



DOTTORATO DI RICERCA IN ELETTRONICA APPLICATA

**Analisi e caratterizzazione di eventi vulcanici esplosivi
tramite tecniche di elaborazioni delle immagini e
soft-computing**

*Francesco Andrea Antonio Ciancitto
(XXX Ciclo della formazione Dottorale)*

Docente-guida

*Prof. Antonino Laudani
Prof. Alessandro Salvini*

INDICE

Introduzione.....	1
I. I vulcani ed il monitoraggio vulcanico.....	2
I.1 Stazioni di monitoraggio.....	3
I.1.1 Geochimica.....	3
I.1.2 Sismovulcanica.....	4
I.1.3 Infrasonica.....	4
I.1.4 Telecamere.....	4
II. Metodi e Finalità.....	6
III. Stromboli.....	7
III.1 Inquadramento.....	7
III.2 Obiettivo.....	9
III.3 Il metodo proposto.....	10
III.4 La video sorveglianza a Stromboli.....	11
IV.4.1Primo Periodo: 2004-2010.....	12
IV.4.2 Secondo Periodo: 2010-2017.....	12
IV. Il processamento dei dati.....	13
IV.1 Detection di eventi vulcanici esplosivi sulla base di immagini IR.....	13
IV.1.1 Il dato acquisito da analizzare.....	13
IV.1.2 L' algoritmo di Detection.....	14
IV.1.2.A Schema funzionale.....	14
IV.1.2.B Analisi del Segnale.....	15

IV.1.2.C	La catena di detection.....	19
IV.1.2.D	Efficienza della detection.....	27
IV.2	Detection di eventi vulcanici esplosivi sulla base di immagini termiche.....	28
IV.2.1	Il dato acquisito da analizzare.....	28
IV.2.2	L'algoritmo di Detection.....	28
IV.2.2.A	Schema funzionale.....	28
IV.2.2.B	Preprocessamento.....	28
IV.2.2.C	La catena di detection.....	29
IV.2.2.D	Discriminazione della qualità dei dati.....	33
IV.2.2.E	Le uscite del sistema.....	37
IV.2.2.F	Efficienza della detection.....	38
IV.3	Dettaglio sui parametri di uscita.....	39
V.	Modello della telecamera Termica.....	40
VI.	Applicazioni.....	45
VI.1	Definizione della no-fly zone a Stromboli.....	45
VI.2	Redazione del bollettino settimanale sul monitoraggio vulcanico.....	49
VI.3	Studio dell'intensità dei getti.....	53
VI.3.1	Attività stromboliana classica.....	53
VI.3.2.	Attività stromboliana classica ed eventi non ordinari.....	56
VI.3.2.	Attività stromboliana forte e vulcano in disequilibrio: l'eruzione effusiva del 2014.....	57
Appendice.....		62
AI.	Cenni di termografia.....	62
AI.1	Lo spettro elettromagnetico.....	62
AI.2	Radiazione del corpo nero.....	63

AI.2.1 Legge di Planck.....	64
AI.2.2 Legge di spostamento di Wien.....	65
AI.2.3 Legge di Stefan-Boltzmann.....	65
AI.3 Emettitori diversi dai corpi neri.....	65
AI.4 Formula di misurazione di una termocamera.....	67
AII. Filtro di Kalman.....	69
AIII. Modello di una Telecamera.....	71
Bibliografia.....	76
Bibliografia di riferimento.....	78
Ringraziamenti.....	80

Introduzione

Il mondo della vulcanologia sino alla prima metà del ventesimo secolo poteva essere considerato come una scienza prevalentemente osservativa. Con l'avvento della tecnologia, nuove risorse si sono aperte all'ambito della ricerca, svecchiandola dei limiti dovuti alla necessità di presenza sul campo e alla conseguente esposizione ad un fenomeno potenzialmente pericoloso di cui una eruzione vulcanica è un esempio immediato.

La vulcanologia moderna si avvale pertanto di modelli ed equazioni, linfa vitale della geofisica, scienza che si propone di studiare i fenomeni legati al pianeta; dall'osservazione di ciò che non è visibile agli occhi, ma che è immaginabile tramite carta e penna si perviene all'utilizzo dell'automazione ed allo sviluppo di algoritmi dedicati.

Oggi diventa usuale trovare sui vulcani di tutto il mondo scienziati intenti a utilizzare le più moderne apparecchiature o installare stazioni di monitoraggio per effettuare il campionamento di varie grandezze fisiche. Cercare di capire il comportamento di un vulcano può sembrare lontano dall'immediata utilità; alle volte la ricerca di una profonda comprensione di alcuni fenomeni rischia di apparire una forzatura, opposizione alla regola ancestrale per cui l'uomo non può fare altro che osservare e restare affascinato dalla magia della Natura. Ritengo invece nobile e rispettoso sviluppare un'indagine scientifica che assuma i tratti di una contemplazione ad un più alto livello di comprensione verso quello che risulta essere la realtà nel suo massimo e semplice valore: il nostro pianeta che si manifesta, rendendo impossibile l'indifferenza. In alcuni casi la comprensione delle dinamiche eruttive si traduce, però in ricerca di sicurezza ed ha quindi scopo di grande attualità. Quando il rischio vulcanico è elevato, ovvero quando un grosso numero di

persone si avvicenda nei pressi dei vulcani attivi per godere di uno spettacolo naturale o, come già detto, osservare la *realtà*, la ricerca è finalizzata alla garanzia dell'incolumità. Lo sviluppo di sistemi di monitoraggio vulcanico diventa pertanto argomento di forte interesse scientifico, specialmente in Italia, paese di profonda cultura e di vulcani, tra i più attivi e spettacolari al mondo.

I. I Vulcani ed il monitoraggio vulcanico

Per comprendere quale sia la sensoristica dedicata al monitoraggio vulcanico, concentrando l'attenzione sugli effetti più superficiali dovuti alla risalita del magma, è necessario descrivere il processo di eruzione nei suoi tratti più salienti, partendo dalla natura del magma stesso.

Quando si parla di magma, si intende una miscela fluida di vari composti chimici, il cui stato fisico è relativo al sistema di riferimento in cui viene considerato, ovvero dalla profondità in cui è collocato; ricordiamo infatti, che a causa del gradiente geotermico, la temperatura è funzione della profondità così come la pressione: all'aumentare della profondità aumenta il valore di entrambe le grandezze.

Componente principe dei fluidi magmatici sono la silice (SiO_2), e sotto forma di ossido, altri elementi quali gli alcali (sodio e potassio) e metalli; inoltre sono contenuti *volatili*, vari gas quali il vapor d'acqua, CO , CO_2 , SO_2 , H_2S , etc.

Quando si parla di una eruzione vulcanica, in linea generale ci si riferisce a due momenti, una fase *esplosiva* ed una fase *effusiva*. Il momento in cui il magma raggiunge la superficie, ovvero subisce una repentina decompressione, fa sì che i gas di cui è ricco riescano ad essolvere, ovvero creare grandi bolle che scoppiano, trasportando in aria porzioni del restante fluido, una vera e propria schiuma, che risultano frammentate con diverse pezzature chiamate *bombe cenere* e *lapilli*: questa è la fase esplosiva dell'eruzione. Il magma incomincia così a liberare i volatili che

erano in esso disciolti e prende il nome di lava. La restante porzione di gas è il motore delle colate laviche, ovvero della fase effusiva dell'eruzione, in cui il gas è sufficiente esclusivamente a spingere il magma in superficie ed a farla fluire su di essa. Quando la colata lavica è messa in posto e si allontana dal punto di emissione comincia a raffreddare e ad opporsi al movimento. Quando la percentuale di gas nel condotto non è più sufficiente per fare fluire la colata, l'eruzione ha termine.

I vari momenti che scandiscono il processo eruttivo possono essere rilevati tramite diverse tipologie di sensori che vengono utilizzati nelle Scienze della Terra.

I.1 Stazioni di Monitoraggio

I.1.1 Geochimica

Riferendoci agli strati superficiali della superficie terrestre (entro i 5 km), i vari gas essolvono, ovvero passano in fase vapore aggregandosi in bolle di dimensione crescente (coalescenza) durante la risalita della colonna magmatica nei condotti di un vulcano. A causa della differente pressione parziale dei vari gas il processo di essoluzione coinvolge in maniera frazionata i componenti gassosi, e proprio dalla misura delle percentuali dei vari gas è possibile stabilire a che profondità si trova il magma pronto ad essere eruttato o se un nuovo *batch* è in risalita dal profondo. I gas magmatici sono i primi componenti a raggiungere la superficie sia in condizioni di eruzione, sia in condizioni di quiete: la permeabilità del suolo, specialmente in prossimità degli orli craterici, nonché la diretta fuoriuscita dai condotti, fa sì dai crateri attivi di un vulcano fuoriesca sempre una nube di gas, chiamata *plume* che si eleva in atmosfera secondo la direzione dei venti. La misura dei gas magmatici può pertanto essere eseguita in maniera diretta tramite sonde piazzate sul terreno o ivi prospicienti; in maniera indiretta tramite l'analisi del plume; questo procedimento si basa sulla valutazione l'assorbimento dei raggi solari tramite camere UV dovuto all'interposizione del plume tra il sole e l'osservatore.

I.1.2 Sismovulcanica

Al movimento dei fluidi nel sottosuolo sono associati vari segnali sismici. In relazione al vulcano considerato, dallo studio dello spettro del segnale sismico, alle varie frequenze che lo compongono è possibile associare un significato. Ad esempio la presenza di magma all'interno dei condotti produce un rumore di fondo a bassa frequenza chiamato tremore vulcanico. Ancora, è possibile discernere tra uno sciame sismico precursore di una frattura superficiale da un evento da fratturazione, dovuto all'intrusione di fluidi magmatici nelle rocce incassanti a profondità maggiore. Certe volte è possibile persino, associare all'essoluzione dei gas nei condotti un opportuno segnale sismico.

I.1.3 Infrasonica

Quando le bolle di gas raggiungono la superficie, subiscono una repentina decompressione cui è associato un segnale infrasonico. Tramite opportuni microfoni è possibile rilevare lo spostamento d'aria anche a grande distanza ed in particolari condizioni, discriminare la sorgente dell'esplosione nell'eventualità di diversi crateri attivi. In presenza di più crateri attivi.

I.1.4 Telecamere

La visione è il metodo più immediato per rilevare un fenomeno, l'atto più vicino alla percezione umana. La tecnologia attuale offre varie tipologie di telecamere, sensibili a varie bande di frequenza. Principalmente, il mercato offre alla ricerca telecamere operanti nella banda degli ultravioletti, in quella del visibile e nella banda dell'infrarosso. Per quanto riguarda le camere UV si è già discusso prima, giacché largamente utilizzate nella geochimica. Se parliamo di telecamere nella banda del visibile al di là della risoluzione, la tendenza, riferendoci al mondo della vulcanologia, è quella di utilizzare telecamere ad alta velocità per meglio rilevare gli eventi vulcanici impulsivi, come ad esempio le esplosioni, che raggiungono velocità anche di 200m/s e

a secondo della distanza necessitano un framerate opportuno, in accordo con il teorema del campionamento di Shannon. I dispositivi ottici che vengono largamente utilizzati nel mondo della vulcanologia sono le telecamere operanti nella banda dell'infrarosso o più largamente le telecamere termiche, capaci di comporre una immagine in falsi colori in cui ogni pixel rappresenta la temperatura della porzione dell'oggetto inquadrato. Ampiamente utilizzate nell'ambito del controllo della produzione e dell'efficienza dei dispositivi elettronici [1][2][3][4], negli ultimi quindici anni hanno affascinato il mondo della vulcanologia. Il principio di funzionamento [5] è abbastanza semplice e descritto dalla teoria dei campi elettromagnetici. Qualunque oggetto che non si trovi allo zero assoluto, e pertanto qualunque oggetto reale, emette spontaneamente onde elettromagnetiche il cui spettro dipende dalla temperatura dello stesso. Al di sotto dei 470°C le frequenze che compongono lo spettro ricadono nel campo dell'infrarosso; al di sopra di questo valore lo spettro si arricchisce di frequenze appartenenti al campo del visibile. Così, a partire dai 500°C un corpo si presenta incandescente, ovvero emana luce, che in un range compreso fra i 500 ed i 1300°C appare rossa-gialla. Quando si parla di vulcani, ovvero sistemi in grado di emettere in atmosfera fluidi caldi, l'utilizzo di tali strumenti appare immediato e sicuramente superiore all'utilizzo di telecamere operanti nella banda del visibile. Il primo motivo è che la visione tramite IR non necessita di fonti di luce: è il soggetto stesso la sorgente di emissione; questo vuol dire non solo che si ha la possibilità di una visione notturna, ma anche di non avere differenze di visibilità nel passaggio giorno-notte della scena. Un altro vantaggio in termini di sensibilità, è dovuto ad un maggiore coefficiente di trasmissione della banda IR rispetto alla banda visibile in ambiente aperto. Quando si parla di vulcani, l'ambiente in cui si opera si può modellizzare come una miscela di aria e vapore e gas, che pertanto risulta essere il mezzo interposto tra il soggetto (il vulcano/cratere) e l'osservatore (la telecamera). In accordo con le leggi di Fresnel [6] a parità di mezzo interposto tra sorgente ed osservatore la percentuale di energia rifratta associata alla banda IR è maggiore della percentuale associata alla banda del visibile. Questo implica che in caso di ambiente saturo di vapore e/o nuvoloso, la

possibilità di visione tramite telecamera termica risulta nettamente superiore.

II. Metodi e Finalità

Lo scopo di questa tesi è dimostrare l'utilizzo innovativo delle telecamere termiche nell'ambito della ricerca e del monitoraggio vulcanico applicato a due vulcani italiani, appartenenti alle isole Eolie, quali Stromboli e Vulcano. Essi risultano essere talmente tanto peculiari nella loro attività, da essere utilizzati come riferimento nella letteratura mondiale. La telecamera termica o IR viene utilizzata come vero e proprio strumento di misura, trascendendo dal suo mero utilizzo osservativo utile per la comprensione delle dinamiche eruttive a breve e lungo periodo e nelle dinamiche di *unrest*. Lo sviluppo di algoritmi dedicati all'elaborazione delle immagini ha permesso di descrivere l'attività eruttiva persistente allo Stromboli e di indagare sui possibili segnali di riavvio dell'attività eruttiva di Vulcano. I dati analizzati sono i filmati realizzati dalle stazioni di videosorveglianza in continua gestione dall'Osservatorio Etneo dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. Tali stazioni producono immagini che vengono visualizzate presso la sala operativa della sede di Catania per la sorveglianza h24 dei vulcani siciliani e per la redazione settimanale del bollettino di monitoraggio vulcanico dello Stromboli ai fini di protezione civile

Prima di questa tesi le immagini prodotte dalle stazioni non sono mai state processate, ovvero non è mai stato sviluppato un applicativo capace di analizzare in automatico i dati forniti dalle telecamere. Le analisi sono incentrate sui video prodotti da telecamere IR o Termiche.

III. Stromboli

III.1 Inquadramento

Stromboli appartiene all'arcipelago vulcanico delle isole Eolie, dove è situato all'estremità nordorientale. La sua cima, I Vancori si innalza a 924m sul livello del mare e a circa 3000 m rispetto al fondale marino. Attualmente le bocche eruttive del vulcano sono situate



Figura III.1.1 Posizione geografica del vulcano Stromboli

su di una terrazza craterica alla

sommità della Sciara del Fuoco, un pendio dovuto al collasso del settore Nordovest dello Stromboli avvenuto circa 5000 anni fa [7], ad una quota di circa 800m.s.l.m. La posizione delle bocche attive è soggetta a continui cambiamenti dovuti alla persistente attività del vulcano, ma tendono sempre a disporsi su direzioni preferenziali lungo due archi orientati a Sudovest e a Nordest [8]. Dati geofisici [9][10][11] dimostrano che, pur avendo manifestazioni eruttive di diverso stile, le due zone hanno una sorgente comune in profondità. Stromboli si trova in uno stato di attività persistente, senza interruzioni significative da un tempo compreso tra il terzo ed il settimo secolo d.C. ad oggi [12], con uno stile eruttivo che caratterizza il vulcano, definito come “normale attività stromboliana” [13]. Questa [14] consiste in un continuo degassamento, ed attività esplosiva intermittente di bassa-media intensità con una frequenza che varia tipicamente fra i 2 e i 15 eventi l'ora, con emissione di getti di gas variamente frammisto a materiale grossolano (bombe, lapilli) e ceneri che raramente superano i 100-200m di altezza sopra le bocche. Occasionalmente, Stromboli offre manifestazioni eruttive di tipo esplosivo di forte intensità, ovvero esplosioni maggiori e parossismi, e meno frequentemente eruzioni

effusive. I parossismi rappresentano la tipologia di evento maggiormente esplosivo in quanto coinvolgono grandi volumi di materiale eiettato, modificano sostanzialmente la disposizione delle bocche e la morfologia della zona craterica e sviluppano in atmosfera nubi vulcaniche che si ergono per alcuni chilometri oltre la cima del vulcano. Le esplosioni maggiori hanno manifestazioni simili ai parossismi ma un'energia associata minore e sono caratterizzate dal lancio di bombe e blocchi che ricadono fino ad una distanza di 1.5 km dalla zona craterica. Le colate laviche allo Stromboli, in tutti i casi storici documentati sono sempre rimaste confinate alla Sciara del Fuoco, alimentate da fessure eruttive o da trabocchi della terrazza craterica.



Figura III.1.2: La terrazza craterica vista dal Pizzo sopra la Fossa.

III.2 Obiettivo

Ogni comportamento eruttivo che si discosta dalla normale attività stromboliana rappresenta un potenziale pericolo per gli abitanti che vivono nei due paesi alle pendici del vulcano e per l'alto numero di turisti che ne raggiungono la località Pizzo Sopra La Fossa (918m.s.l.m.) per osservarne l'attività: a tal proposito si ricordi che, per motivi di sicurezza le ascensioni alla cima del vulcano vengono controllate tramite ordinanza prefettizia che incarica della conduzione delle escursioni le Guide Alpine o Vulcanologiche. In questo modo si cerca di garantire un maggior standard di sicurezza possibile, limitando il numero di persone che contemporaneamente transitano in zone soggette a maggiore rischio vulcanico: si pensi che nelle giornate di picco il vulcano vede circa 500 persone avvicinarsi dalle sue pendici fino alla cima. Per i motivi sopra esposti, di grande interesse sarebbe l'individuazione di un protocollo di analisi che riesca a rilevare comportamenti anomali dell'attività del vulcano, considerabili come precursori di manifestazione eruttive di forte intensità.

Quello che ci si propone è l'analisi sul lungo periodo del rilascio energetico relativo alla persistente attività esplosiva dello Stromboli, basato principalmente sui dati provenienti dalle stazioni di monitoraggio presenti sul vulcano, focalizzando l'attenzione sui dati generati dalla stazione di videosorveglianza situata in località Pizzo Sopra La Fossa, avente una completa visione della terrazza craterica.

Se difatti, diversi studi sono già stati condotti sullo stile eruttivo dello Stromboli, ed hanno permesso una classificazione della diversa tipologia di eventi esplosivi [15] essi, hanno il limite implicito di essere stati condotti tramite campagne di misure effettuate in un intervallo di tempo necessariamente limitato[16]; l'utilizzo, come sorgente di dati di una stazione di monitoraggio in acquisizione continua, può invece consentire una panoramica temporale di insieme sufficiente lunga da caratterizzare l'attività eruttiva.

III.3 Il metodo proposto

Per comprendere quali siano i parametri utili per descrivere il rilascio energetico del vulcano durante il suo stato di equilibrio dinamico, ovvero la normale attività stromboliana, è bene descrivere le fasi che portano alla generazione di un normale evento eruttivo, inteso come un sistema di processi considerato nelle zone prossime alla superficie.

Ogni evento esplosivo può essere descritto fondamentalmente in tre fasi [17]. Ricordiamo che il motore di ogni esplosione è il gas [18][19] che si trova disciolto nella colonna magmatica all'interno dei condotti del vulcano. Il gas, va considerato come una insieme di bolle, ovvero un certo volume di sostanza in stato aeriforme circondato dal resto del fuso magmatico in fase liquida/fluida. Nel momento in cui le bolle si riuniscono in una sola bolla (coalescenza) abbastanza grande, essa effettua la risalita lungo i condotti per differenza di densità, raggiungendo le bocche attive trasportando con se il magma. In prossimità della superficie, per repentina caduta di pressione la bolla esplose lanciando in aria brandelli di lava. Riferendoci a questa descrizione, vediamo comprendiamo che ogni esplosione ogni esplosione del vulcano può essere descritta da tre fasi a cui associare opportuni parametri geofisici. Il momento di partenza è l'essoluzione e la formazione di una grossa bolla (formazione dello *slug*), a cui è associato un opportuno segnale sismico (VLP). Quando la bolla o raggiunge la superficie, ovvero nell'istante dello scoppio, si ha una forte decompressione a cui è associato un segnale infrasonico. Infine, i brandelli di lava, materiale *caldo*, vengono lanciati in atmosfera con un moto parabolico.

A questo punto è possibile descrivere l'energia associata ad singolo evento esplosivo può essere l'unione di tre componenti:

- energia elastica sotto forma di onde sismiche e onde di pressione acustica.
- energia cinetica legata alla balistica dell'esplosione.
- energia termica legata al rilascio termico del materiale incandescente eiettato in atmosfera.

Per una stima dell'energia elastica andrebbero valutati i segnali dei sismometri e dei microfoni infrasonici; per la valutazione dell'energia cinetica è necessario risalire alle masse coinvolte nelle esplosioni ed alla velocità di emissione. Per una stima del rilascio termico sarebbe necessario valutare la temperatura del materiale emesso.

Sicuramente la parte più grande dell'energia è associata al lancio dei prodotti e pertanto all'energia cinetica, che ricordiamo essere espressa dalla semplice relazione:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{III.3.1})$$

Dove m è la massa del materiale eruttato alla velocità v . Se le velocità in gioco sono sempre nell'ordine di grandezza... (valore e citazione) quello che è fortemente variabile e quello che caratterizza la variabilità della attività stromboliana nel breve/lungo periodo è proprio la quantità del materiale emesso.

In questo lavoro ci si concentrerà principalmente sulla valutazione dell'energia cinetica associata all'evento esplosivo puntando sulla stima della massa eruttata, funzione della frequenza delle esplosioni e dalla intensità della stessa. L'idea è quella di produrre un algoritmo che analizzi i filmati prodotti dalle telecamere di videosorveglianza in modo da rilevare tutte le esplosioni del vulcano e classificare le stesse in funzione di vari parametri

III.4 La video sorveglianza a Stromboli

Dal 2004 ad oggi, posizionate in punti strategici sull'isola, sono presenti due stazioni di monitoraggio video le cui immagini sono archiviate presso l'osservatorio Etno dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. A una quota di circa 400m s.l.m. sulla cresta nordorientale della sciara del fuoco è presente la stazione denominata *Q.400* (quota 400), mentre a 918m s.l.m., proprio di fronte alla terrazza craterica ad una distanza dalla stessa di circa 300m, è situata la stazione denominata *Pizzo*. Nel corso degli anni la strumentazione delle due stazioni

ha subito ammodernamento e fondamentalmente possiamo distinguere due grandi periodi di funzionamento in cui le stazioni erano equipaggiate in maniera differente: dal 2004 al 2010 e dal 2010 ad oggi. La qualità e la tipologia di dato è pertanto cambiata nel corso degli anni. Quello che non è cambiato è la tipologia di dati che restano comunque dei filmati AVI, trasmessi come video composito.

A seguire una descrizione della strumentazione in uso nei due periodi sopracitati nella stazione posizionata al Pizzo Sopra La Fossa

III.4.1 I Periodo: 2004-2010

La stazione era equipaggiata esclusivamente con una telecamera IR e per questo motivo era denominata SPI (Stromboli Pizzo Infrarosso). La termocamera utilizzata era una Opgal EYE – M 320B, dotata di un sensore Amorphous Silicon Microbolometrico da 320x240 pixel con range spettrale di $8 \div 12 \mu m$, $NEDT \leq 70 mK^\circ \leq 70^\circ mK$. Essa utilizzava un'ottica da 12 mm con un campo di vista orizzontale di circa 60° , tale da fornire una visuale complessiva della terrazza craterica.

III.4.2 II Periodo: 2010-2017

Dal mese di ottobre 2010 è attivo, in località Pizzo sopra la Fossa, un sito di monitoraggio video, equipaggiato con una telecamera denominata SPV (Stromboli Pizzo Visibile) ad alta risoluzione operante nello spettro del visibile ed una telecamera termica denominata SPT (Stromboli Pizzo Termica). In base alle statistiche di funzionamento, la stazione è considerabile una robusta sorgente di dati. La termocamera utilizzata è una FLIR, dotata di un sensore FPA (Focal Plane Array) microbolometrico non raffreddato, avente una risoluzione di 320x240 pixel con range spettrale di $7.5 \div 13 \mu m$, $NEDT \leq 50 mK^\circ$. Essa ha in dotazione un'ottica da 18 mm con un campo di vista $25^\circ \times 18.8^\circ$, ma su di essa è installata un'ottica grandangolare da 90° tale da

fornire non soltanto una visuale complessiva della terrazza craterica, ma un campo di osservazione ben più vasto nel quale osservare la ricaduta di prodotti emessi durante l'attività esplosiva.



Figura III.4.2.1: La stazione di monitoraggio video SPT (a); le telecamere installate(b)

IV. Il processamento dei dati

L'idea è quella di produrre un algoritmo che analizzi i filmati prodotti dalle telecamere di videosorveglianza in modo da rilevare tutte le esplosioni del vulcano e classificare le stesse in funzione di vari parametri geometrici. Come accennato, la sorgente dei dati è cambiata nel tempo e pertanto si è reso necessario lo sviluppo di tecniche diverse per l'analisi delle immagini.

IV.1 Detection di eventi vulcanici esplosivi sulla base di immagini IR

IV.1.1 Il dato acquisito da analizzare

Riferendoci alla installazione presente nel I periodo (2004-2010), i filmati da analizzare provengono da una telecamera IR. Sulla base di una sequenza di immagini acquisite dalla stazione, rilevate con frequenza di un fotogramma ogni due secondi, vengono realizzati dei filmati archiviati sotto forma di file AVI, inerenti ad intervalli temporali di 15 minuti; nell'arco

di 24 ore si generano pertanto 96 filmati costituiti da 450 fotogrammi, a meno di imprevisti di natura tecnica.

IV.1.2 L'algoritmo di Detection

IV.1.2.A Schema funzionale

Prima di poter procedere con la detection vera e propria le immagini vanno preparate con opportuni filtraggi che verranno di seguito descritti, realizzando una catena di processamento schematizzabile con il seguente diagramma a blocchi.



Figura IV.1.1: Schema funzionale dell'algoritmo di detection

Ridimensionamento

Per il riconoscimento degli eventi esplosivi in maniera automatica, dopo una attenta analisi dei filmati originali, si è subito notato come la qualità delle immagini andasse migliorata, così da operare a partire da una sorgente di dati più accurata possibile.

I filmati sono soggetti a rumore di fondo, causato dalla qualità del sensore della telecamera, dalle procedure di archiviazione (compressione e salvataggio file) e dal guadagno automatico, impostazione data al fine di migliorare la visione da parte di un utente in caso di scarsa/eccessiva luminosità, ma che si rivela assolutamente controproducente nel caso di osservazione automatizzata. L'archiviazione dei file avviene a partire da un sensore avente risoluzione di 320x240 pixel, successivamente rimappata e portata alla dimensione di 640x480 pixel. In seguito, viene diminuita l'altezza dell'immagine utile per far spazio a video ad elementi grafici: il logo dell'I.N.G.V. in alto ed il TimeCode in basso. Tutta questa procedura, oltre a generare ulteriori errori dovuti all'interpolazione necessaria per il ridimensionamento dell'immagine, produce una deformazione della scena osservata, di cui vengono perse le proporzioni. Nell'ottica di poter lavorare in futuro in funzione della matrice radiometrica, si è deciso di riportare l'immagine alle sue dimensioni originarie. Pertanto, pur introducendo una ulteriore

interpolazione ed un conseguente errore, la “detection” avviene su immagini riscalate aventi formato 320x210, prive di grafica sovrainpressa, che riproducono la scena così come acquisita dal sensore della telecamera e che non impegnano l’algoritmo di riconoscimento su pixel artefatti, ovvero in numero superiore rispetto a quelli effettivamente utilizzati in fase di acquisizione.

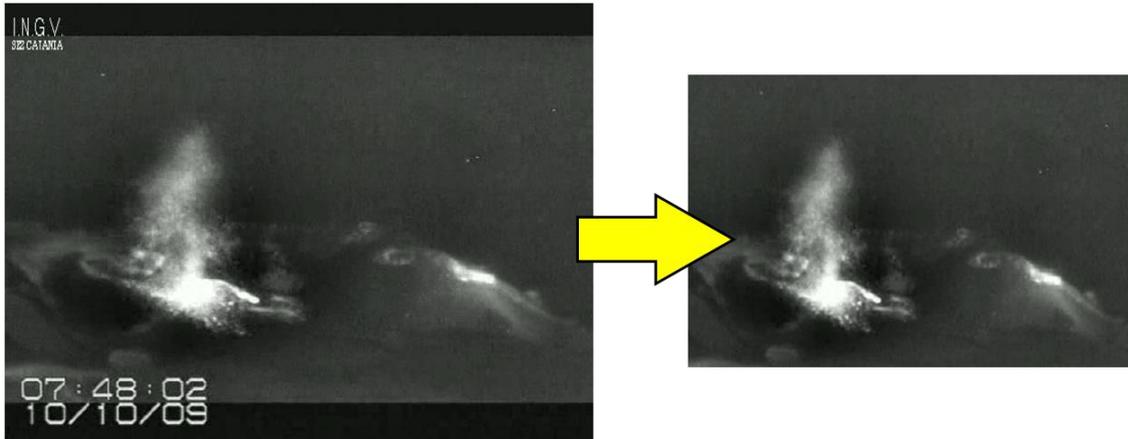


Figura IV.1.2: Ridimensionamento di un fotogramma

IV.1.2.B Analisi del Segnale

Il fotogramma ripulito e ridimensionato è pronto per l’analisi vera e propria; essa è basata sullo studio della dinamica della luminosità dei pixel che compongono la scena. Il fotogramma può essere considerato in due zone fondamentali chiamate *skyzone* ed *hotzone*. Nella prima, raramente le variazioni di luminosità sono dovute alla presenza di una esplosione bensì sono fortemente influenzate dalle condizioni meteo quali passaggio di nuvole e umidità. Nella seconda, la dinamica delle esplosione è la fonte principale di variazioni della luminosità.

Si è scelto di posizionare sul fotogramma 180 sample al fine di indagare in merito alla dinamica della luminosità dei pixel.

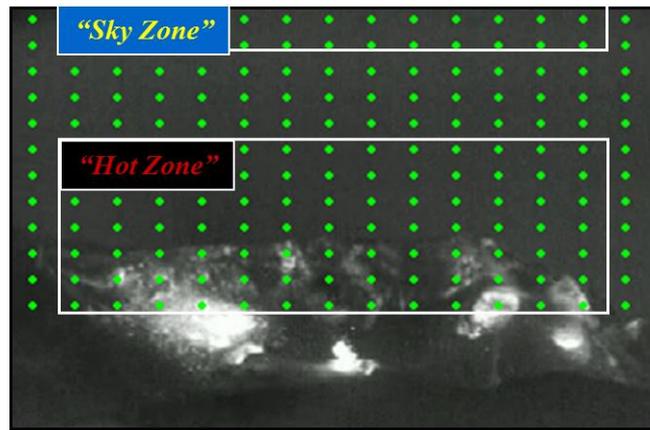
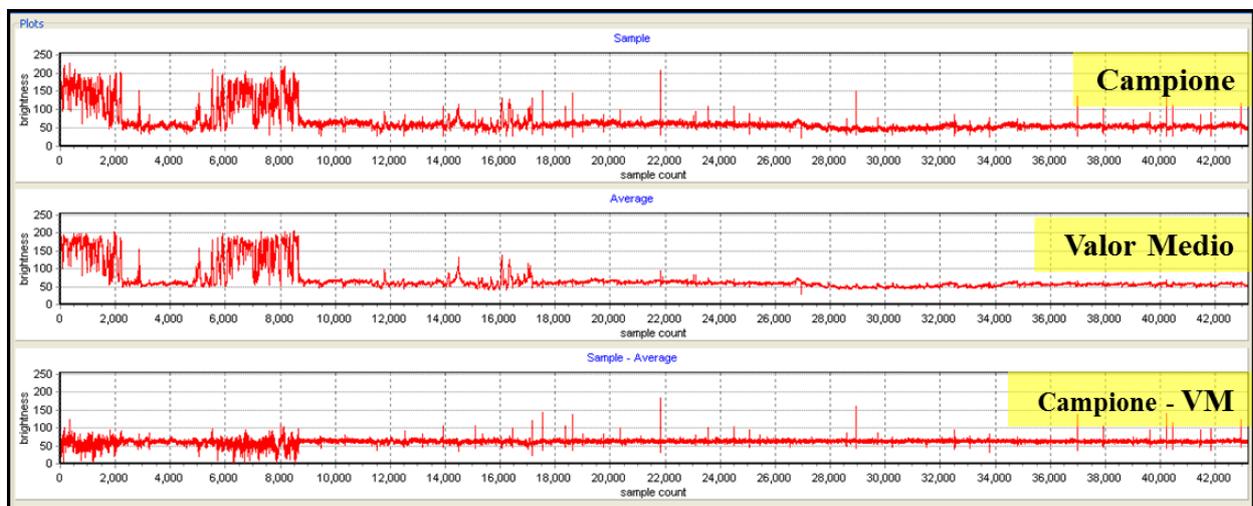


Figura IV.1.3: posizionamento dei sample e zone di interesse



IV.1.4: Dinamica della luminosità di un sample nella hotzone, del valor medio e della differenza delle due grandezze.

Filtraggio del rumore

Il rumore di fondo ha sicuramente un andamento tale da localizzarsi alle alte frequenze, pertanto, ottimizzare la qualità delle immagini implica l'implementazione di un filtro passa basso, tale da preservare la dinamica della luminosità conseguente alle evoluzioni meteorologiche. Se consideriamo lo stato del sistema, ovvero la luminosità relativa al singolo pixel, in assenza di variazioni meteo ed agli eventi esplosivi essa è soggetta ad una incertezza dovuta solo al rumore di fondo, ovvero:

$$x_{k+1} = x_k + q_m \quad (\text{IV.1.1})$$

dove x_k rappresenta lo stato di un pixel all'istante k e q_m l'incertezza di modello (o di processo) a cui è associata una deviazione standard σ_m .

Il modello che invece descrive l'andamento della luminosità dovuto esclusivamente ai fattori meteo è del tipo

$$y_{k+1} = x_{k+1} + q_r \quad (\text{IV.1.2})$$

dove y_k rappresenta la misura effettuata dal sensore della termocamera all'istante k e q_r l'errore della misura a cui è associata una deviazione standard σ_r .

Il problema in questione ricade nella casistica in cui può essere efficace un filtro di Kalman, la cui rappresentazione nel dominio del tempo (per sistemi tempo-discreti), monodimensionali, ad ingresso nullo, assume a regime una forma del tipo:

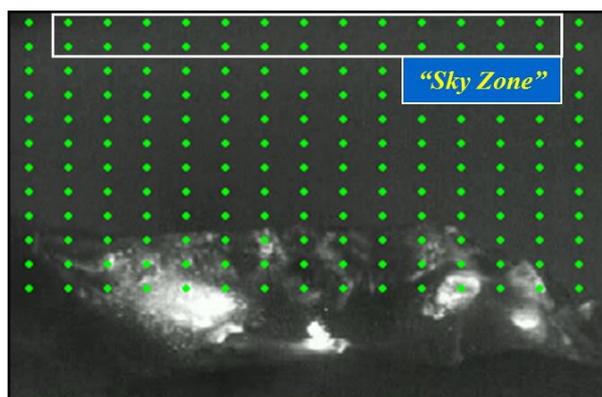
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Predizione} \\ \quad x_{k+1} = x_k \\ \quad P_k = P_{k+1} + \sigma_m^2 \\ \text{Aggiornamento} \\ \quad \gamma_k = P_k \cdot (\sigma_r^2 + P_k)^{-1} \\ \quad x_{k+1} = x_k + \gamma_k (y_k - x_k) \\ \quad P_{k+1} = (1 - \gamma_k) P_k \end{array} \right. \quad (\text{IV.1.3})$$

Sulla base di opportune osservazioni sui filmati inerenti a varie giornate, relativamente a porzioni delle immagini in cui la principale fonte di luminosità non dovesse essere un evento esplosivo, si è indagato in merito ai coefficienti statistici fondamentali caratterizzanti il rumore. Nel dettaglio, oggetto di analisi è stata la porzione di immagine relativa al cielo, la più distante dalla zona craterica.

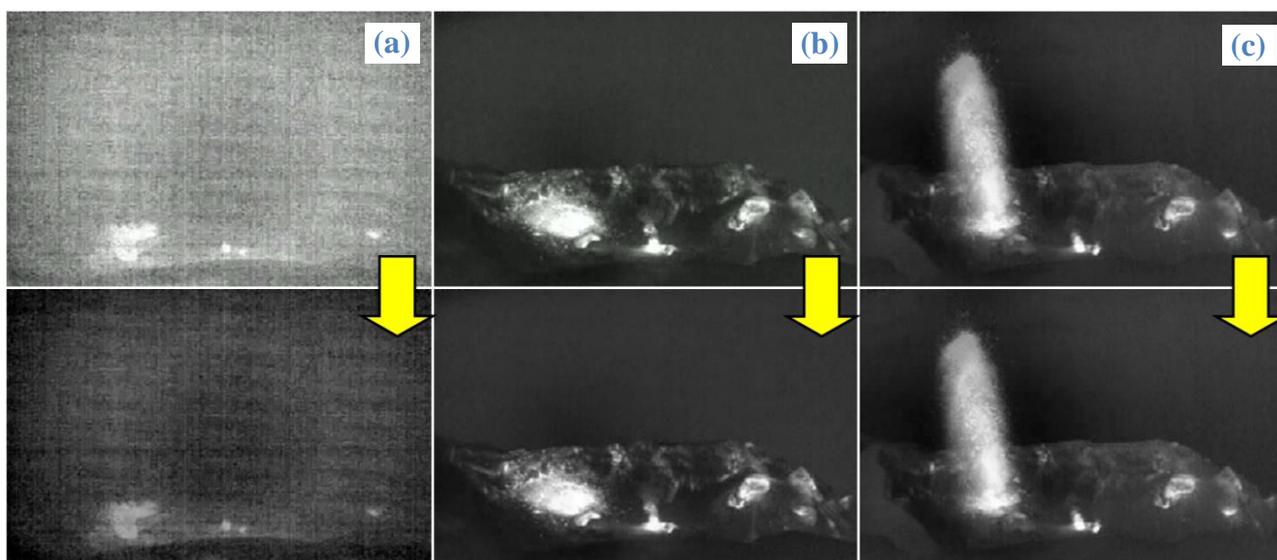
Analizzando immagini relative a giornate con meteo pressoché stabile, si è potuta valutare la precisione del modello. Si sono pertanto stimati gli indici statistici relativi al rumore ed al modello meteo, ottenendo $\sigma_r \approx 3.5$ e $\sigma_m \approx 2.7$, che portano a regime ad un guadagno $\gamma \approx 0.5$.

Il filtro così implementato rappresenta un ottimo nella realizzazione di un filtro passa basso capace di attenuare fortemente il rumore di fondo, a scapito di una modesta perdita della dinamica degli eventi meteorologici.

L'immagine, opportunamente ripulita tramite un filtraggio è così ottimizzata e pronta per la detection.



IV.1.5: Sample utilizzati per il filtraggio del rumore di fondo



IV.1.6: Effetti del filtraggio su tre fotogrammi differenti: forte nuvolosità(a); assenza di nuvolosità e di esplosioni(b); esplosione(c)

IV.1.2.C La catena di detection

Il blocco di detection consta di più parti, in quanto oltre a rilevare le anomalie termiche significative, ha il ruolo di darne una prima caratterizzazione in merito alle geometrie ed alla sorgente di emissione. In primo luogo vanno riconosciute le anomalie termiche associabili all'evento esplosivo: si ricordi infatti che qualunque sovrapposizione sulla scena di parte di nuvole o dalla presenza del sole sullo sfondo, il persistere di materiale caldo espulso in una precedente eruzione creano una anomalia termica che non va confusa con l'esplosione vera e propria. Secondariamente andrà assegnata la sorgente di emissione: il vulcano Stromboli presenta più bocche attive, dislocate con un orientamento costante sulla terrazza craterica e riconducibili a posizioni denominate Area Nord ed Area Sud con stili eruttivi tendenzialmente indipendenti. Il passo successivo è relativo al riconoscimento del contorno. Infine, il getto verrà osservato durante tutta la sua evoluzione che verrà considerata conclusa all'istante della sua massima espansione: questo è il momento in cui potranno essere archiviati i parametri geometrici del getto. Così come precedentemente detto, la logica seguita per effettuare la detection può essere vista come una catena, che può essere descritta dal seguente diagramma a blocchi.

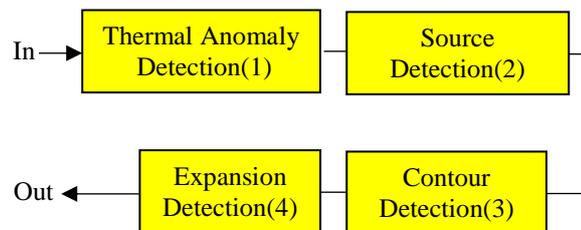


Figura IV.1.6: Schema funzionale della catena di detection

1) Riconoscimento dell'anomalia termica

La strategia per il riconoscimento di un evento esplosivo è stata centrata sullo studio della dinamica della luminosità dei pixel investiti dalle esplosioni, in modo da poterle discernere dalle evoluzioni del meteo. Nella migliore delle ipotesi, per esplosioni di dinamica usuale al carattere dello Stromboli, si desidererebbe un'immagine statica dove l'unica fonte di anomalia dovrebbero essere le esplosioni nella zona craterica, di carattere impulsivo. Purtroppo invece, le condizioni meteorologiche hanno una evoluzione notevole nell'arco anche del medesimo filmato; questo lo si deve alla posizione geografica del vulcano ed alla quota del punto di rilevazione, esposto frequentemente a vento molto forte. Il meteo dunque, riflettendosi in fluttuazioni di luminosità sulla scena inquadrata, a volte anche massicce (condizione di forte nuvolosità), tanto da portare alla perdita di ogni dettaglio, risulta essere un forte elemento di disturbo per la valutazione delle esplosioni. Viste queste premesse, la dinamica temporale di un evento esplosivo è stata analizzata con attenzione, introducendo vari parametri di valutazione.

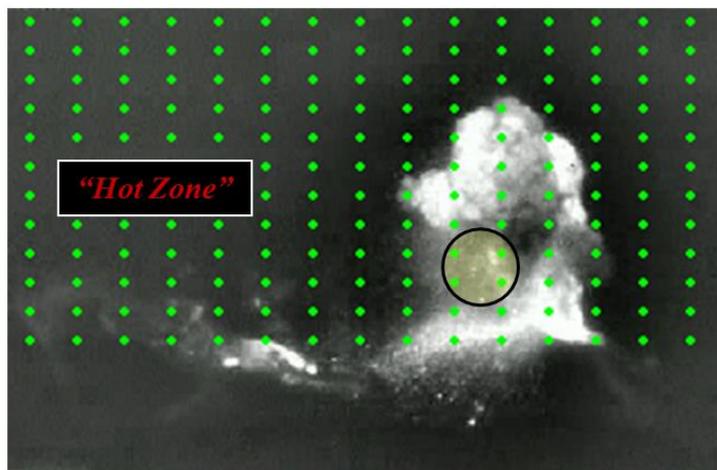


Figura IV.1.7: Fotogramma e pixel interessati da una esplosione nella "hotzone".

Posizionando sulla immagine non ancora filtrata vari punti di osservazione (samples), si è ricavata la dinamica della luminosità ad essi inerente. Ad essa viene sottratto il valor medio per poi essere filtrata utilizzando un filtro di Kalman così come precedentemente descritto.

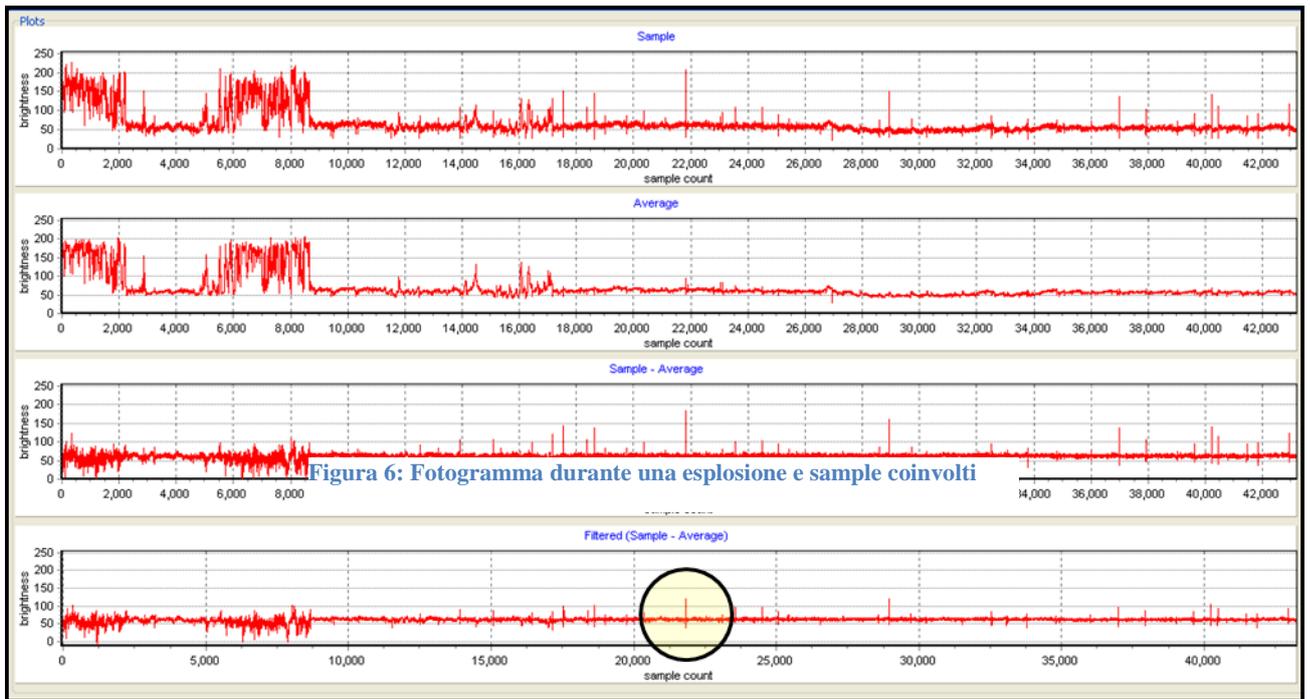


Figura IV.1.8: sequenza dell'analisi dei sample nella hotzone. Nel cerchio il segnale associato ad un esplosione.

La dinamica delle esplosioni è apparsa modellizzabile in buona approssimazione tramite una sola funzione campione $\bar{v}(kt)$, la cui evoluzione è descritta in 11 fotogrammi ($k = 0, 1, \dots, 10$): questa funzione è autovettore, $L(\bar{v}) \subset R^{11}$.

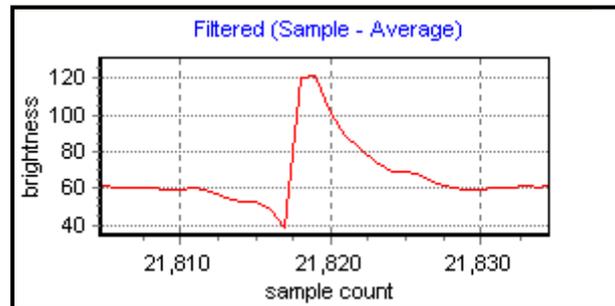


Figura IV.1.9: funzione campione dello spazio delle esplosioni

Una generica forma d'onda tempo-discreta $\bar{f}(kt) \subset R^{11}$ relativa ad un evento esplosivo, pur non appartenendo allo spazio a base unitaria $L(\bar{v})$, ha una buona correlazione con il segnale $\bar{v}(kt)$ e può essere rappresentata in una forma del tipo:

$$\bar{f} = \bar{I}\mu_f + \alpha\bar{v} + \bar{e} \quad \text{con } k \in N, \alpha \in R \quad (\text{IV.1.4})$$

dove \bar{I} è un vettore di 1, appartenente ad R^{11} ; μ_f il valor medio del segnale \bar{f} ; $\alpha = \bar{f} * \bar{v}$ ed \bar{e} rappresenta la proiezione di \bar{f} sullo spazio $G(\bar{w}) \subset R^{11}$, con $\bar{w} \in R$, ortogonale ad $L(\bar{v})$, ovvero $\bar{v} * \bar{w} = 0$;

La (1) può essere riscritta come la somma di due componenti, una statica $\bar{f}_s = \bar{I}\mu_f$ ed una dinamica $\bar{f}_d = \alpha\bar{v} + \bar{e}$

$$\bar{f} = \bar{f}_s + \bar{f}_d \quad (\text{IV.1.5})$$

In effetti, l'energia associata ad una esplosione, prescinde dalla componente statica del segnale, che non rappresenta altro che un offset trascurabile e di cui risulta ragionevole non occuparsi.

Il contenuto energetico della parte “interessante” del segnale che modella l'evento esplosivo, è pertanto:

$$E_d = E_f - E_s = \|\alpha\bar{v} + \bar{e}\|^2 = (\alpha\bar{v} + \bar{e}) * (\alpha\bar{v} + \bar{e}) = \alpha^2 \quad (\text{IV.1.6})$$

essendo $\bar{v} * \bar{v} = 1$ e $\bar{v} * \bar{e} = 0 \quad \forall \bar{e} \in G(\bar{w})$.

L'espressione di E_d così proposta relativamente alle sue componenti dinamiche $E_{\bar{f}_d * \bar{v}} = \alpha^2$ e $E_{\bar{f}_d * \bar{w}} = \|\bar{e}\|^2$ aiuta a definire un parametro di bontà che indichi quanto i segnali \bar{f} e \bar{v} siano correlati fra di loro.

L'approssimazione di \bar{f} , utilizzando la sua unica componente α relativa a $\bar{v}(kt)$ è tanto buona più risulta alto il parametro ρ , così definito

$$\rho = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \|\bar{e}\|^2} \quad (\text{IV.1.7})$$

che evidenzia quanto il contenuto energetico della parte dinamica del segnale \bar{f} ricade sulla sua componente relativa a \bar{v} , ed è pertanto un indice di bontà per la correlazione fra i due segnali, per la quale si dovrà garantire

$$\rho \geq \rho_{min} = 0.5 \quad (IV.1.8)$$

Tuttavia la dinamica di alcune variazioni meteo viene modellizzata da \bar{v} , portando ad una errata detection. Fortunatamente il contenuto energetico associato a queste forme d'onda è solitamente significativamente inferiore rispetto a quello associato ad effettive esplosioni: applicando una soglia, e fissando quindi un minimo energetico E_{th} per il segnale candidato ad essere interpretato come esplosione, è stato possibile effettuare un miglioramento delle prestazioni dell'algoritmo di riconoscimento.

Poiché è ragionevole pensare che all'aumentare del rumore di fondo aumenti uniformemente l'energia complessiva dell'immagine, è apparso logico parametrizzare la soglia energetica della detection riferendosi ad un rapporto segnale rumore minimo da garantire. Il valore di soglia viene pertanto modulato analizzando istante per istante la potenza di rumore N (anch'essa a meno della sua componente statica) secondo la relazione:

$$E_{th} : \frac{E_{th}}{N} = SNR_{min} = 4 \quad (IV.1.9)$$

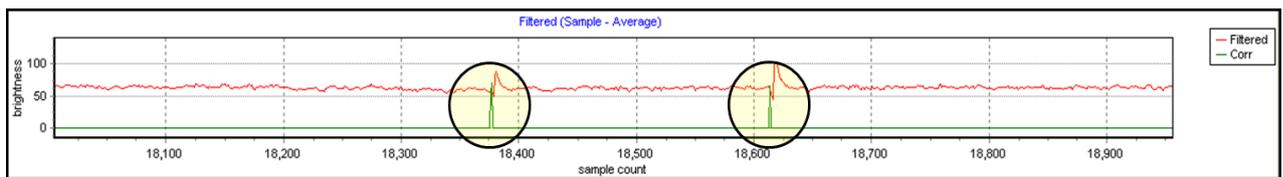


Figura IV.1.10: analisi del segnale filtrato e correlazione con l'autovettore v : il picco di correlazione si ha all'innescio dell'evento eruttivo

A questo si aggiunge un ulteriore controllo, mediante una maschera che tagli fuori ogni anomalia che non venga rilevata in zone considerate valide, ovvero non ricadenti al di sopra delle aree crateriche. Tale maschera, poiché fortemente dipendente dalla morfologia dell'area craterica, andrà ridefinita al verificarsi di forti eventi parossistici che stravolgano il numero o le dimensioni degli orli craterici.

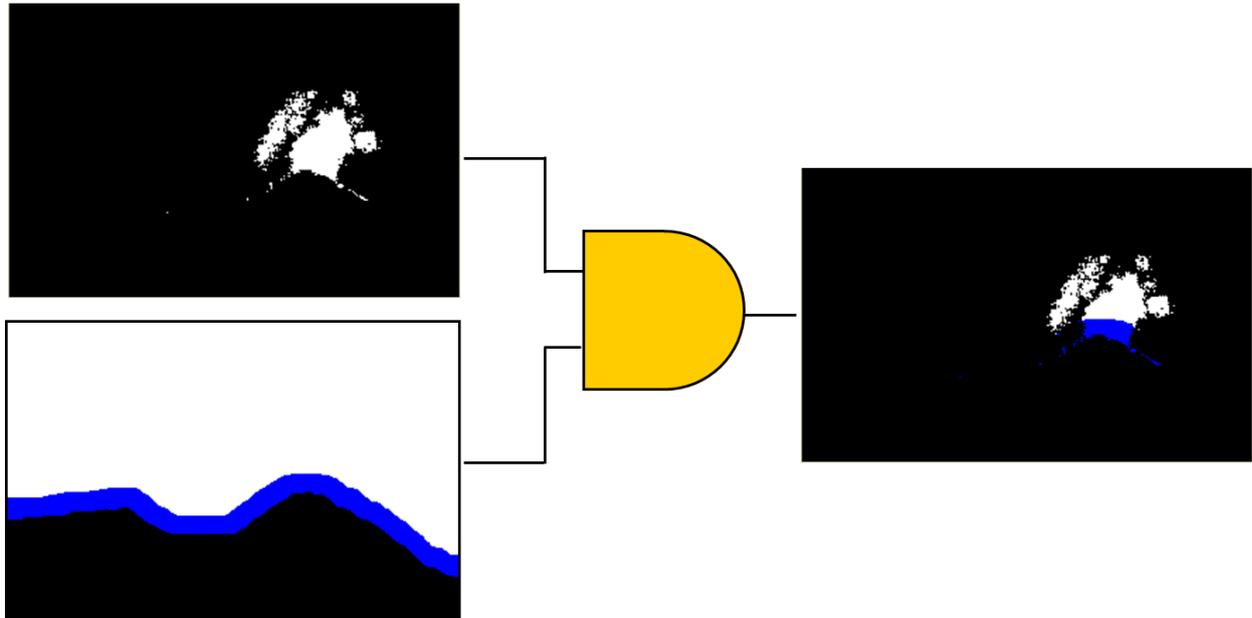


Figura IV.1.11: Controllo della coerenza della posizione dell'anomalia riconducibile ad un jet vulcanico

2) Assegnazione della sorgente dell'esplosione

Dopo aver riconosciuto l'innesco di una esplosione, ad essa viene assegnata la sorgente di emissione. Ogni area craterica ha una posizione sull'immagine, assegnata precedentemente ed univocamente determinata tramite una coppia di coordinate cartesiane. Nel momento in cui l'anomalia termica viene rilevata viene effettuato il calcolo della posizione del baricentro della feature individuata. Relativamente ad esso viene calcolata la distanza geometrica rispetto alle aree crateriche: la sorgente assegnata sarà quella risultante più vicina.



Figura IV.1.12: Posizione dei crateri attivi nella scena

3) Rilevamento del contorno

Per evidenziare graficamente la feature dell'esplosione viene tracciato il contorno dei pixel racchiusi

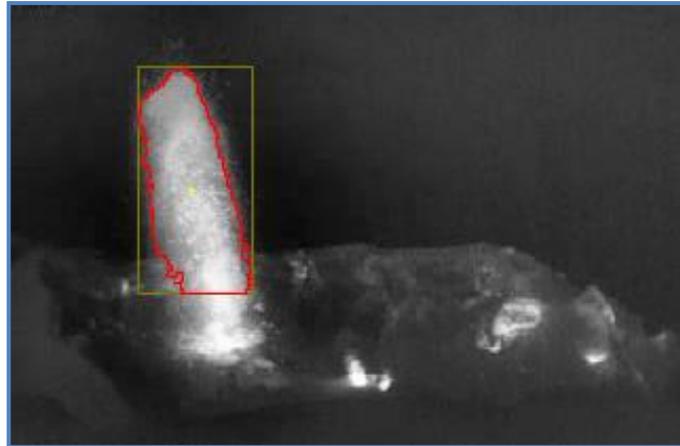


Figura IV.1.13: Rilevamento del contorno di un'anomalia termica

4) Rilevamento dell'espansione

Una volta innescata l'esplosione ha una dinamica caratteristica che ne caratterizza l'evoluzione e che determina il tempo di vita. L'esplosione viene considerata attiva sino a quando l'anomalia cresce dimensionalmente. Questo si traduce nel considerare l'anomalia termica che è rilevabile sempre dopo il fotogramma in cui è presente l'innescò: se l'area della stessa racchiude la feature rilevata all'istante precedente e possiede pertanto un numero di pixel maggiore, essa è considerabile come evoluzione dell'espansione. Il processo prosegue sino al fotogramma nel quale viene rilevata l'anomalia alla sua massima espansione. Di questa vengono calcolati i parametri geometrici in termini di pixel: Dispersione (numero di pixel all'interno della anomalia corrispondente alla massima espansione), altezza, larghezza. Il tempo che intercorre tra l'innescò e la conclusione dell'espansione è considerato la durata dell'esplosione.

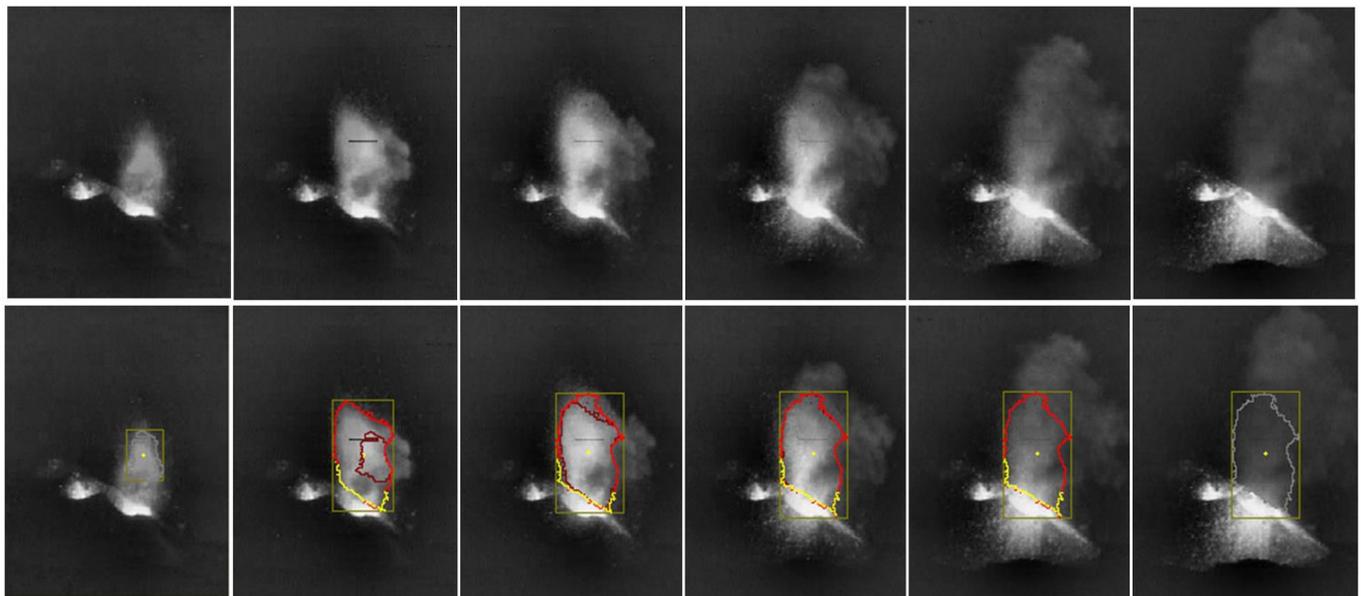


Figura IV.1.14: Evoluzione dell'esplosione stromboliana

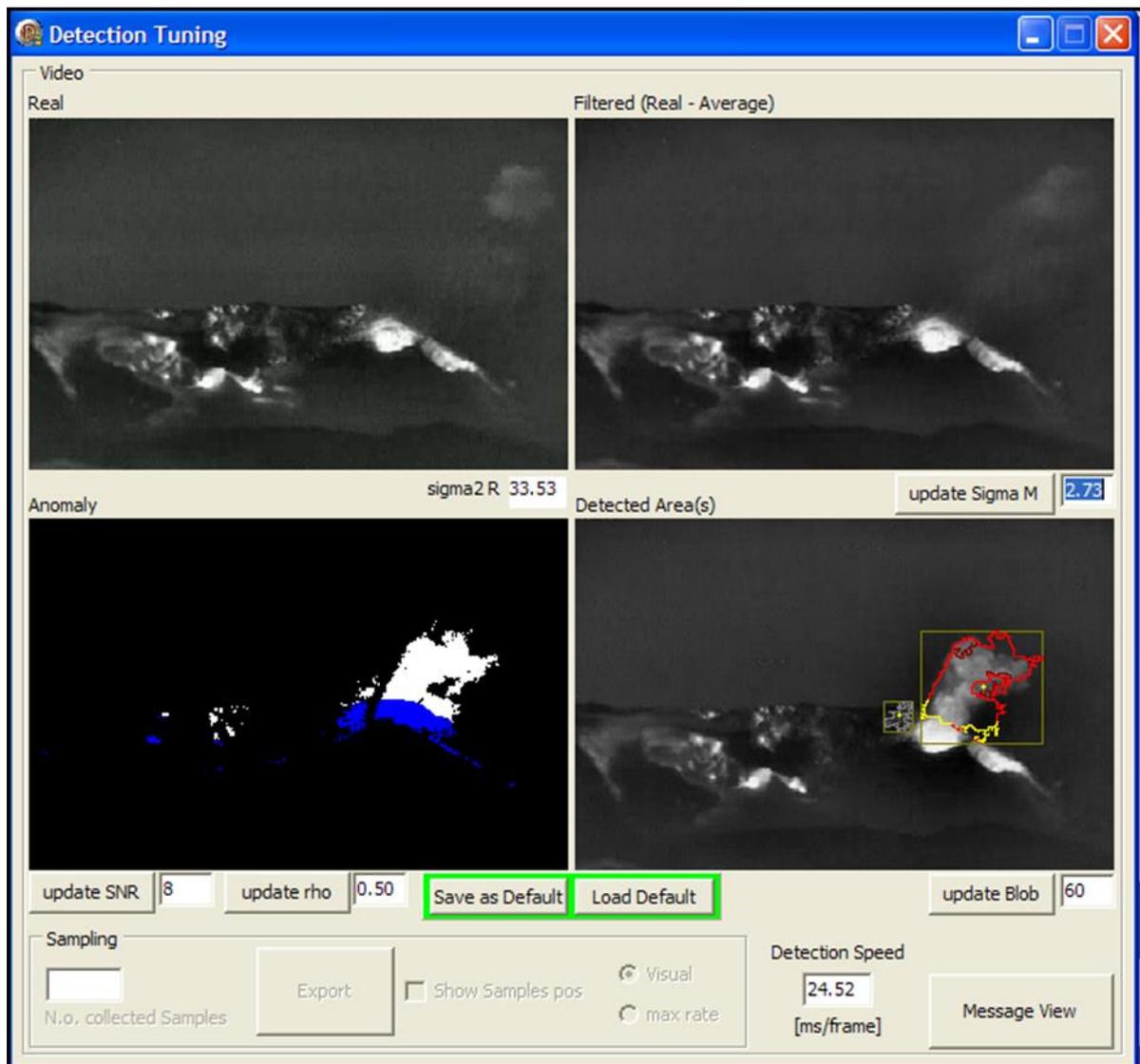


Figura IV.1.15: Uno screenshot del software di detection su base IR

IV.1.2.D Efficienza della detection

È stata condotta una fase di testing, durante la quale sono stati tarati i vari parametri coinvolti nell'algoritmo della detection. A tale scopo si è dovuto fissare un inevitabile trade-off tra il mancato riconoscimento di alcuni eventi esplosivi e l'errata detection di artefatti. La politica adottata ha puntato sulla robustezza dell'algoritmo, preferendo la perdita di alcuni eventi ad un conteggio in esubero degli stessi. Questa scelta è stata dettata soprattutto dall'osservazione di giornate particolarmente nuvolose, in cui generalmente l'analisi da parte di un operatore non viene effettuata a causa della particolare difficoltà incontrata nel discernere eventi esplosivi immersi in spessi strati di nebbia o nuvole. Vengono di seguito confrontati i dati rilevati tramite operatore ed in riconoscimento automatico:

METEO	Totale	Rilevate	Non rilevate	Artefatte
Molto nuvoloso	17	3	14	0
Stabile	30	27	3	2

Tabella IV.1.1: Efficienza della detection.

Sulla base dei dati mostrati e della logica scelta, l'algoritmo si mostra abbastanza robusto, consentendo la detection di alcuni eventi anche in caso di meteo particolarmente avverso.

IV.2 Detection di eventi vulcanici esplosivi sulla base di immagini termiche

IV.2.1 Il dato acquisito da analizzare

Riferendoci alla installazione presente nel II periodo (2010-2017), i filmati da analizzare provengono da una telecamera termica. Sulla base di una sequenza di immagini acquisite dalla stazione, rilevate con frequenza di due fotogrammi al secondo, vengono realizzati dei filmati archiviati sotto forma di file AVI, inerenti ad intervalli temporali di 15 minuti; nell'arco di 24 ore si generano pertanto 96 filmati costituiti da 1800 fotogrammi ciascuno, a meno di imprevisti di natura tecnica.

IV.2.2 L'algoritmo di Detection

IV.2.2.A Schema funzionale

Le immagini in ingresso, vengono inizialmente preparate e poi inviate parallelamente a due rami. Il primo (2a) si occupa della detection vera e propria; il secondo (2b) effettua una valutazione della attendibilità del dato analizzato in termini di visibilità causata dalle condizioni meteo e di integrità del video processato. L'uscita di tutto il sistema pertanto sarà composta da uno o più file che collezionano le esplosioni con tutte le caratteristiche salienti e da un set di informazioni che rappresentano la qualità della analisi effettuata

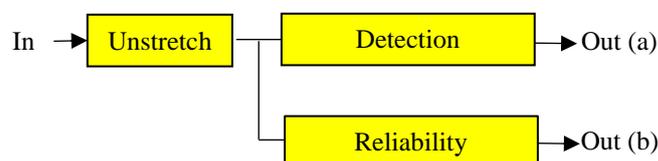


Figura IV.2.1: Schema funzionale dell'algoritmo di detection

IV.2.2.B Preprocessamento

Il blocco di pre-processamento si occupa semplicemente di riportare alle dimensioni originali di acquisizione i fotogrammi che compongono il file AVI. Le immagini provenienti

dalla termocamera generano un video la cui risoluzione è doppia rispetto all'originale, semplicemente per esigenze di visualizzazione. Le immagini da processare vengono pertanto ridimensionate alla risoluzione di 320x240 pixel.

IV.2.2.C La catena di Detection

Il blocco di detection consta di più parti, in quanto oltre a rilevare le anomalie termiche significative, ha il ruolo di darne una prima caratterizzazione in merito alle geometrie ed alla sorgente di emissione. In primo luogo vanno riconosciute le anomalie termiche associabili all'evento esplosivo: si ricordi infatti che qualunque sovrapposizione sulla scena di parte di nuvole o dalla presenza del sole sullo sfondo, il persistere di materiale caldo espulso in una precedente eruzione creano una anomalia termica che non va confusa con l'esplosione vera e propria. Secondariamente andrà assegnata la sorgente di emissione: il vulcano Stromboli presenta più bocche attive, dislocate con un orientamento costante sulla terrazza craterica e riconducibili a posizioni denominate Area Nord ed Area Sud con stili eruttivi tendenzialmente indipendenti. Il passo successivo è relativo al riconoscimento del contorno. Infine, il getto verrà osservato durante tutta la sua evoluzione che verrà considerata conclusa all'istante della sua massima espansione: questo è il momento in cui potranno essere archiviati i parametri geometrici del getto

Così come precedentemente detto, la logica seguita per effettuare la detection può essere vista come una catena, che può essere descritta dal seguente diagramma a blocchi.

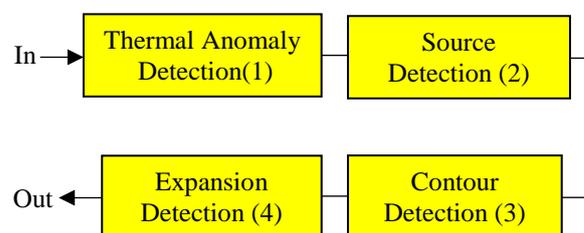


Figura IV.2.2: Schema funzionale della catena di detection

1) Riconoscimento dell'anomalia termica

Il riconoscimento di una anomalia termica, ascrivibile ad un evento esplosivo viene

effettuato grazie ad una sequenza di vidimazioni così schematizzabile:

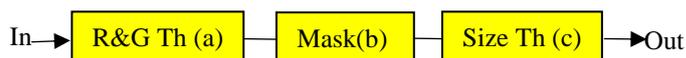


Figura IV.2.3: Schema funzionale della catena di riconoscimento dell'anomalia termica

1a) Superamento della soglia di temperatura

La strategia per il riconoscimento di un evento esplosivo è basata semplicemente sul superamento di una soglia di temperatura, vincolata a certe condizioni. Le immagini analizzate sono delle bitmap, in cui ogni pixel ha un colore mappato secondo una palette in temperatura, e viene analizzato nelle sue componenti RGB. I due estremi di temperatura, freddo e caldo vengono pertanto rappresentati rispettivamente dal colore nero ($R=G=B=0$) e dal colore bianco ($R=G=B=255$). Cercando pixel ad alta temperatura, ovvero colori più accesi, risulta sufficiente l'analisi delle sole componenti R e G. Il superamento di un determinato valore di temperatura, corrisponde al superamento di due valori di soglia R_{th} e G_{th} delle componenti R e G.

1b) Coerenza della posizione della anomalia

La presenza di una esplosione non è possibile su ogni punto della scena inquadrata. Un'eventuale anomalia termica interessante dovrà provenire al di sopra della terrazza craterica ed intersecarne il bordo. A tal proposito si è scelto di mascherare la terrazza craterica e di utilizzare il colore blu ($R=G=0, B=255$), per il bordo, con il quale verificare l'intersezione con il margine inferiore dell'anomalia termica.

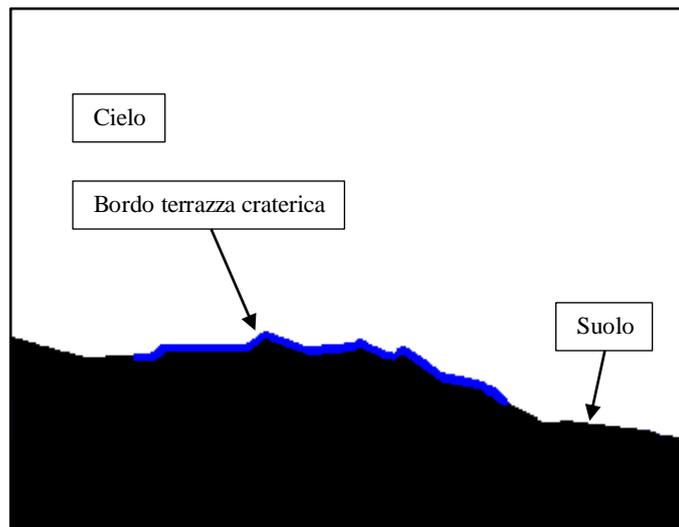


Figura IV.2.4: Maschera per la discriminazione del corretto posizionamento.

1c) Raggiungimento della dimensione minima

Un ultimo controllo per la validazione dell'anomalia viene effettuato sulla dimensione in pixel della stessa. Imponendo il superamento di un valore di soglia si tagliano fuori eventuali anomalie ben posizionate ma troppo piccole per essere considerate esplosioni.

2) Assegnazione della sorgente dell'esplosione

Dopo aver riconosciuto l'innescò di una esplosione, ad essa viene assegnata la sorgente di emissione. Ogni area craterica ha una posizione sull'immagine, assegnata precedentemente ed univocamente determinata tramite una coppia di coordinate cartesiane. Nel momento in cui l'anomalia termica viene rilevata viene effettuato il calcolo della posizione del baricentro della feature individuata e relativamente ad esso viene calcolata la distanza geometrica rispetto alle aree crateriche: la sorgente assegnata sarà quella risultante più vicina.

3) Rilevamento del contorno

Per evidenziare graficamente la feature dell'esplosione viene tracciato il contorno dei pixel racchiusi

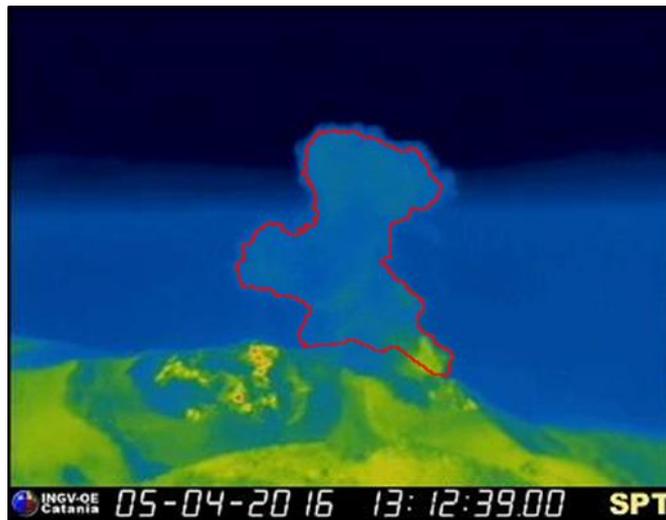


Figura IV.2.5: Rilevamento del contorno dell'anomalia termica

4) Rilevamento dell'espansione

Una volta innescata, l'esplosione ha una dinamica caratteristica che ne caratterizza l'evoluzione e che determina il tempo di vita. L'esplosione viene considerata attiva sino a quando l'anomalia cresce spazialmente. Questo si traduce nel considerare l'anomalia termica rilevata sempre dopo il fotogramma in cui è presente l'innescò: se l'area della stessa racchiude la feature rilevata all'istante precedente e possiede pertanto un numero di pixel maggiore, essa è considerabile come evoluzione dell'espansione. Il processo prosegue sino al fotogramma nel quale viene rilevata l'anomalia alla sua massima espansione. Di questa vengono calcolati i parametri geometrici in termini di pixel: Dispersione (numero di pixel all'interno della anomalia corrispondente alla massima espansione) , altezza, larghezza. Il tempo che intercorre tra l'innescò e la conclusione della espansione è considerato la durata dell'esplosione.

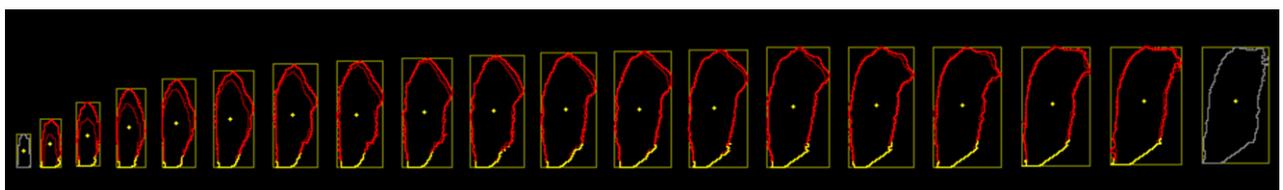


Figura IV.2.6: Evoluzione di un'esplosione , dall'innescò alla sua massima espansione

IV.2.2.D Discriminazione della qualità dei dati

Per la valutazione dell'attendibilità dei risultati ottenuti occorre valutare l'integrità dei filmati e la visibilità della scena, imputabile nella maggior parte dei casi a condizioni meteorologiche particolarmente avverse.

Se indichiamo come e_s l'errore introdotto dall'assenza di fotogrammi e con e_m l'errore introdotto dall'assenza di visibilità (imputabile generalmente a cattive condizioni meteo), l'attendibilità percentuale (*Reliability* o $R\%$) può essere definita come:

$$R\% = (1 - e_s) \cdot (1 - e_m) \cdot 100 \quad (\text{IV.2.1})$$

D1 Valutazione dell'errore dovuto all'assenza di segnale

Nel primo caso, a causa di eventuali anomalie di funzionamento è possibile che alcuni file siano incompleti e che pertanto non tutte le porzioni della giornata siano state processate, con conseguente perdita eventuale di alcuni eventi esplosivi. Un semplice indicatore di questo problema è dato dal conteggio dei fotogrammi di ogni file: la percentuale di fotogrammi mancanti sarà una componente di errore relativa al segnale che viene espresso come

$$e_s = \left(1 - \frac{n}{N}\right) \quad (\text{IV.2.2})$$

Dove N è il numero totale di fotogrammi attesi ed n è il numero di fotogrammi ricevuti e processati.

D2 Valutazione dell'errore dovuto alle condizioni Meteo

Per quanto riguarda la valutazione della visibilità della scena si è scelto di assegnare una valutazione di tipo binaria, ovvero un marker "OK" o "Bad" ad ogni fotogramma.

La valutazione viene effettuata su una ROI (Region Of Interest) definita *Hot Zone*, ovvero la porzione più significativa della scena, contenente una regione molto calda come l'area craterica, ed

una regione molto fredda: il cielo. In condizioni di ottima visibilità ci si aspetta che entrambi gli elementi siano distinti, ovvero che in tutta la ROI considerata ci siano forti differenze cromatiche.

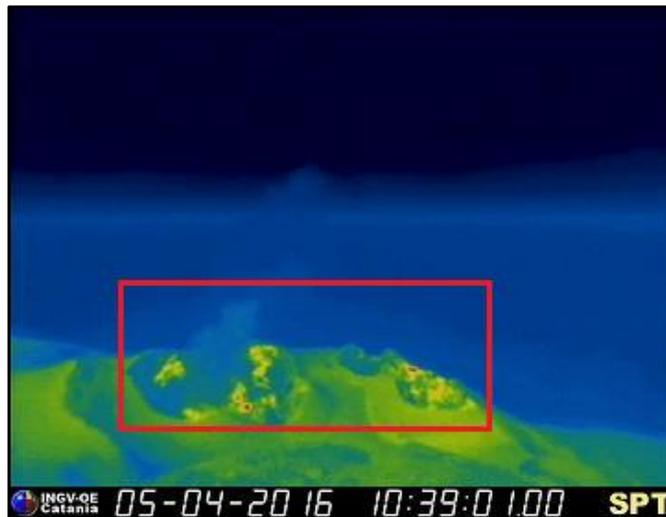


Figura IV.2.7: Fotogramma e Hot Zone

Dato che su pixel rappresentanti temperature alte ci si aspetta una predominanza del Rosso e su pixel rappresentanti temperature basse una predominanza del Blu, la grandezza da esaminare sarà:

$$\Delta_i = R_i - B_i, \quad \text{per } i \in H \quad (\text{IV.2.3})$$

$$\Delta_i \in [256, -256] \quad (\text{IV.2.4})$$

Indicando

$$MAX = \max_H(\Delta_i) \quad (\text{IV.2.5})$$

$$MIN = \min_H(\Delta_i) \quad (\text{IV.2.6})$$

per $i \in H$

è possibile definire il parametro

$$DIFF = \frac{MAX-MIN}{512} \quad (IV.2.7)$$

$$\text{dove } DIFF \in [0,1] \quad (IV.2.8)$$

In condizioni di ottima visibilità ci si attende $Diff = 1$, mentre per pessima visibilità $Diff = 0$;

Per tenere conto della dinamica della scena si è scelto però di raffinare ulteriormente la marcatura dei fotogrammi. Se difatti fossimo in presenza di continue variazioni di visibilità dovute, ad esempio, a forte vento in quota e conseguente passaggio di nubi, potrebbe capitare di avere continue variazioni del marker, ottenendo una valutazione che in realtà traviserebbe l'attendibilità della detection. A tal proposito si pensi ad una giornata avente Meteo = OK al 50%. Se ogni fotogramma fosse valutato indipendentemente da un certo numero di fotogrammi appartenenti ad un certo intervallo di tempo, si darebbe la stessa valutazione a giornate aventi 12 ore di visibilità piena e a giornate che in realtà hanno avuto un marker continuamente altalenante. Essendo le esplosioni vulcaniche degli eventi impulsivi la cui durata è mediamente di decine di secondi, non avere potuto osservare metà giornata sarà sicuramente più penalizzante che avere la metà dei fotogrammi con Meteo = Bad sparpagliati nell'arco di tutta la giornata.

DIFF viene pertanto inteso come un segnale tempo discreto $DIFF_k$ da processare. Per prima cosa viene filtrato in modo da ottenere il segnale di partenza *debiased*, che chiamiamo VAR_k .

Il filtro da utilizzare è un forte LP del tipo

$$y_k = \alpha \cdot y_{k-1} + (1 - \alpha) \cdot u_k \quad \text{con } \alpha \in [0,1] \quad (IV.2.9)$$

Dove $u_k = DIFF_k$, $VAR_k = y_k$ e $\alpha = 0.98$

VAR_k rappresenta così il valore istantaneo della variazione di $DIFF_k$. Per variazioni repentine, ovvero per

$$VAR_k < -Var_{TH} \quad (IV.2.10)$$

viene attivato un flag che decresce nel tempo con una inerzia del tipo:

$$FFLAG_k = FFLAG_{k-1} \cdot DynAct \quad (IV.2.11)$$

$$\text{Dove } FFLAG_k \in [0,1] \forall k \text{ e } DynAct \in [0,1] \quad (IV.2.12)$$

Pertanto dopo un certo numero di campioni $FFLAG_k$ scenderà sotto il valore di soglia Var_{TH} scelto precedentemente, ovvero si avrà che

$$FFLAG_k < TH_{min} \quad (IV.2.13)$$

In definitiva, se la variazione di visibilità è lenta, si andrà a valutare esclusivamente che le DIFF sia abbastanza grande per assegnare il marker $Meteo = OK$ al fotogramma, ovvero che

$$DIFF_k > TH_{min} \quad (IV.2.14)$$

Se invece si assiste ad una variazione repentina, non basterà che la (12) venga soddisfatta, ma si dovrà attendere un certo tempo di latenza pari ad un certo numero di campioni finché non venga soddisfatta anche la (IV.2.13)

Osservando diversi esempi si è scelto $DynAct = 0.95$

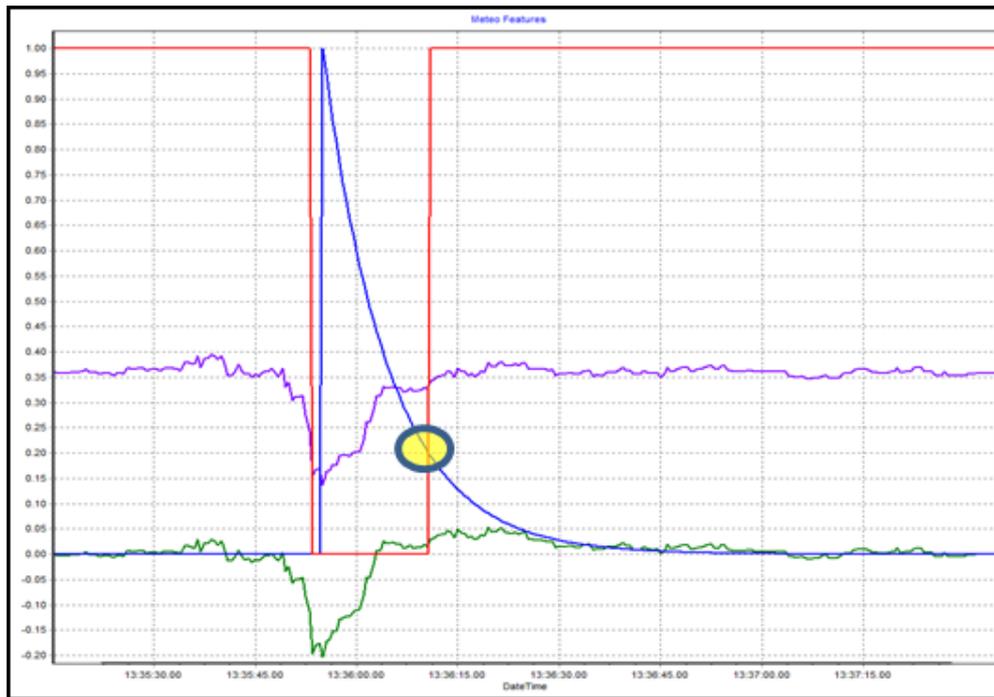


Figura IV.2.8: Parametri Meteo. In viola Diff, verde Var, Blu FFlag, Rosso l'uscita (alto Meteo = OK, basso Meteo = Bad). Si noti il cambio di stato per $Th_min = 0.20$

IV.2.2.E Le uscite del sistema

La catena di detection produce in uscita un file *exp* in cui sono elencate tutte le esplosioni della giornata analizzata, caratterizzate secondo i parametri:

- Sorgente dell'eruzione (cratere)
- Altezza H [pixel]
- Larghezza W [pixel]
- Dispersione D [pixel]
- Istante di innesco T [yyyy/mm/dd – hh:mm:ss]
- Durata EL [ms]

Vengono inoltre collezionati i fotogrammi relative ad ogni singola esplosione nell'istante di massima espansione.

La catena della valutazione della reliability fornisce in uscita un file met che caratterizza ogni fotogramma in termini di visibilità.

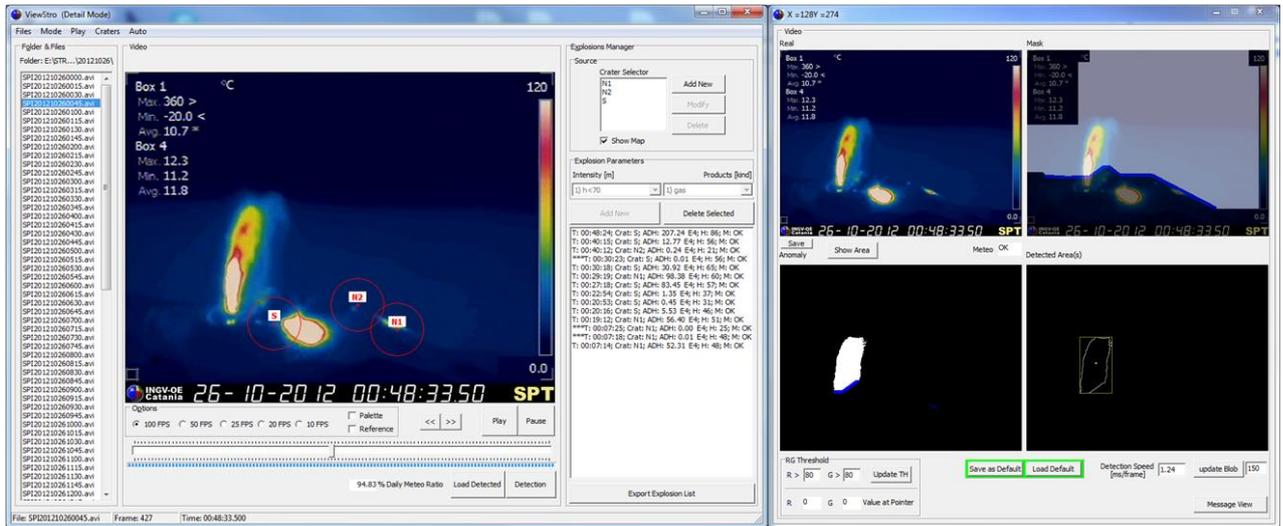


Figura IV.2.6: :Il software di detection in tutti i suoi componenti.

IV.2.2.F Efficienza della detection

METEO	Totale	Rilevate	Non rilevate	Artefatte
Molto nuvoloso	17	3	14	0
Stabile	30	27	3	2

Tabella IV.2.1: Efficienza della detection

IV.3 Dettaglio sui parametri di uscita

I parametri in uscita permettono una perfetta caratterizzazione del singolo jet vulcanico. In particolare, i parametri geometrici (altezza, larghezza dispersione) vengono valutati all'istante di massima espansione e sono misurati in pixel. Sicuramente c'è da notare che una visione effettuata tramite una sola telecamera fa sì che la misura perda di profondità. Per risolvere il problema bisognerebbe utilizzare almeno un'altra telecamera in opportuna posizione e dedicarsi ad un calcolo stereoscopico dei getti. Vista l'unicità della stazione, questa operazione può essere affidata solo a campagne di misura limitate nel tempo di cui non tratteremo, e considereremo sempre l'approssimazione bidimensionale valida, supponendo scarsa la casistica di getti particolarmente direzionali.

Nella gran parte delle applicazioni si rende necessario pervenire al valore vero (o con buona approssimazione) della geometria dei getti espressa in metri. La conversione tra pixel e metri è un problema di calibrazione della telecamera che presuppone la conoscenza della posizione relativa tra osservatore ed osservato. E' necessario conoscere pertanto non solo la distanza interposta tra il sistema di riferimento telecamere - Crateri ma anche gli angoli di posizionamento relativo (vedi appendice) [20]. Questa problematica viene affrontata nel capitolo successivo, dove viene ricercato il modello della telecamera termica utilizzata nel secondo periodo.

V. Modello della telecamera termica

Consideriamo l'osservatore (stazione telecamera) e dei punti del tipo P_{UTM} noti sulla scena osservata (terrazza craterica): Hornito nella zona meridionale, cratere nella zona settentrionale, cratere centrale ed un costone di roccia. Per questi punti sono note le coordinate geografiche che esprimiamo in proiezione UTM (coordinate geografiche):

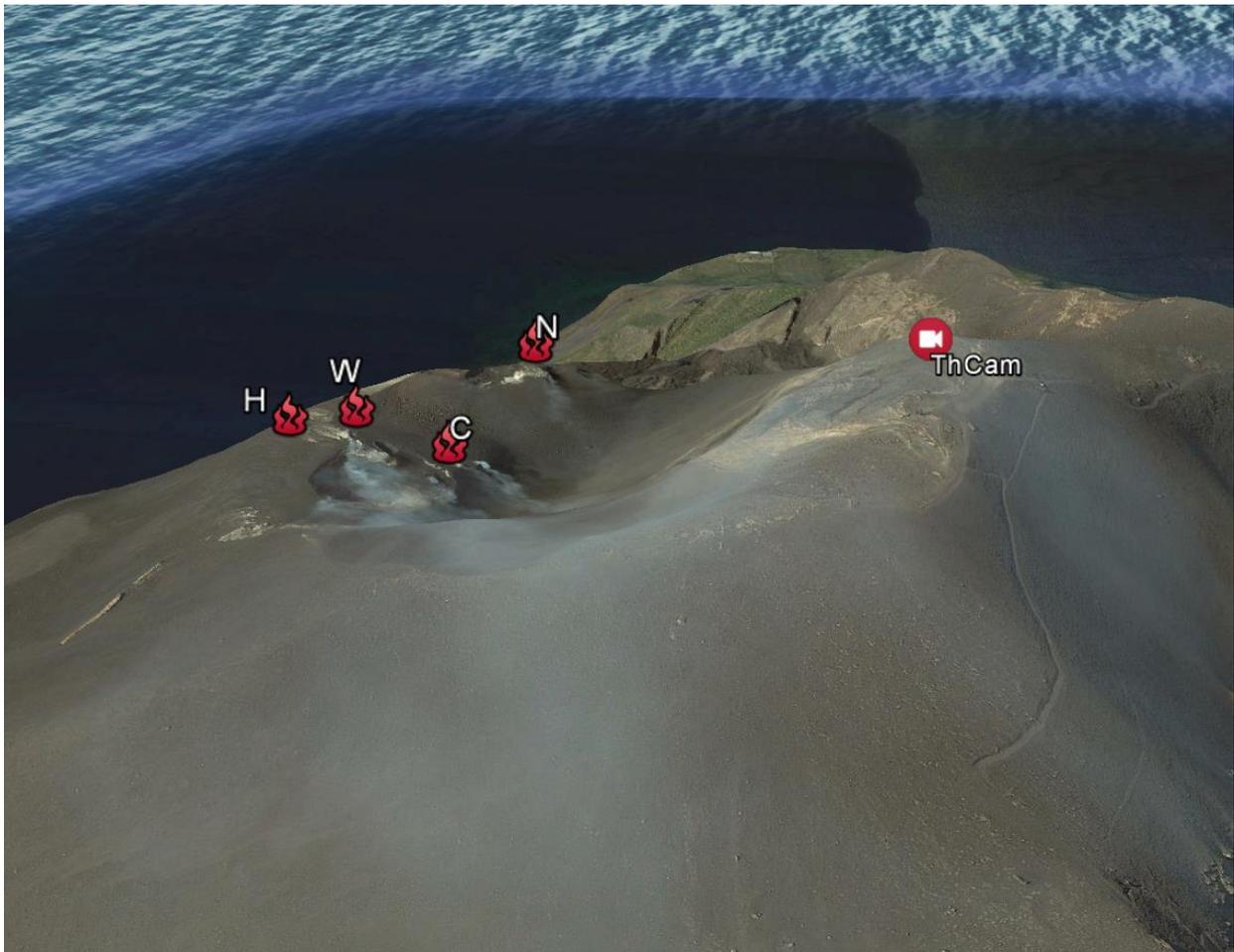


Figura V.1: osservatore ed osservato in proiezione UTM (vista a volo d'uccello): Telecamera(ThCam); Hornito (H); Cratere N (N); Cratere (C); costone (W)

	E	N	H
ThCam	518597.00	4293782.84	918
H	518283.47	4293909.14	770
W	518328.65	4293775.90	800
N	518416.48	4294022.38	760
C	518363.35	4293888.21	750

Tabella 1: Tabella 1 proiezione UTM di osservatore ed osservato

Consideriamo come sistema di riferimento assoluto XYZ quello che ha origine nel centro dello schermo della telecamera e che ha l'asse X in direzione Est, l'asse Y in direzione N e l'asse Z concorde con la quota geografica.

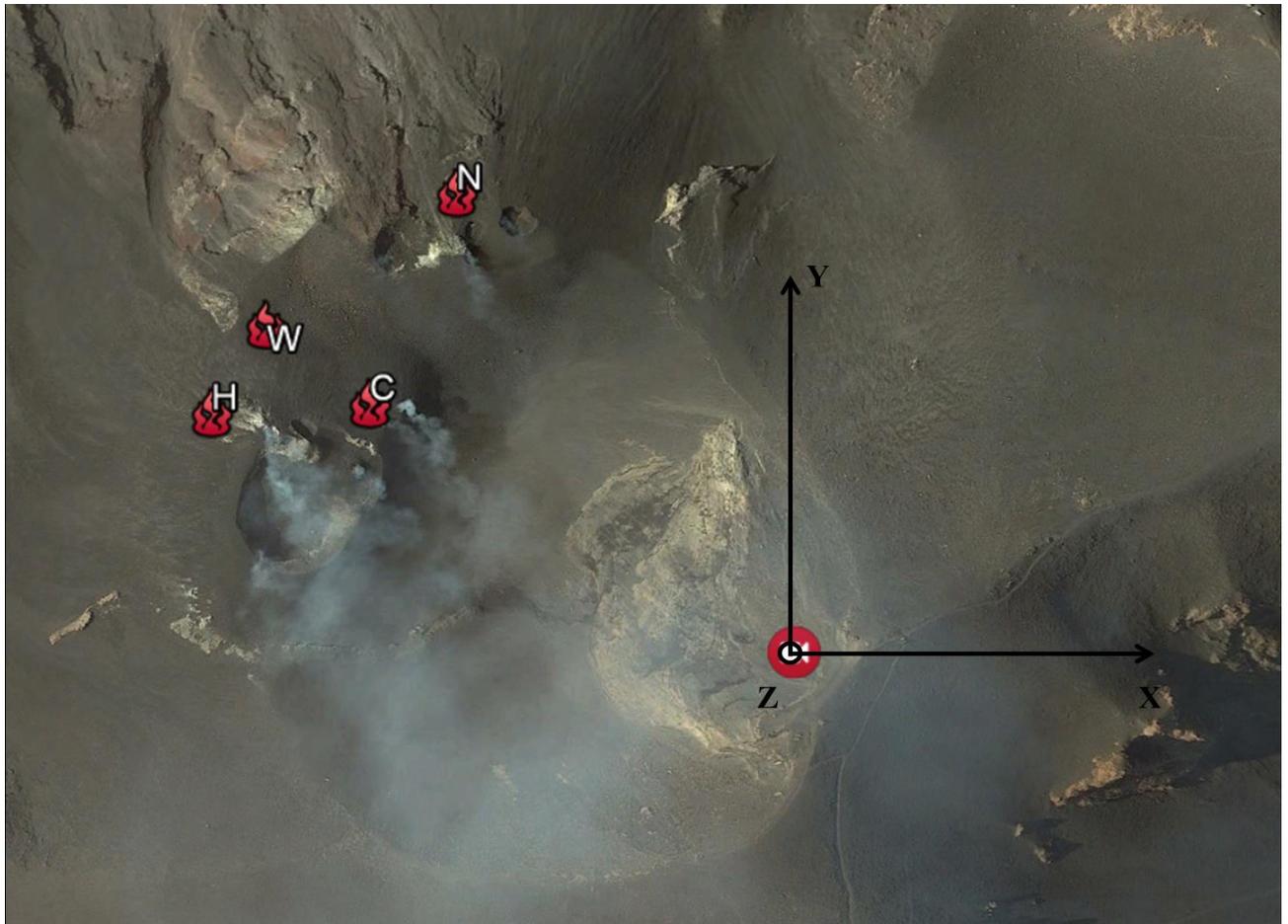


Figura V.2: Sistema di riferimento centrato sulla stazione video

Esprimiamo adesso in coordinate geografiche osservatore ed osservato, considerando che un generico punto \mathbf{P} lo si ottiene tramite la semplice relazione:

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_{UTM} - \mathbf{P}_{ThCam}$$

Ottenendo:

	E(X)	N(Y)	H(Z)
ThCam	0	0	0
H	-313.53	126.30	-148.00
W	-268.35	-6.94	-118.00
N	-180.52	239.54	-158.00
C	-233.65	105.37	-168.00

Tabella 2: osservatore ed osservato nel sistema di riferimento XYZ

In base al modello della telecamera, avendo il sistema di riferimento assoluto ed il sistema di

riferimento dello schermo della telecamera origine degli assi coincidenti, il punto \mathbf{P} viene trasformato in nel punto $\tilde{\mathbf{I}}$ giacente sullo schermo della telecamera tramite una trasformazione del tipo:

$$\tilde{\mathbf{I}} = \mathbf{\Pi}_0 \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{P} \quad (\text{V.1})$$

dove $\mathbf{\Pi}_0$ è la matrice prospettica ed \mathbf{R} è una opportuna matrice di rotazione.

Ricordando che la risoluzione delle immagini termiche è di 320x240 pixel e che in una bitmap l'origine degli assi non giace al centro dell'immagine bensì nell'angolo in alto a sinistra con un sistema di riferimento del tipo

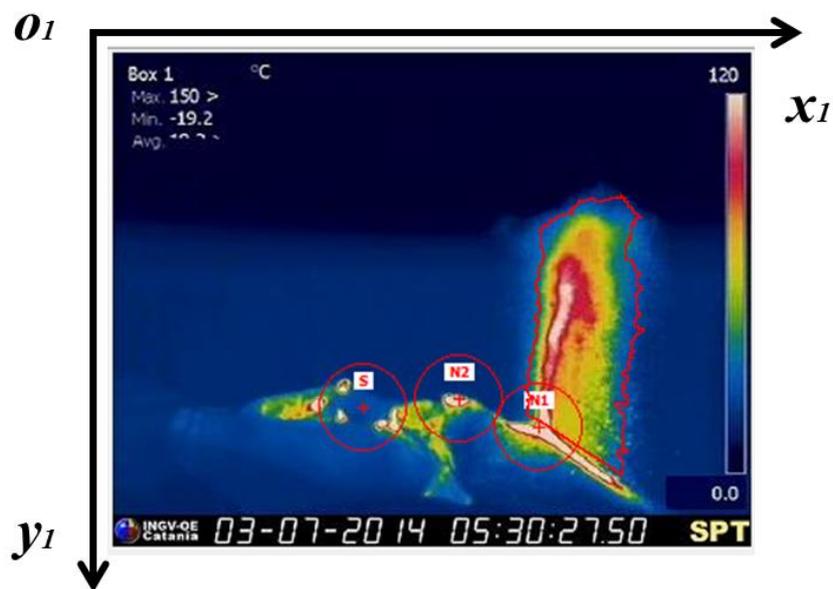


Figura V.3: Sistema di riferimento $x_1 O_1 y_1$ dello schermo della telecamera

Considerando inoltre che l'ottica della telecamera ha una apertura di 90° , si ha che $f=160$ e di conseguenza:

$$\mathbf{\Pi}_0 = \begin{pmatrix} 160 & 0 & 160 \\ 0 & 160 & 120 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{V.2})$$

I punti osservati, rispetto al sistema di riferimento dello schermo $x_1 O_1 y_1$ sono:

	x_1	y_1
H	141	173
W	70	183
N	228	193
C	147	205

Tabella 3:Punti osservati espressi in coordinate immagine

La matrice \mathbf{R} in coordinate non omogenee può essere vista come una matrice \mathbf{R}' del tipo:

$$R' = R_{II} \cdot R_I \quad (V.3)$$

dove R_I effettua una rotazione di 90° intorno all'asse X ed R_{II} effettua una opportuna rotazione tale da compensare azimuth α e pitch β del sistema telecamera necessario in fase di installazione:

$$R_{II} = R_{Azimuth} \cdot R_{Pitch} \quad (V.4)$$

È immediato scrivere la matrice che effettua una rotazione di 90° rispetto l'asse X come:

$$R_I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \text{ e } P' = R_I \cdot P \quad (V.5)$$

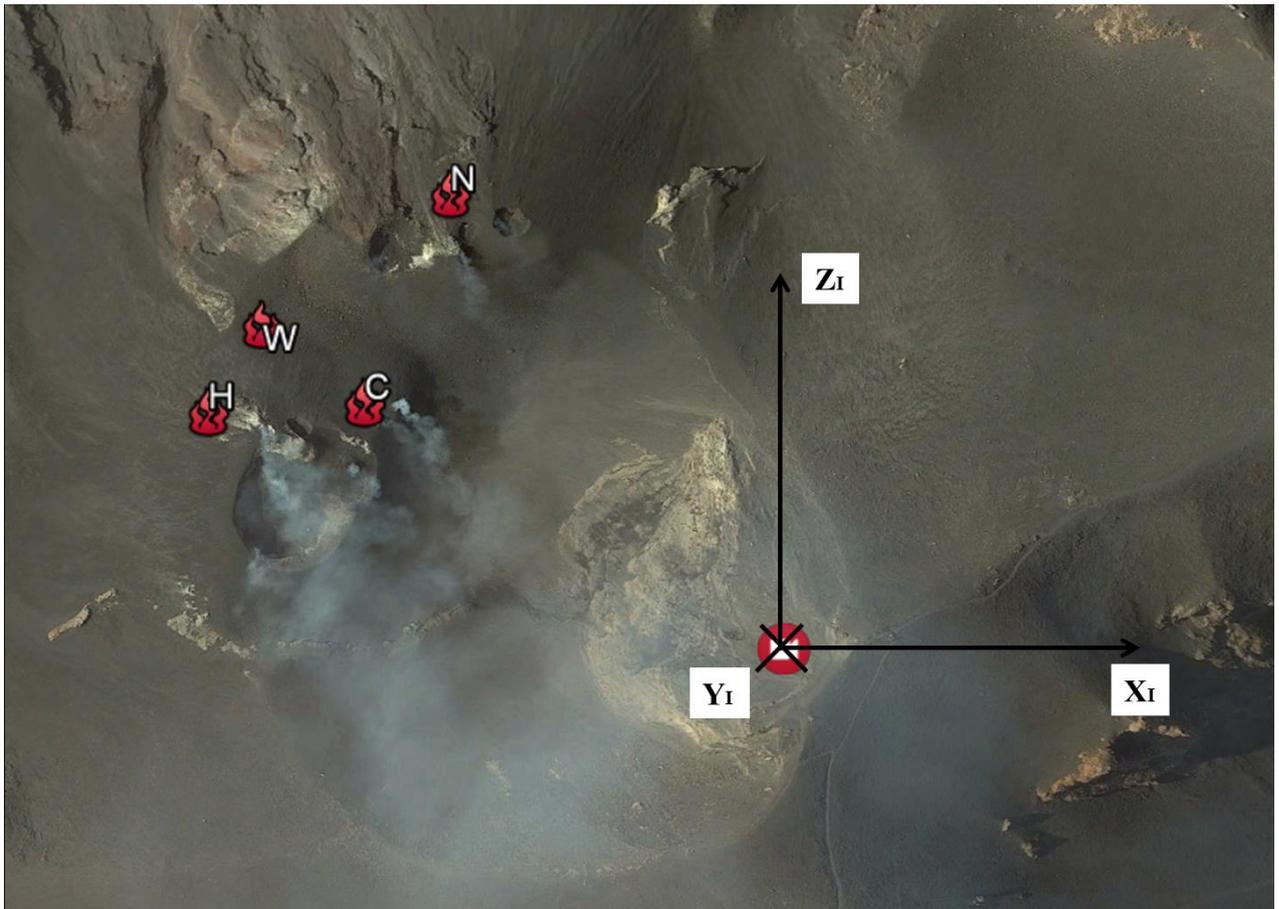


Figura V.4: Sistema di riferimento $X_I Y_I Z_I$ centrato sulla telecamera termica e ruotato di -90° rispetto a X

Ottenendo:

	X_I	Y_I	Z_I
ThCam	0	0	0
H	-313.53	148.00	126.30
W	-268.35	118.00	-6.94
N	-180.52	158.00	239.54
C	-233.65	168.00	105.37

Tabella 4: osservatore ed osservato nel sistema di riferimento $X_I Y_I Z_I$

A questo punto la (V.1) diviene:

$$\tilde{\mathbf{I}} = (\mathbf{\Pi}_0 \cdot \mathbf{R}_{Azimuth} \cdot \mathbf{R}_{Pitch} \cdot \mathbf{R}_I) \cdot \mathbf{P} \quad (\text{V.6})$$

Che conduce ad un sistema di due equazioni non lineari a due incognite in α e β risolvibile tramite i punti noti espressi nei due sistemi di riferimento XYZ (tab.2) e $x_I o_I y_I$ (tab.3), ottenendo:

$$\alpha \cong 61^\circ \text{ e } \beta \cong 5.4^\circ \quad (\text{V.7})$$

Stabilita così la corrispondenza tra ogni punto dello schermo e la scena reale, è possibile quantificare metricamente le geometrie della scena. Considerando che i vari punti della scena non sono tutti alla stessa distanza e che questo influenza la prospettiva, mediando fra i diversi valori ottenuti, si è scelta come risoluzione media per tutta la scena:

$$l_{pixel} = 1.8m \quad (\text{V.8})$$

Che verrà utilizzato per convertire i parametri H ed L.

Per quanto riguarda la dispersione, che rappresenta in buona approssimazione la massa del materiale eruttato, ai fini della valutazione della dinamica nel lungo periodo possiamo utilizzare il dato grezzo, così come si presenta.

Ai fini di regolamentare il traffico aereo in condizioni di sicurezza, l'Ente Nazionale per l'Aviazione Civile (ENAC) ha richiesto all'INGV dei dati concreti per la valutazione della distanza minima da rispettare rispetto ai crateri attivi dello Stromboli.

La grossa mole di dati raccolta in maniera automatica dal sistema di detection rende possibile una analisi statistica degli eventi e la ricerca dei valori di altezza più probabili raggiunti dai jet vulcanici. Il sistema, permette di quantificare sia la frequenza delle esplosioni sia le loro caratteristiche geometriche, come l'altezza massima raggiunta e l'area di ricaduta dei prodotti balistici. L'analisi delle esplosioni registrate in periodi di venti giorni su tre intervalli campione (1-20 giugno 2012, 22-31 luglio 2012, 1-30 luglio 2011) che sono rappresentativi dell'attività stromboliana ordinaria (da questi sono stati tolti i giorni in cui sono state registrate esplosioni stromboliane straordinarie) ha permesso di caratterizzare 10.657 esplosioni stromboliane ordinarie.

Nei tre periodi analizzati il numero medio orario delle esplosioni, è stato circa 9, 8, e 7 con valori compresi tra 4 e 12 eventi (esattamente uguale all'oscillazione della frequenza media osservata sul lungo periodo: 2004-2012). L'altezza massima raggiunta dai balistici è stata di circa 290 m in 16, 9 e 1 eventi, mentre l'altezza media è stata di 110, 103 e 99 m nei tre periodi. In figura 3 è stata riportata la probabilità di accadimento delle esplosioni in funzione dell'altezza nei tre periodi analizzati per classi di altezze di 10 m. Il picco della distribuzione unimodale delle altezze delle esplosioni si è attestato, in tutti e tre i periodi, tra 40 e 60 m (figura 3), e il 50 % di tutte le esplosioni ha raggiunto i 110, 90 e 100 m di altezza nei tre periodi analizzati. L'ampiezza media della ricaduta dei balistici nei tre periodi analizzati non superava i 300 m avvicinandosi a questo valore in 22, 9 e 10 eventi, mentre l'ampiezza media è stata di 96, 91 e 80 m rispettivamente; pertanto i balistici non ricadevano oltre i 150 m dalla bocca eruttiva ad eccezione di alcuni eventi più direzionali che comunque non hanno superato i 200 m di distanza dalla bocca. In figura 4 è stata riportata la probabilità di accadimento delle esplosioni in funzione dell'ampiezza della ricaduta nei tre periodi analizzati per classi di ampiezze di 10 m. I picchi

delle distribuzioni quasi unimodali delle ampiezze delle esplosioni misurate si sono posizionati tra tra 50 e 90 m (figura 4), e il 50 % di tutte le esplosioni ha raggiunto i 100, 90 e 80 m di ampiezza nei tre periodi analizzati.

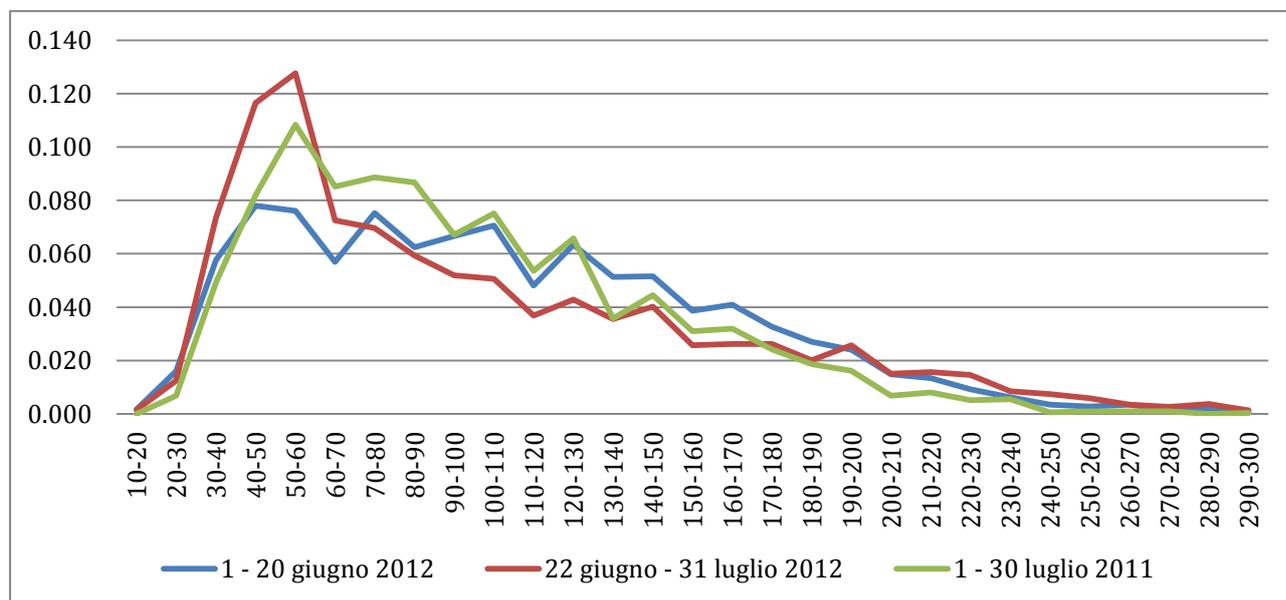


Figura VI.1.2. Probabilità di accadimento delle esplosioni stromboliche ordinarie in funzione dell'altezza dei lanci dei balistici misurati su tre periodi campione analizzati nel 2012 e 2011.

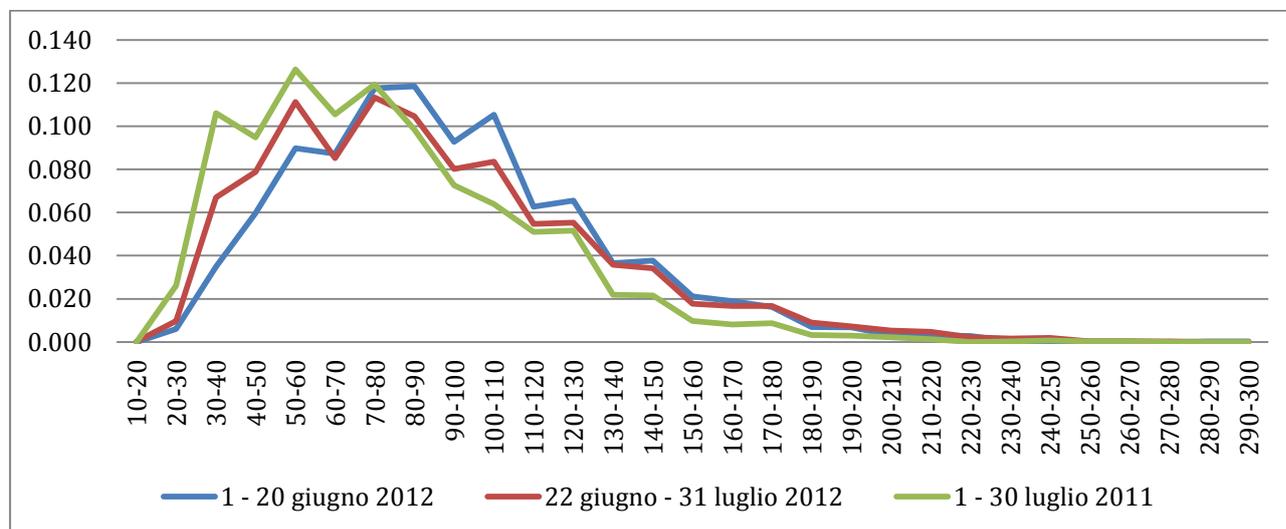


Figura VI.1.3: Probabilità di accadimento delle esplosioni stromboliche ordinarie in funzione dell'ampiezza della ricaduta dei balistici misurati su tre periodi campione analizzati nel 2012 e 2011.

I risultati dell'analisi delle 10657 esplosioni stromboliche ordinarie, sopra esposti, ci consentono di affermare che la probabilità di accadimento un evento esplosivo ordinario in grado di raggiungere l'area del Pizzo sopra la Fossa (a circa 250 m di distanza dalla bocca più vicina)

molto bassa, praticamente nulla, infatti non sono state rilevati balistici sul Pizzo sopra la Fossa durante le ricognizioni effettuate nei periodi sopra analizzati, ad esclusione di quelli delle esplosioni stromboliane straordinarie che, come premesso, sono state tolte dall'analisi.

Utilizzando i risultati di questa analisi statistica è possibile riportare sulla mappa le aree medie e massime di ricaduta dei balistici emessi dall'attività stromboliana ordinaria sotto forma di cerchi intorno alle bocche attive. In figura 5 vengono mostrate le aree di ricaduta dei balistici dalle 5 bocche attive nel periodo 2011-2013 sulla Terrazza Craterica dello Stromboli. Per semplicità sono stati usati dei diametri massimi uguali per tutte le bocche con 400 m di ampiezza che tiene conto anche il contributo delle esplosioni direzionali (vedi la discussione sulle ampiezze massime misurate), e medi di 100 metri come risulta dall'analisi statistica prima illustrata.

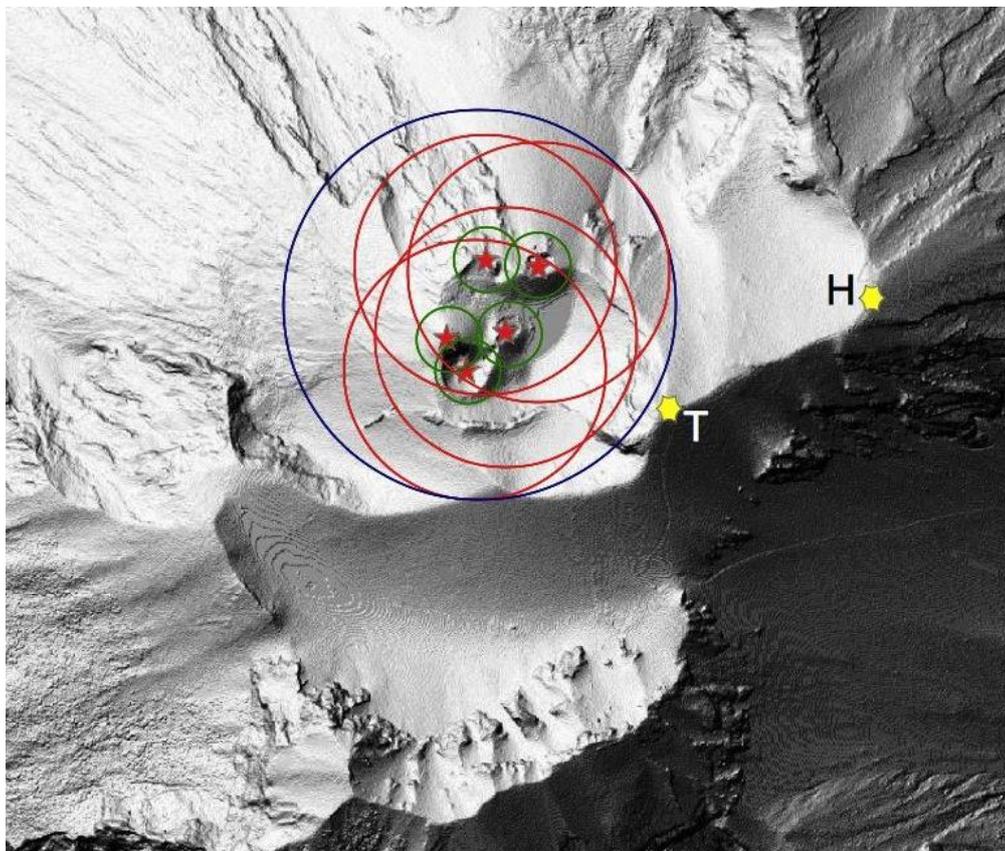


Figura VI.1.4: sfere di ricaduta dei prodotti

Figura 5. Le bocche attive negli ultimi 2 anni (stelle rosse) localizzate sulla Terrazza Craterica con i cerchi massimi (rossi) e medi (versi) di dispersione dei balistici, il cerchio di colore blu racchiude tutti i cerchi massimi (il DMS è stato fornito da M. Marsella, Università La Sapienza, Roma).

La figura VI.1.4 mostra che la media dei balistici eruttati dall'attività stromboliana ordinaria ricade dentro o nelle immediate vicinanze della Terrazza Craterica e raggiunge la quota di circa 930 m di altezza, cioè 110 m sopra la Terrazza Craterica, e ben al di sotto della quota di 960 m del Pizzo sopra la Fossa. Invece, utilizzando i valori massimi delle altezze e delle aree ricadute di balistici possiamo trovare il volume occupato dagli eventi esplosivi più intensi dell'attività stromboliana ordinaria e visualizzarlo come un cilindro di 600 m di diametro e 300 m di altezza sopra il punto di coordinate 38°47'38,6"N e 15°12'40,2" E posto a circa 800 m s.l.m.

VI.2 Redazione del bollettino settimanale sul monitoraggio vulcanico, geochimico, delle deformazioni del suolo e sismico del vulcano Stromboli.

Visto lo stato di attività dello Stromboli l'INGV fornisce a cadenza settimanale (o giornaliera in caso di attività fuori dall'usuale) dei bollettini che per definizione [all. A DPC]:

- Contengono esplicite valutazioni vulcanologiche e di pericolosità relative ai fenomeni osservati e allo stato di attività vulcanica per la definizione della criticità da parte del DPC
- Oltre alle valutazioni per ciascuna singola disciplina di monitoraggio, riportano una sintesi complessiva dello stato di attività del vulcano e, ove possibile, indicazioni circa la sua eventuale evoluzione a breve-medio termine;

Per quanto riguarda le informazioni di carattere vulcanologico ogni settimana viene descritto lo stato di attività del vulcano in termini di:

- Numero di bocche attive e loro posizione
- Intensità dei getti in funzione dell'altezza.

- Frequenza delle esplosioni intesa come media oraria giornaliera.

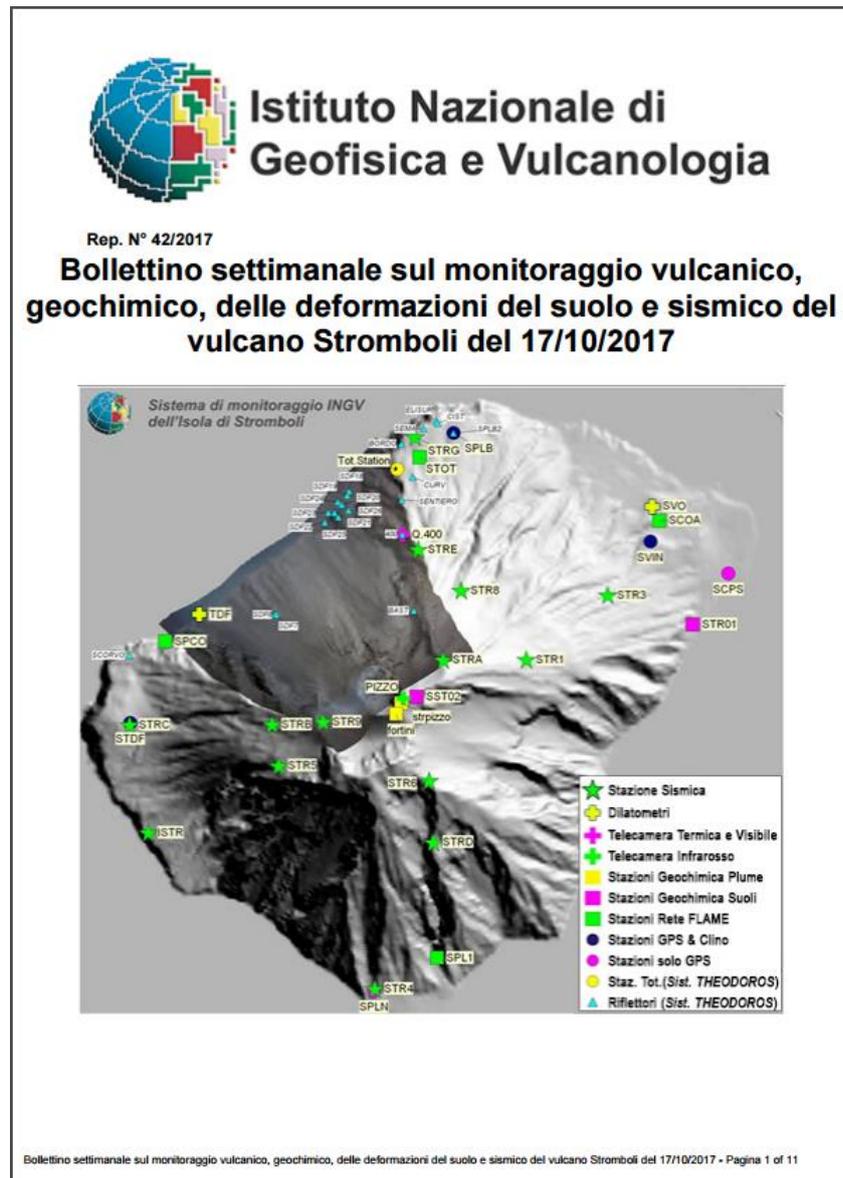


Figura VI.2.1: Bollettino settimanale sullo stato di attività del vulcano Stromboli

Considerando che in giornate di normale attività si assiste ad un numero compreso tra i 24 e 180 eventi, il supporto di uno strumento che automaticamente possa analizzare 24 ore di filmati appare fondamentale. C'è da dire che prima dello sviluppo di tale sistema il conteggio avveniva in maniera puramente osservativa rendendo il lavoro oneroso e tipico di un automatismo, non certo da affidare ad un operatore che meglio si offre come eventuale supervisore.

Per l'analisi delle singole giornate è stato sviluppato un semplice applicativo che elabora i file

prodotti dall'analisi automatica delle esplosioni, che ne mostra i tratti salienti e calcola automaticamente la media oraria giornaliera delle esplosioni tramite un semplice grafico riferito alle due aree crateriche fondamentali: settentrionale e meridionale. Il redattore del bollettino può visualizzare un elenco completo delle esplosioni della giornata disponendo di filtri per la visualizzazione di tutte le esplosioni, o divise per area craterica; di essere è possibile osservare la completa evoluzione per un veloce controllo sulla coerenza della detection. Un piccolo pannello fornisce i valori mediati per la giornata da introdurre nel grafico finale del bollettino.

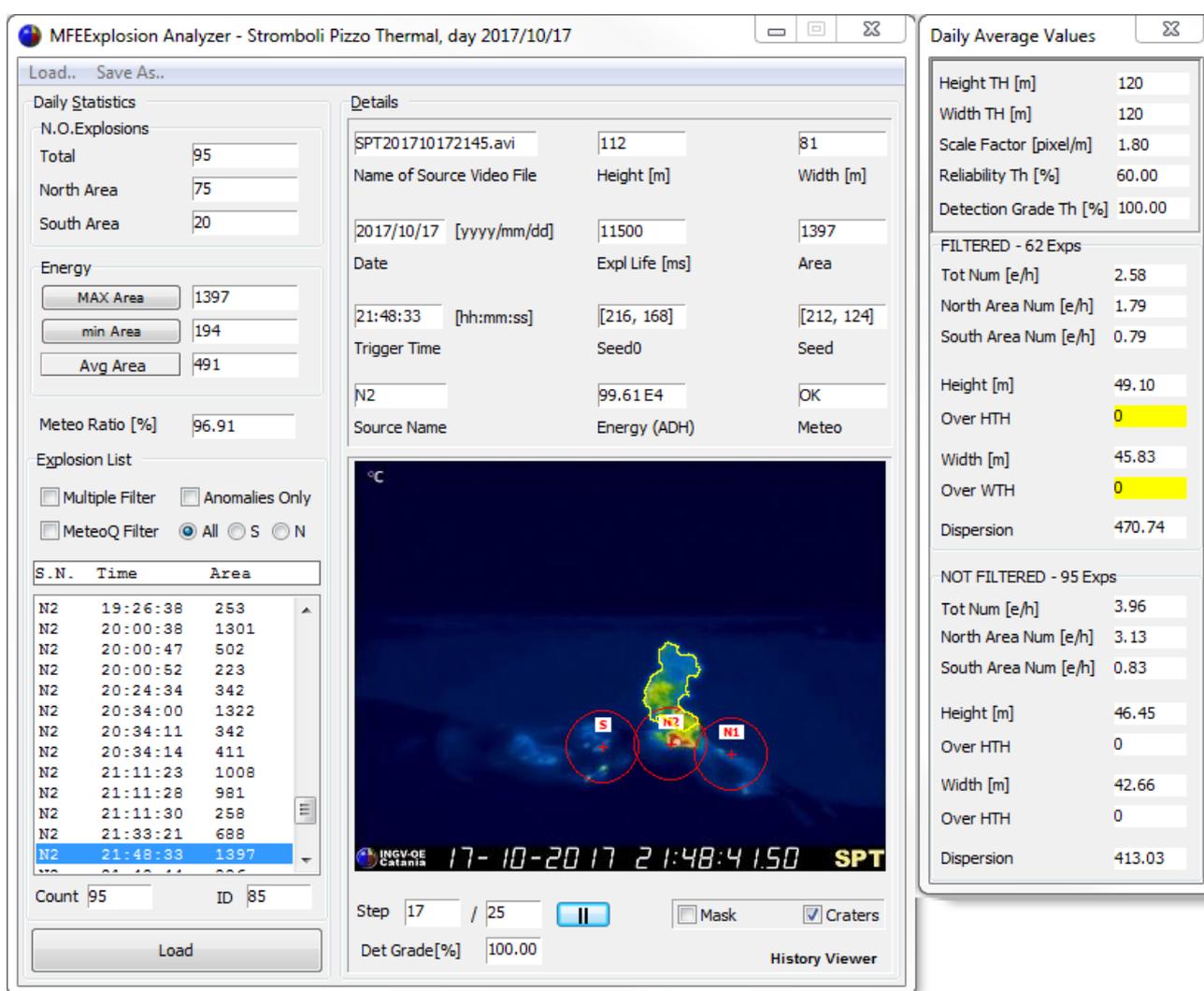


Figura VI.2.2: Analizzatore delle esplosioni giornaliere

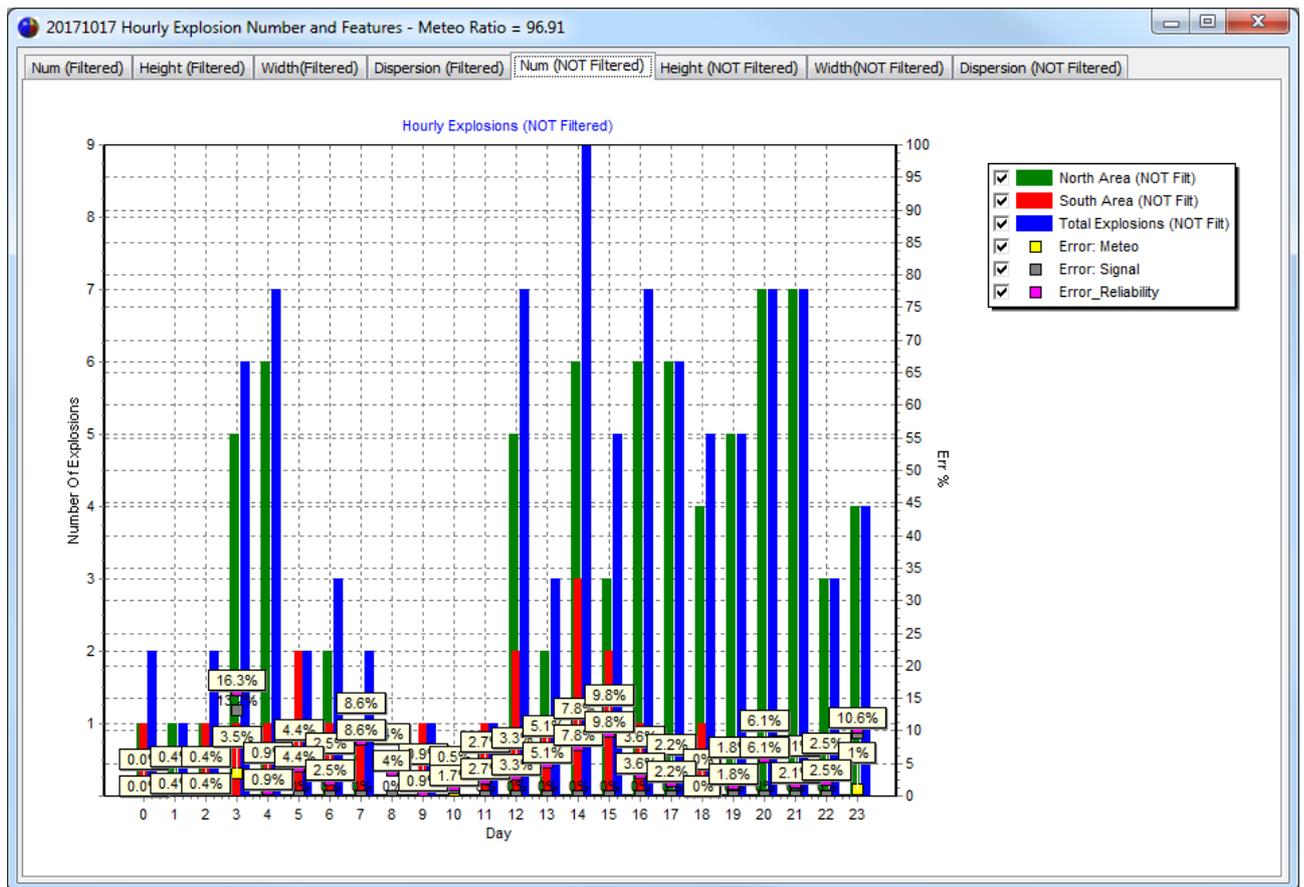


Figura VI.2.3: Andamento della media oraria giornaliera per le differenti aree crateriche.

Prima dello sviluppo del sistema automatico, l'intensità dei getti I veniva valutata considerando l'altezza raggiunta dai prodotti, secondo la classificazione empirica

$$\begin{cases} H > 150 \text{ m} & I \text{ Alta} \\ 80 < H < 150 \text{ m} & I \text{ Media} \\ H < 80 \text{ m} & I \text{ Bassa} \end{cases} \quad (\text{VI.2.1})$$

Si è invece provato a fare una valutazione di stampo statistico per cercare una soglia da applicare in maniera più robusta.

VI.3 Studio dell'intensità dei getti

VI.3.1 Attività stromboliana classica

A tal proposito si è scelto di analizzare una presa una popolazione di 2920 esplosioni, durante un periodo in cui lo Stromboli ha avuto manifestazioni "classic strombolian" [20110701-20110730] considerate nel valore complessivo.

Così come già detto si è pensato di affidare al valore di dispersione il significato di "intensità": più materiale viene emesso, maggiore è l'energia in gioco nell'esplosione.

Ipotizzando che quello che ci appare come evento poco probabile abbia una intensità che non è classificabile come "media" si è scelto di considerare i percentili della distribuzione dei campioni al 15% per discriminare gli estremi che caratterizzano l'intervallo di valori di dispersione di intensità "media". Così facendo, vengono ridefinite le soglie di intensità come di seguito:

$$\begin{cases} D > 5000 \text{ pixel} & I \text{ Alta} \\ 5000 < D < 1000 \text{ pixel} & I \text{ Media} \\ D < 1000 \text{ pixel} & I \text{ Bassa} \end{cases} \quad (\text{VI.3.1})$$

A questo punto si è cercato di indagare in merito alla correlazione fra altezza e dispersione dei getti che risulta essere alta per valori di dispersione sino a 5400 pixel, corrispondenti ad una altezza stimata di circa 140 m.

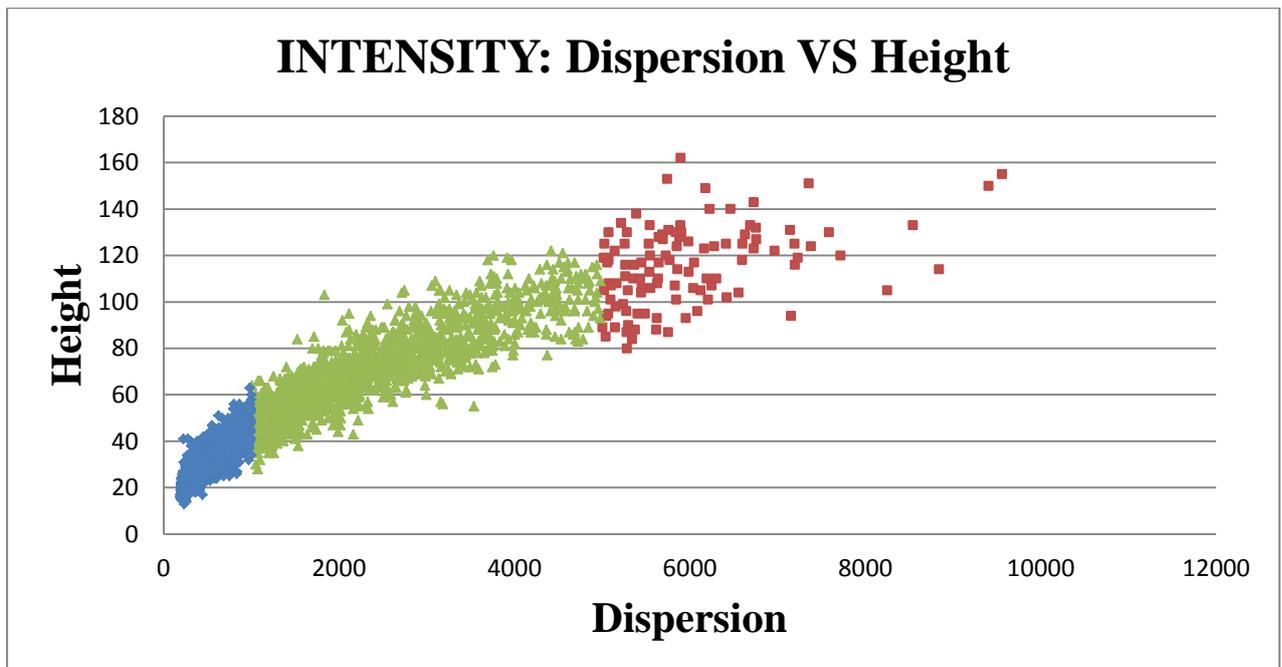


Figura VI.3.1: Correlazione fra altezza e dispersione dei getti e soglie di intensità per una popolazione di 2920 esplosioni di attività stromboliana classica

Per valori di dispersione maggiori di 5400 pixel, l'intensità delle esplosioni non è più legata esclusivamente alla altezza delle stesse in quanto evidentemente si ha una distribuzione a "rosa" dei prodotti, corrispondente ad una situazione in cui il magma è residente nella parte superficiale dei condotti.

Da questa riflessione, si ha la conferma che il parametro che meglio rappresenta l'energia della singola esplosione risulta essere la dispersione e non l'altezza.

Ancora, si è provato a questo punto ad indagare in merito alla correlazione fra intensità media oraria e frequenza media oraria delle esplosioni, considerando un campione di esplosioni appartenente al primo intervallo ([20110701-20110730], 2920 esplosioni)

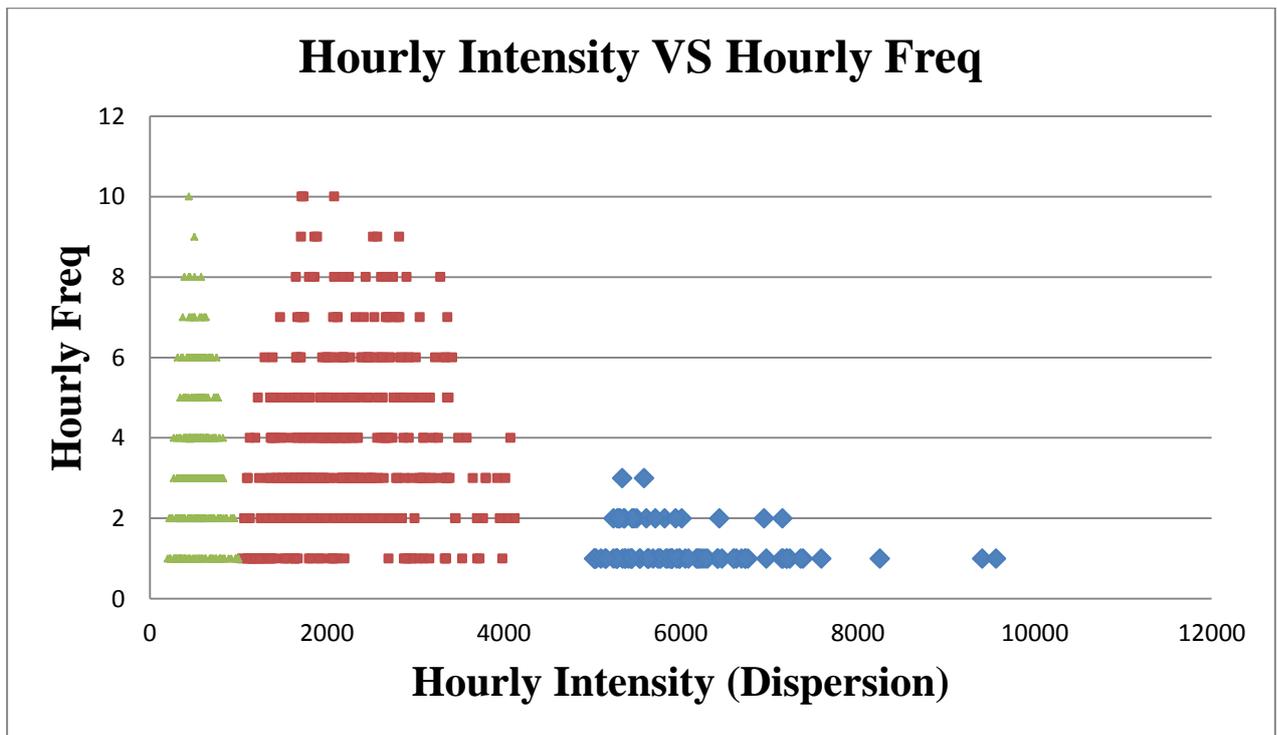


Figura VI.3.2: Correlazione fra altezza e dispersione dei getti e soglie di intensità per una popolazione di 2920 esplosioni di attività stromboliana classica

Intensità e frequenza delle esplosioni appaiono scorrelate, ma è interessante notare come in un periodo di attività “classica” ad alti valori di dispersione corrispondano basse frequenze.

Se difatti consideriamo la dispersione cumulativa CD ovvero

$$CD = F_H \cdot D_H \quad (VI.3.2)$$

Dove F_H e D_H sono rispettivamente la frequenza delle esplosioni e la dispersione delle stesse mediata in un ora, ci accorgiamo che quando il vulcano è nel pieno del suo equilibrio dinamico, ovvero in normale attività stromboliana, ad un forte incremento del materiale eruttato il sistema risponda rallentando, ovvero abbassando la frequenza delle esplosioni.

VI.3.2 Attività stromboliana classica ed eventi non ordinari

Per aumentare il numero di campioni si è scelto di analizzare un intero anno di dati [20101026-20111026] per un totale 54020 esplosioni ottenendo la stessa correlazione tra altezza e dispersione dei prodotti, con gli stessi limiti espressi nel caso precedente.

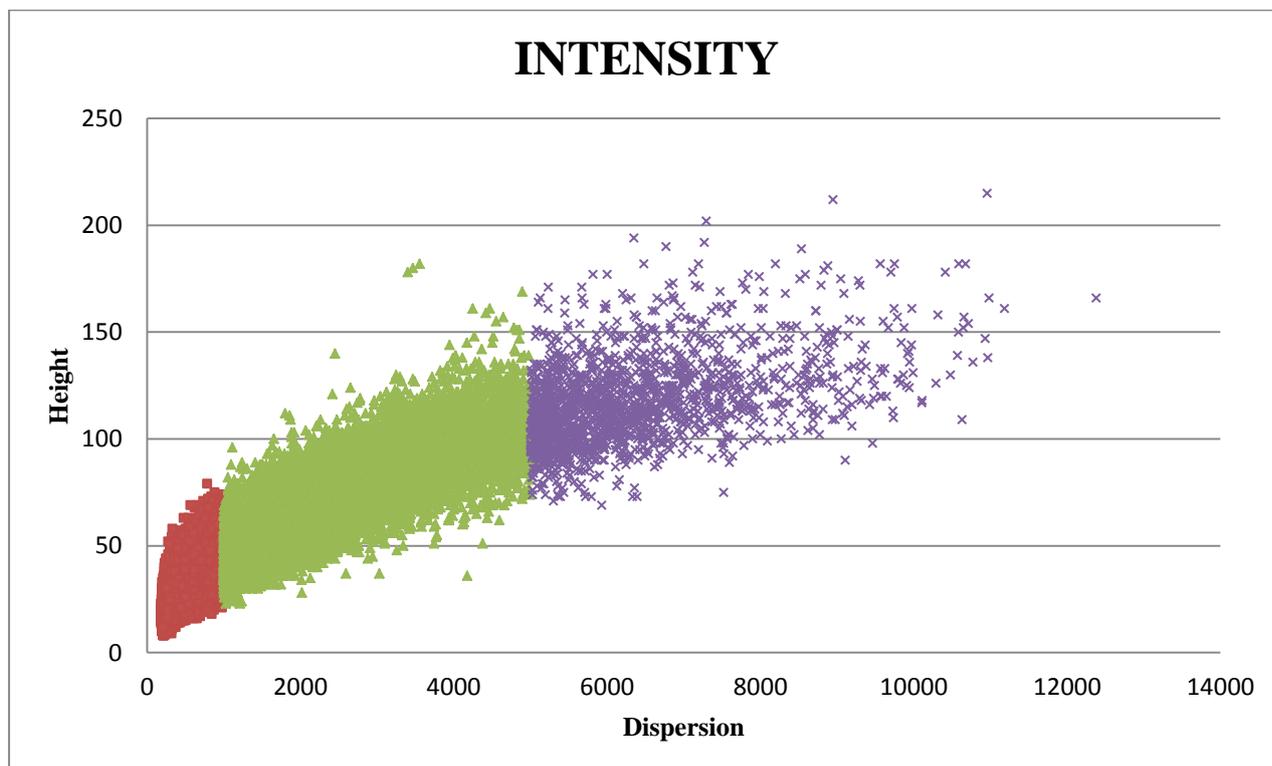


Figura VI.3.3: Correlazione fra altezza e dispersione dei getti e soglie di intensità per una popolazione di 2920 esplosioni di attività stromboliana classica

Risulta altresì interessante notare come all'esterno di questo intervallo ricadano anche esplosioni particolarmente energetiche, "non ordinarie", segnalate dalla sala operativa dell'INGV, elencate nella tabella:

Data [yyyy/mm/dd]	Ora di innesco [hh:nn:ss.mmm]	Dispersione [pixel]
2011/07/05	02:45:28.500	61904
2011/07/10	15:21:01.000	28936
2011/07/17	20:45:11.500	19628
2011/07/20	00:18:04.000	16974
2011/08/05	07:14:55.000	25348
2011/08/15	19:33:45.000	19019

Tabella VI.3.1: Esplosioni maggiori

Ampiamente fuori dal range di correlazione tra altezza e dispersione e tutte corrispondenti a valori di dispersione superiori a 15000 pixel che potrebbe essere considerata una soglia di *attenzione*.

Vediamo adesso cosa accade quando frequenza e dispersione risultano correlate nelle fasi in cui l'equilibrio dinamico dell'attività eruttiva viene perturbato.

VI.3.3 Attività stromboliana forte e vulcano in disequilibrio: l'eruzione effusiva del 2014

Il 2014 è stato un anno particolarmente importante per il vulcano Stromboli in quanto si è assistito allo sviluppo di una colata lavica a partire dal 6 Agosto 2014 da una frattura eruttiva di quota 650m s.l.m. lungo il fianco nordorientale della Sciara del Fuoco, sviluppando un delta lavico lungo la linea di costa. L'evento eruttivo è perdurato sino al 13-17 Novembre ed è stato preceduto un lungo periodo di intensa attività stromboliana, caratterizzato da un pesante incremento della frequenza delle esplosioni e da un aumento del numero delle bocche attive nella terrazza craterica, sino ad un numero di 14 nei giorni precedenti all'apertura



Figura VI.3.4: Colata lavica allo Stromboli il 7 agosto 2014 (foto guide vulcanologiche Aitne Med)

Come detto in precedenza, un episodio effusivo è sintomo di disequilibrio dello Stromboli. Si vuole dimostrare adesso, che grazie ai dati del sistema automatico questo venga messo pesantemente in evidenza dal raggiungimento della correlazione tra frequenza e dispersione: per alti valori di entrambe le grandezze l'energia del sistema è in forte disequilibrio e porta ad un sovraccarico che il vulcano tende a sfogare con una manifestazione inusuale come una colata lavica.

Analizziamo l'andamento temporale dell'attività esplosiva dall'inizio del 2014, valutando la frequenza dell'attività stromboliana e l'intensità (dispersione) considerandone la media oraria.

La F_H si mantiene su valori abbastanza bassi dall'inizio dell'anno sino a fine maggio, mentre la dispersione ha consuete fluttuazioni in maniera scorrelata. All'inizio di giugno si ha un cambio repentino di tendenza: F_H e D_H aumentano contemporaneamente.

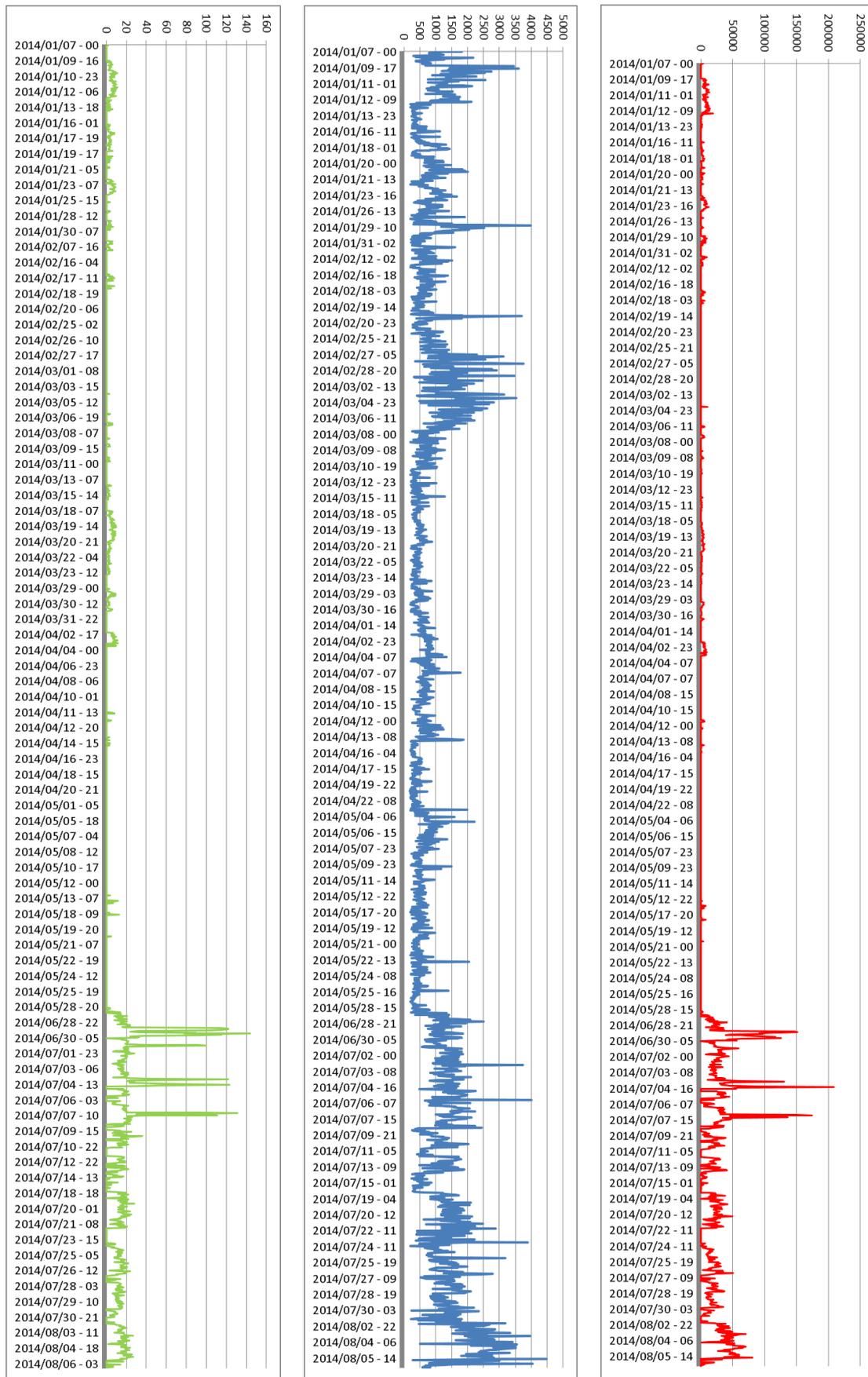


Figura VI.3.5: Andamento della frequenza e della dispersione (mediati nell'ora) dell'attività esplosiva durante il 2014

Giugno 2014 segna l'inizio di una situazione di forte attenzione, vediamo lo nel dettaglio.

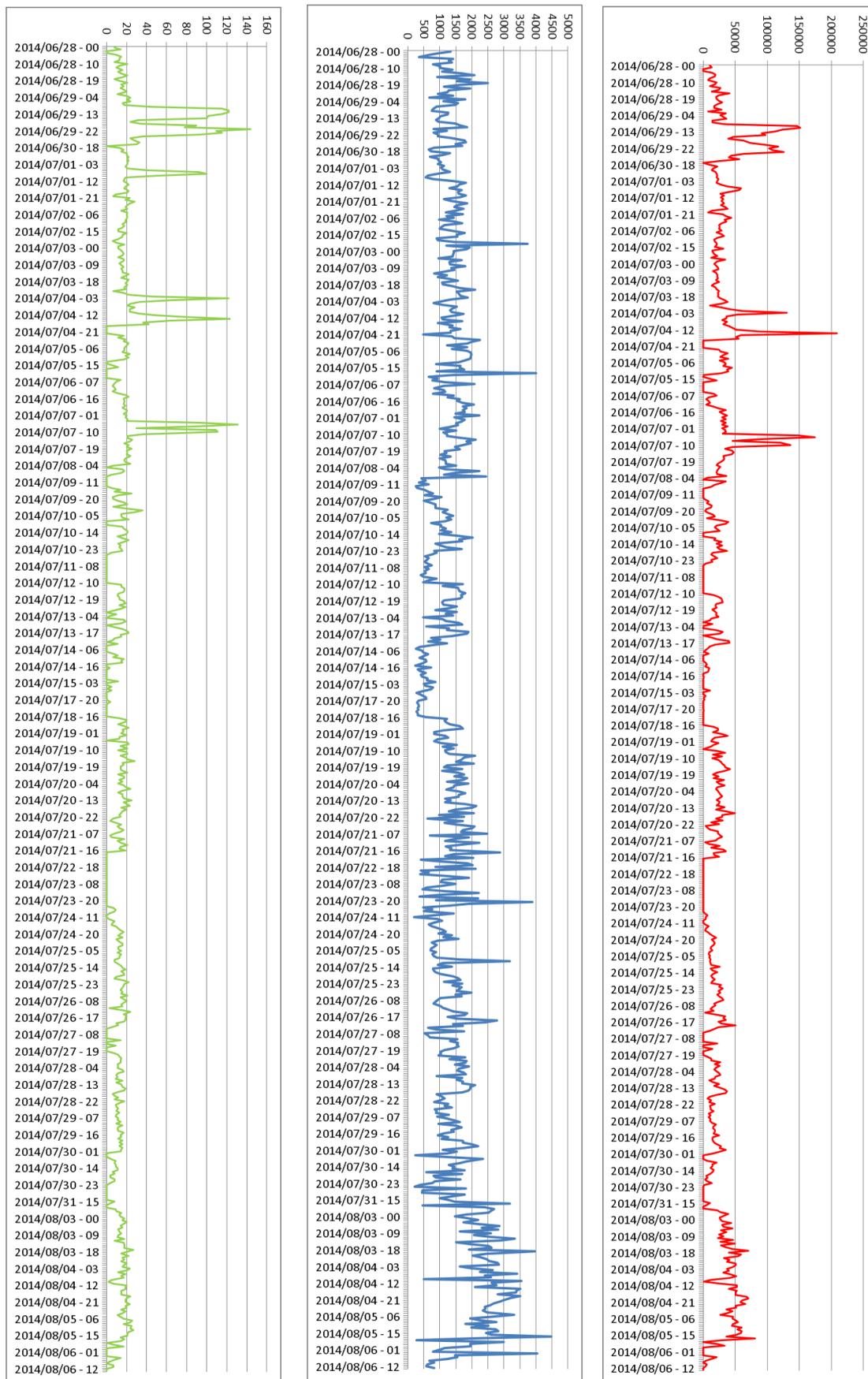


Figura VI.3.6: Andamento della frequenza e della dispersione (mediati nell'ora) dal 28 giugno al 6 Agosto (inizio eruzione)

Appare pertanto evidente come più di un mese prima il vulcano mostrasse l'innesco del

disequilibrio della sua dinamica eruttiva che lo condurrà ad una eruzione effusiva.

Appendice

AI. Cenni di Termografia

AI.1 Lo spettro elettromagnetico

Lo spettro elettromagnetico è suddiviso arbitrariamente in un certo numero di regioni classificate in base alla lunghezza d'onda e denominate bande, distinte a seconda dei metodi utilizzati per emettere e rilevare le radiazioni. Non esiste alcuna differenza sostanziale tra le radiazioni presenti nelle diverse bande dello spettro elettromagnetico: tutte sono governate dalle stesse leggi e le sole differenze sono quelle determinate dalle diverse lunghezze d'onda

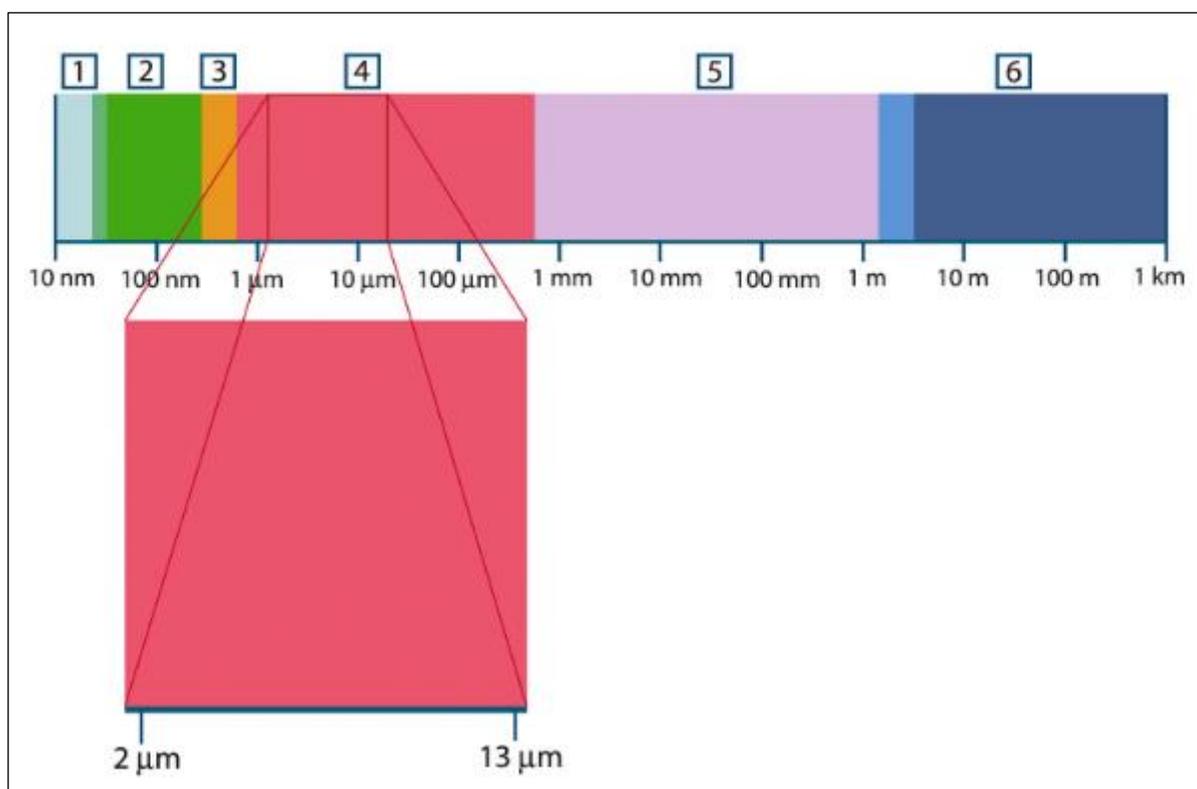


Figura AI.1.1: Lo spettro elettromagnetico. 1:raggi X; 2: ultravioletto; 3:luce visibile; 4: infrarosso; 5:microonde; 6:onde radio.

La termografia utilizza la banda spettrale dell'infrarosso. Il confine delle onde corte è situato al limite della percezione visiva, nella parte rossa dello spettro. Il confine delle onde lunghe si fonde con la lunghezza d'onda delle microonde radio, nell'intervallo delle onde millimetriche. La banda dell'infrarosso è spesso ulteriormente suddivisa in quattro bande più piccole, i cui confini vengono anch'essi scelti in modo arbitrario. Le bande comprendono: infrarosso vicino (0,75-3

μm), infrarosso medio (3-6 μm), infrarosso lontano (6-15 μm) e infrarosso estremo (15-100 μm). Anche se le lunghezze d'onda sono espresse in μm (micron), per misurare la lunghezza d'onda in questa regione dello spettro è spesso possibile utilizzare anche altre unità di misura, ad esempio nanometri (nm) e Angstrom (\AA).

AI.2 Radiazione del corpo nero

Per corpo nero si intende un oggetto che assorbe tutte le radiazioni che lo colpiscono a una lunghezza d'onda qualsiasi. L'utilizzo dell'apparente termine improprio nero riferito a un oggetto che emette radiazioni, è spiegato dalla legge di Kirchhoff (Gustav Robert Kirchhoff, 1824-1887), la quale afferma che un corpo in grado di assorbire tutte le radiazioni a una lunghezza d'onda qualsiasi è ugualmente in grado di emettere radiazioni. La costruzione della sorgente di un corpo nero è, in linea di massima, molto semplice. Le caratteristiche delle radiazioni dell'apertura di una cavità isotermica costituita da un materiale opaco assorbente, rappresentano quasi esattamente le proprietà di un corpo nero. Un'applicazione pratica del principio per la costruzione di un perfetto assorbitore di radiazioni, è rappresentata da una scatola nascosta alla luce a eccezione di un'apertura su uno dei lati. Qualsiasi tipo di radiazione entri successivamente all'interno del foro viene diffuso e assorbito da ripetute riflessioni, in modo che solo una frazione infinitesimale possa sfuggire. L'oscurità ottenuta in corrispondenza dell'apertura è quasi simile a un corpo nero e pressoché perfetta per tutte le lunghezze d'onda. Se la cavità isotermica viene riscaldata adeguatamente, questa diventa ciò che si definisce un radiatore a cavità. Una cavità isotermica riscaldata a una temperatura uniforme genera la radiazione di un corpo nero, le cui caratteristiche vengono stabilite unicamente in base alla temperatura della cavità. Tali radiatori di cavità vengono comunemente usati in laboratorio come sorgenti di radiazione negli standard di riferimento della temperatura per la calibrazione di strumenti termografici, quali ad esempio le termocamere FLIR Systems. Se la temperatura della radiazione del corpo nero aumenta raggiungendo un valore superiore a 525 °C (977 °F), la

sorgente comincia a diventare visibile in modo da non apparire più nera all'occhio umano. Questo rappresenta la temperatura del radiatore che inizialmente è rossa e successivamente diventa arancione o gialla quando la temperatura aumenta ulteriormente. Infatti, per temperatura di colore di un oggetto si intende la temperatura che un corpo nero dovrebbe raggiungere per avere lo stesso aspetto. Si considerino ora tre espressioni che descrivono la radiazione emessa da un corpo nero.

AI.2.1 Legge di Planck

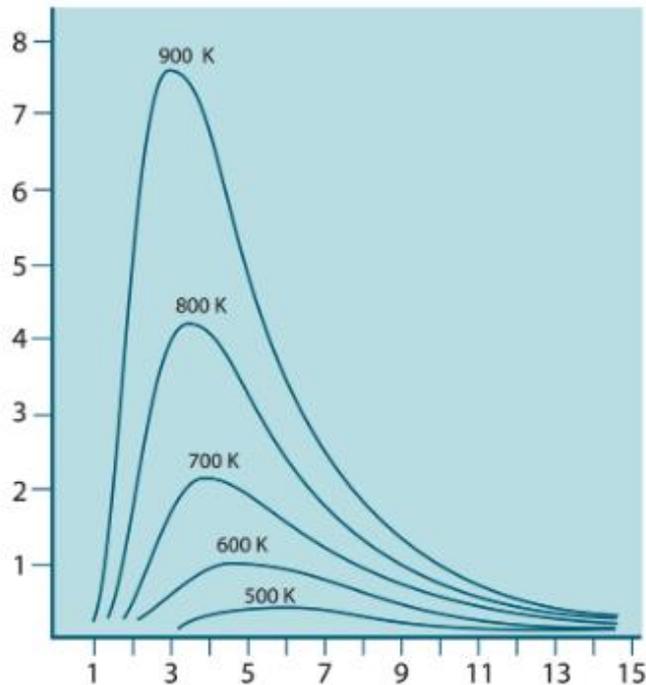
Max Planck fu in grado di descrivere la distribuzione spettrale della radiazione emessa da un corpo nero mediante la formula seguente:

$$W_{\lambda b} = \frac{2\pi hc^3}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \times 10^{-6} [W/m^2 \mu m] \quad (\text{AI.1})$$

Dove $W_{\lambda b}$ è l'energia associata all'onda elettromagnetica di lunghezza d'onda λ emessa da un corpo nero alla temperatura assoluta T , h e k rispettivamente le costanti di Planck e di Boltzmann, c la velocità della luce.

La legge di Planck descrive pertanto per una data temperatura l'energia emessa (emittanza) dal corpo nero al variare della lunghezza d'onda, ovvero l'energia associata alla radiazione elettromagnetica emessa ad una data temperatura. Seguendo una qualsiasi curva di Planck, l'emittanza spettrale è zero per $\lambda=0$, successivamente aumenta rapidamente fino a raggiungere il massimo in corrispondenza della lunghezza d'onda λ_{max} e, dopo averla raggiunta, si avvicina nuovamente a zero per lunghezze d'onda elevate. Maggiore è la temperatura, minore è la lunghezza d'onda alla quale si raggiunge il massimo.

Al variare della temperatura si ottiene pertanto una famiglia di curve del tipo



AI.2.1: Emittanza di corpo nero [W/cm^2] al variare della lunghezza d'onda [μm] per una data temperatura T[K]

AI.2.2 Legge di spostamento di Wien

La legge di spostamento di Wien descrive a quale radiazione elettromagnetica (ovvero a quale lunghezza d'onda) emessa da un corpo nero alla temperatura T è associata l'emittanza di picco:

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} [\mu m] \quad (AI.2)$$

AI.2.3 Legge di Stefan-Boltzmann

La legge di Stefan-Boltzmann consente di calcolare l'emittanza radiante totale dal corpo nero, integrando la legge di Planck per $\lambda \in [0, \infty[$ ottenendo:

$$W_b = \sigma T^4 [W/m^2] \quad (AI.3)$$

AI.3 Emettitori diversi dai corpi neri

Su una regione di lunghezza d'onda estesa, gli oggetti reali non rispettano quasi mai le leggi sopra illustrate, ovvero non si comportano come un corpo nero a causa di tre processi che

funzione della lunghezza d'onda: una frazione α della radiazione incidente viene assorbita, una frazione ρ viene riflessa, mentre un'altra τ viene trasmessa. Definendo pertanto:

- Coefficiente di assorbimento spettrale α_λ il rapporto tra il flusso energetico spettrale assorbito da un oggetto e quello incidente
- Coefficiente di riflessione spettrale ρ_λ il rapporto tra il flusso energetico spettrale riflesso da un oggetto e quello incidente
- Coefficiente di trasmissione spettrale τ_λ il rapporto tra il flusso energetico spettrale trasmesso da un oggetto e quello incidente

si può affermare che:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (\text{AI.4})$$

che per materiali opachi diviene:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1 \quad (\text{AI.5})$$

Per T e λ fissati è possibile definire il parametro emissività spettrale

$$\varepsilon_\lambda = \frac{W_{\lambda a}}{W_{\lambda b}} \quad (\text{AI.6})$$

Dove $W_{\lambda a}$ e $W_{\lambda b}$ sono l'energia emessa associata alla radiazione elettromagnetica di lunghezza λ ad una data temperatura T a cui si trovano rispettivamente un oggetto qualunque e un corpo nero.

Così:

- Se $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = 1 \rightarrow$ corpo nero
- Se $\varepsilon_\lambda = \varepsilon < 1 \rightarrow$ corpo grigio
- Se $\varepsilon_\lambda = \varepsilon(\lambda) \rightarrow$ radiatore selettivo

Applicando la legge di Kirchhoff ad un corpo qualunque abbiamo che

$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda \quad (\text{AI.7})$$

e per un materiale opaco

$$\varepsilon_\lambda + \rho_\lambda = 1 \quad (\text{AI.8})$$

Per un materiale molto riflettente $\varepsilon_\lambda \cong 0$, pertanto

$$\rho_\lambda = 1 \quad (\text{AI.9})$$

Infine, per un corpo grigio la formula di Stefan-Boltzman diventa:

$$W_0 = \varepsilon\sigma T^4 = \varepsilon W_b \quad (\text{AI.10})$$

Ovvero il potere emissivo totale di un corpo grigio è identico a quello di un corpo nero alla stessa temperatura ridotta in proporzione al valore di ε del corpo grigio.

AI.4 Formula di misurazione di una termocamera

Una termocamera è uno strumento di misura equipaggiato con un sensore che trasduce l'energia che riceve da una sorgente radiante in valori di tensione. Se consideriamo W_{obj} come l'energia radiata da un corpo nero ad una certa temperatura, si noti che l'energia radiata da un corpo grigio, εW_{obj} non corrisponde esattamente a quella ricevuta dalla telecamera W_{tot} in quanto la sorgente non è mai un semplice emettitore ma in parte riflette l'energia dell'ambiente circostante ed inoltre il mezzo interposto fra sorgente e termocamera ha una certa capacità di trasmissione; pertanto l'energia che raggiunge la termocamera sarà:

$$W_{tot} = \tau W_{source} + \rho W_{atm} \quad (\text{AI.11})$$

Ovvero alla telecamera arriverà oltre al contributo energetico dovuto alla sorgente un contributo dovuto al mezzo interposto. Inoltre:

$$W_{source} = \varepsilon W_{obj} + \rho W_{refl} = \varepsilon W_{obj} + (1 - \varepsilon) W_{refl} \quad (\text{AI.12})$$

Dove εW_{obj} è l'energia che l'oggetto emette e ρW_{refl} e quella emessa dall'oggetto per riflessione dell'energia associata all'ambiente circostante; dunque

$$W_{tot} = \varepsilon\tau W_{obj} + (1 - \varepsilon)\tau W_{refl} + (1 - \tau)W_{atm} \quad (\text{AI.13})$$

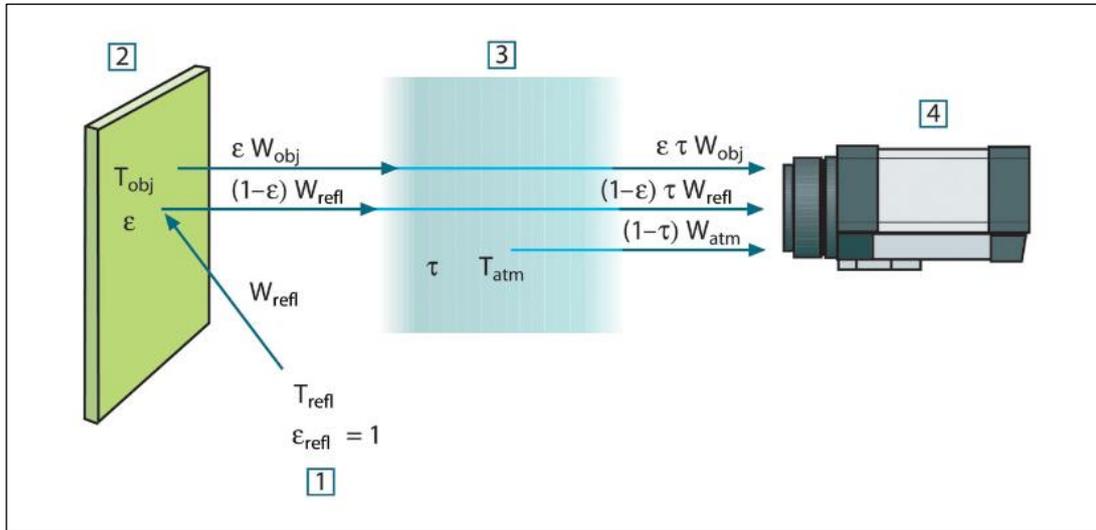


Figura AI.4.1: Rappresentazione schematica del Sistema sorgente – termocamera. 1) area circostante; 2) sorgente; 3) mezzo interposto; 4) termocamera.

Assumendo che su distanze corte l'energia W_{tot} generi sul sensore della termocamera una tensione della termocamera U_{tot} , proporzionale all'energia in entrata (termocamera ad energia lineare), ovvero:

$$U_{tot} = C W_{tot}, \quad C \text{ costante} \quad (\text{AI.14})$$

Si avrà

$$U_{tot} = \varepsilon \tau U_{obj} + (1 - \varepsilon) \tau U_{refl} + (1 - \tau) U_{atm} \quad (\text{AI.15})$$

Risolvendo:

$$U_{obj} = \frac{1}{\varepsilon \tau} U_{tot} - \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} U_{refl} - \frac{(1-\tau)}{\varepsilon \tau} U_{atm} \quad (\text{AI.16})$$

Che risulta essere la tensione di uscita calcolata dalla termocamera per un corpo nero di temperatura T_{obj} , ovvero una tensione direttamente convertibile nella temperatura reale dell'oggetto. U_{tot} è la tensione di uscita misurata dalla termocamera per il caso specifico; U_{refl} è la tensione di uscita teorica della termocamera per un corpo nero di temperatura T_{refl} , in base alla calibrazione; U_{atm} è la Tensione di uscita teorica della termocamera per un corpo nero di temperatura T_{atm} in base alla calibrazione.

AII. Filtri di Kalman

Consideriamo un sistema dinamico lineare avente equazione di stato:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_t = \mathbf{A}_t \cdot \mathbf{X}_{t-1} + \mathbf{B}_t \cdot \mathbf{u}_t \\ \mathbf{Y}_t = \mathbf{C}_t \cdot \mathbf{X}_t \end{cases} \quad (\text{AII.1})$$

Supponiamo che lo stato sia una variabile aleatoria; assumendo l'incertezza di modello una variabile aleatoria \mathbf{q}_t si considera una equazione per il vettore di stato assolutamente generale:

$$\mathbf{X}_t = \mathbf{A}_t \cdot \mathbf{X}_{t-1} + \mathbf{B}_t \cdot \mathbf{u}_t + \mathbf{q}_t \quad (\text{AI.2})$$

Indicando la misura dell'uscita come la somma dell'uscita con un eventuale rumore di misura aleatorio \mathbf{r}_t si può scrivere:

$$\mathbf{Z}_t = \mathbf{Y}_t + \mathbf{r}_t = \mathbf{C}_t \cdot \mathbf{X}_t + \mathbf{r}_t \quad (\text{AI.3})$$

La (AII.1) diviene:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_t = \mathbf{A}_t \cdot \mathbf{X}_{t-1} + \mathbf{B}_t \cdot \mathbf{u}_t + \mathbf{q}_t \\ \mathbf{Y}_t = \mathbf{C}_t \cdot \mathbf{X}_t + \mathbf{r}_t \end{cases} \quad (\text{AI.4})$$

Il filtro di Kalman è un caso particolare di filtro bayesiano nell'ipotesi che lo stato e tutte le eventuali incertezze in gioco abbiano una densità di probabilità gaussiana, e che siano incorrelati fra di loro. Esso effettua pertanto una stima dello stato di un processo tempo discreto così come descritto nella (AI.4).

Definite:

- $\hat{\mathbf{X}}_t^-$ lo stato all'istante t stimato a priori sulla base della conoscenza del processo precedente all'istante t
- $\hat{\mathbf{X}}_t$ lo stato all'istante t stimato a posteriori sulla base misura \mathbf{Y}_t allo stesso istante t
- $\hat{\mathbf{e}}_t^- = \hat{\mathbf{X}}_t - \hat{\mathbf{X}}_t^-$ l'errore di stima a priori dello stato all'istante t , avente covarianza $\hat{\mathbf{P}}_t^-$
- $\hat{\mathbf{e}}_t = \mathbf{X}_t - \hat{\mathbf{X}}_t$ l'errore di stima a posteriori dello stato all'istante t , avente covarianza \mathbf{P}_t
- \mathbf{Q}_t covarianza del rumore di processo \mathbf{q}_t bianco e gaussiano e a media nulla
- \mathbf{R}_t covarianza del rumore di misura \mathbf{r}_t bianco, gaussiano e a media nulla
- \mathbf{q}_t ed \mathbf{r}_t incorrelati

E' possibile esprimere il filtro di Kalman tramite il seguente set di equazioni:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\text{Predizione} \\
\widehat{\mathbf{X}}_t = \mathbf{A}_t \cdot \widehat{\mathbf{X}}_{t-1} + \mathbf{B}_t \cdot \mathbf{u}_t \\
\widehat{\mathbf{P}}_t = \mathbf{A}_t \cdot \mathbf{P}_{t-1} \cdot \mathbf{A}_t^T + \mathbf{Q}_t \\
\text{Aggiornamento} \\
\mathbf{K}_t = \widehat{\mathbf{P}}_t \cdot \mathbf{C}_t^T \cdot (\mathbf{R}_t + \mathbf{C}_t \cdot \widehat{\mathbf{P}}_t \cdot \mathbf{C}_t^T)^{-1} \\
\mathbf{X}_t = \widehat{\mathbf{X}}_t + \mathbf{K}_t \cdot (\mathbf{Z}_t - \mathbf{C}_t \cdot \widehat{\mathbf{X}}_t) \\
\mathbf{P}_t = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_t \cdot \mathbf{C}_t) \cdot \widehat{\mathbf{P}}_t
\end{array} \right. \quad (\text{AI.5})$$

Il filtro di Kalman stima lo stato del processo realizzando un feedback sulla base delle misure affette da rumore e comprende due gruppi di equazioni dette di predizione e di aggiornamento. Le prime proiettano in avanti lo stato corrente e la covarianza dell'errore di stima al fine di ottenere una stima a priori per il successivo istante temporale. Le seconde incorporano le nuove misure nella stima a priori per ottenere una stima a posteriori migliorata.

AIII. Modello di una telecamera

In questa appendice verrà illustrata la teoria di base sulla generazione delle immagini secondo il modello pin-hole. In Figura AIII.1 è illustrato il processo di formazione dell'immagine sullo schermo di una telecamera secondo il cosiddetto pin-hole model. Una telecamera pin-hole rappresenta un sistema proiettivo privo di deformazioni (a meno di quella prospettica) avente fuoco puntiforme. In figura il sistema di riferimento \mathbf{XYZ} rappresenta il sistema di riferimento assoluto mentre il sistema di riferimento $x_1 y_1 z_1$ è un sistema di riferimento solidale alla telecamera. In questo caso i due sistemi sono coincidenti. Un punto \mathbf{P} nello spazio genera sullo schermo della telecamera un punto immagine \mathbf{I} .

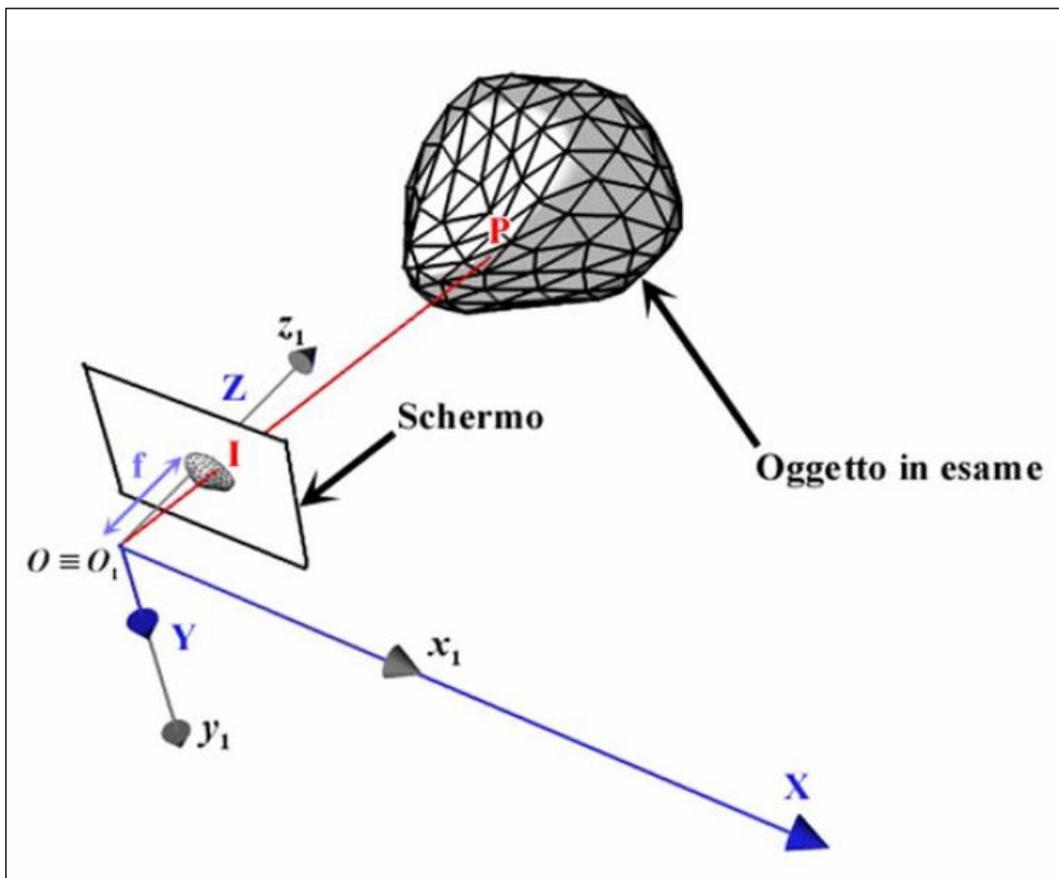


Figura AIII.1: Schema di una pin-hole camera

Poiché i punti \mathbf{P} , \mathbf{I} e \mathbf{O} giacciono sulla stessa retta è possibile affermare che:

$$\exists k \in [0,1]: \mathbf{I} = k \cdot \mathbf{P} \quad (\text{AIII.1})$$

Il valore di k si può calcolare tenendo conto che la componente di \mathbf{I} lungo l'asse Z è pari alla distanza focale f . Si ottiene quindi che

$$k = \frac{f}{z_P} \rightarrow \begin{cases} X_I = f \frac{X_P}{z_P} \\ Y_I = f \frac{Y_P}{z_P} \\ Z_I = f \end{cases} \quad (\text{AIII.2})$$

Ciò che a noi interessa sono le componenti X e Y del punto \mathbf{I} in quanto sono queste a definire la posizione dell'immagine generata dal punto \mathbf{P} sullo schermo della telecamera. Come si vede, la legge di trasformazione che permette di passare dalle coordinate del punto \mathbf{P} a quelle della sua immagine, è non lineare. Osservando però che il denominatore di ciascuna componente del punto immagine è pari all'inverso della costante k possiamo pensare di rendere lineare tale trasformazione rappresentando il punto immagine in coordinate omogenee. In coordinate omogenee l'immagine di \mathbf{P} , che indicheremo con $\tilde{\mathbf{I}}$, può essere riscritta come segue:

$$\tilde{\mathbf{I}} = \begin{pmatrix} X_P \\ Y_P \\ z_P/f \end{pmatrix} \quad (\text{AIII.3})$$

Per modellizzare una telecamera occorre quindi trovare un'applicazione lineare che effettui la seguente trasformazione:

$$\tilde{\mathbf{I}} = \mathbf{\Pi}_0 \cdot \mathbf{P} \quad (\text{AIII.4})$$

Dove chiameremo $\mathbf{\Pi}_0$ *matrice prospettica principale*. Tale matrice rappresenta il modello della telecamera ed è immediato verificare che tale matrice è così fatta:

$$\mathbf{\Pi}_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f \end{pmatrix} \quad (\text{AIII.5})$$

Questo modello ha validità solo nel caso in cui il sistema di riferimento assoluto e quello solidale con la telecamera coincidono. Se i due sistemi di riferimento non coincidono occorrerà convertire le

coordinate dei punti rispetto al sistema di riferimento assoluto in coordinate rispetto al sistema di riferimento solidale con la telecamera (rototraslazione). Questa conversione si può ottenere utilizzando la relazione

$$\mathbf{P}' = \mathbf{R} \cdot \mathbf{P} + \mathbf{T} \quad (\text{AIII.6})$$

dove si è indicato

- **P** : il punto **P** rispetto al sistema di riferimento solidale con la telecamera.
- **R**: la matrice del cambio di base dal sistema di riferimento assoluto al sistema di riferimento solidale con la telecamera.
- **T**: la posizione dell'origine del sistema di riferimento assoluto rispetto al sistema di riferimento solidale con la telecamera.

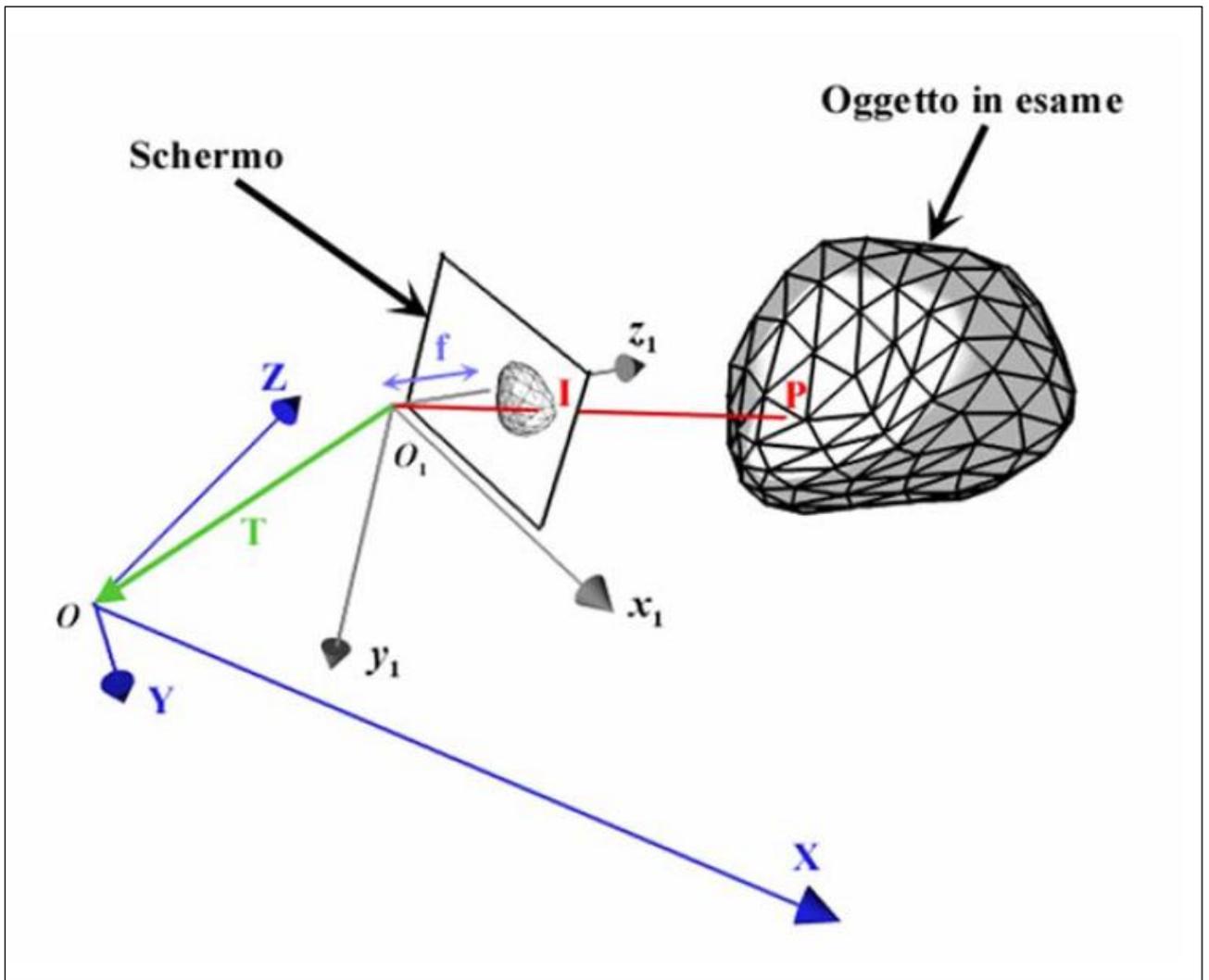


Figura AIII.2: Caso di telecamera con sistema di riferimento non coincidente con il sistema di riferimento assoluto

Tenendo conto di ciò che abbiamo detto e facendo riferimento alla figura AIII.2 si può scrivere:

$$\tilde{\mathbf{I}} = \Pi_0 \cdot \mathbf{P}' = \Pi_0 \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{P} + \Pi_0 \cdot \mathbf{T} \quad (\text{AIII.7})$$

Oppure in forma più compatta:

$$\tilde{\mathbf{I}} = \Pi_0 \cdot (\mathbf{R} \ \mathbf{T}) \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{P} \\ 1 \end{pmatrix} + (\Pi_0 \cdot \mathbf{R} \ \Pi_0 \cdot \mathbf{T}) \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{P} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{AIII.8})$$

La matrice prospettica così ottenuta

$$\Pi \equiv (\Pi_0 \cdot \mathbf{R} \ \Pi_0 \cdot \mathbf{T}) \in \mathbf{R}^{3 \times 4} \quad (\text{AIII.1})$$

rappresenta il modello generale di una telecamera.

Bibliografia

- [1] **Jeffrey Carlson, David Menicucci, Peter Vorobieff, Andrea Mammoli, Hongbo He**, Infrared imaging method for flyby assessment of solar thermal panel operation in field settings, *Applied Thermal Engineering*, Volume 70, Issue 1, 2014, Pages 163-171, ISSN 1359-4311.
- [2] **Li Hong Idris Lim, Zhen Ye**, A dynamic thermal modelling of solar panels using frequency-domain method, *Solar Energy*, Volume 105, 2014, Pages 428-437, ISSN 0038-092X.
- [3] **Botsaris, P. N., & Tsanakas, J. A.** (2010, June). Infrared thermography as an estimator technique of a photovoltaic module performance via operating temperature measurements. In *Proceedings of the 10th ECNDT Conference*.
- [4] **Anthony Dominguez, Jan Kleissl, Jeffrey C. Luvall**, Effects of solar photovoltaic panels on roof heat transfer, *Solar Energy*, Volume 85, Issue 9, 2011, Pages 2244-2255, ISSN 0038-092X.
- [5] **Flir Systems**, Thermovision A40 M manuale dell'operatore, publ.no. 1 558 084 rev.a72, 2004 183-198.
- [6] **S.Barbarino**, Appunti di Campi Elettromagnetici, A.A. 2002-2003, cap.3, Catania, 2001.
- [7] **P. Kokelaar, C. Romagnoli**, Sector Collapse Sedimentation and Clast Population Evolution at an Active Island.-Arc volcano, Stromboli, Italy. *Bulletin of Volcanology*, 1995, Volume 57, Issue 4, pp 240–262.
- [8] **Rosi, M.** (1980). The island of Stromboli. *Rendiconti Società Italiana Mineralogia e Petrologia*, 36(1), 345–368.
- [9] **Mark Settle, Thomas R. Mcgetchin**, Statistical analysis of persistent explosive activity at stromboli, 1971: Implications for eruption prediction, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 8, Issue 1, 1980, Pages 45-58, ISSN 0377-0273
- [10] **Harris, A.J.L., Stevens, N.F., Maciejewski, A.J.H., Röllin, P.J.**, 1996. Thermal Evidence for linked vents at Stromboli. *Acta Vulcanol.*8, 57-62.
- [11] **Ripepe, M., A. J. L. Harris, and E. Marchetti** (2005), Coupled thermal oscillations in

explosive activity at different craters of Stromboli volcano, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L17302.

[12] **Rosi, M., Bertagnini, A., Landi, P.**, 2000. Onset of the persistent activity at Stromboli volcano (Italy), *Bull. Volcanol.* 62, 294–300.

[13] **Barberi, F., Rosi, M., Sodi, A.**, 1993. Volcanic hazard assessment at Stromboli based on review of historical data. *Acta Vulcanol.* 3, 173-187.

[14] **Blackburn, E.A., Wilson, L. & Sparks, R.S.J.**, 1976. Mechanism and dynamics of strombolian activity. *Journal of the Geological Society, London* 132, 429-40.

[15] **Patrick M.R.**, 2005. Ph.D. Thesis, Geology and Geophysics, University of Hawaii.

[16] **Patrick M.R., Harris A.J.L., Ripepe M., Dehn J., Rothery D.A., Calvari S.** Strombolian explosive styles and source conditions: insights from thermal FLIR video, *Bulletin of Volcanology*, 69 (2007), pp. 769-784, 10.1007/s00445-006-0107-0.

[17] **Andrew Harris, Maurizio Ripepe**, Synergy of multiple geophysical approaches to unravel explosive eruption conduit and source dynamics – A case study from Stromboli, *Chemie der Erde - Geochemistry*, Volume 67, Issue 1, 2007, Pages 1-35.

[18] **Braun, T. & Ripepe, M.** 1993. Interaction of seismic and air waves recorded on Stromboli Volcano. *Geophysical Research Letters* 30(18), 1941-4.

[19] **Andrew Harris, Maurizio Ripepe**, Temperature and dynamics of degassing at Stromboli, *Journal Of Geophysical Research*, Volume 112, Issue B3, 2007.

[20] **L. Sciavicco, B. Siciliano**, *Robotica industriale*, seconda edizione, McGraw-Hill Libri Italia, 330-32, Milano, 2000, ISBN 88-386-0874-1

Bibliografia di riferimento

B. Chouet, N. Hamisevicz, T.R. McGetchin, 1974. Photoballistic of volcanic jet activity at Stromboli, Italy, *J. Geophys. Res.* 79, 4961–4976.

Da Fontoura Costa, L., Cesar, R. M. Jr. Shape Analysis and Classification: Theory and Practice, CRC Press Inc (2000) ISBN-13: 978-0849334931.

A.J.L. Harris, D.S. Stevenson, 1997. Thermal observations of degassing open conduits and fumaroles at Stromboli and Vulcano using remotely sensed data, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 76, 175–198.

Harris, A.J.L., Stevens, N.F., Maciejewski, A.J.H., Röllin, P.J., 1996. Thermal Evidence for linked vents at Stromboli. *Acta Vulcanol.* 8, 57-62.

Andrew J.L. Harris, Maurizio Ripepe, Elizabeth A. Hughes, Detailed analysis of particle launch velocities, size distributions and gas densities during normal explosions at Stromboli, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volumes 231–232, 2012, Pages 109-131, ISSN 0377-0273.

Métrich, N. Bertagnini, A., Landi, P., Rosi, M., Belhadj, O., 2005. Triggering mechanism at the origin of paroxysm at Stromboli (Aeolian Archipelago, Italy): the 5 April, *Geophysical Research Letters* 321(10)

Patrick M.R. (2007), Dynamics of Strombolian ash plumes from thermal video: Motion, morphology, and air entrainment, *J. Geophys. Res.*, 112, B06202, doi:10.1029/2006JB004387.

Pecora, E., Biale, E., Rapporti Tecnici INGV n.33 del 2006.

Ripepe, M., M. Rossi, G. Saccorotti, 1993. M. Ripepe, M. Rossi, G. Saccorotti, Image processing of explosive activity at Stromboli, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 54, Issues 3–4, 1993, Pages 335-351, ISSN 0377-0273.

Ripepe, M., Harris, A.J.L., Carniel, R., 2002. Thermal, seismic and infrasonic insights into conduit process at Stromboli volcano, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 118, 285–297.

Williams H, Mc Birney A.R., Volcanology, Freeman, Cooper And Company, San Francisco, 1979.

Zanoni, V., Neri, M., Pecora, E., 2009. Interpretation of data from the monitoring thermal camera of stromboli volcano (Aeolian Islands, Italy). *Geolol.Mag.*146(4), 591-601.

Ringraziamenti

Questo lavoro di fatto è il risultato di due grandi passioni coltivate parallelamente: quella per le scienze matematiche e fisiche e quella per le montagne ed i vulcani. La prima mi ha condotto a conseguire il Diploma di Laurea in Ingegneria Elettronica; la seconda mi ha portato a dedicarmi alla ricerca nel campo della vulcanologia e all'insaziabile desiderio di osservazione ed esplorazione dei vulcani, conducendomi al conseguimento del titolo di Guida Vulcanologica.

Collaborando con i diversi ricercatori dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – Osservatorio Etneo, ho avuto la fortuna di confrontarmi ed imparare da professionisti dei vari ambiti, ampliando così le mie conoscenze. Un sentito ringraziamento va al Dott. Ing. Michele Prestifilippo che mi ha guidato nel mondo dell'informatica e delle scienze tecnologiche, al Dott. Mauro Coltelli, per avermi condotto nel mondo della vulcanologia moderna, al Dott. Luigi Lodato per avermi trasmesso la sua passione per il lavoro sul campo. Ringrazio inoltre il Dott. Ing. Emilio Pecora ed l'Ing. Emilio Biale, che da anni progettano ed installano stazioni video per il monitoraggio vulcanico. Infine, esprimo la mia riconoscenza ai professori Antonino Laudani e Alessandro Salvini per avermi dato l'occasione di concretizzare anni di ricerca in questa tesi di dottorato.