic drag: practical information on aerodynamic drag and hydrodynamic resistance* (Vancouver WA, 1965).
- [19] D.G. Miller, *Ballistic tables for spheres 7.5 to 25mm (0.3 to 1 in.) in diameter* (Dept. of Energy, Lawrence Livermore Laboratory 1979).
- [20] D.G. Miller, A.B. Bailey, "Sphere drag at Mach number from 0.3 to 2.0 at Reynolds numbers approaching 10^7 " *Jour. Fluid Mech.* **92**, 449-464 (1979).
- [21] G.S. Steinberg, V. Lorenz, "External ballistics of volcanic explosions" *Bull. Volcanol.* , 333-348 (1983).
- [22] British Standards Institution, *Methods of test for soils for civil engineering purposes*. Third revision (Gaylard & Son Ltd., London 1975).

[a] Riccardo Rasà, Alessandro Tripodo, Sergio Casella, Germana Pisacane, Salvatore Provenzano
Università degli Studi di Messina
Dipartimento di Scienze della Terra
Salita Sperone, 31
98166 Messina, Italy
* **E-mail:** rrasa@unime.it

[b] Monica Lia Szilagyí
Universitatea din Oradea
Departamentul de Geografie, Turism și Amenajare Teritorială
Strada Armatei Romane, Nr. 5
Oradea, Judetul Bihor, Romania

Presented: November 28, 2005
Published on line on November 9, 2006