

2° PRISMA Day, Bologna, 16 ottobre 2018



Analisi dei bolidi di PRISMA: dalla traiettoria al meteorite

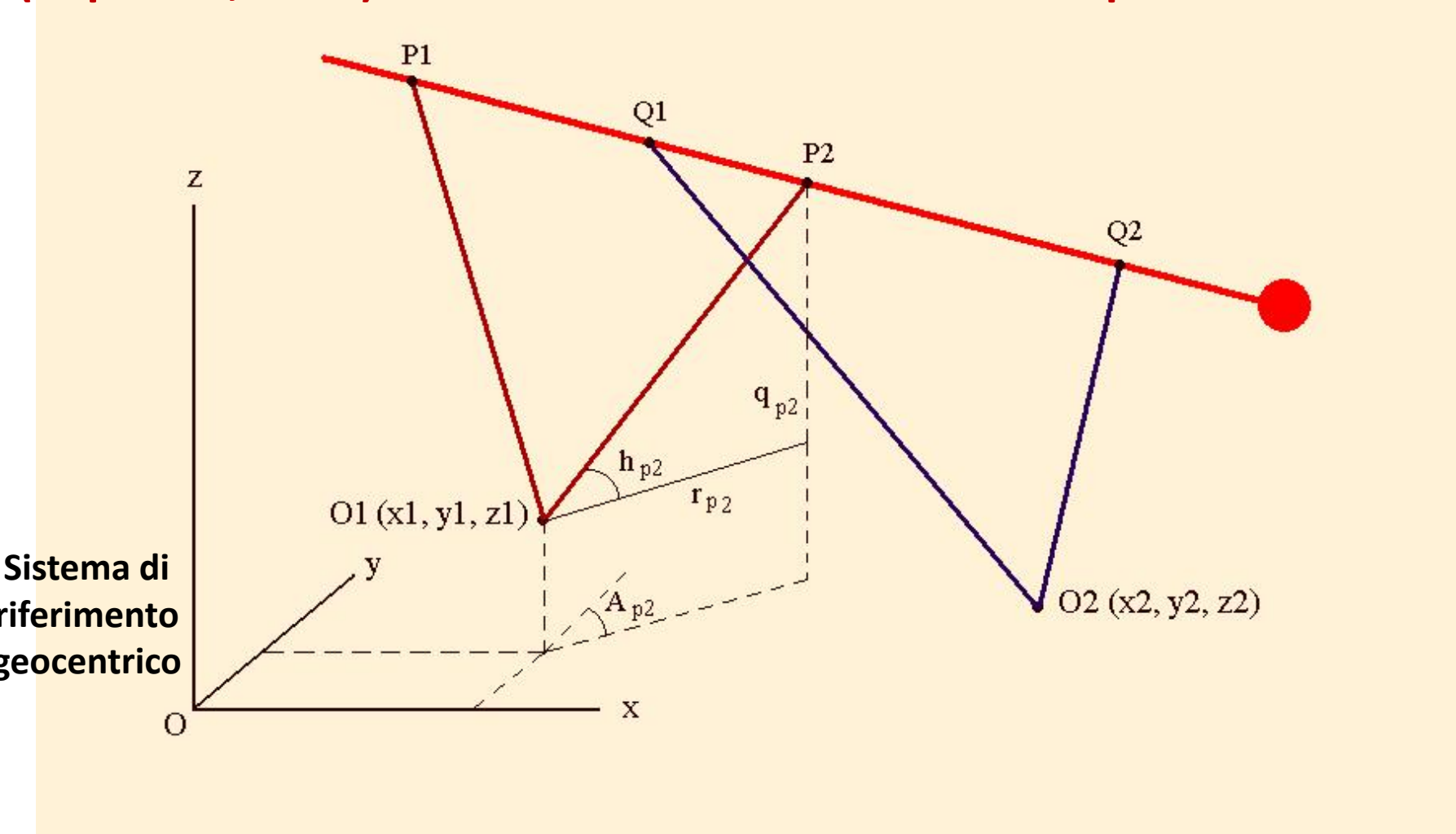
Dott. Albino Carbognani, Ph.D.

INAF Osservatorio Astrofisico di Torino/Osservatorio Astronomico della Valle d'Aosta

L'analisi di un bolide si articola in 4 fasi:

1. **Triangolazione**: si usano le osservazioni astrometriche da diverse stazioni per la ricostruzione della traiettoria del bolide in atmosfera.
2. **Modello dinamico meteoroidico**: a partire dalla **quota** e dalla **velocità osservate** in atmosfera si ottengono i parametri fisici del meteoroidico.
3. **Dark-flight**: a partire dal **punto finale osservato**, conoscendo **quota**, **velocità** e **accelerazione finali**, si modella la caduta libera per ottenere la zona al suolo dove andare a cercare eventuali meteoriti (**strewn field**).
4. **Orbita**: a partire dal modello dinamico del meteoroidico si ottiene la **velocità all'infinito fuori atmosfera** e, correggendo per l'attrazione e la rotazione terrestre, si ottiene la **velocità geocentrica**, la **velocità eliocentrica** e, conoscendo la posizione della Terra nello spazio al momento della caduta, si ottiene **l'orbita eliocentrica del meteoroidico**.

La traiettoria del bolide può essere ottenuta come intersezione dei due piani contenenti gli osservatori e i versori delle direzioni osservate (Ceplecha, 1987). Per costruzione il risultato è sempre una linea retta.



Dinamica di un meteoroide: la conservazione della quantità di moto

Nel sistema di riferimento del meteoroide, se si impone la **conservazione della quantità di moto** mv , ossia che la quantità di moto iniziale della massa d'aria che investe il meteoroide sia uguale alla somma della quantità di moto dell'aria dopo l'interazione più quella acquisita dal meteoroide per effetto della interazione si trova la forza di resistenza a cui è soggetto il meteoroide:

$$F = -\Gamma\rho Av^2$$

Legge della resistenza di Newton

Γ = coefficiente di resistenza aerodinamica (dipende da velocità e forma del corpo)

ρ = densità del fluido

v = velocità del corpo rispetto al fluido

A = area della «sezione d'urto» del corpo

Dinamica di un meteoroide: la conservazione dell'energia

Nel sistema di riferimento del meteoroide, se si impone la **conservazione dell'energia**, ossia che l'energia cinetica iniziale della massa d'aria che investe il meteoroide sia uguale alla somma dell'energia finale dell'aria dopo l'interazione più quella che è servita per **l'ablazione (fusione + vaporizzazione)** del corpo dal meteoroide si trova la variazione di massa cui è soggetto il meteoroide in atmosfera:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{\Lambda}{2Q} \rho A v^3$$

Λ = coefficiente adimensionale di trasferimento del calore (compreso fra 0 e 1).

Q = energia necessaria per l'ablazione dell'unità di massa

ρ = densità del fluido

v = velocità del corpo rispetto al fluido

A = area della «sezione d'urto» del corpo

Dinamica del meteoroidi: modello ad ablazione costante senza frammentazione

$$\frac{dv}{dt} = -\Gamma \rho \frac{v^2}{D_\infty} e^{-\frac{\sigma}{6}(v^2 - v_\infty^2)}$$

Conservazione della quantità di moto + energia

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\rho v \cos(z)}{H}$$

$$\frac{dh}{dt} = -v \cos(z)$$

v = body speed with respect to the air

Γ = aerodynamic drag coefficient

ρ = air density

σ = ablation coefficient

v_∞ = pre-atmospheric velocity

$D_\infty = m_\infty/A_\infty$, pre-atmospheric ratio mass/cross section

z = mean zenith distance of the fireball radiant

$H = 7.64$ km, average atmosphere scale height

Modello del dark flight: la legge di resistenza newtoniana

Nella fase di volo buio il moto del meteoroido residuo avviene in un regime altamente turbolento, ossia caratterizzato da alti numeri di Reynolds (circa 10^6). La massa è costante e l'equazione del moto è:

$$\vec{a} = -\Gamma \rho v \frac{A}{m} \vec{v} \quad \text{con} \quad \vec{v} = \vec{v}_c - \vec{V}$$

$\Gamma = C_R/2$ = coefficiente di resistenza aerodinamica (dipende da velocità e forma del corpo)

ρ = densità del fluido

V = velocità del fluido rispetto al suolo (ossia la velocità del vento)

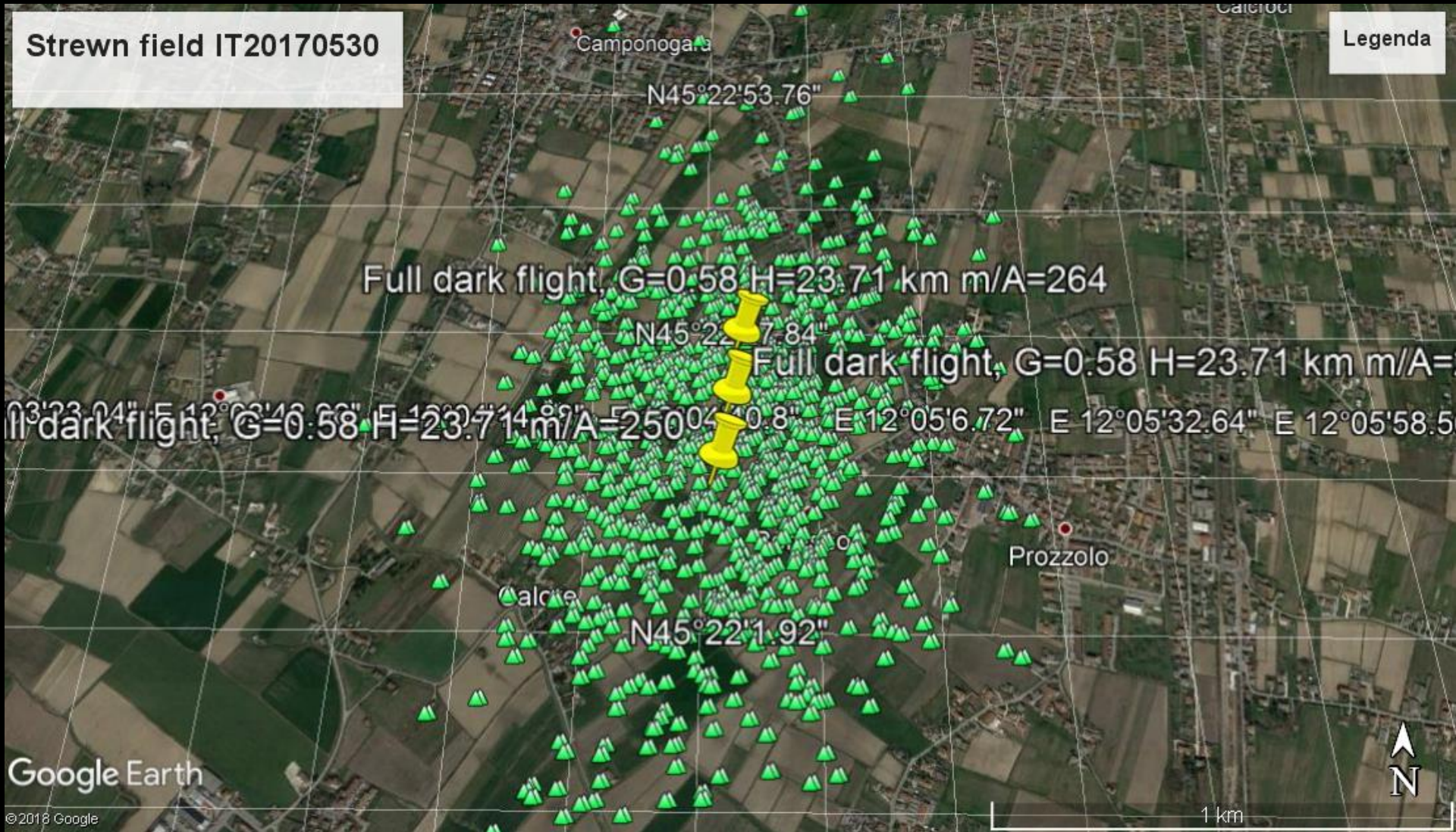
v = velocità del corpo rispetto al fluido

v_c = velocità del corpo rispetto al suolo

A = area della «sezione d'urto» del corpo

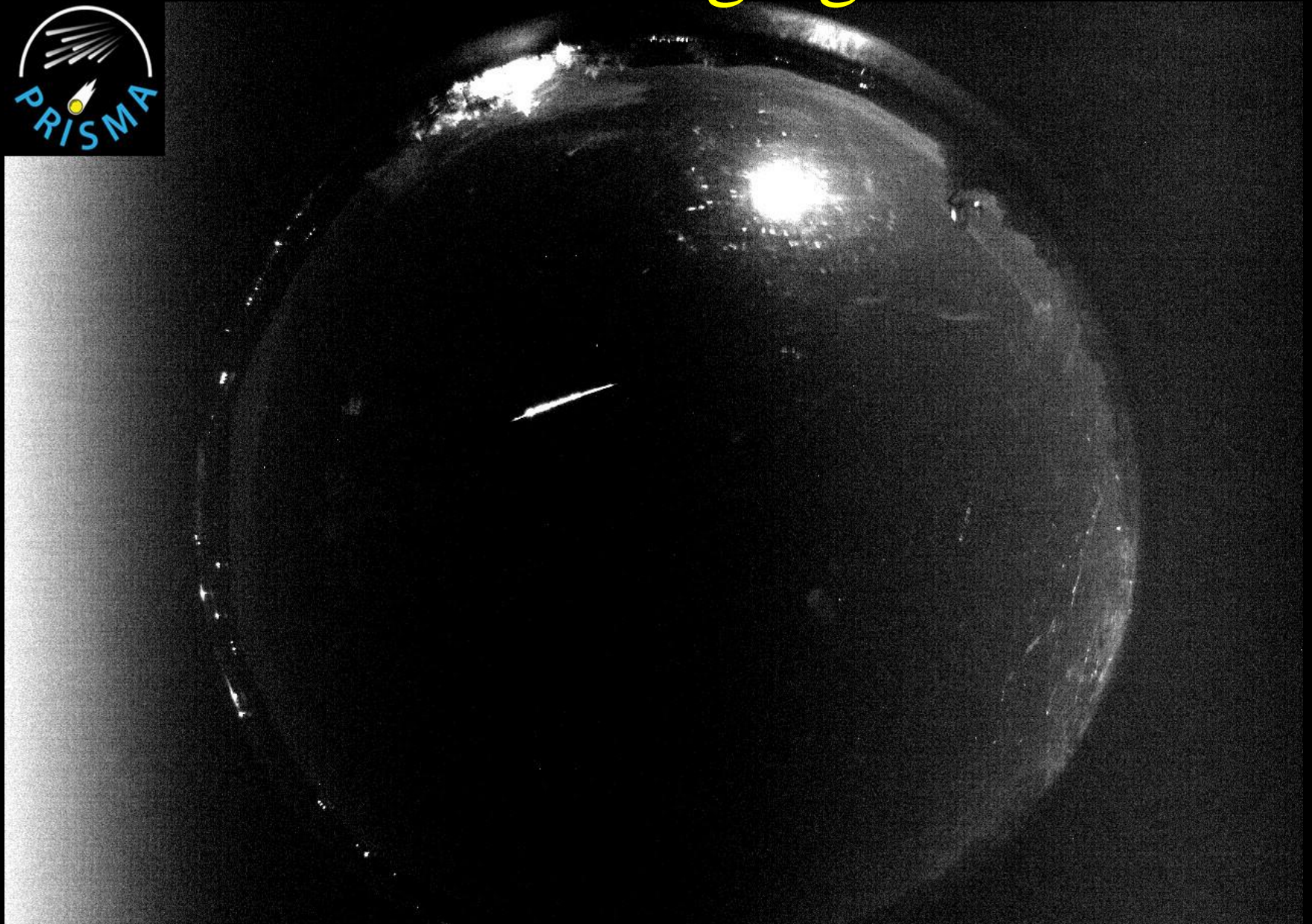
m = massa residua del meteoroido

Aggiornamento su IT20170530



Strewn field con N=1000 meteoroidi virtuali, dimensioni $2,0 \times 1,2$ km.
Lat. $45^{\circ}22'19.56''N$; Long. $12^{\circ}4'42.96''E$

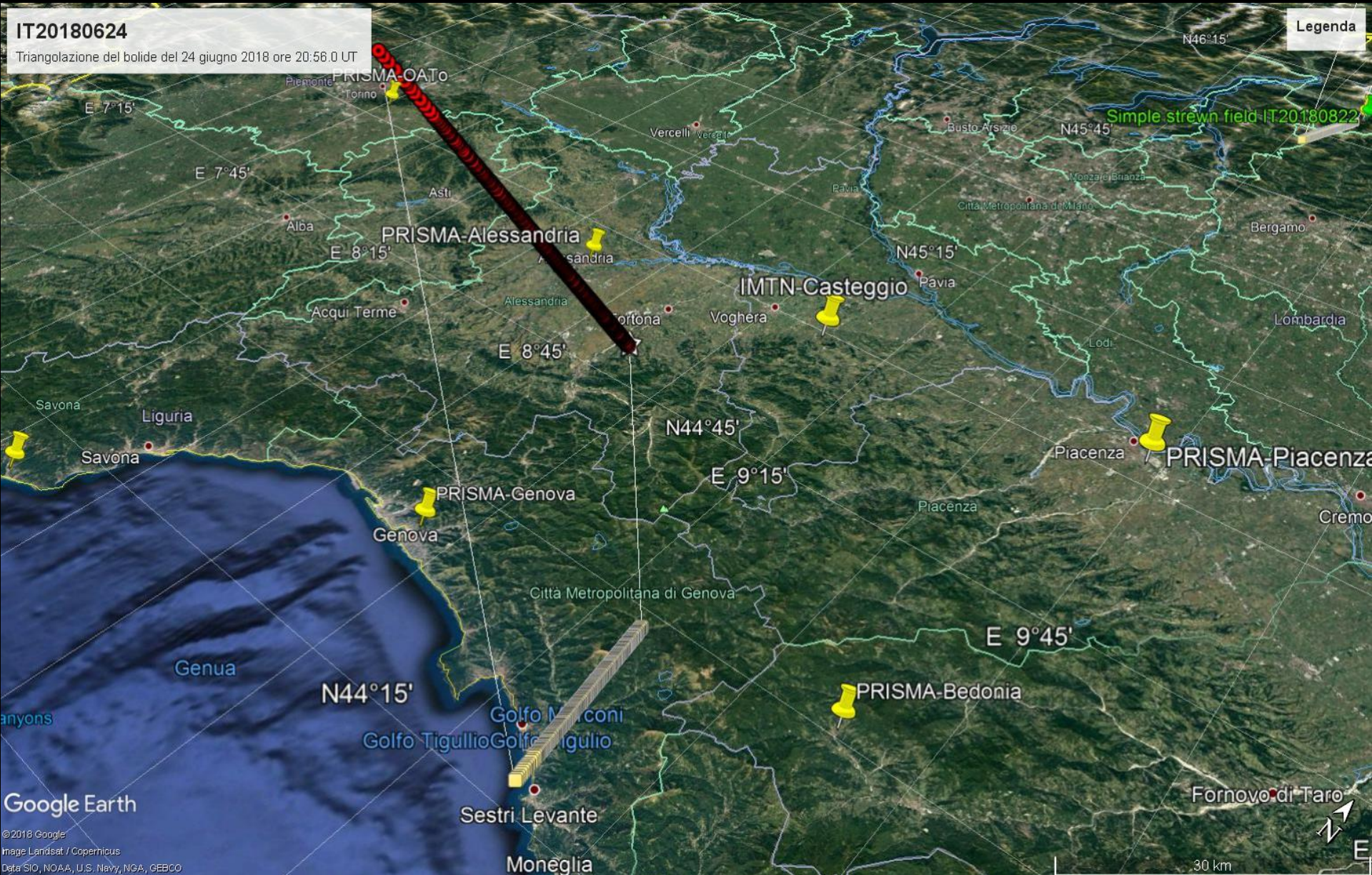
Il bolide del 24 giugno 2018



20180624T205620 UTC

BEDONIA

Triangolazione IT20180624



IT20180624
Triangolazione del bolide del 24 giugno 2018 ore 20:56.0 UT

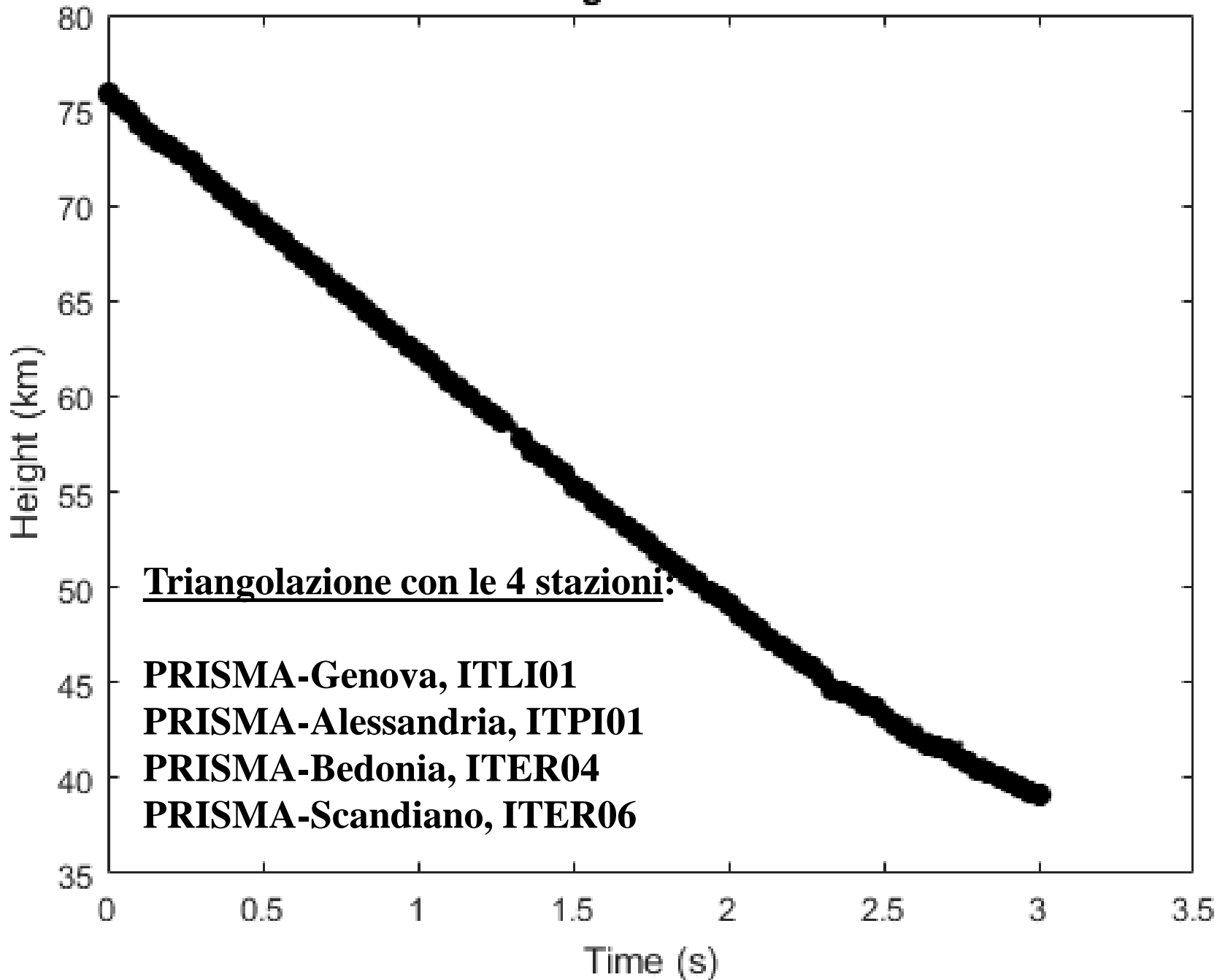
Legenda

Google Earth

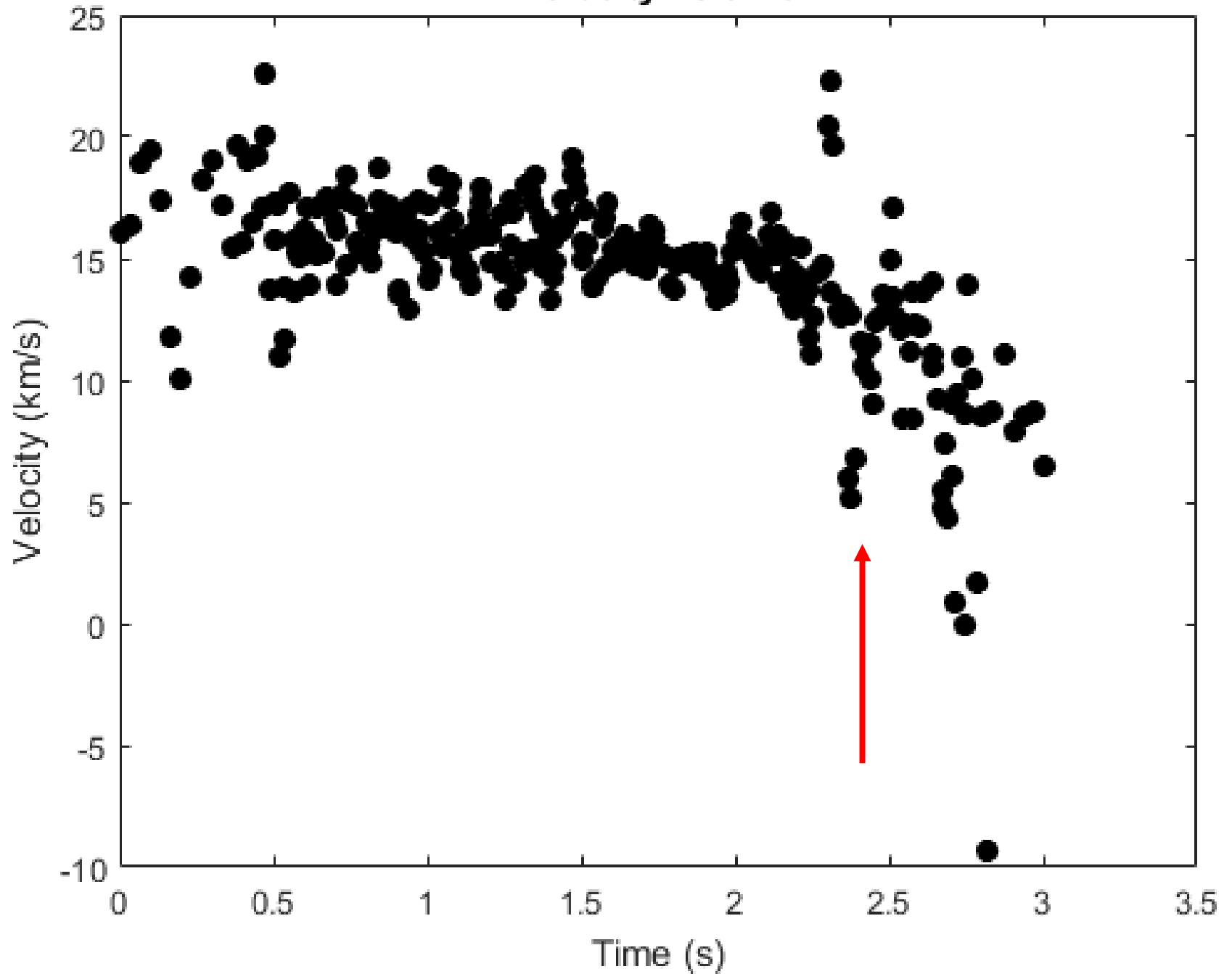
© 2018 Google
Image Landsat / Copernicus
Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO

30 km

Height vs time



Velocity vs time



Risultati su IT20180624

Il bolide è caduto con una inclinazione media di circa 58° rispetto al suolo, con una durata totale di 3,0 s.

Sì è reso visibile a 76 km di quota (sopra Sestri Levante) e ha terminato la corsa sulla verticale di Parazzuolo (GE) a 39 km di quota.

In totale ha percorso 193 km in atmosfera con una velocità media di $14,5 \pm 4$ km/s.

Il bolide del 12 luglio 2018



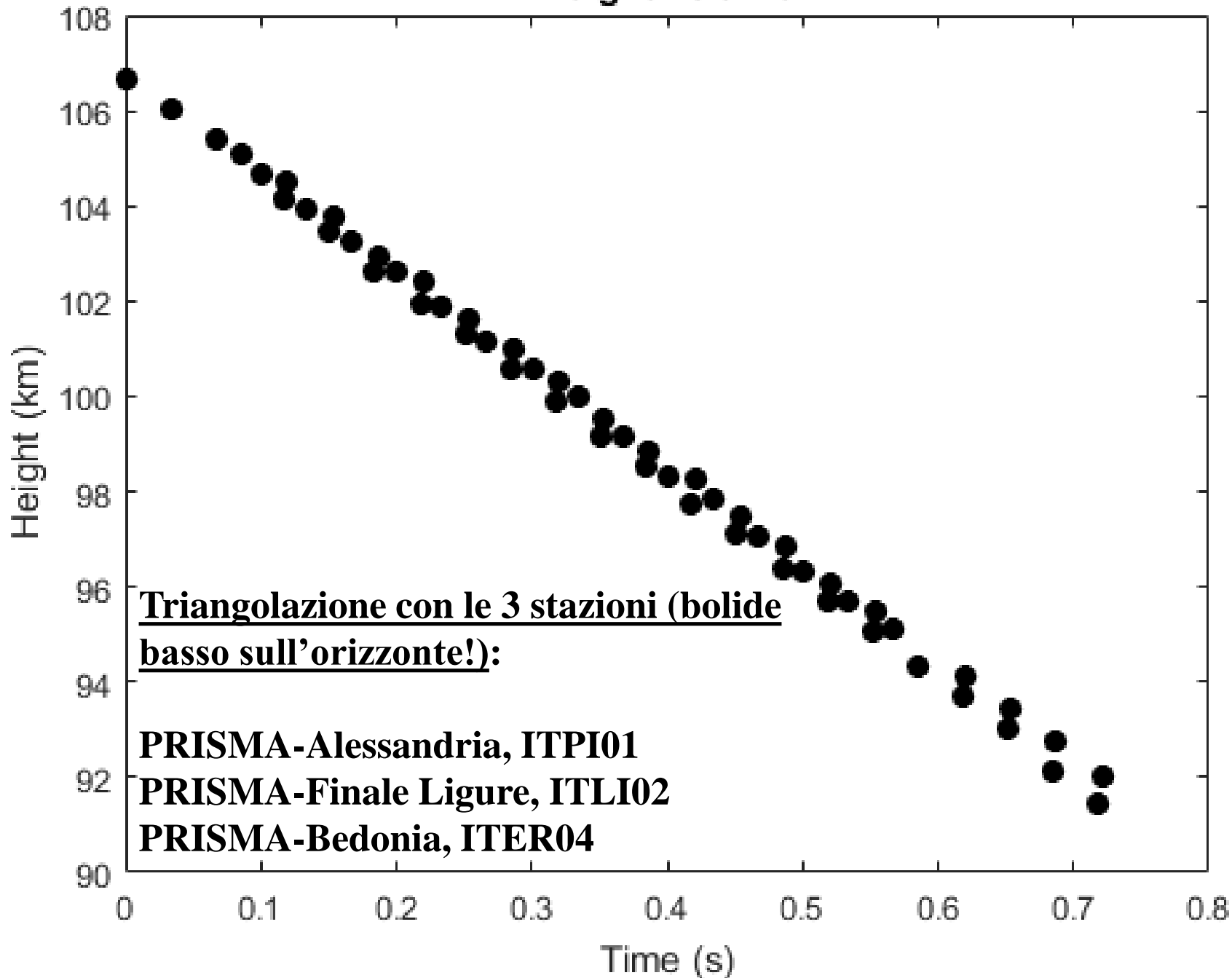
20180712T222909 UTC

FINALELIGURE

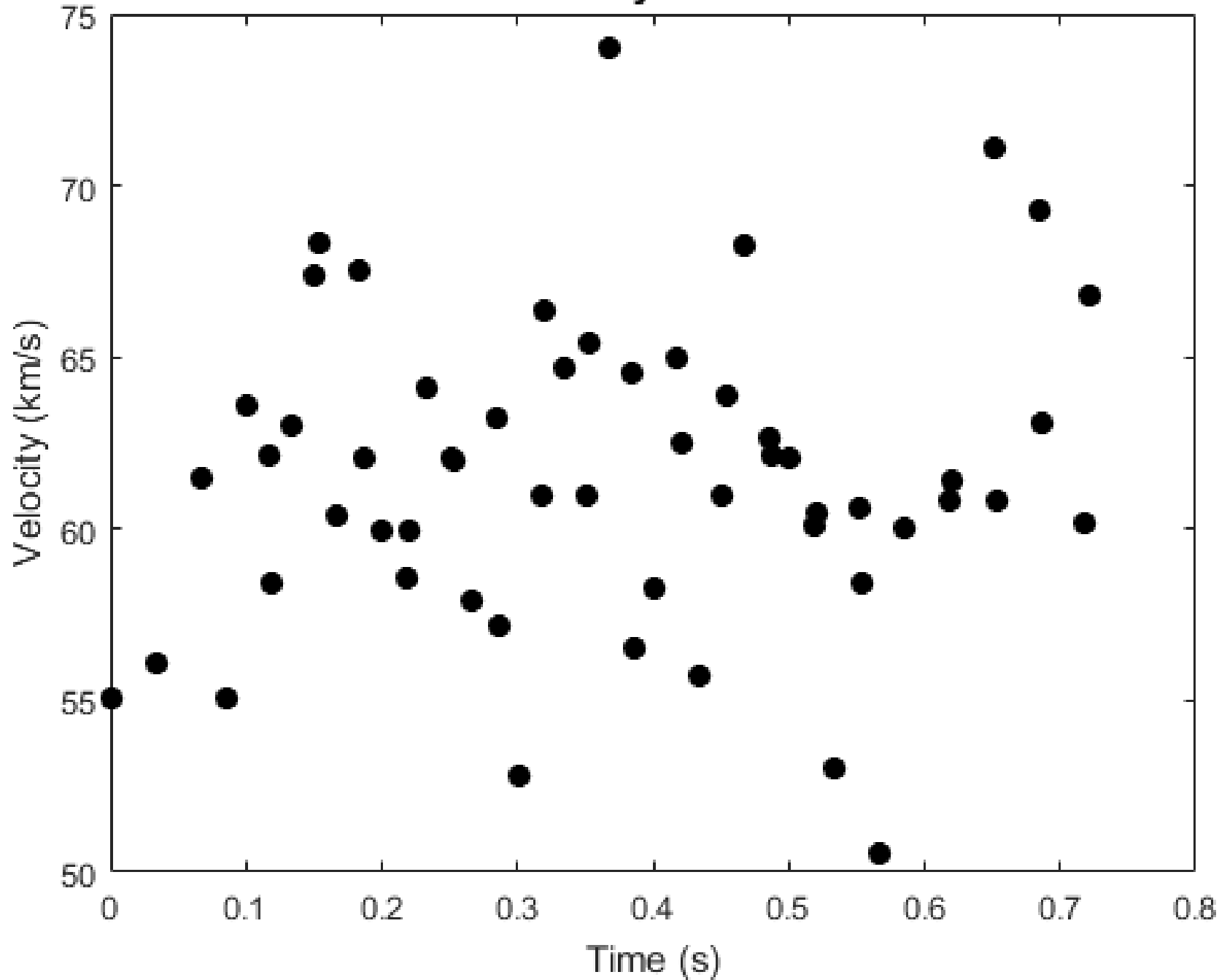
Triangolazione IT20180712



Height vs time



Velocity vs time



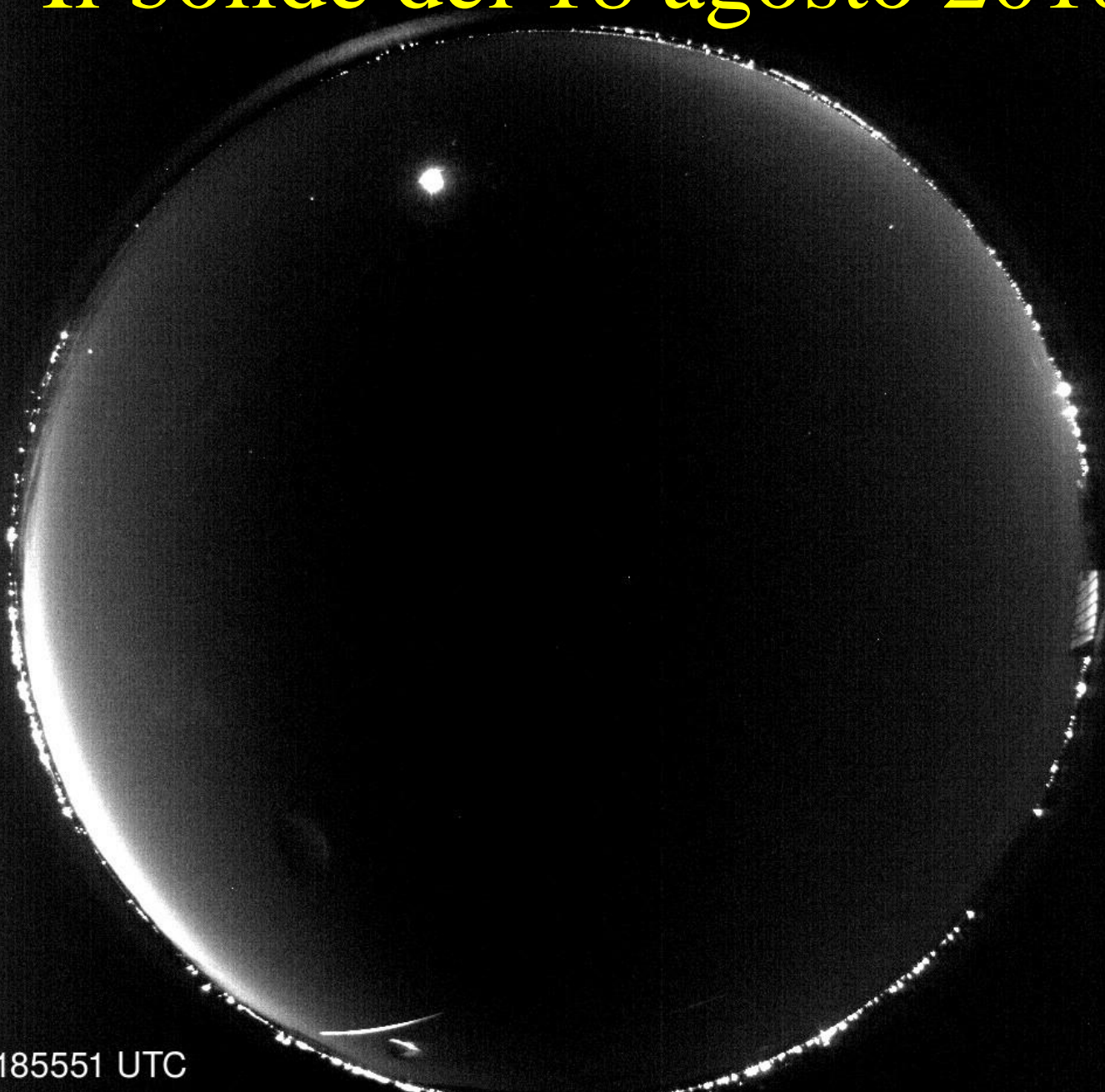
Risultati su IT20180712

Il bolide è caduto con una inclinazione media di circa 20° rispetto al suolo, con una durata di 0,72 s.

Sì è reso visibile a 107 km di quota (sopra il Mar Ligure) e ha terminato la corsa, sempre sul mare, a 92 km di quota.

In totale ha percorso 103 km in atmosfera con una velocità media di 62 ± 4 km/s.

Il bolide del 18 agosto 2018



20180818T185551 UTC

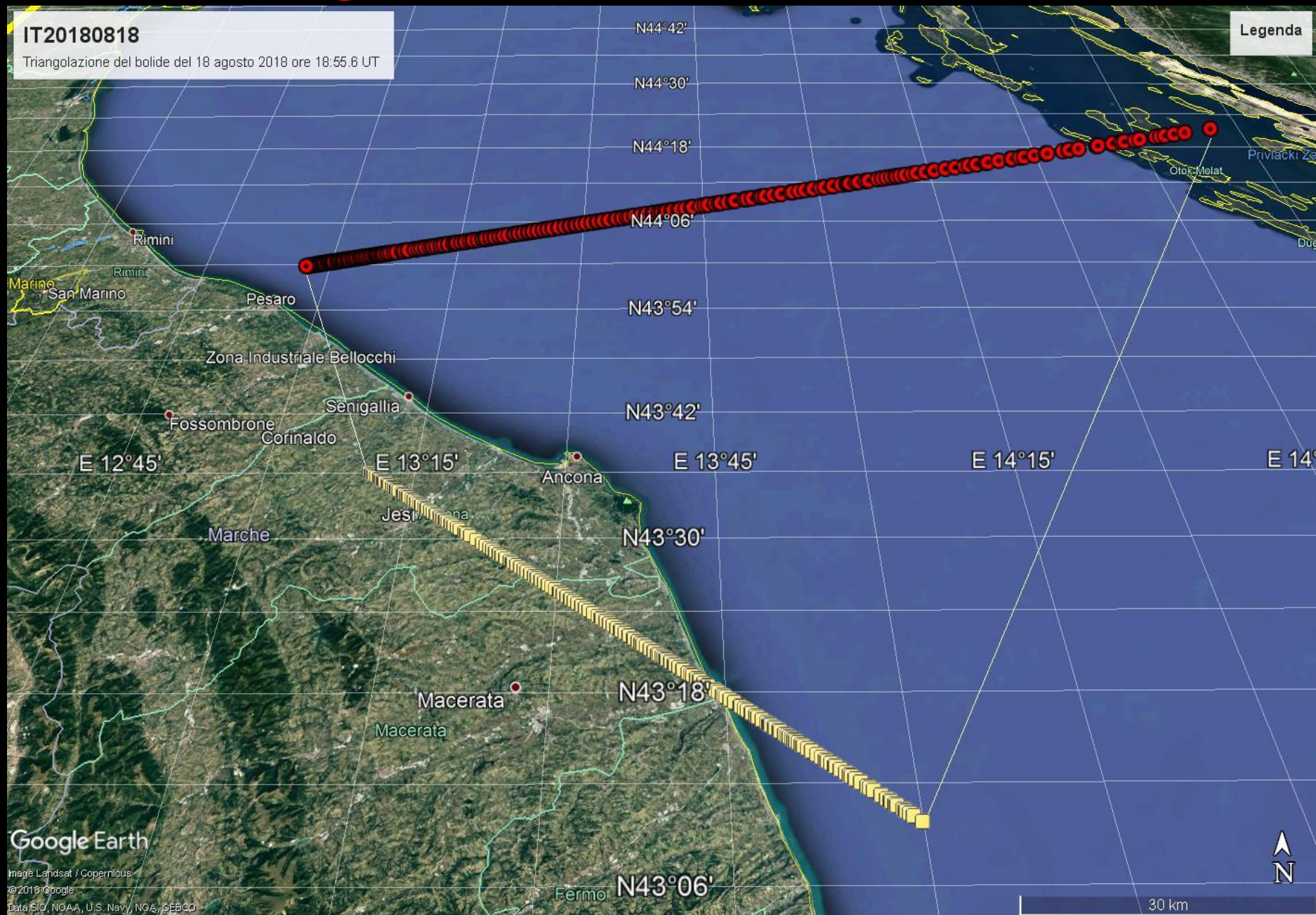
CAPUA

Triangolazione di IT20180818

IT20180818

Triangolazione del bolide del 18 agosto 2018 ore 18:55.8 UT

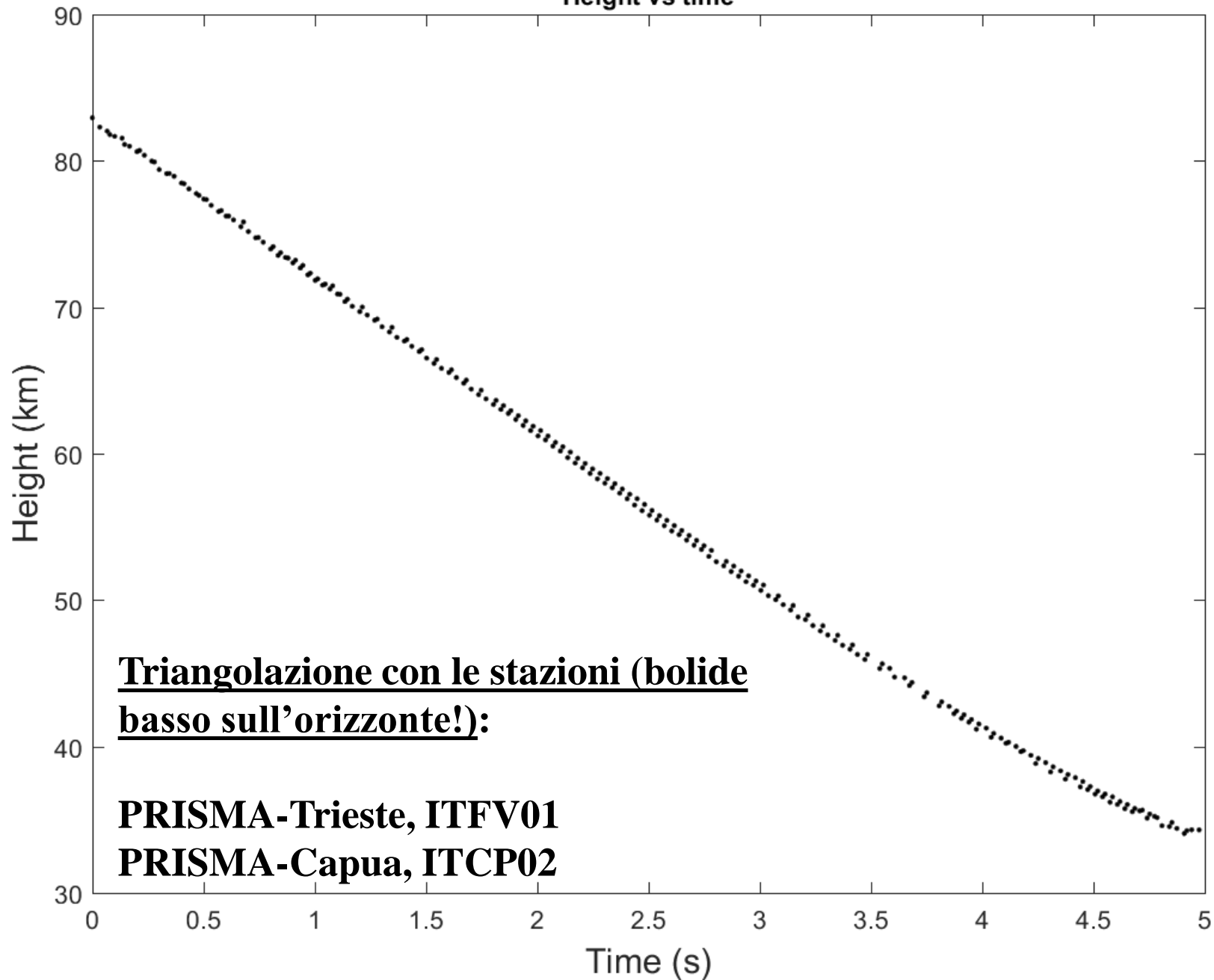
Legenda



Google Earth

Image Landsat / Copernicus
© 2018 Google
Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO

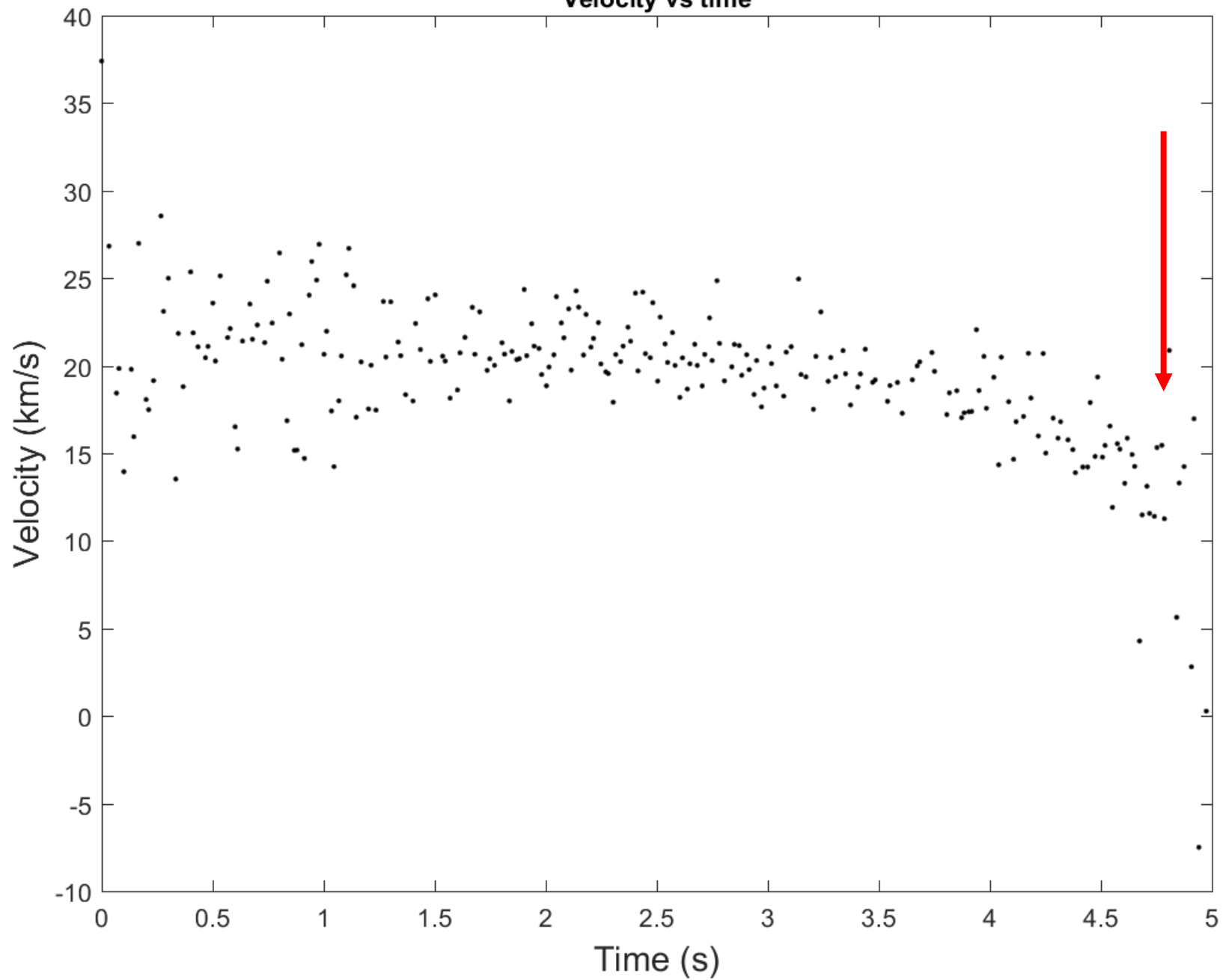
Height vs time



Triangolazione con le stazioni (bolide basso sull'orizzonte!):

PRISMA-Trieste, ITFV01
PRISMA-Capua, ITCP02

Velocity vs time



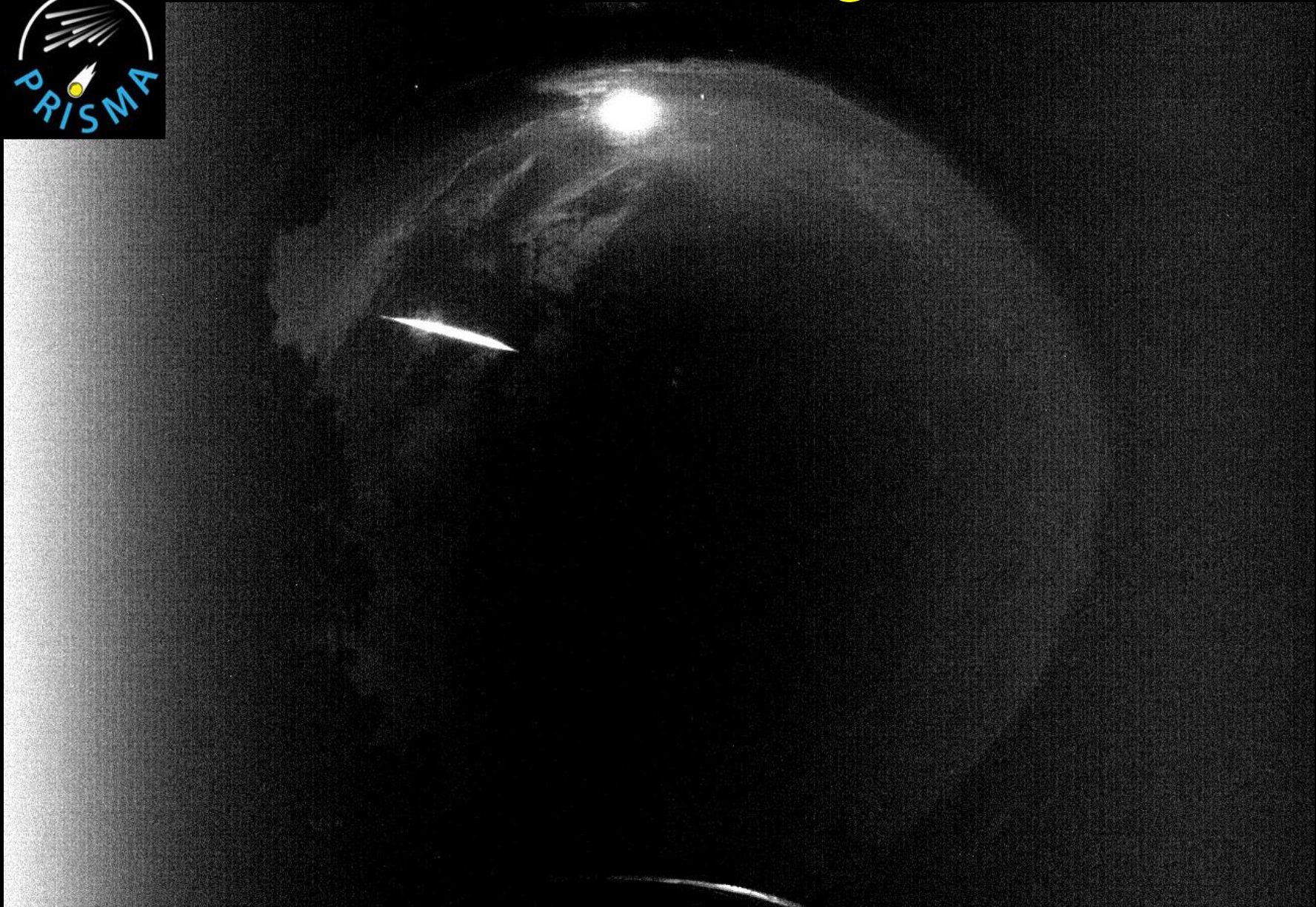
Risultati su IT20180818

Il bolide si è mosso con una inclinazione di circa 30° rispetto al suolo, con una durata di 5 s. Si è reso visibile a 83 km di quota (sopra l'Adriatico, a est di Fermo) e ha terminato la corsa sull'entroterra di Senigallia, a 34 km di quota. In totale ha percorso 540 km in atmosfera.

Ha subito una frammentazione finale, **indicata dalle oscillazioni della velocità osservata**. Probabilmente non è arrivato niente al suolo perché la velocità finale del modello dinamico indica un valore di 15 km/s.

La velocità all'infinito era di 21 ± 1.5 km/s, con una velocità geocentrica di circa 17.5 km/s, quindi era un meteoroide con un'orbita di tipo asteroidale.

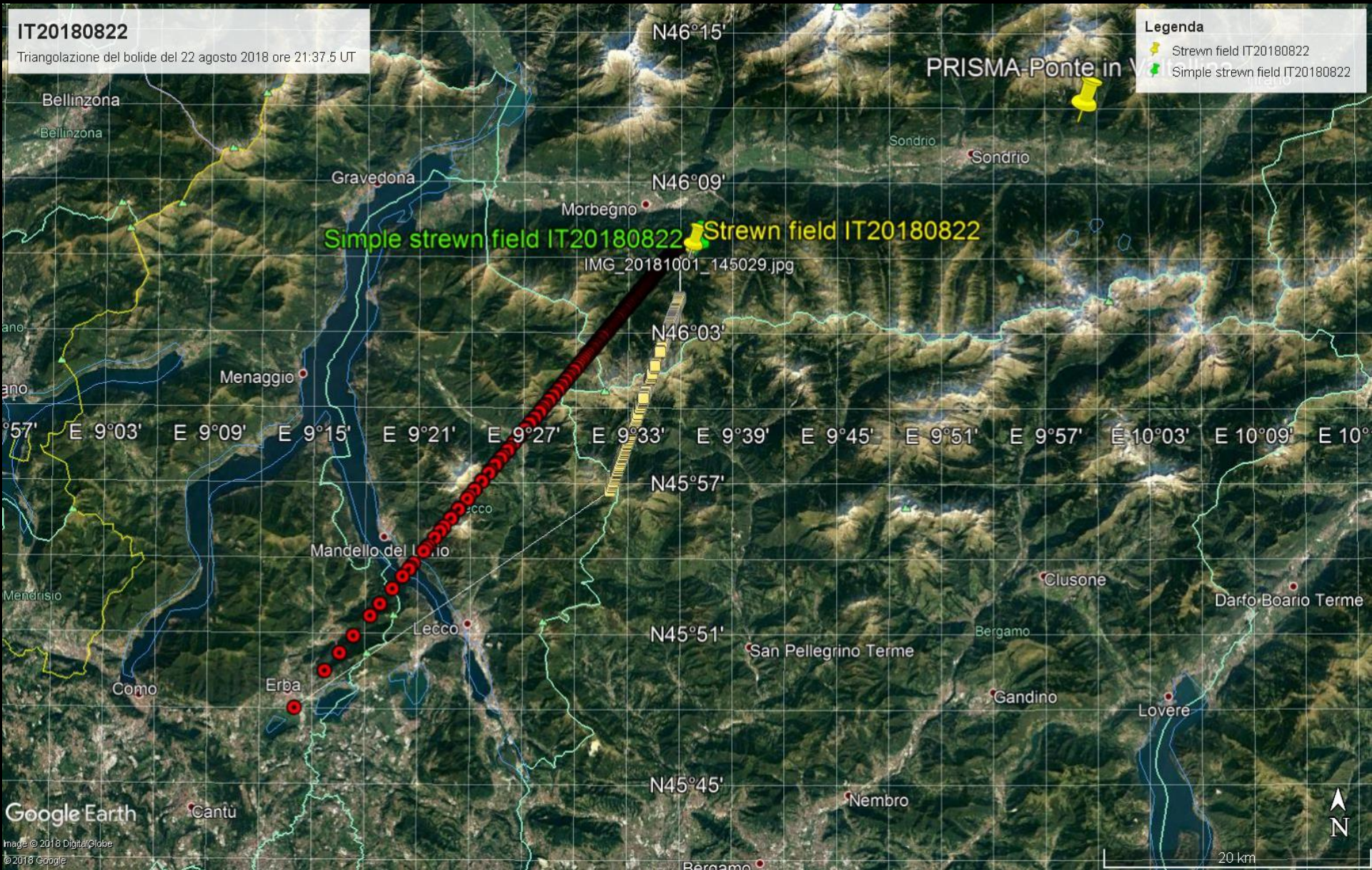
Il bolide del 22 agosto 2018



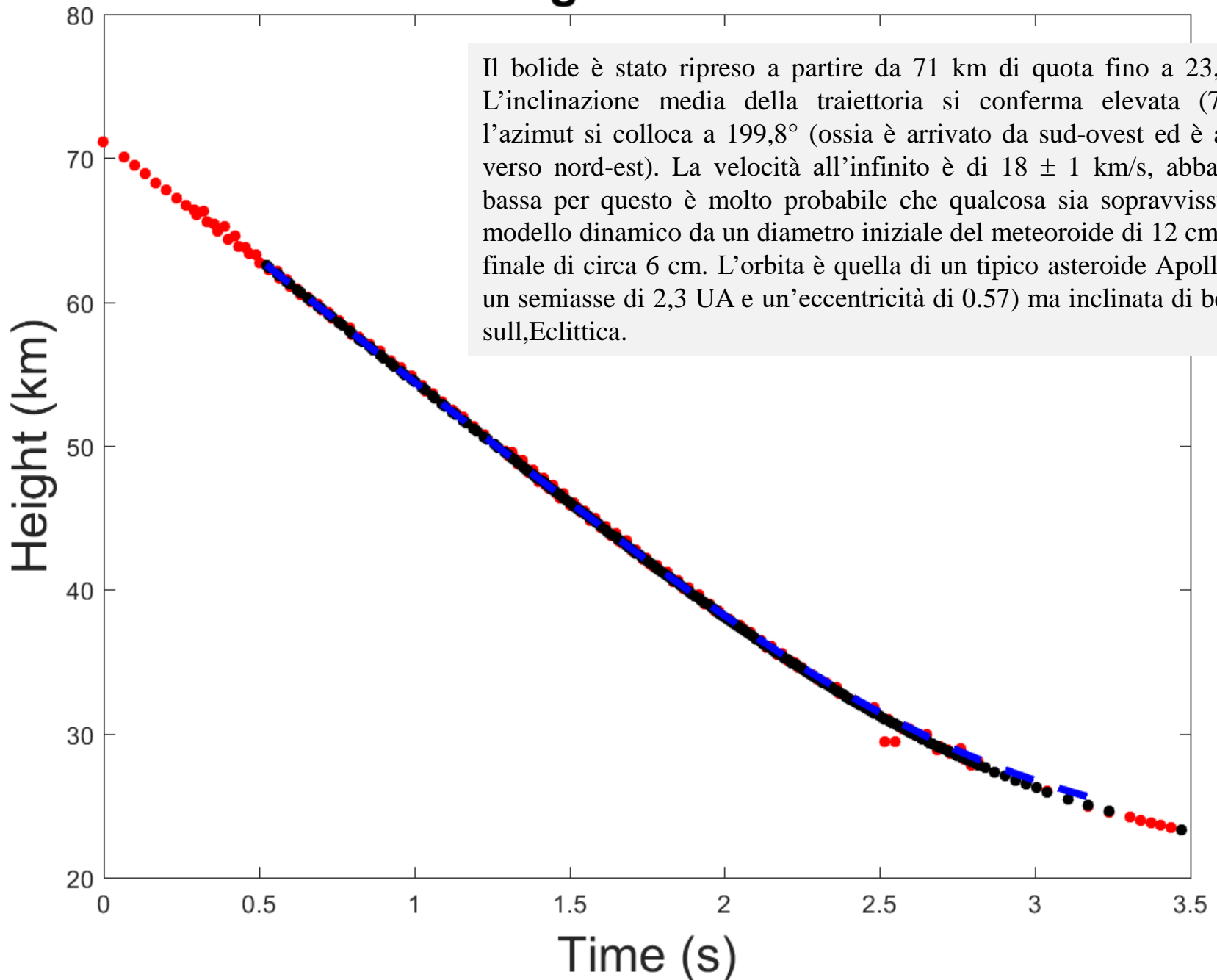
20180822T213746 UTC

PONTEVALTELLINA

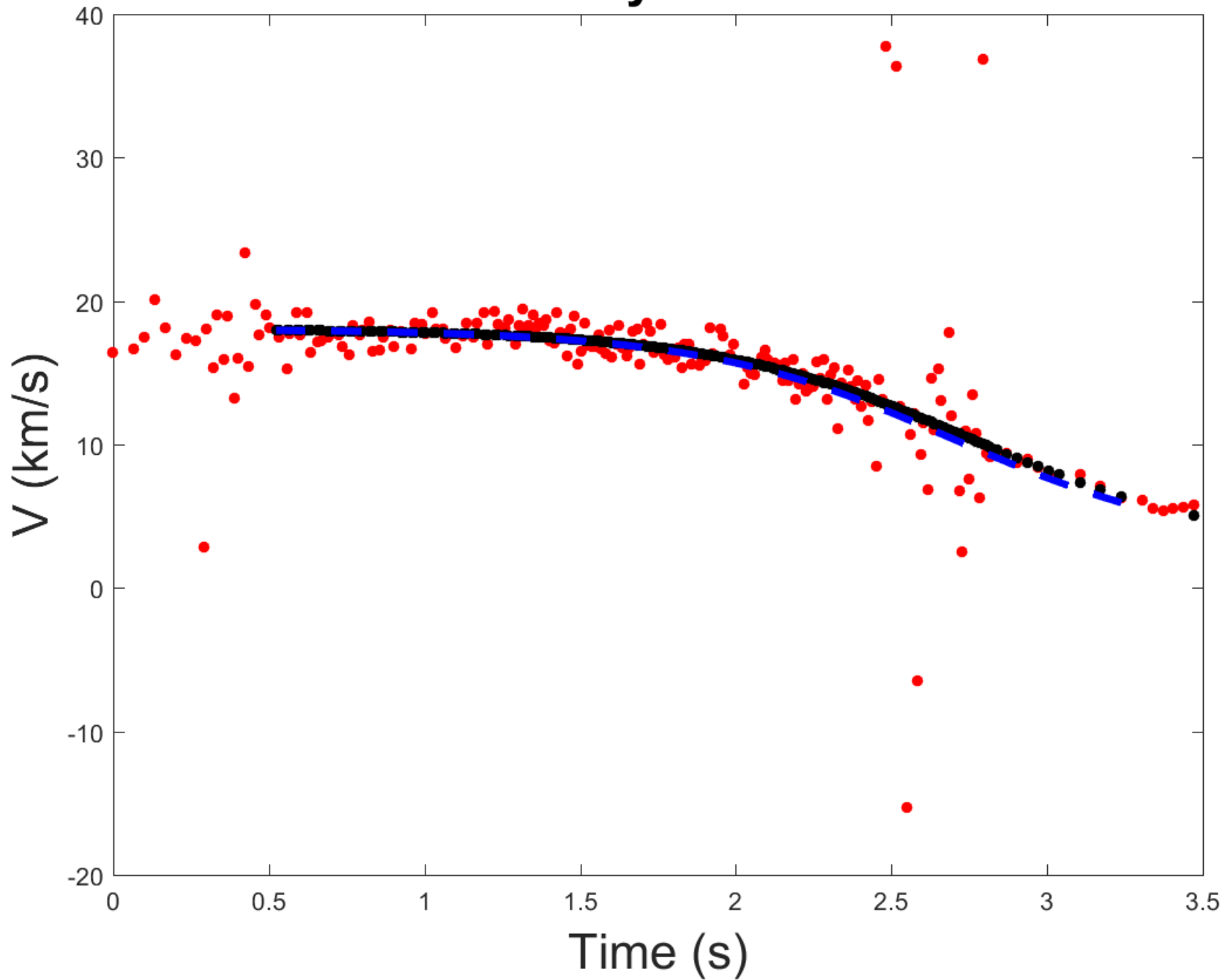
Triangolazione IT20180822



Height vs. time



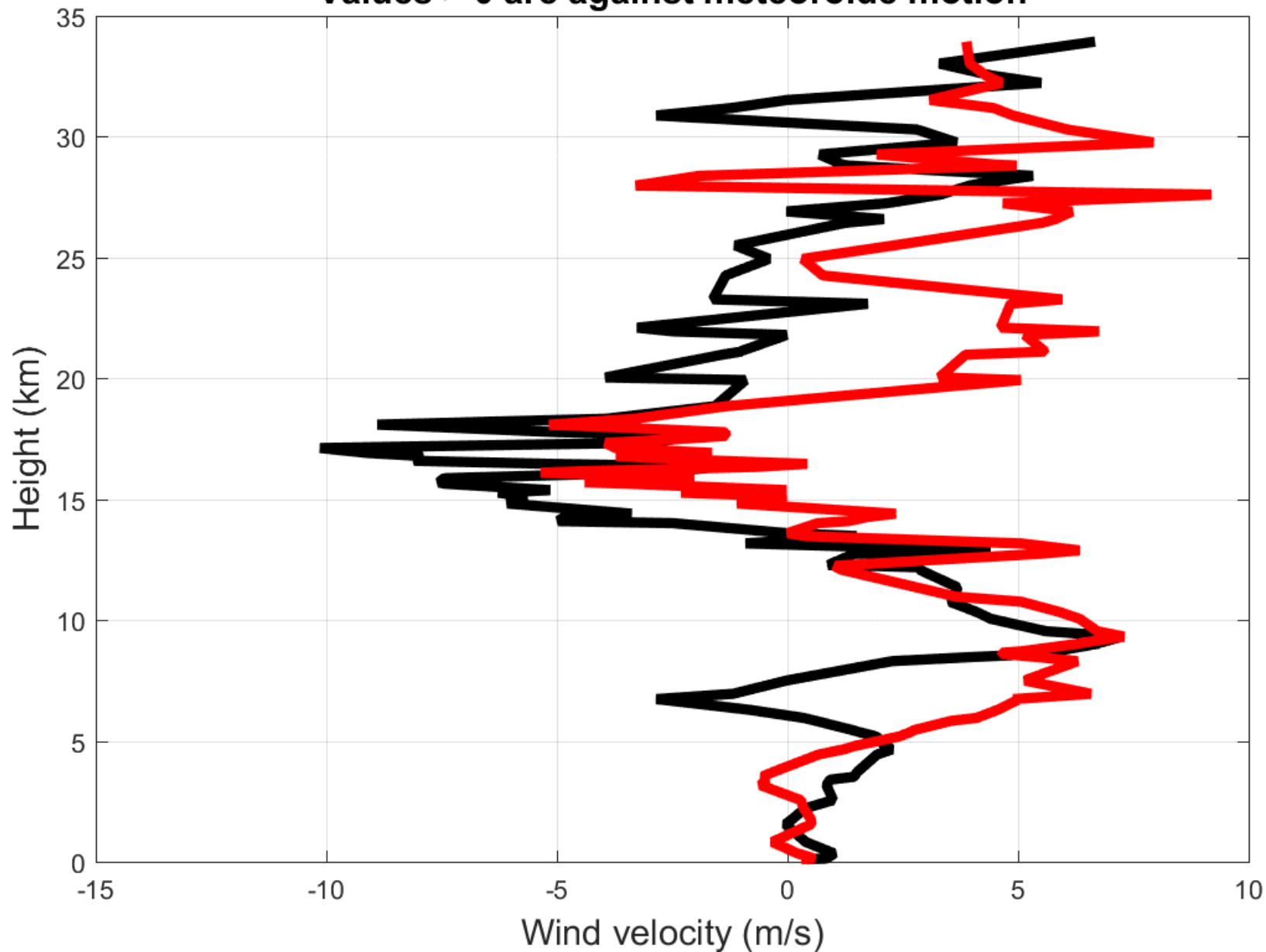
Velocity vs. time



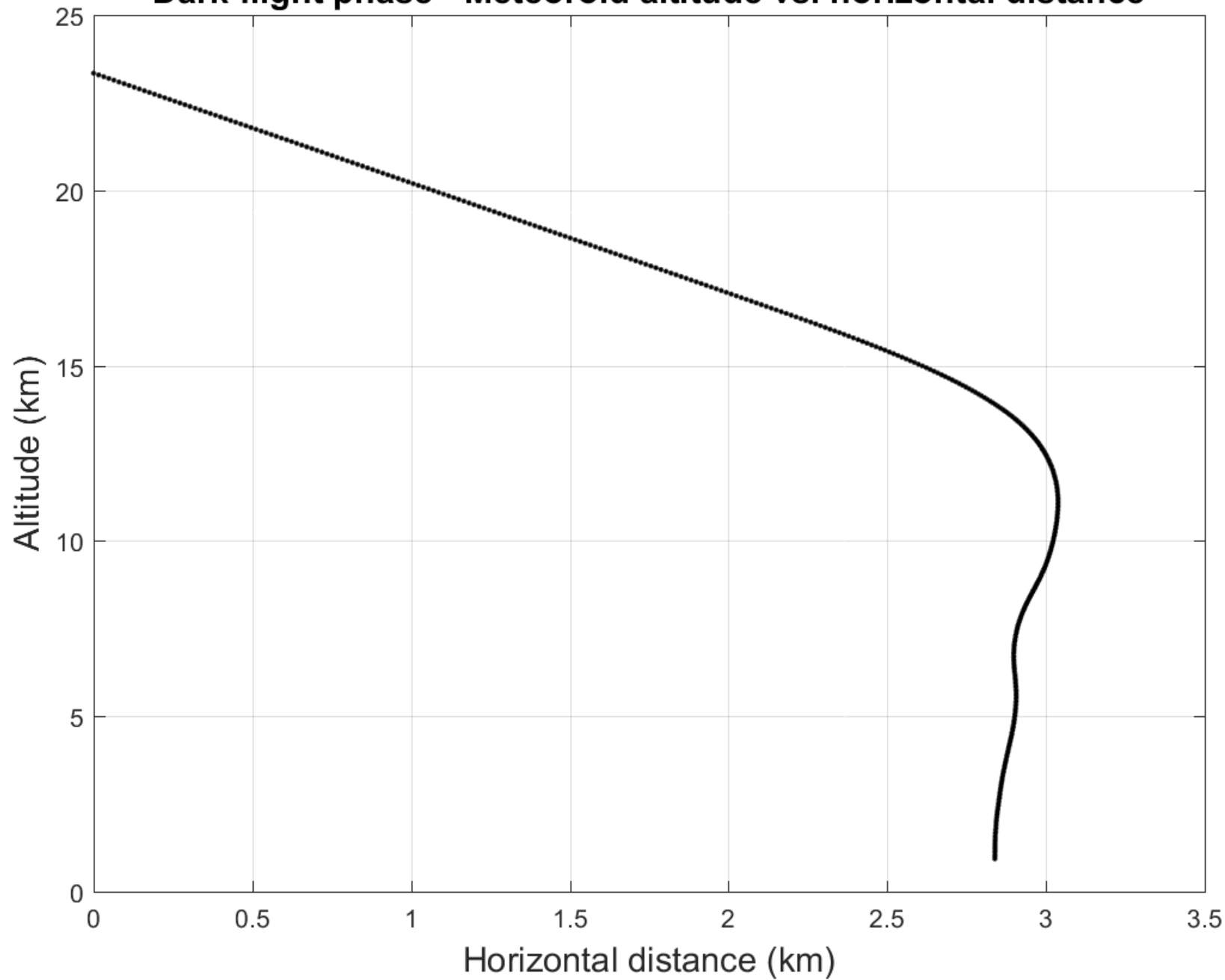
Wind velocity vs. height in the reference meteoroid system

Black: fireball motion direction, Red: orthogonal direction

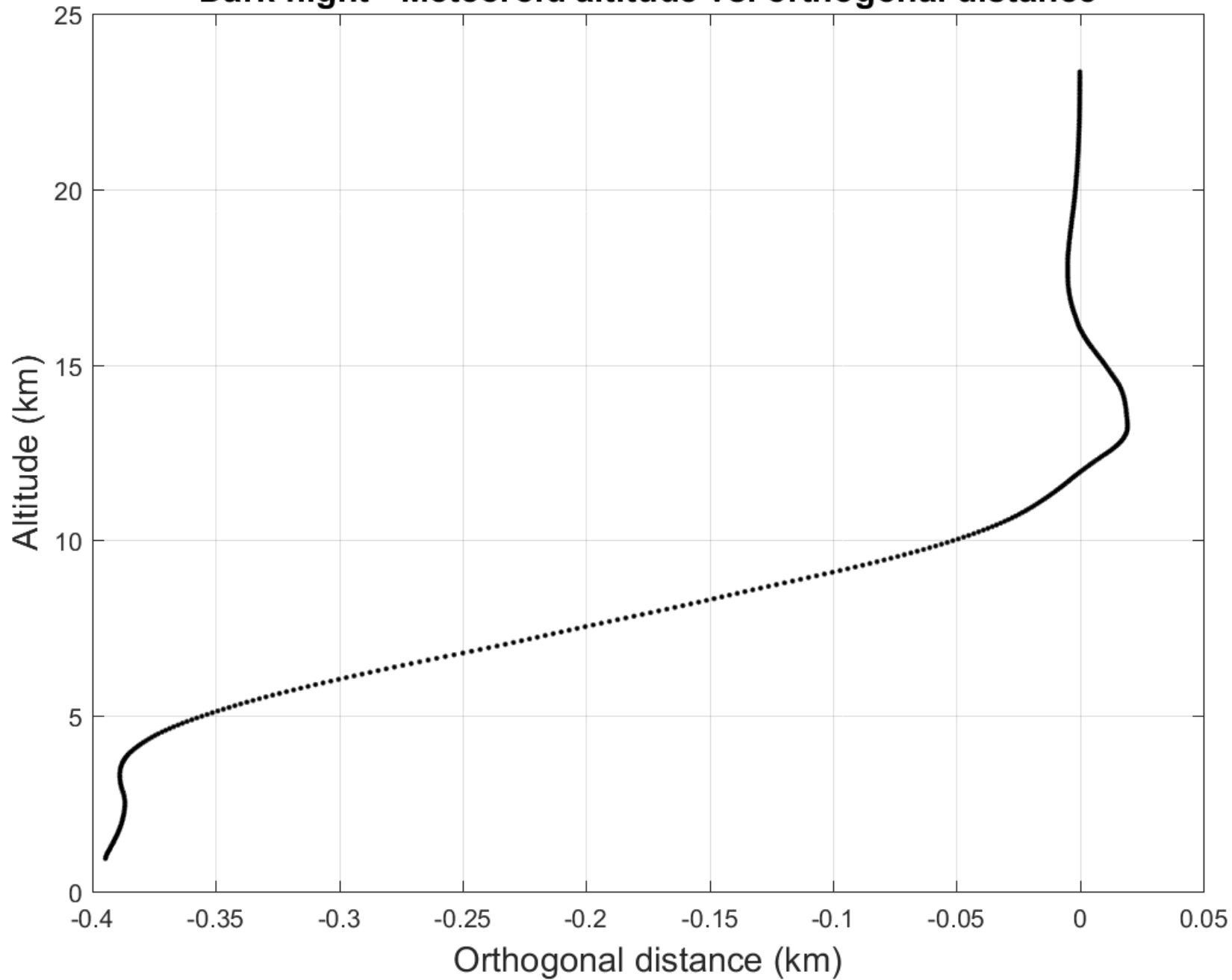
Values > 0 are against meteoroid motion



Dark flight phase - Meteoroid altitude vs. horizontal distance



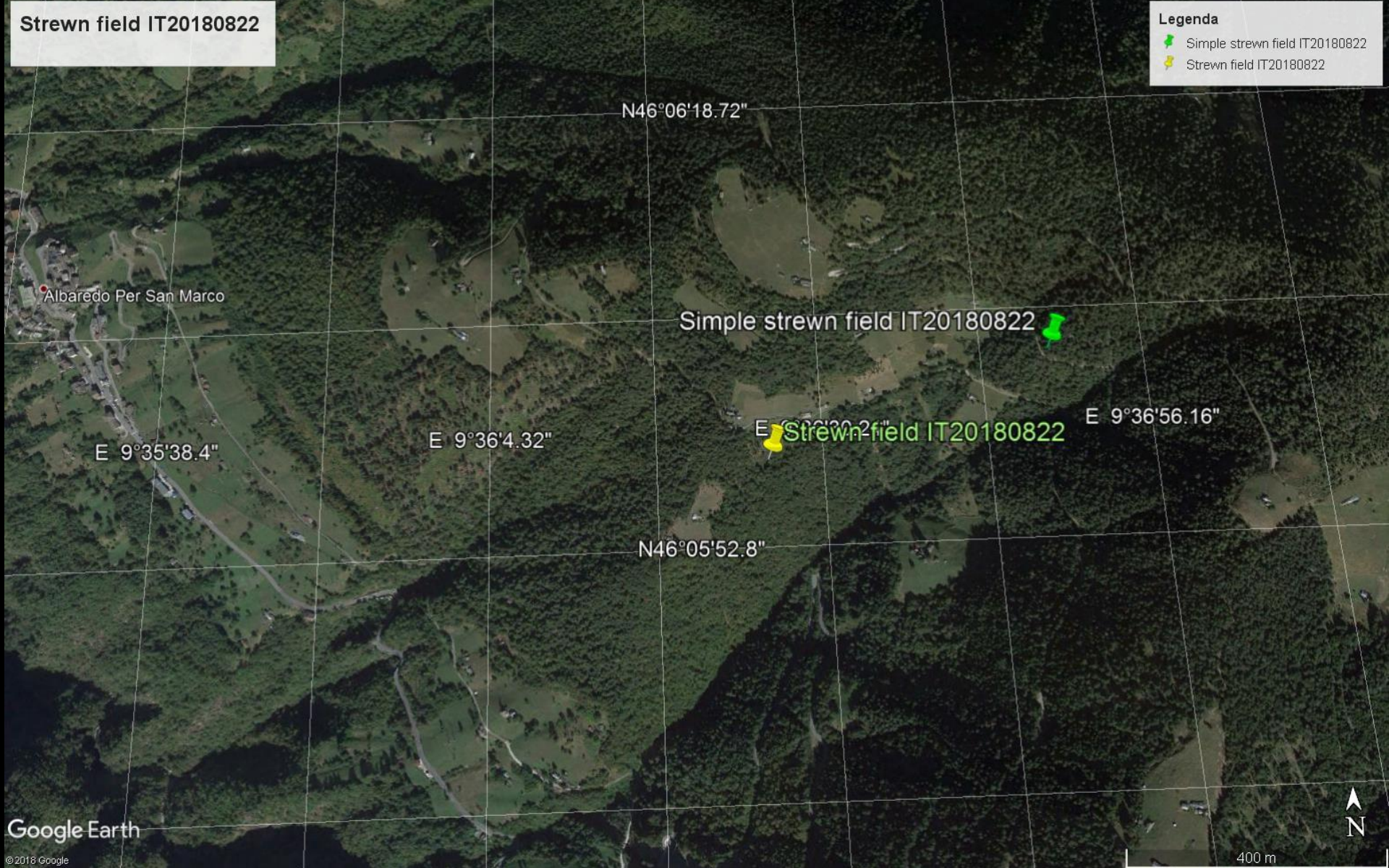
Dark flight - Meteoroid altitude vs. orthogonal distance



Strewn field IT20180822

Legenda

- Simple strewn field IT20180822
- Strewn field IT20180822



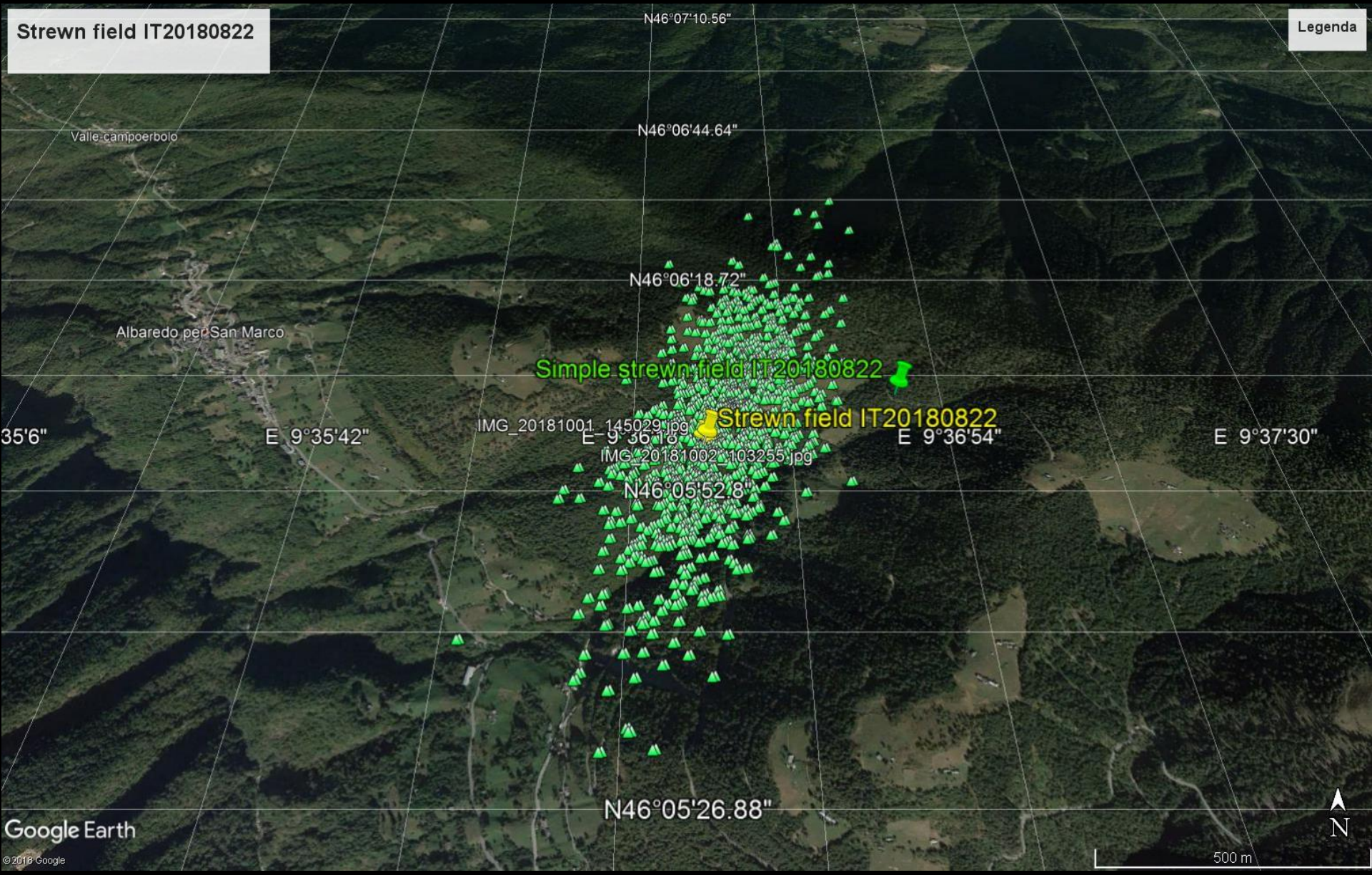
Il luogo calcolato per la caduta si trova nel comune di Albaredo per San Marco, a Sud di Morbegno (SO), alle coordinate:

Lat. 46.0993° N; Long 9.6072° E

Zona facilmente raggiungibile in auto, ma boscosa e piuttosto impervia. La dimensione calcolata del residuo è di circa 6 cm.

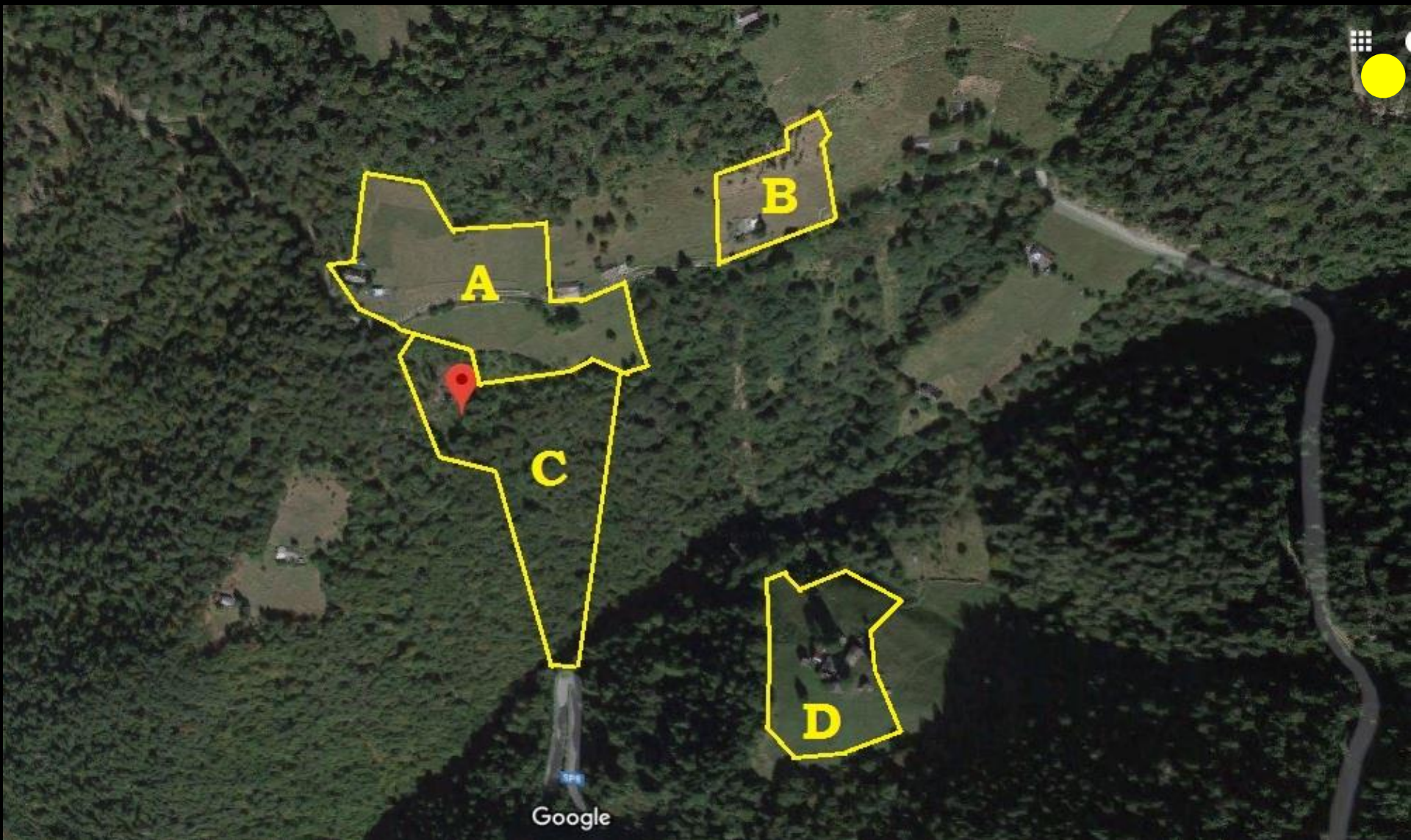
Strewn field IT20180822

Legenda



Strewn field con N=1000 meteoroidi virtuali, dimensioni 1,5 × 0.5 km.

Ricerca sul «campo» fatta l'1-2 ottobre 2018

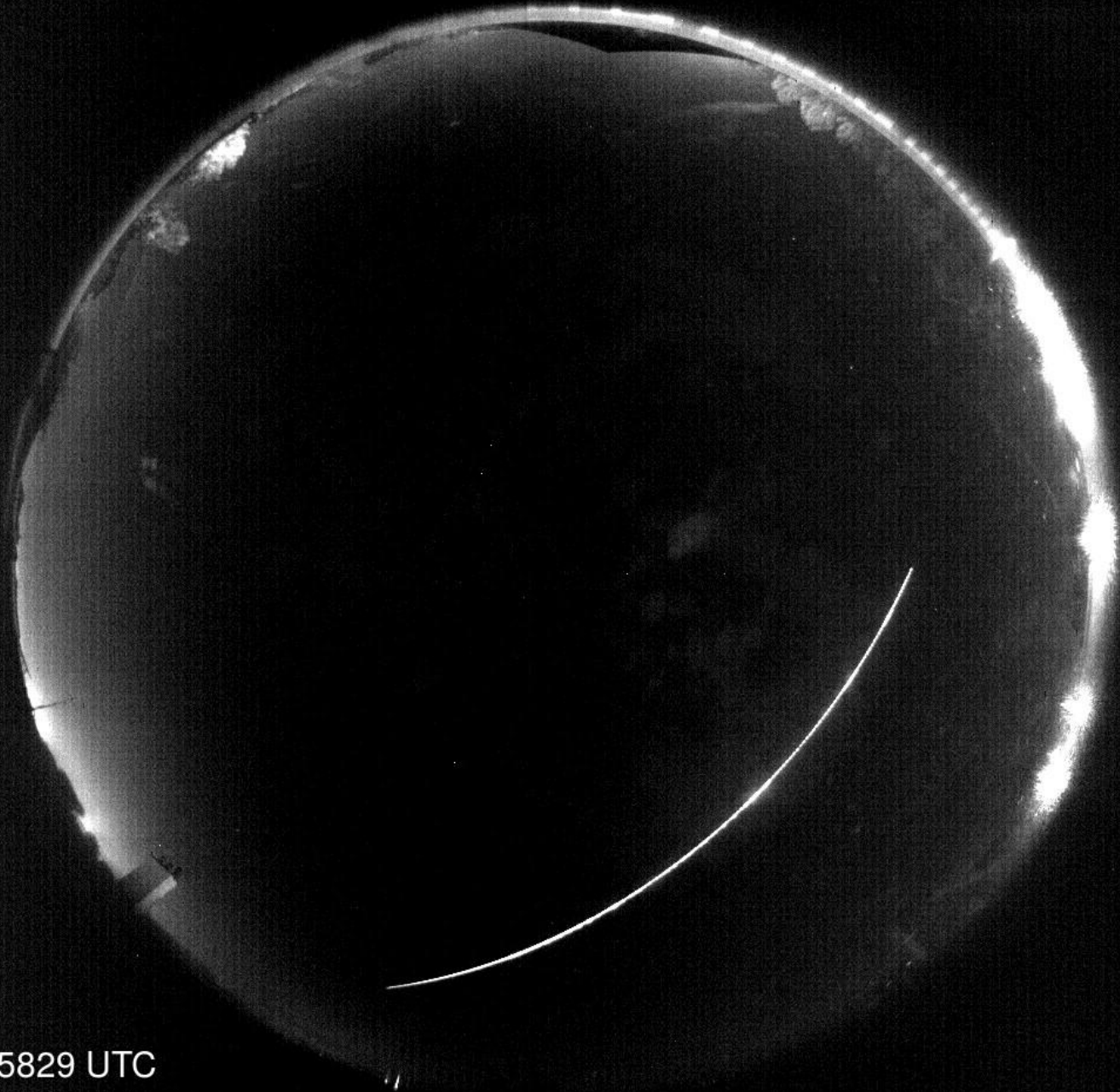








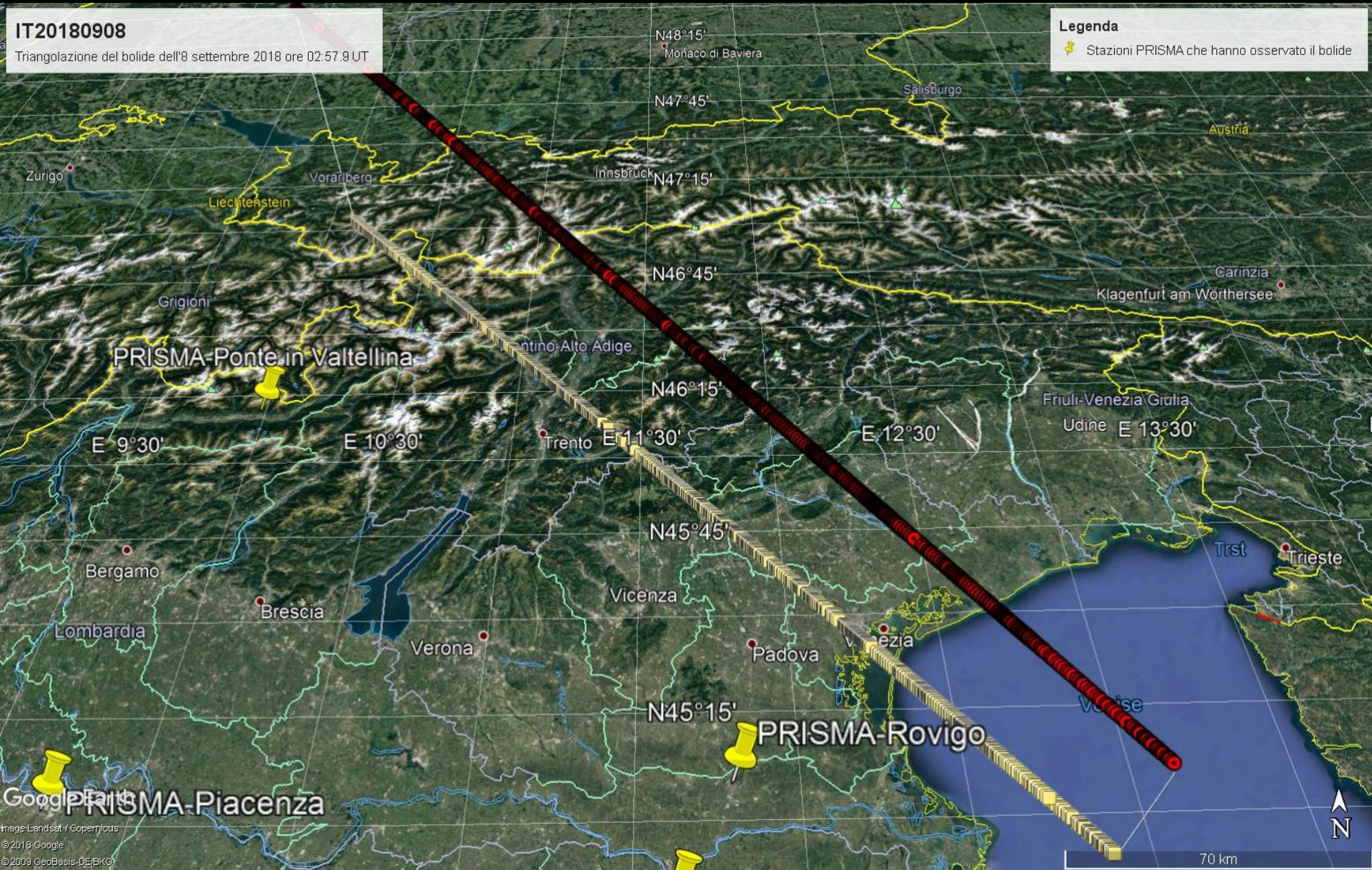
Il bolide dell'8 settembre 2018



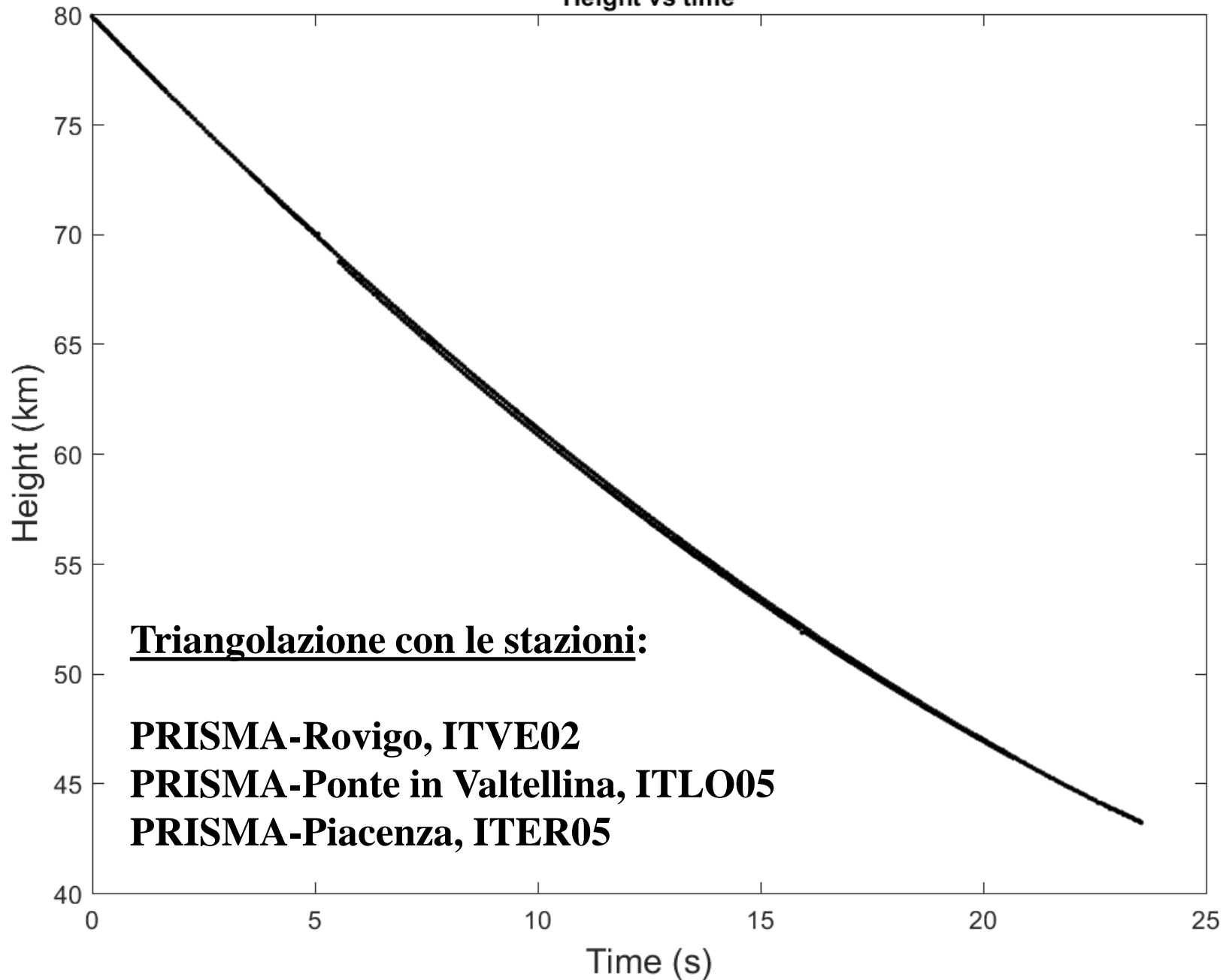
20180908T025829 UTC

ROVIGO

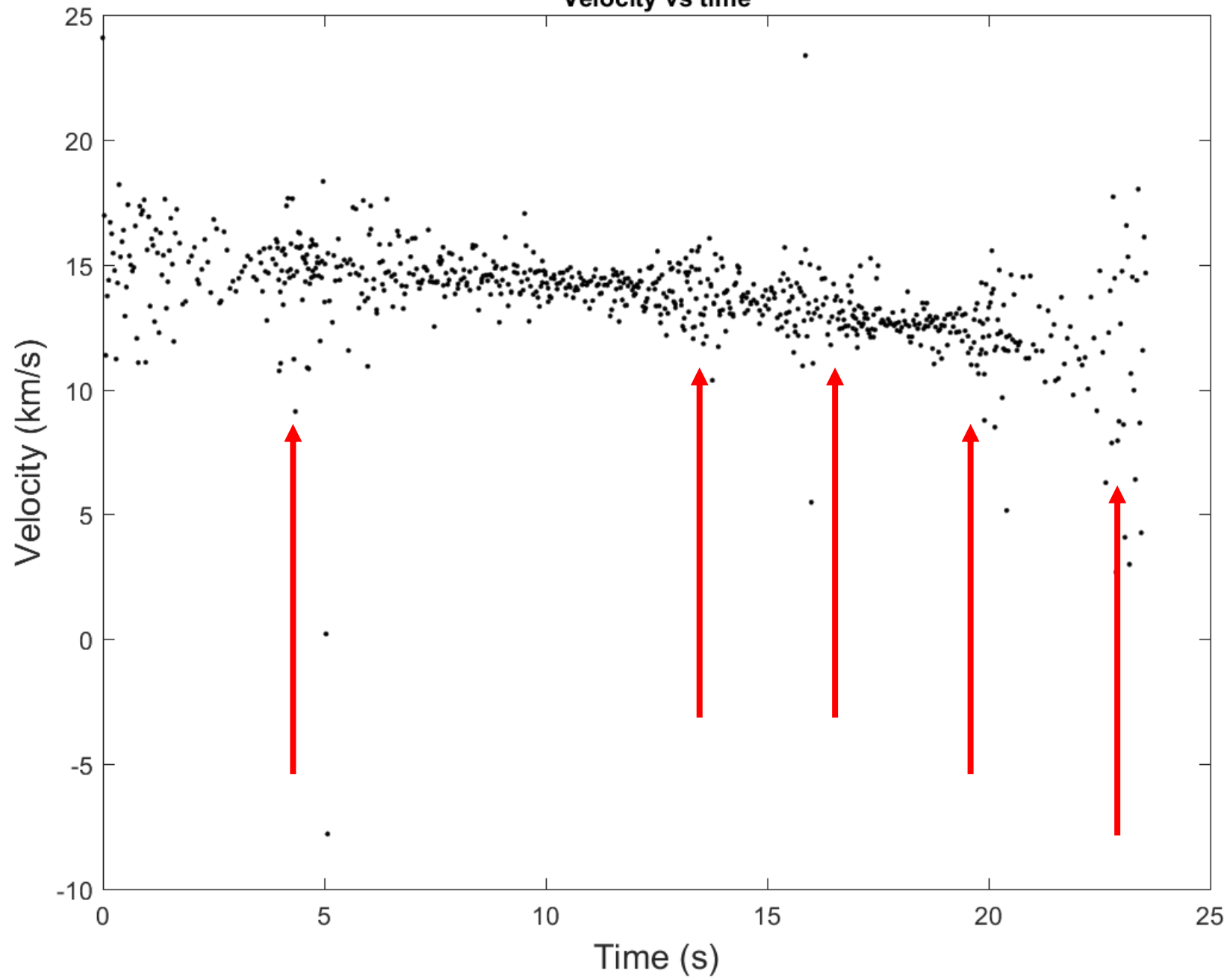
Triangolazione di IT20180908



Height vs time



Velocity vs time



Risultati su IT20180908

Il bolide è caduto a bassissima inclinazione rispetto al suolo, solo 7° , per questo è durato ben 23,5 s! Si è reso visibile a 80 km di quota (sopra l'Austria occidentale) e ha terminato la corsa sull'Adriatico a 43 km di quota. In totale ha percorso 425 km in atmosfera.

Durante il tragitto ha subito delle frammentazioni, ci sono oscillazioni della velocità a 4,5, 13, 16,5, 20 e 23 s quindi il modello dinamico non è adeguato perché ipotizza che l'ablazione sia uniforme e senza frammentazione.

La velocità all'infinito era di 16 ± 1 km/s, con una velocità geocentrica di circa 12 km/s, quindi era un meteoroido e non un detrito spaziale.



Thank you!

Per segnalazioni visuali di bolidi:
<http://prisma.imo.net/>