



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

International-Cosmic-Day (ICD) 2023

20-21/11/2023



Applicazione della fisica dei raggi cosmici

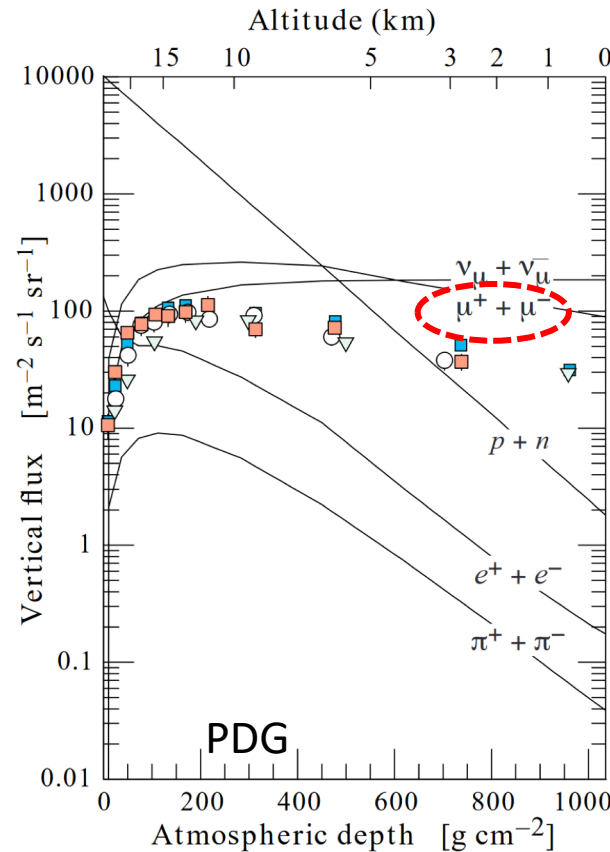
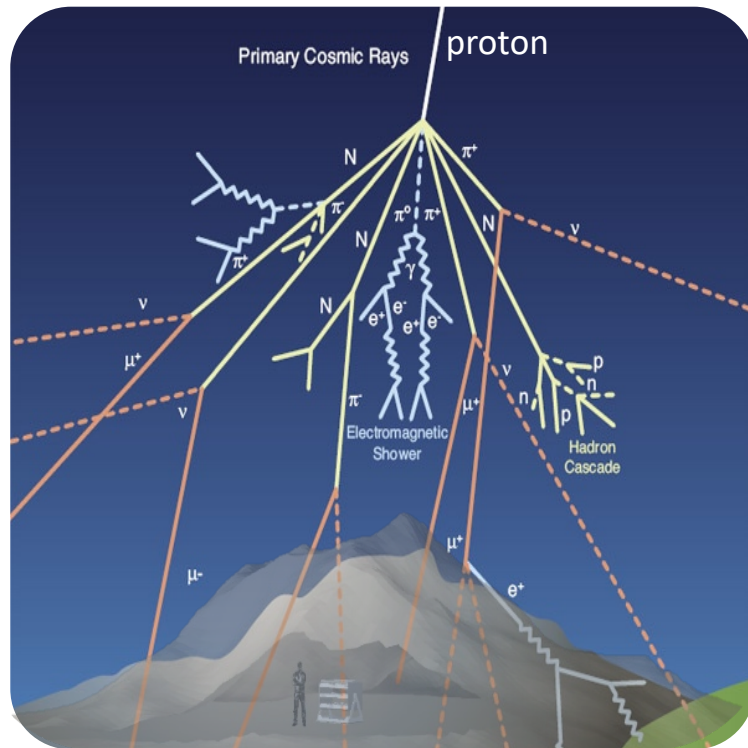
La Radiografia Muonica come
strumento di *Imaging*

Discover Cosmic Rays

**INTERNATIONAL
COSMIC DAY**

I raggi cosmici primari provenienti dall'universo incidono sulla nostra atmosfera producendo uno «sciame» di particelle

I muoni μ sono i raggi cosmici secondari carichi più abbondanti al livello del suolo.



I muoni hanno una vita media τ di $\sim 2.2\mu\text{s}$ (2 milionesimi di secondo) ed una massa $m_\mu \cong 200m_e$ e la loro volta decadono in elettroni e positroni.

La relativamente lunga vita media permette, ad una buona percentuale di μ , di raggiungere il suolo

Al suolo arrivano circa $100 \text{ muoni s}^{-1} \text{ m}^{-2}$

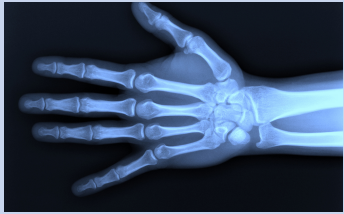
I muoni sono le particelle cariche più penetranti in materia, possono attraversare km di roccia → Usati per fare le «muografie»

Introduzione:

La tecnica della radiografia muonica

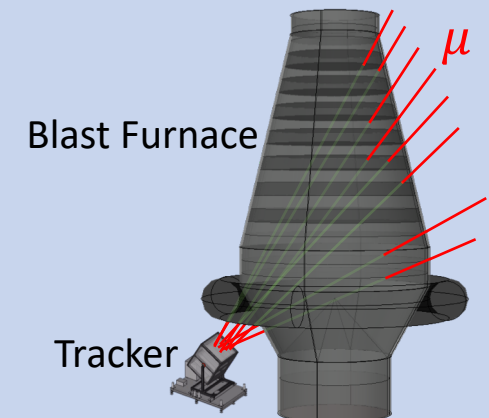
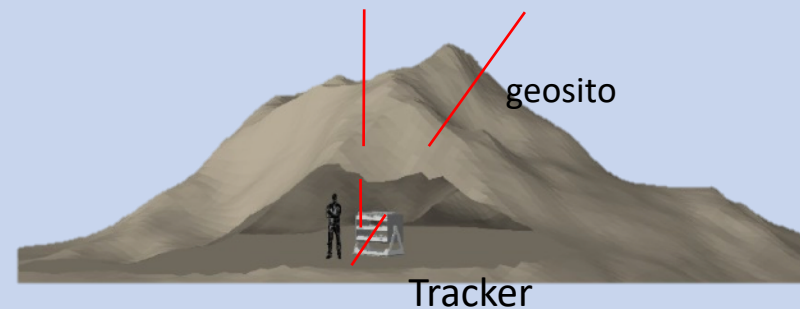
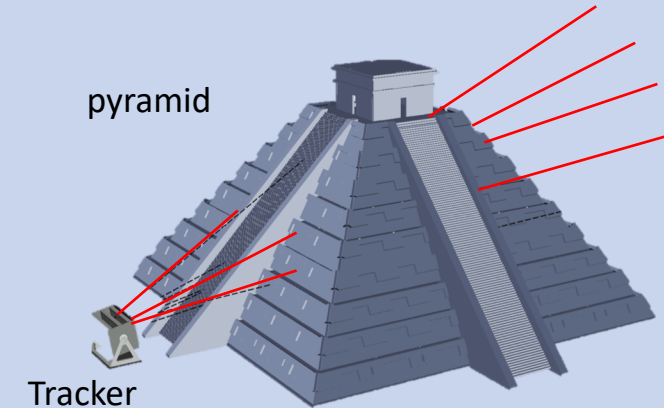
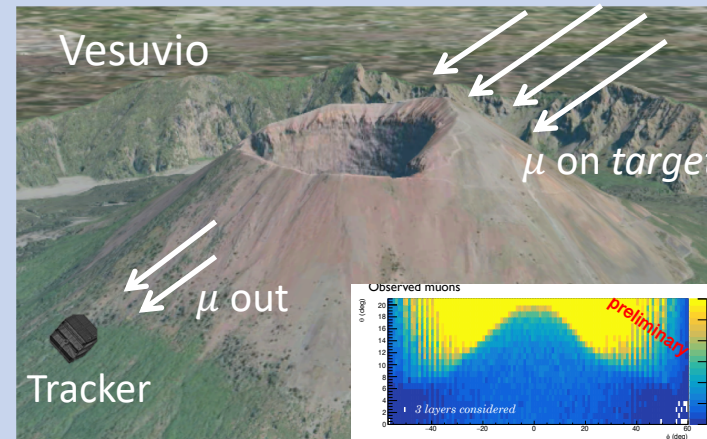
La **radiografia muonica (o muografia)** è una **tecnica di *imaging*** che permette di creare immagini bidimensionali o tridimensionali della densità interna dell'oggetto in esame (detto **target**) attraverso **misure di assorbimento di muoni cosmici**. I rivelatori utilizzati sono **tracciatori** (tracker) di particelle cariche.

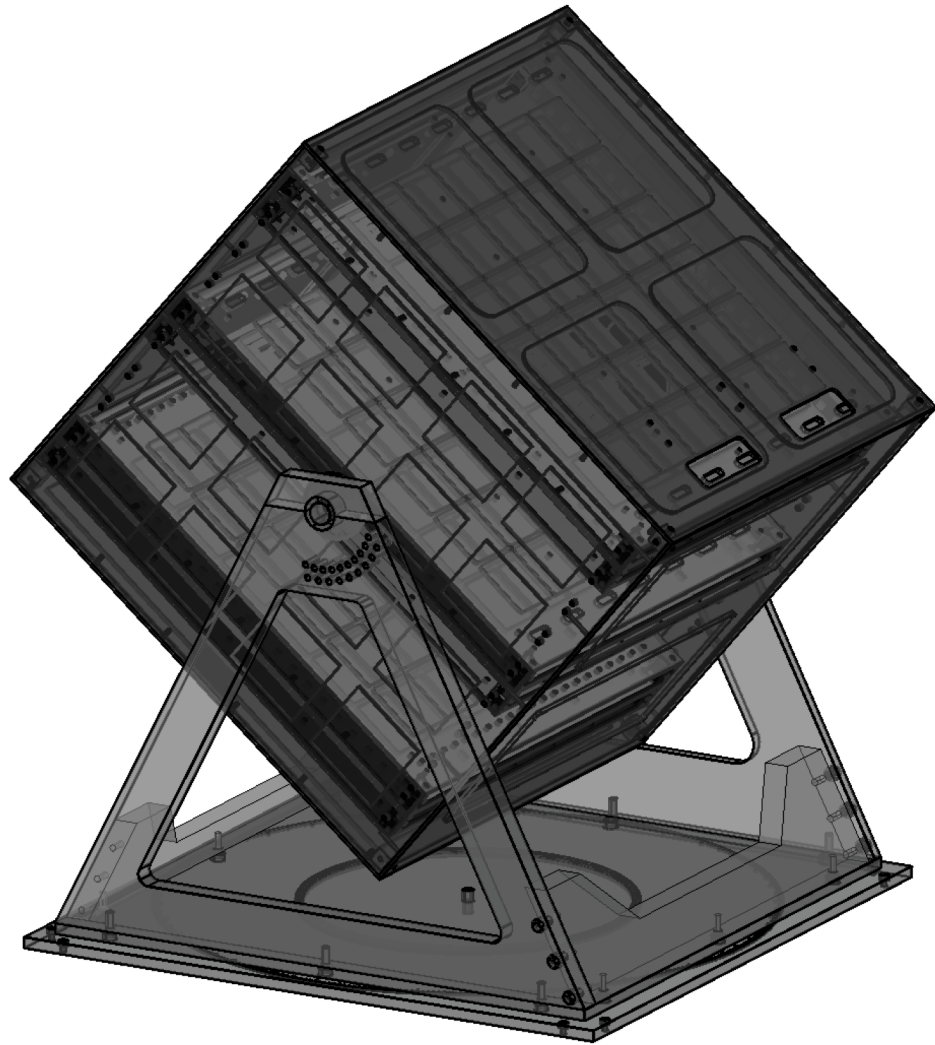
- ✓ Il principio di funzionamento è lo stesso della radiografia a raggi X, studia l'assorbimento delle particelle all'interno del target



- ✓ Prima applicazione nel 1969 alla piramide di Chepren a Giza per la ricerca di camere nascoste
- ✓ È una tecnica non invasiva
- ✓ Molti ambiti di applicazione: geologico, minerario, archeologico, sicurezza civile
- ✓ Tempi di acquisizione: qualche mese

- ✓ Applicazione a grandi strutture





Rivelatori per misure di radiografia muonica

La tecnica della radiografia muonica:

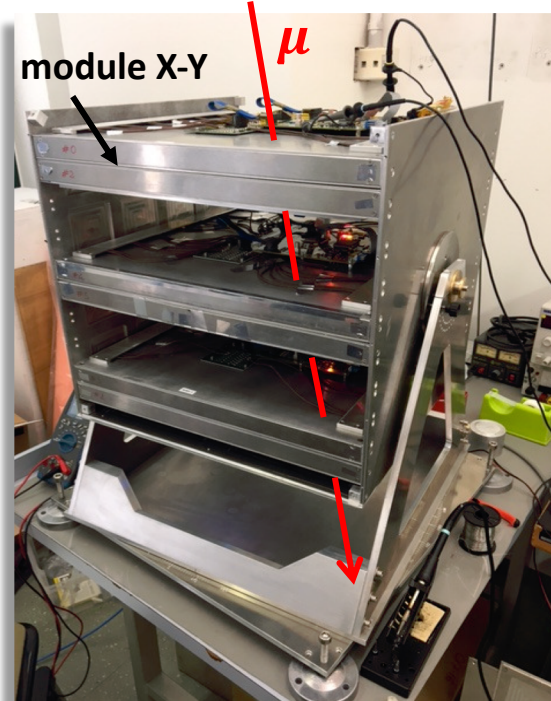
Rivelatori: tracciatori di particelle

I rivelatori utilizzati per le applicazioni di radiografia muonica sono dei tracciatori (tracker).

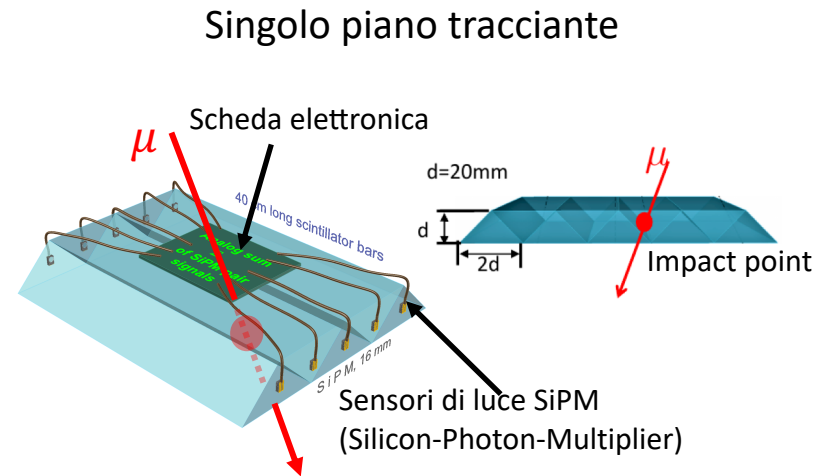
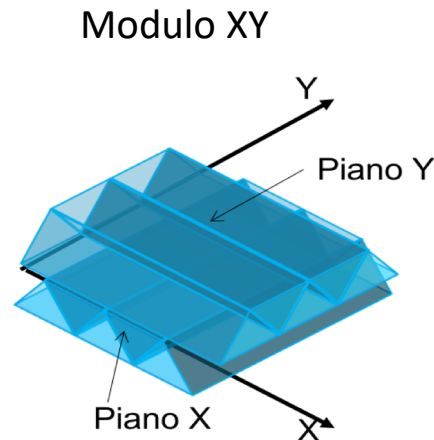
I tracciatori sono dei rivelatori costituiti da materiali sensibili al passaggio di particelle cariche e permettono di ricostruire la traiettoria della particella che ha attraversato il rivelatore e ottenere così la direzione di provenienza.

Esempio di tracciatore:

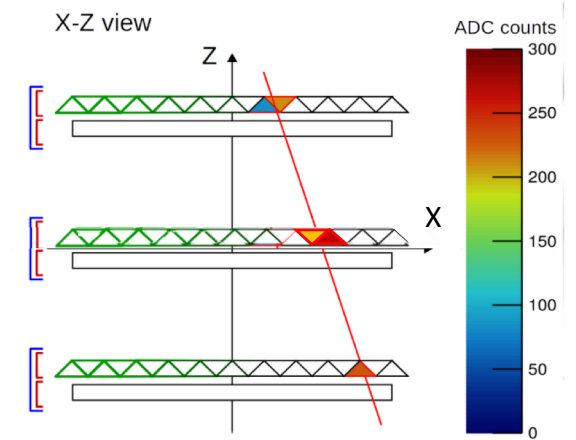
MIMA (Muon Imaging for Mining and Archaeology)



Ogni modulo tracciante XY è costituito da un piano X e un piano Y e permette di ottenere il punto XY d'impatto della particella.



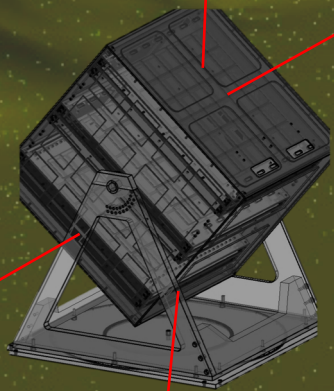
Esempio di ricostruzione della traccia di una particella



Cubo di dimensioni (50x50x50) cm³ che poggia su una piattaforma orientabile

Materiale: Scintillatore plastico a sezione triangolare, dimensione singola barra (4x2x40) cm. Numero barre per piano: 21.

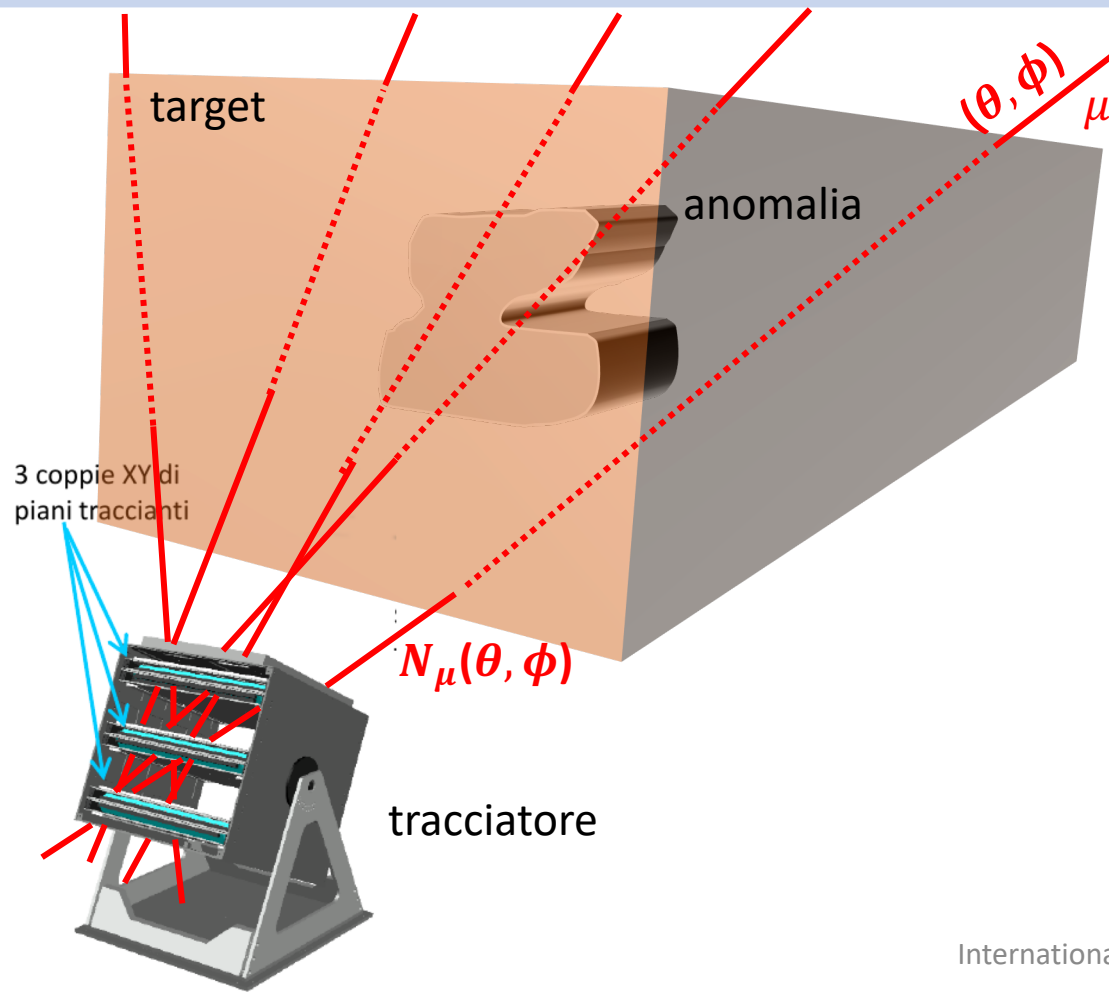
Metodologia della tecnica della radiografia muonica



La tecnica della radiografia muonica:

Cosa si misura

Da una misura di radiografia muonica si ottiene il numero di muoni che arriva da ogni direzione osservabile dal rivelatore $N_\mu(\theta, \phi)$ con θ angolo di zenit e ϕ angolo di azimut. Dall'attenuazione del flusso di muoni dovuto al target si possono individuare delle anomalie interne.



- ✓ Il rivelatore va puntato verso il target e deve trovarsi il più possibile sotto di esso per avere un flusso di muoni il più possibile verticale (angolo per il quale il flusso è massimo)
- ✓ $N_\mu(\theta, \phi)$ dipende dal target (forma e densità) ma anche dal flusso di raggi cosmici a terra e dal rivelatore attraverso la sua efficienza e accettazione.

Per avere $N_\mu(\theta, \phi)$ dipendente solo dal target e poter così ben individuare e localizzare le possibili anomalie interne sono necessarie misure e simulazioni.



Imaging Metodologia → Mappe di densità del target

Mappe 2D di densità interna del target

1. Misura Target

$$N_{\mu_{target}}(\theta, \phi)$$



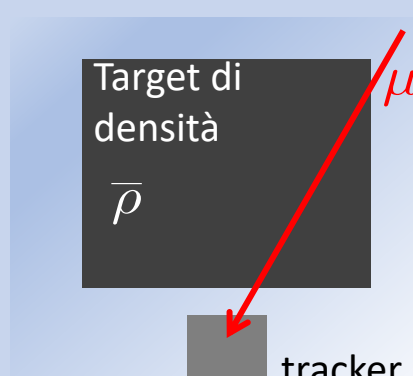
2. Misura Freesky

$$N_{\mu_{freesky}}(\theta, \phi)$$



3. Simulazione nel caso di assenza di anomalie

Target di densità $\bar{\rho}$



Trasmissione di μ misurata

$$T_{misu}(\theta, \phi) = \frac{N_{\mu_{target}}}{N_{\mu_{freesky}}} \cdot \frac{t_{freesky}}{t_{target}}$$

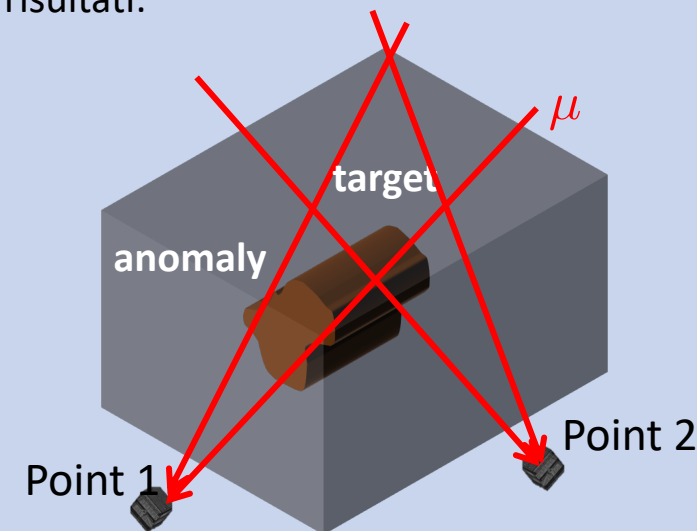
Trasmissione di μ simulata

$$T_{simu}(\theta, \phi, \bar{\rho})$$

Variando $\bar{\rho}(\theta, \phi) : T_{misu}(\theta, \phi) = T_{simu}(\theta, \phi, \bar{\rho}) \rightarrow$ **Mappa 2D di densità $\rho_{target}(\theta, \phi)$**

Mappe 3D di densità interna del target

- Tecnica della triangolazione:
Per una visione **stereoscopica** è possibile installare i rilevatori in più punti e combinare i risultati:



- Tecnica delle retroproiezioni: stima la distanza dall'anomalia utilizzando i dati acquisiti da una singola misura (applicabile solo in alcune condizioni).

A wide river flows through a landscape under a clear blue sky. In the distance, a dam with several pillars is visible. The foreground shows a rocky or gravelly bank. The text is overlaid on the center of the image.

Applicazione in ambito idrogeologico e di sicurezza civile

La radiografia muonica di argini fluviali e dighe

La tecnica della radiografia muonica: Applicazione in ambito idrogeologico

Ricerca di cavità non mappate (danneggiamento causato dall'attività di fauna locale) finalizzata alla programmazione di interventi mirati di manutenzione

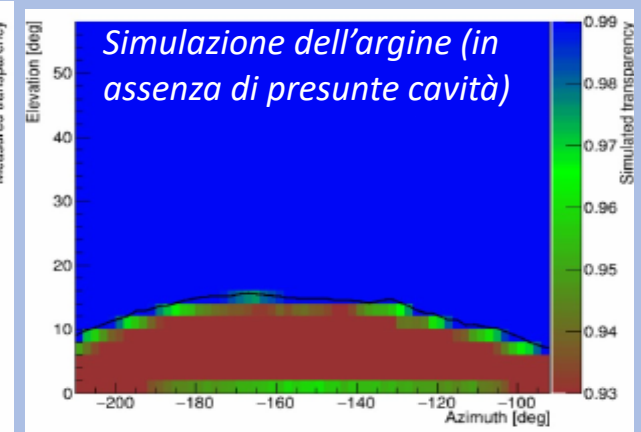
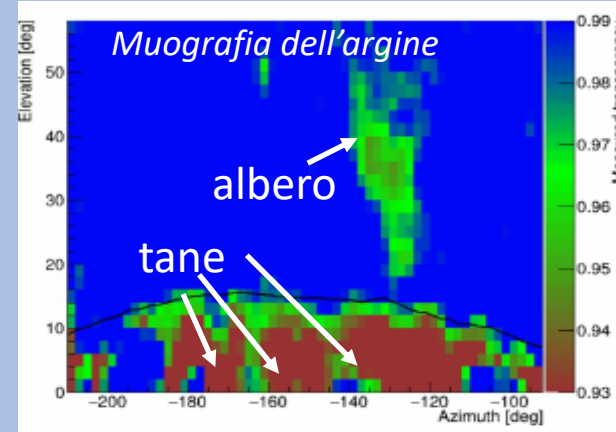


MIMA

Argine: tana scavata dalla fauna locale



Argine: misura



Il puntamento dello strumento è quasi orizzontale (tecnica al limite).

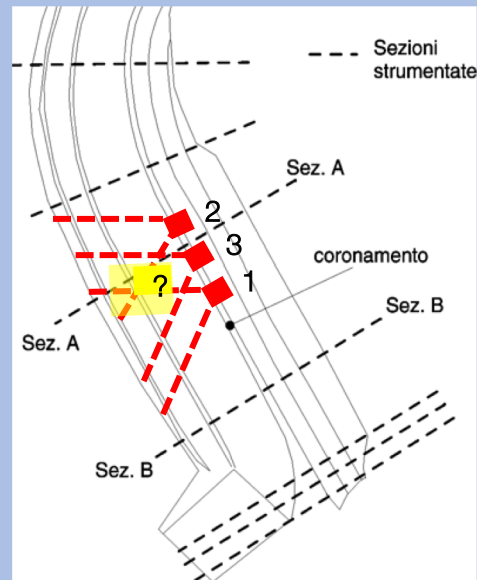
I risultati sono in accordo con quelli di una *indagine geoelettrica* eseguita nello stesso periodo.

La tecnica della radiografia muonica: Applicazione in ambito idrogeologico

Ricerca di anomalie interne al corpo diga relativamente alla Diga di Bilancino. Dati in fase di studio.



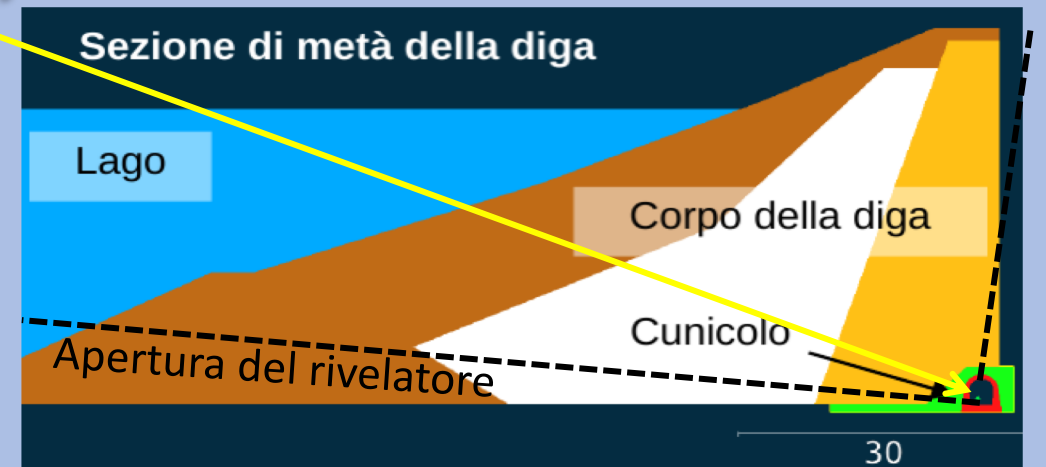
Diga di Bilancino (FI)




Disposizione di tre misure di radiografia muonica con il rivelatore MIMA



MIMA



A photograph of a cave interior. The walls are made of rough, textured rock. In the foreground, there is a bright, circular opening, possibly a tunnel entrance or a large hole, which is illuminated from within, creating a strong contrast with the darker surroundings. The lighting is warm and focused on the opening.

Applicazione in ambito archeologico
La radiografia muonica di siti archeologici

La tecnica della radiografia muonica: Applicazione in ambito archeologico

Ricerca e ricostruzione di cavità non mappate alla Galleria Borbonica a Napoli

Galleria Borbonica (NA)



Galleria Borbonica: ingresso

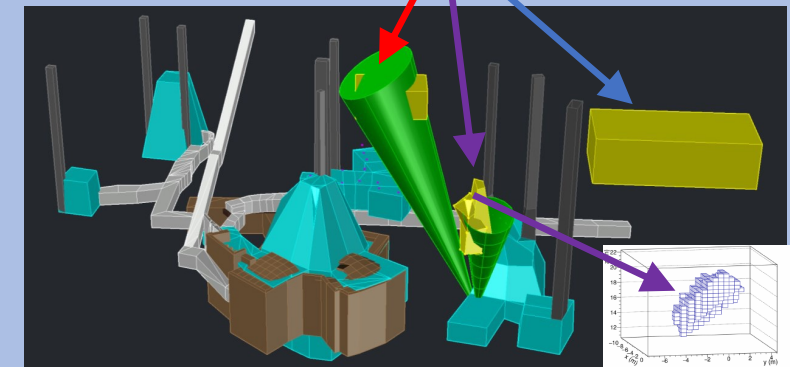
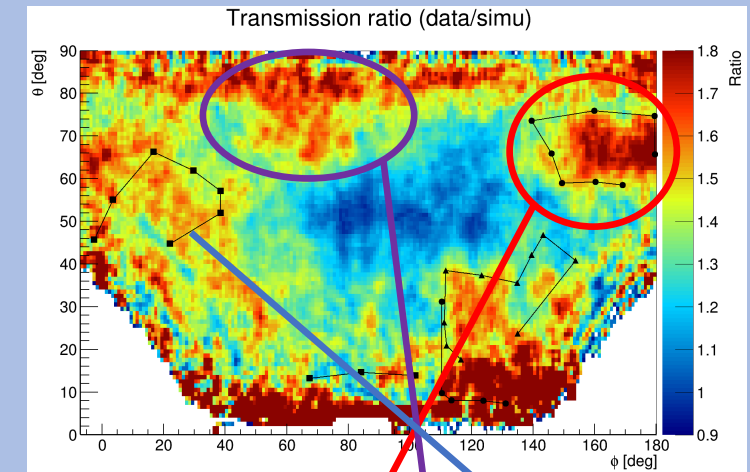


Galleria Borbonica:
esterno



Galleria Borbonica: misura

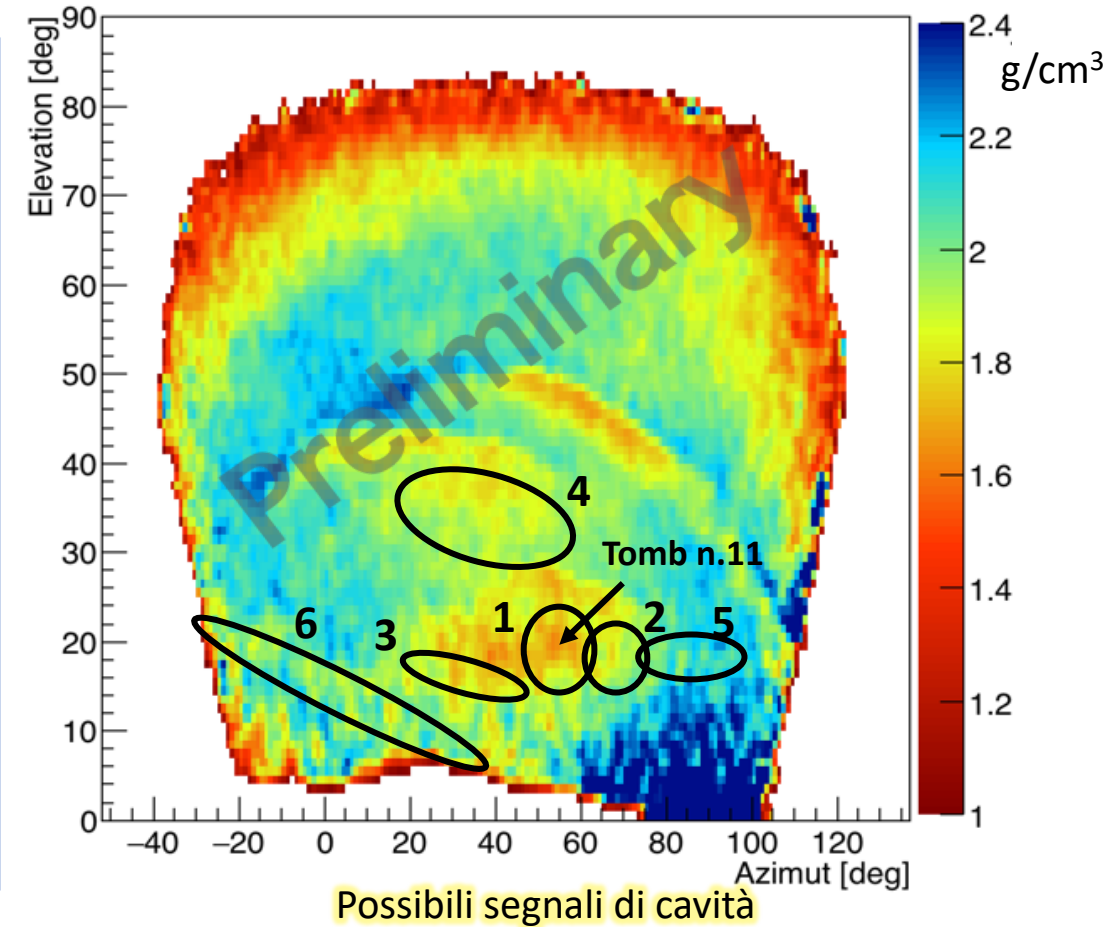
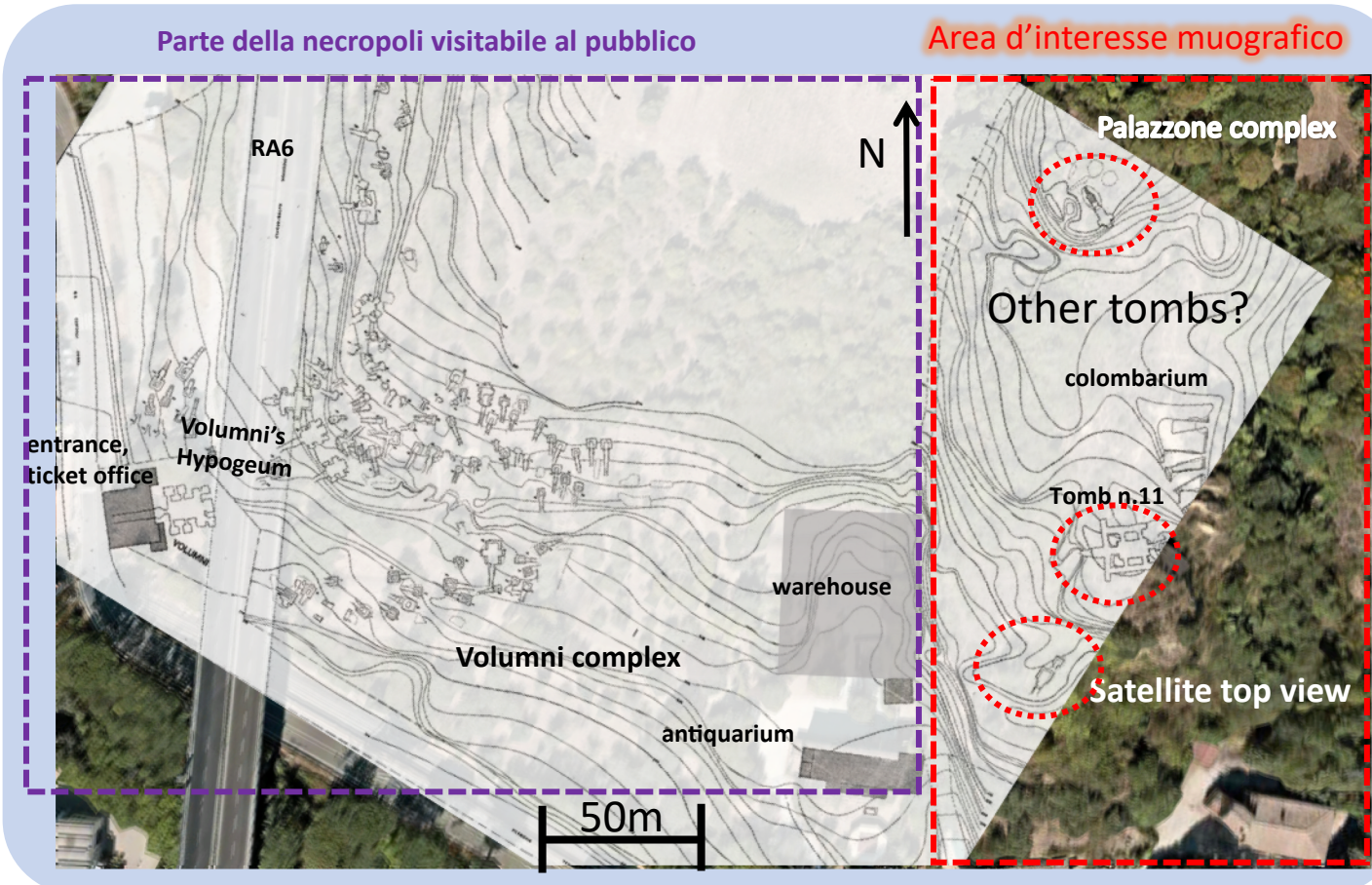
Muografia e profilo 3D di possibili cavità non mappate

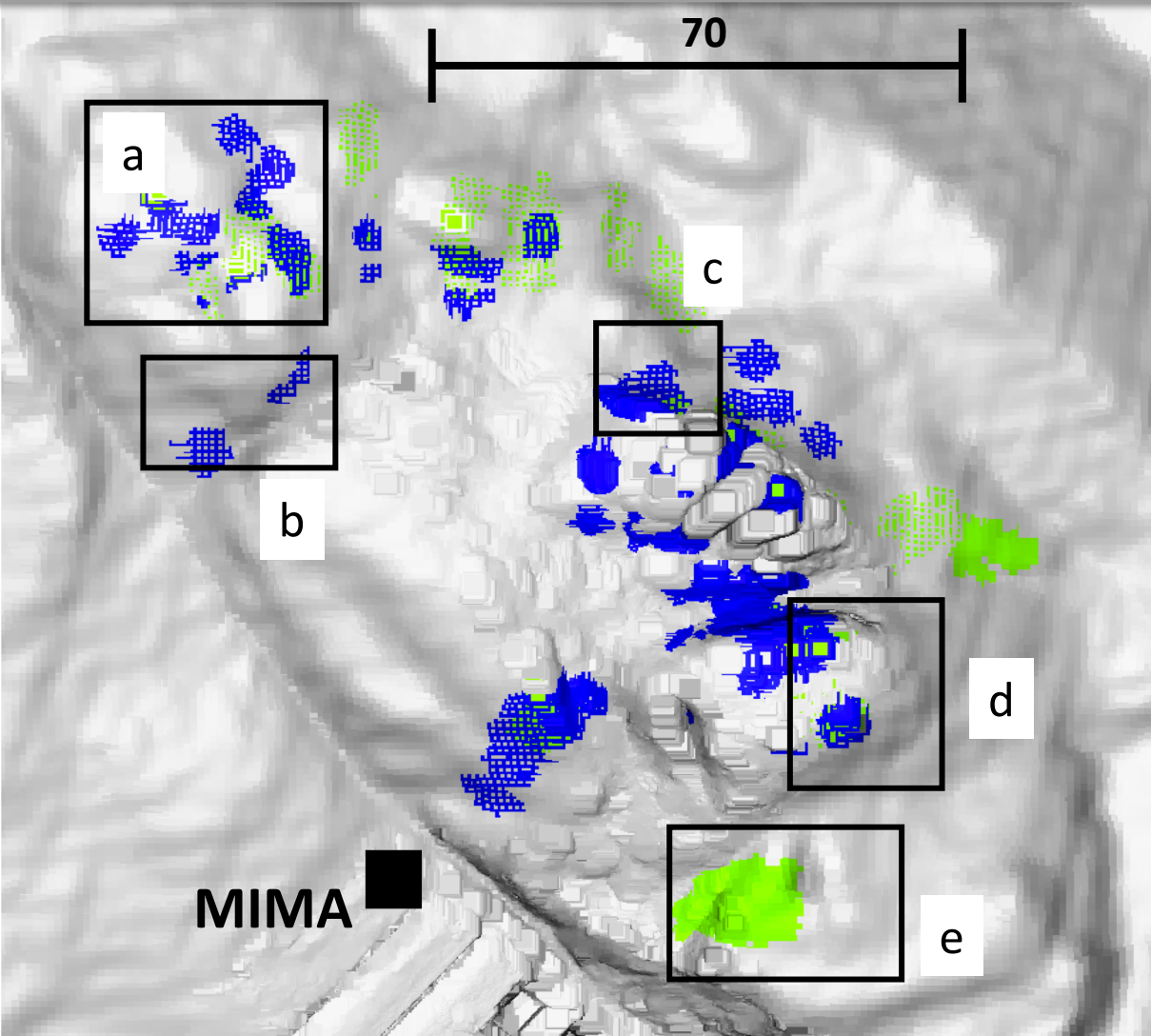


Sono state individuate due nuove regioni da esplorare!!

La tecnica della radiografia muonica: Applicazione in ambito archeologico

Necropoli del Palazzone Perugia





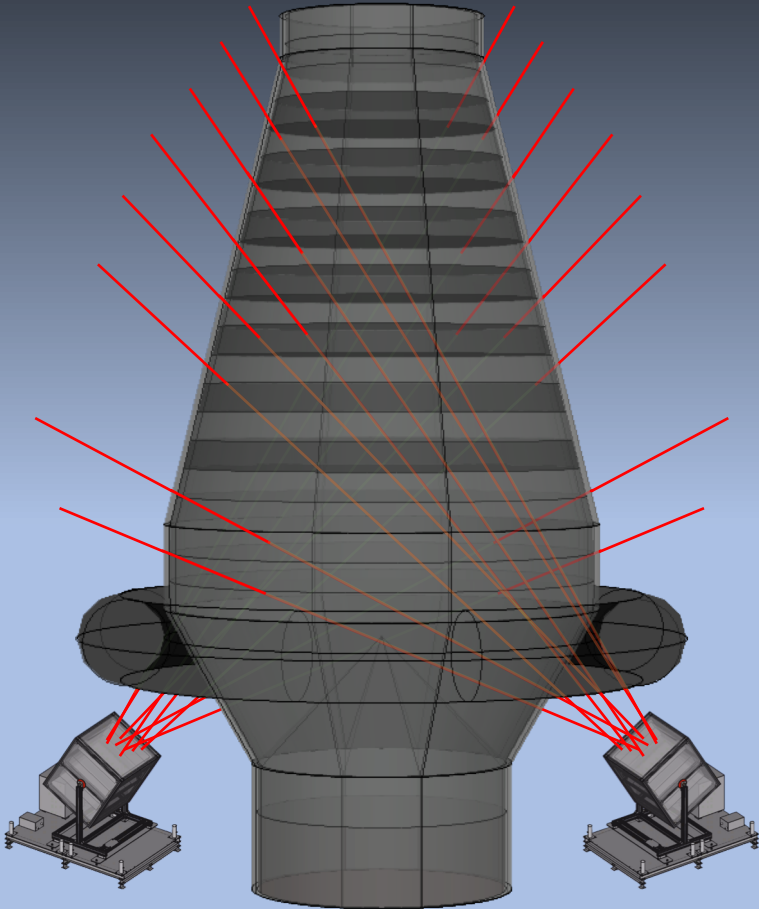
● areas identified with back-projections
● areas identified with 3D rays



Applicazione in ambito industriale

Misura in corso!

Sito di Misura: Altoforno situato nell'acciaiera dell'Arcelormittal a Brema (Germania)



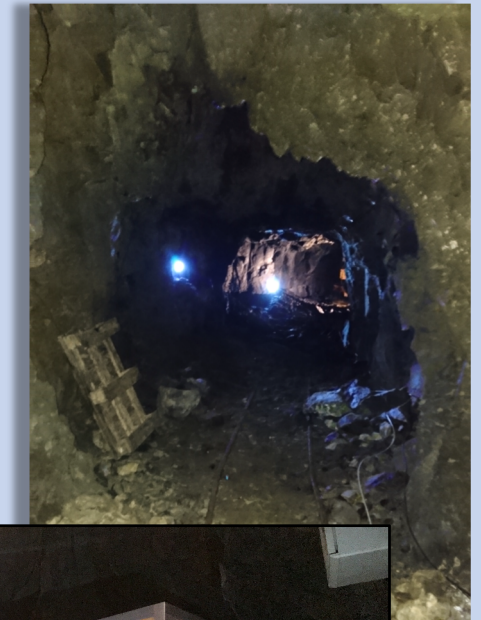
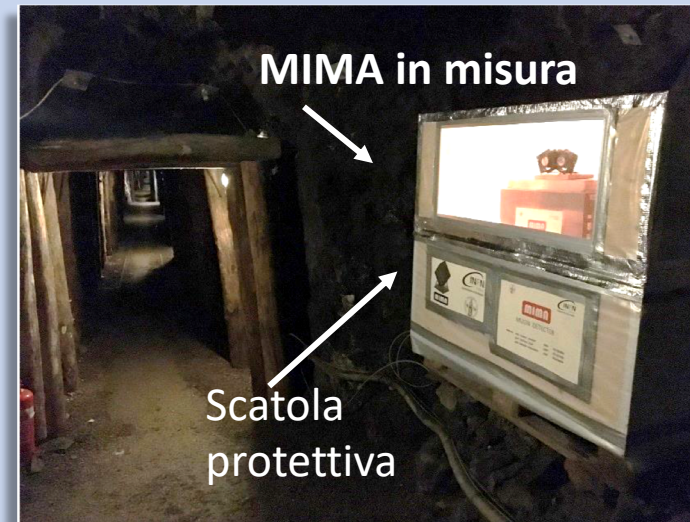
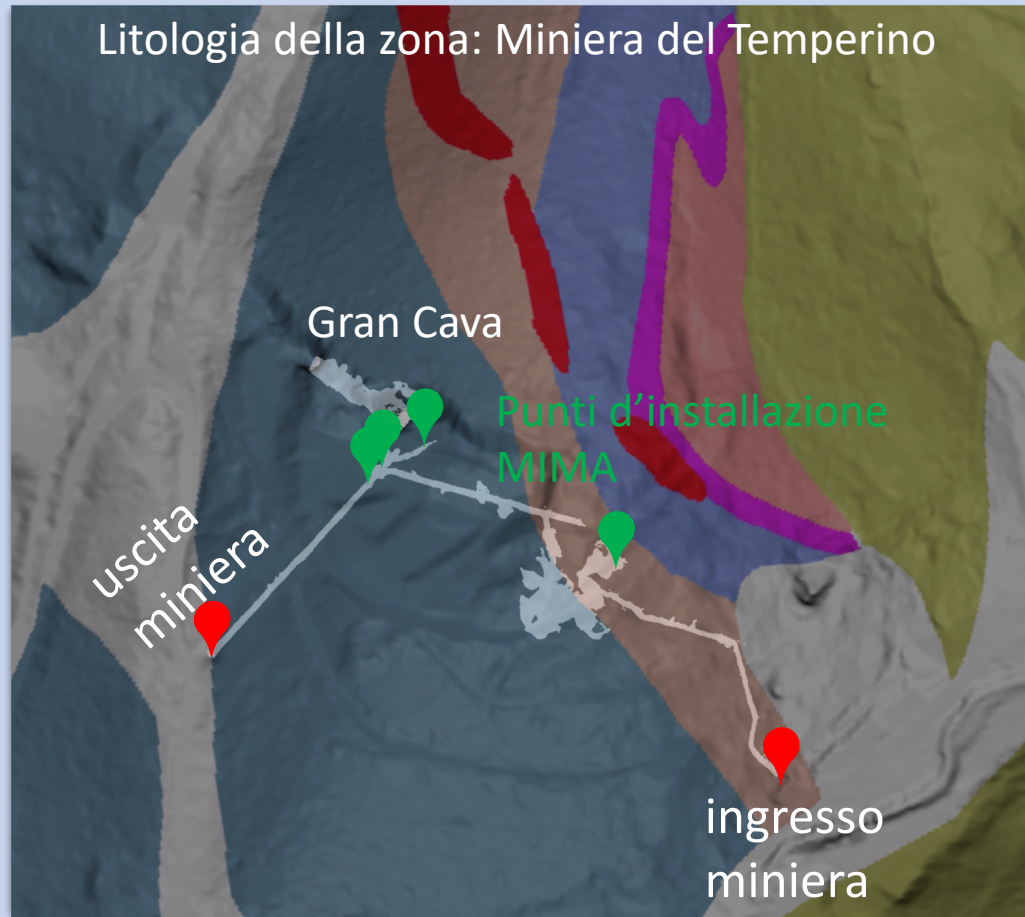


Applicazione in ambito geologico
La radiografia muonica di miniere

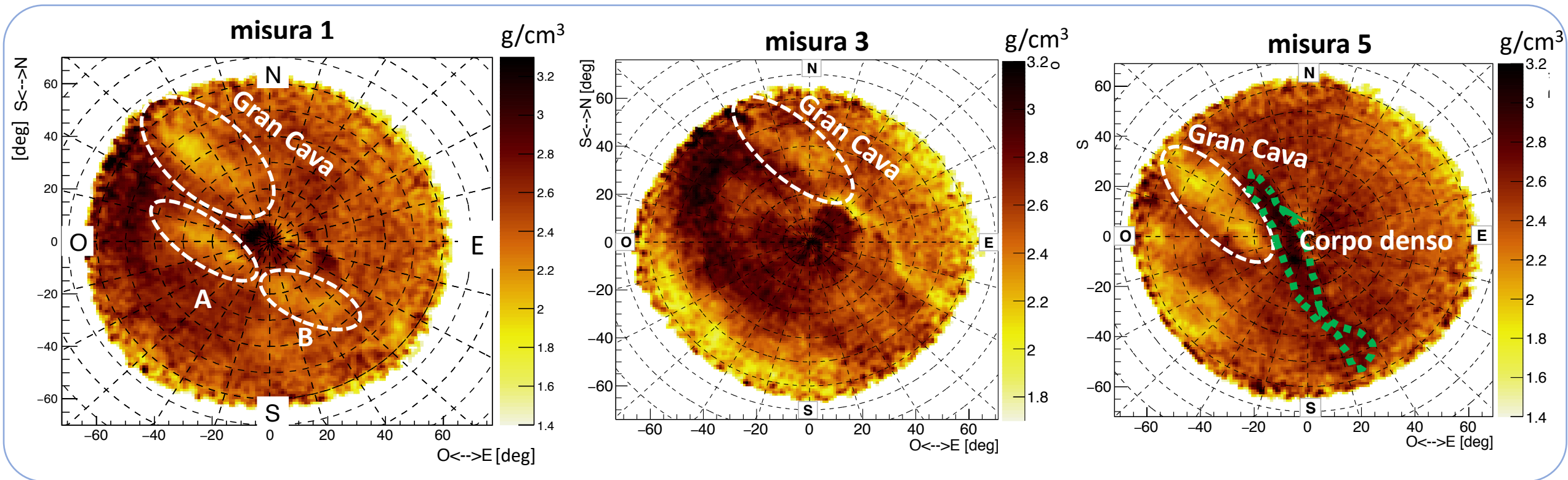
La tecnica della radiografia muonica: Applicazione in ambito geologico minerario



Ricerca di cavità alla miniera del Temperino a Campiglia Marittima (Toscana) d'interesse archeologico e geologico e finalizzate alla messa in sicurezza della miniera



Mappe angolari 2D di densità:



Oltre alla Gran Cava sono visibili altri segnali a bassa densità

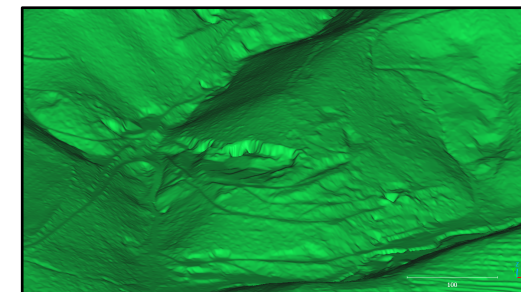
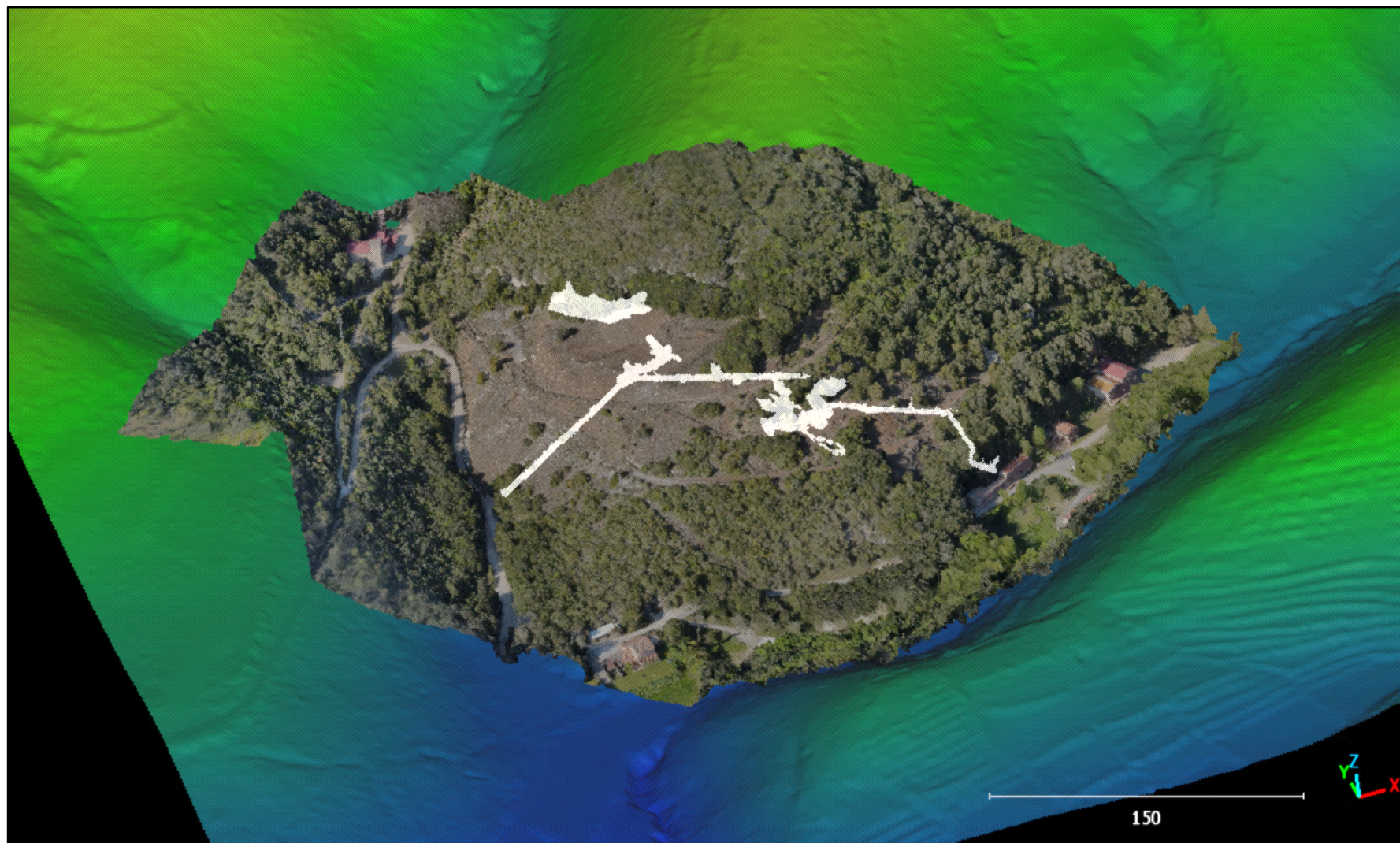
Ricostruzione 3D delle cavità osservate con la radiografia muonica

Sono in atto ricerche
per l'ispezione delle
nuove cavità



Ref: Borselli, D., Beni, T., Bonechi, L. *et al.* Three-dimensional muon imaging of cavities inside the Temperino mine (Italy). *Sci Rep* **12**, 22329 (2022).
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-26393-7>

La tecnica della radiografia muonica: Applicazione in ambito geologico minerario



DEM

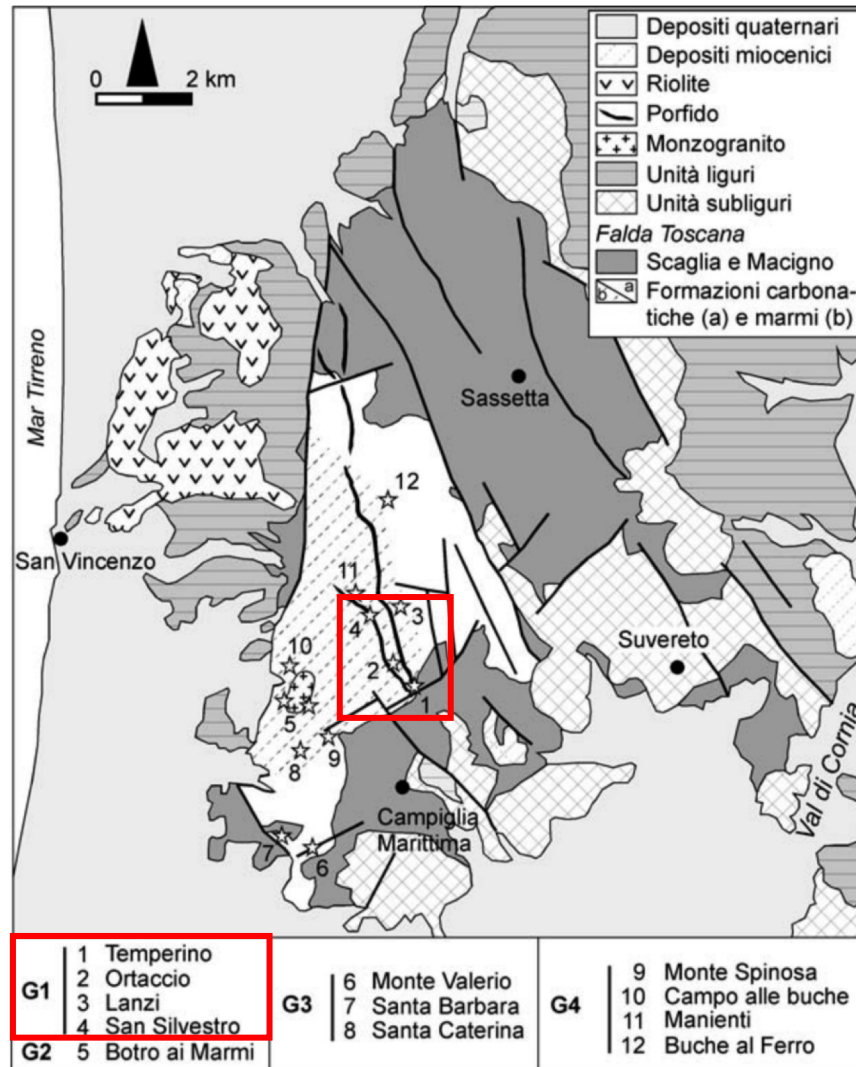


UAV

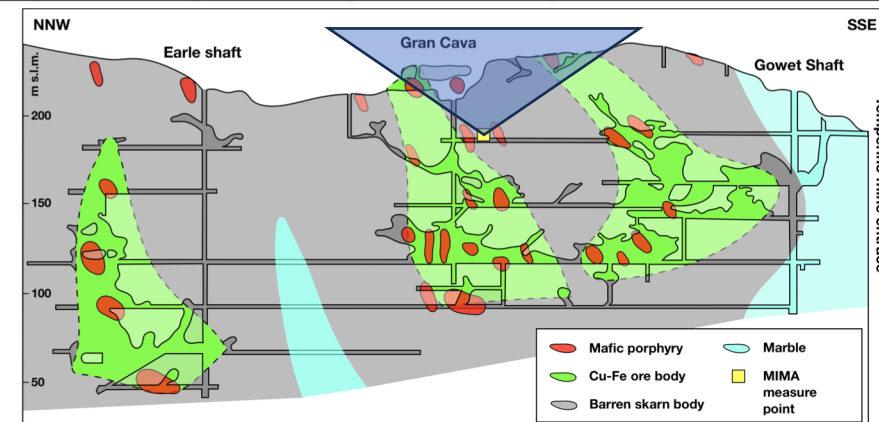


TLS

La tecnica della radiografia muonica: Applicazione in ambito geologico minerario

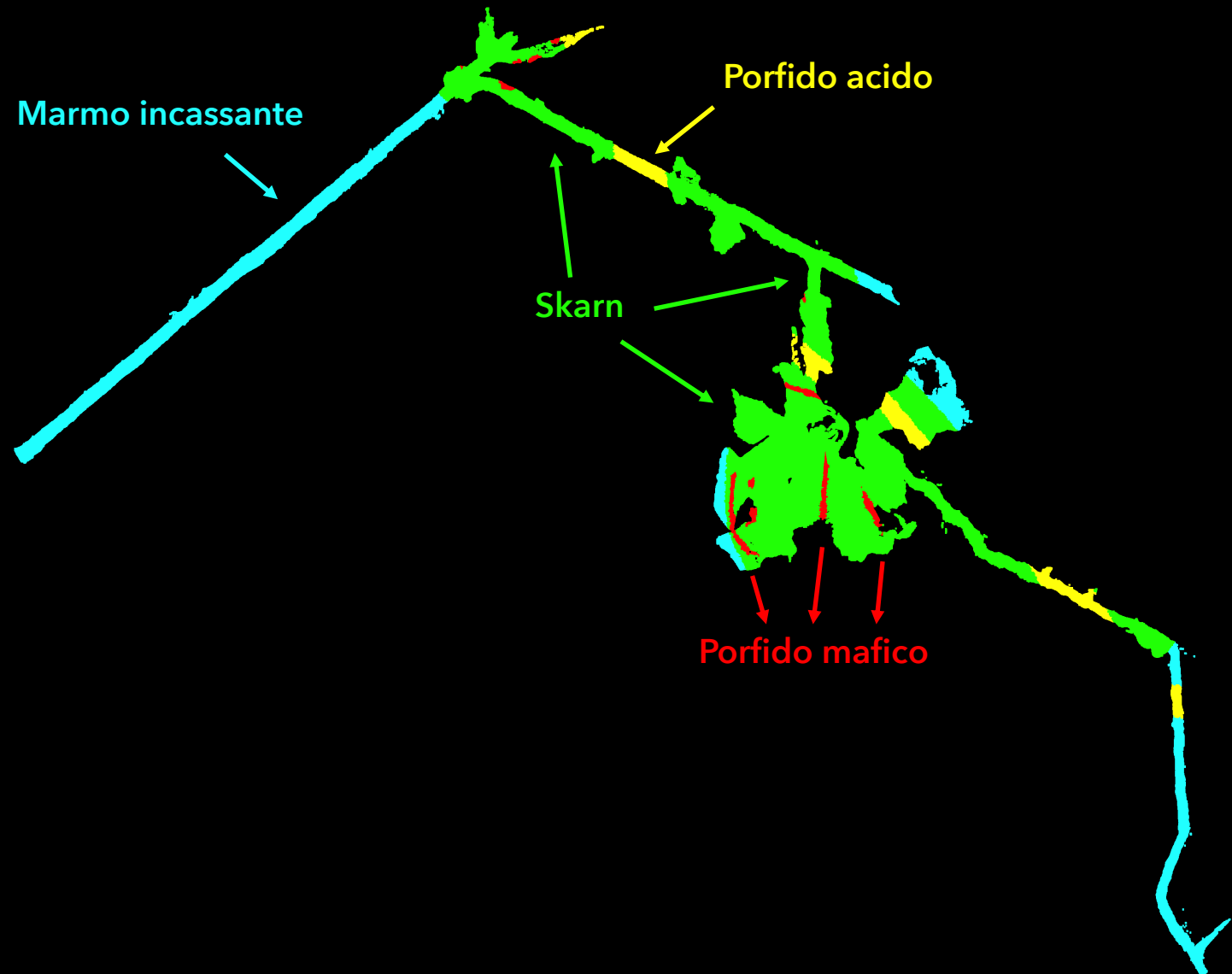


Sigla	Tipo di giacimento	Caratteri geochimici	Località	Processo genetico	Rocce incassanti
G1	Skarn a hedenbergite, ilvaite ± johannsenite	Cu, Pb, Zn, Fe,	Min. del Temperino Min. dei Lanzi Valle dei Manienti	Idrotermali magmatici di sostituzione	Marmi bianchi, (Giura)
G2	Aureola di contatto e skarn ± vene di quarzo e clorite	Cu, Zn, Pb, As, Fe, Sn, W, Th	Botro ai Marmi Monte Spinosa	Idrotermali magmatici di sostituzione	Marmi grigi e bianchi (Trias-Giura), granito (Mio-Pliocene).
G3	Vene e masse di cassiterite, pirite e idrossidi di Fe ± scheelite e tormalina	Sn, W, Fe, As	Monte Valerio Cento Camerelle Valle Pozzanello Monte Spinosa Campo alle Buche	Idrotermali magmatici in vene e disseminazioni	Marmi grigi e bianchi, diaspri, calcari e marne (Trias-Giura)
G4	Masse di idrossidi di Fe	Fe, As, Cu, Pb, Zn, Sn	Campo alle Buche Colle Sant'Antonio Cento Camerelle	alterazione supergenica alle spese di depositi a skarn e a solfuri	Marmi grigi e bianchi, diaspri, calcari e marne (Trias-Giura)

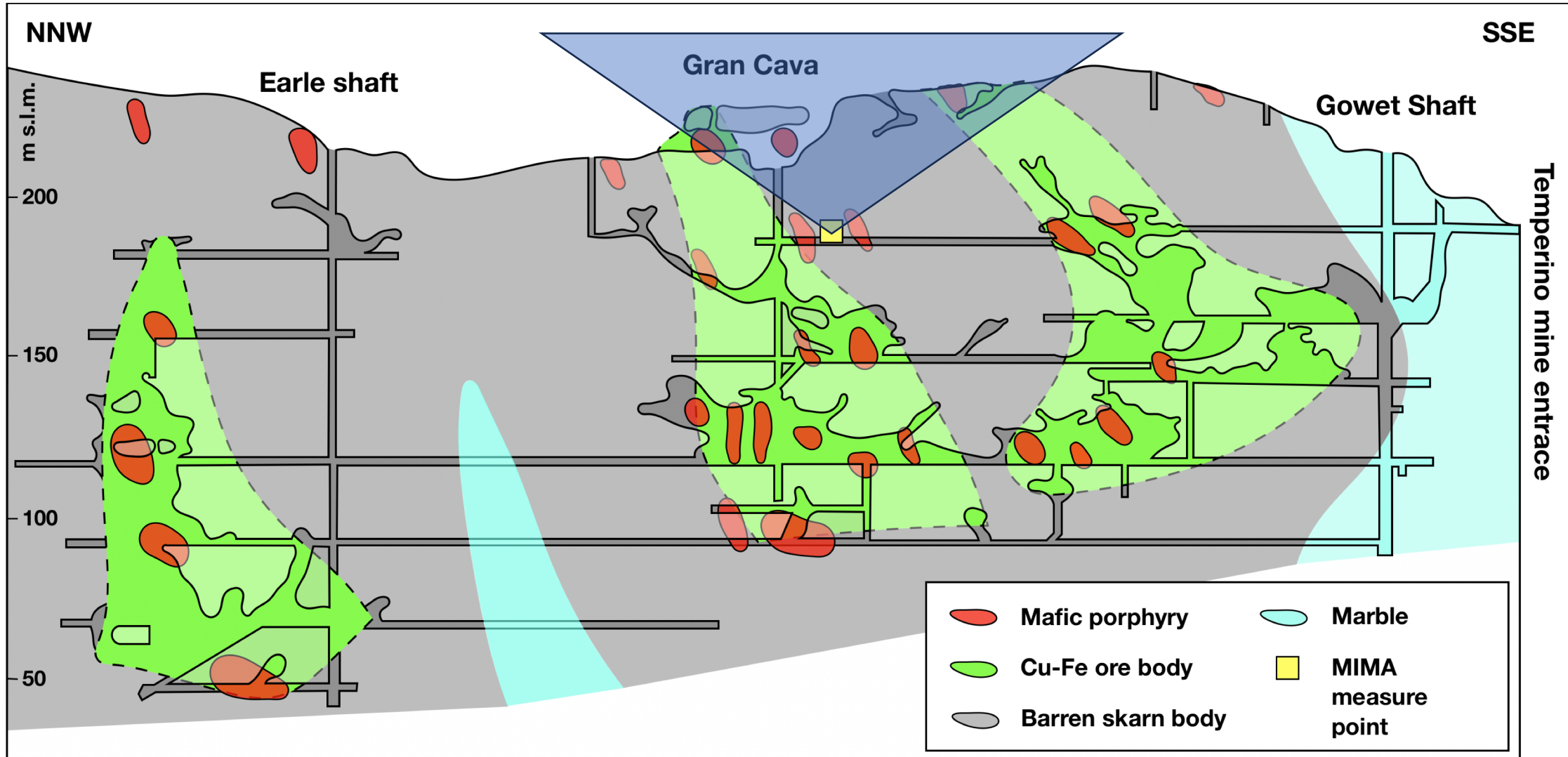


I livelli e le gallerie della miniera del

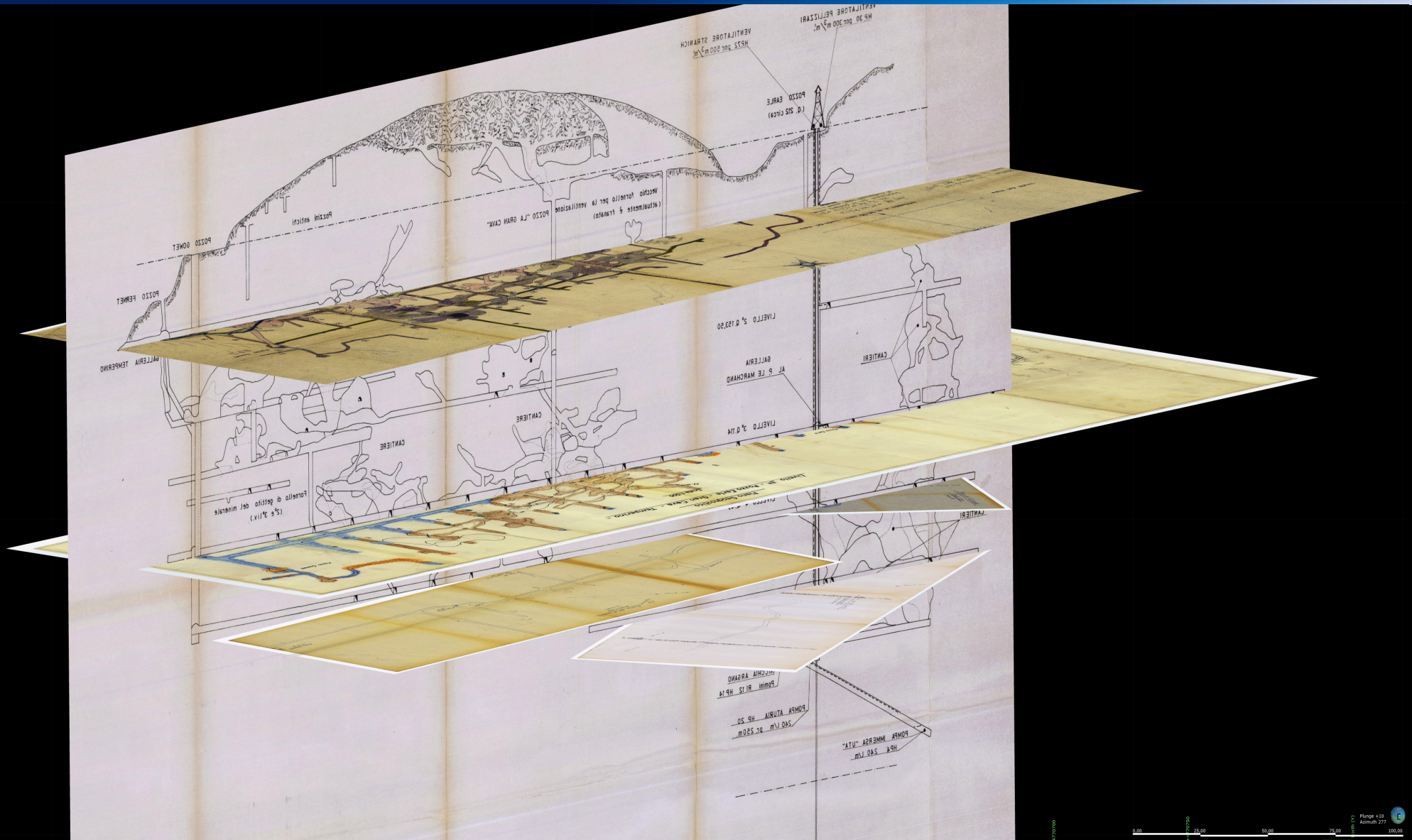
Temperino sono stati scavati verticalmente e orizzontalmente all'interno dello skarn per trovare i depositi minerali arricchiti in Cu-Fe. Tra questi, i principali depositi si trovano all'interno del corpo di skarn e raramente le superfici di contatto tra marmo e skarn sono mineralizzate.



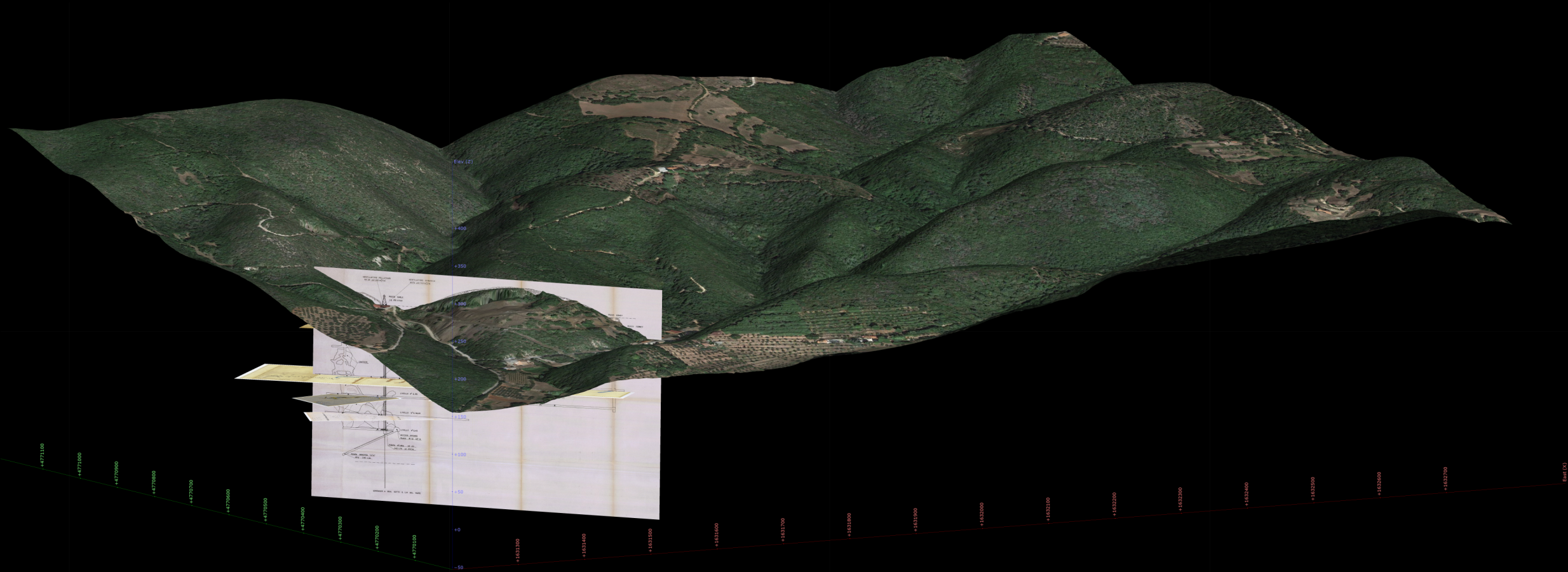
La tecnica della radiografia muonica: Applicazione in ambito geologico minerario



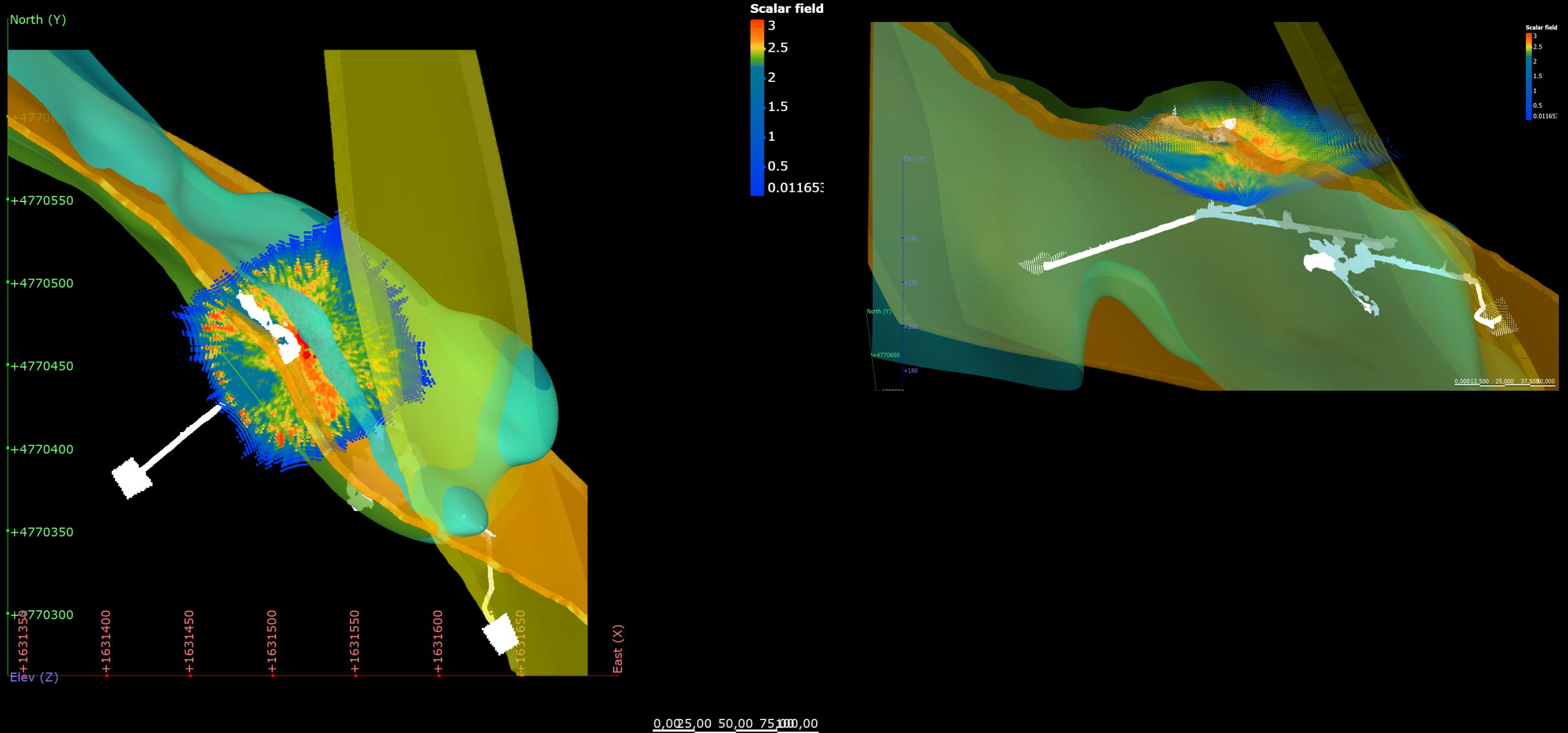
La tecnica della radiografia muonica: Applicazione in ambito geologico minerario



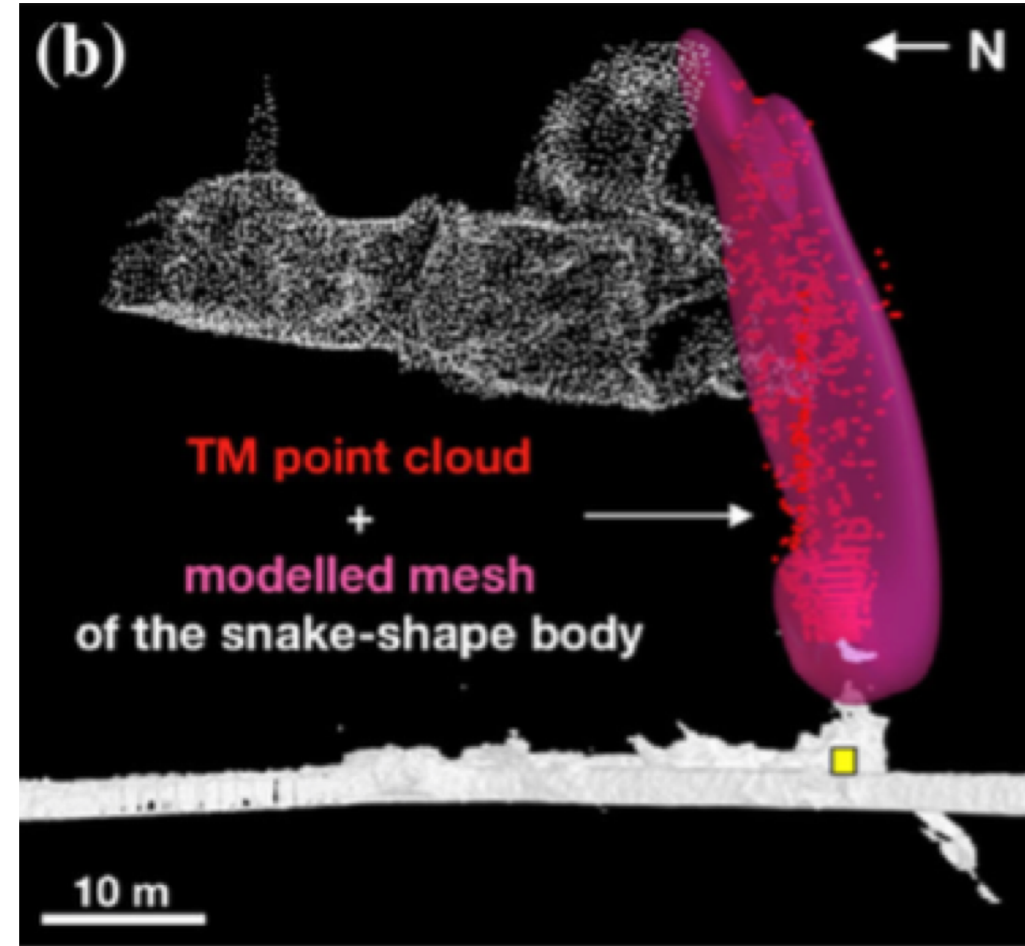
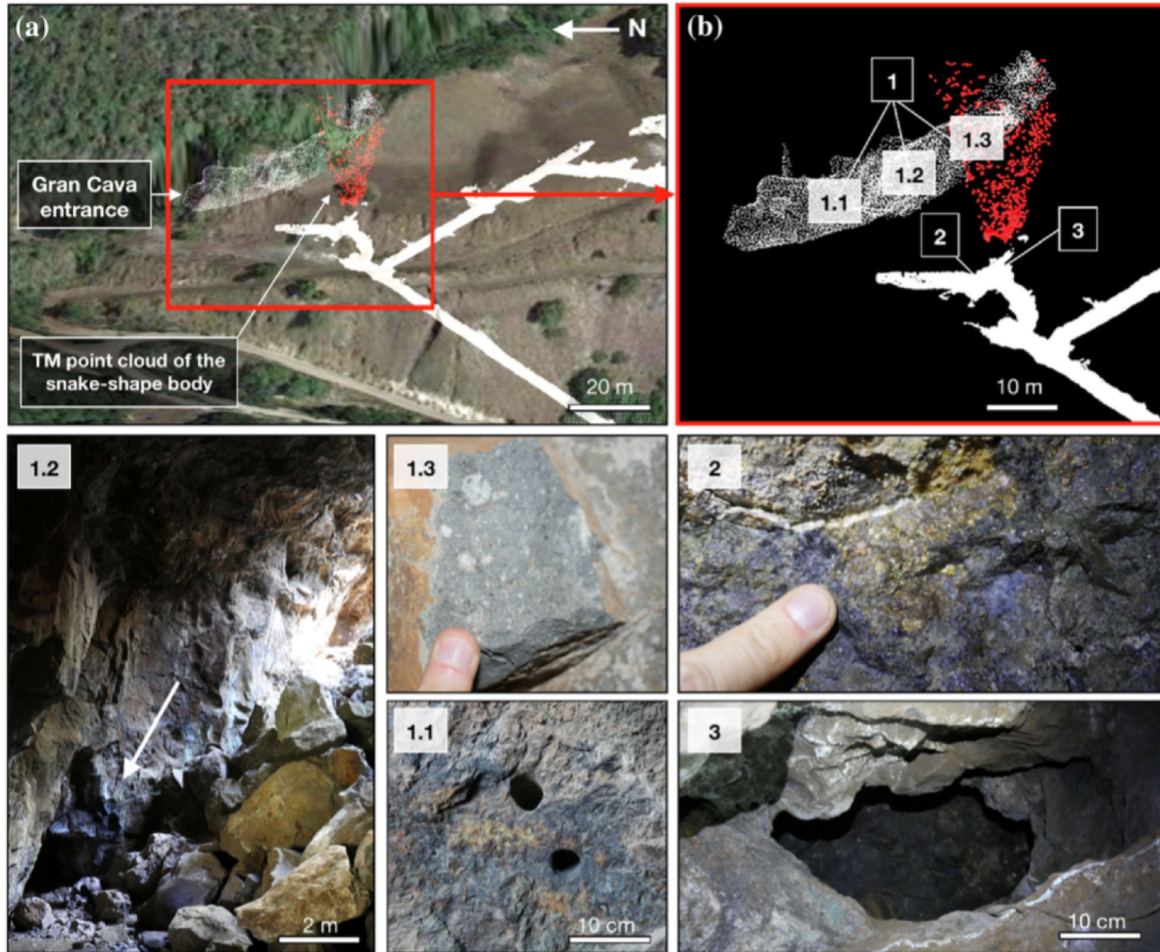
La tecnica della radiografia muonica: Applicazione in ambito geologico minerario



La tecnica della radiografia muonica: Applicazione in ambito geologico minerario



La tecnica della radiografia muonica: Applicazione in ambito geologico minerario: corpi densi



T. Beni, D. Borselli, L. Bonechi et al., *Transmission-Based Muography for Ore Bodies Prospecting: A Case Study from a Skarn Complex in Italy*, Nat. Resour. Res. **32** (2023) 1529. DOI: 10.1007/s11053-023-10201-8

Discover Cosmic Rays

INTERNATIONAL COSMIC DAY