

Propagazione radio, acustica e
trasporto aerosol
nella Grotta di Frasassi

Quaderni di Geofisica

141



Quaderni di Geofisica

Direttore Responsabile

Silvia MATTONI

Editorial Board

Luigi CUCCI - Editor in Chief (INGV-RM1)

Raffaele AZZARO (INGV-CT)

Mario CASTELLANO (INGV-NA)

Viviana CASTELLI (INGV-BO)

Rosa Anna CORSARO (INGV-CT)

Mauro DI VITO (INGV-NA)

Marcello LIOTTA (INGV-PA)

Mario MATTIA (INGV-CT)

Milena MORETTI (INGV-CNT)

Nicola PAGLIUCA (INGV-RM1)

Umberto SCIACCA (INGV-RM2)

Alessandro SETTIMI (INGV-RM2)

Salvatore STRAMONDO (INGV-CNT)

Andrea TERTULLIANI (INGV-RM1)

Aldo WINKLER (INGV-RM2)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - Referente

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860068

redazionecen@ingv.it

in collaborazione con:

Barbara Angioni (RM1)

REGISTRAZIONE AL TRIBUNALE DI ROMA N.174 | 2014, 23 LUGLIO

© 2014 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Rappresentante legale: Carlo DOGLIONI

Sede: Via di Vigna Murata, 605 | Roma



Propagazione radio, acustica e trasporto aerosol nella Grotta di Frasassi

Radio, acoustic propagation and aerosol transport in the Cave of Frasassi

Cesidio Bianchi¹, Maurizio Borioni², Fabio Bianchi¹, Roberta Porretta¹, Sandro Mariani², Giuseppe Serafini²

¹INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Geomagnetismo, Aeronomia e Geofisica Ambientale)

²GSF (Gruppo Speleologico CAI, Fabriano - AN)

Propagazione radio, acustica e trasporto aerosol nella Grotta di Frasassi

Il rapporto di collaborazione tra l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) ed il Gruppo Speleologico CAI di Fabriano (GSF) nasce con l'obiettivo di chiarire, da un punto di vista fisico-modellistico, alcuni fenomeni osservati nelle cavità carsiche del complesso delle grotte di Frasassi.

I rilievi topografici delle sezioni esplorate dal gruppo di speleologi, tra miriadi di cunicoli e anfratti, mostrano principalmente due sistemi di gallerie: la Grotta Grande del Vento e la galleria del Buco Cattivo, separate da un notevole spessore di roccia calcarea di circa 120 m apparentemente compatto.

In questo lavoro si esporranno gli esperimenti condotti tra le due gallerie, al fine di prevedere la presenza di ulteriori cavità, oppure valutare se si tratti di uno spessore compatto, variamente fratturato o poroso. Il lavoro multi-disciplinare tratterà modelli di trasporto e diffusione di aerosol, propagazione radio e acustica, allo scopo di interpretare e validare gli esperimenti condotti dal GSF.

Il lavoro riguarderà anche l'inquadramento dell'area di studio, la speleogenesi del complesso carsico, le evidenze speleologiche e i dati sperimentali per proporre dei modelli numerico-analitici della diffusione dell'aerosol e di propagazione radio e acustica. Le risultanze ottenute finora non danno una conclusione definitiva circa la presenza di altre cavità, ma costituiscono una metodologia necessaria per altri esperimenti e ricerche future.

The collaboration between the National Institute of Geophysics and Volcanology (INGV) and the Speleological Group CAI Fabriano (GSF) was established with the aim of clarifying from a physical point of view modeling certain phenomena observed in karst cavities of the complex the Frasassi caves. The surveying of the sections explored by the cavers team, including a myriad of tunnels and caves show, mainly two tunnel systems: the Grotta Grande del Vento and the Galleria del Buco Cattivo separated by a apparently compact limestone of considerable thickness of about 120 m. This paper will present the experiments conducted between the two tunnels in order to predict the presence of additional cavities, or whether it is a compact thick, variously fractured or porous. The multi-disciplinary work deals with transport and diffusion of aerosol, radio and acoustic propagation models with the purpose to interpret and validate the experiments conducted by the GSF. The work will also cover the geological framework of the area, the speleogenesis of karst, caving evidence and experimental data to propose numerical-analytical models of aerosol diffusion, radio and acoustic propagation. The results obtained so far do not give a definite conclusion about the presence of other cavities but are a necessary methodology for other experiments and future research.

Introduzione

Le grotte di Frasassi, ubicate nel versante adriatico dell'Appennino Umbro-Marchigiano, rappresentano uno dei sistemi ipogei più famosi d'Italia. Il complesso carsico si apre all'interno di un'anticlinale asimmetrica con vergenza est-ovest tagliata da una profonda gola incisa dal Fiume Sentino. Il nucleo della struttura è costituito dalla Formazione del Calcare Massiccio di età Giurassico Inferiore, calcare compatto, bianco, molto puro (99% CaCO₃) e di elevata permeabilità.

Il processo di deformazione tettonica, iniziato negli Appennini circa 5 milioni di anni fa, ha generato un complesso sistema di faglie e fratture nei potenti strati del Calcare Massiccio.

Alla base della successione carbonatica, è stata da tempo

accertata l'esistenza di un importante orizzonte di rocce evaporitiche (dolomie e anidriti) nota come Formazione di Burano, di età triassica.

L'acqua solfurea, all'interno della serie evaporitica, miscelata con acque di origine meteorica, ha scavato un'imponente sistema di sale e gallerie per uno sviluppo totale di 40 km.

Ad oggi, le grotte conosciute nell'area di Frasassi sono circa 100; il sistema principale (Grotta del Fiume- Grotta Grande del Vento) è costituito da cunicoli e gallerie sotterranee (20 Km circa) situate ad altitudini tra i 200 ed i 360 m. Notevoli dimensioni raggiungono anche le altre due grotte (Buco Cattivo, lungo 5000 m e la Grotta del Mezzogiorno-Sistema Grotta di Frasassi, 3500 m di lunghezza) situate ad altitudini tra i 360 ed i 500 m [Galdenzi, 2003]. Le grotte hanno un anda-

mento principalmente orizzontale e disposte su livelli preferenziali (piani carsici); in particolare, i rilievi topografici effettuati tra le due grotte Grotta Grande del Vento e Buco Cattivo hanno evidenziato che esse risultano separate da un notevole spessore di rocce calcarea di circa 120 m.

Nel presente lavoro verranno esposti gli esperimenti e i risultati condotti tra le due grotte, al fine di valutare la presenza di ulteriori cavità oppure di uno spessore stratificato molto fratturato. Numerosi indizi ci fanno ritenere che ancora molto sia da scoprire ed è questo l'obiettivo degli speleologi che operano attivamente in questo complesso, ove ad oggi poco più di 1 km è stato aperto al pubblico [Borioni, 2010].

1. La speleogenesi del complesso carsico

La formazione delle grotte a Frasassi, iniziata 1-2 milioni di anni fa, sembra essere di tipo ipogenico. La speleogenesi è essenzialmente legata alla circolazione di acque sotterranee

ricche in idrogeno solforato che attraversano la formazione giurassica del Calcarea Massiccio (Menichetti, [2013] con i riferimenti citati) che, a contatto con l'acqua forma gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Lo sviluppo dei principali ambienti carsici avverrebbe nella parte superiore della falda per fenomeni di ossido riduzione che interessano lo zolfo rilasciato nelle acque freatiche e l'ossigeno presente nelle acque superficiali e nell'atmosfera della grotta.

Le acque solfuree (H_2S), quando incontrano le acque superficiali ricche in ossigeno attraverso le profonde fratture della formazione calcarea, formano acido solforico (H_2SO_4); grazie anche alla presenza di colonie di solfobatteri che giocherebbero un ruolo attivo in questo processo. Questo processo crea un'azione altamente corrosiva, rendendo l'ambiente sommerso estremamente aggressivo nei confronti del calcarea che, in corrispondenza delle faglie e delle fratture, viene rapidamente dissolto originando, al di sotto della falda freatica, un labirinto di sale e gallerie [FSM-Federazione Speleologica Marchigiana, 2010].



Figura 1.1 Topografia della Grotta Grande del Vento.
Figure 1.1 Topography of Grotta Grande del Vento.

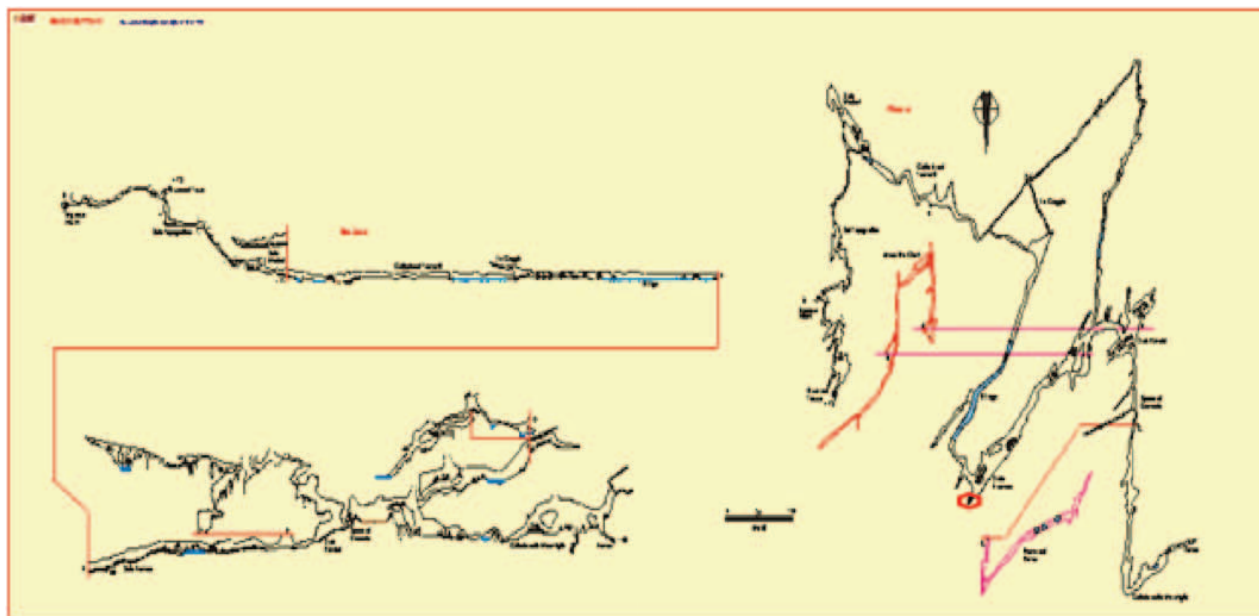


Figura 1.2 Topografia della Galleria del Buco Cattivo.
Figure 1.2 Topography of Buco Cattivo.

I successivi sollevamenti tettonici hanno fatto emergere gli strati aggrediti al di sopra del livello base del Fiume Sentino, portando alla luce le grotte prima sommerse. Inoltre, i sollevamenti del blocco calcareo hanno dato luogo ai vari “piani” principalmente orizzontali che caratterizzano il complesso

ipogeo, mentre sotto il livello del fiume si stanno formando tutt’ora altri vuoti per un rapido trasferimento delle acque assorbite verso la falda freatica, ubicata tra i 300 ed i 500 m di profondità rispetto alla superficie topografica. I rilievi topografici mostrano i due sistemi di gallerie: la Grotta Grande

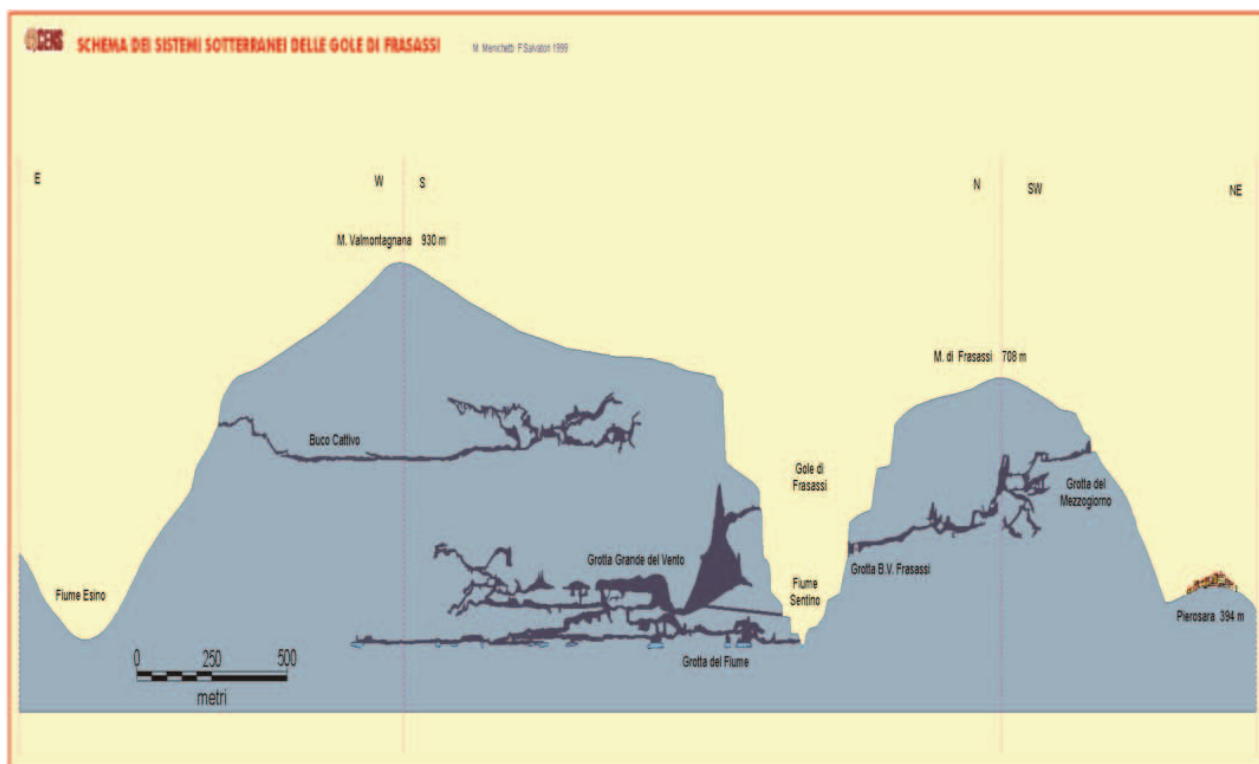


Figura 1.3 Schema dei sistemi di Grotte con i rilievi montuosi.
Figure 1.3 Scheme of system with mountain’s reliefs.

del Vento (figura 1.1) e la galleria del Buco Cattivo (figura 1.2) separate da un notevole spessore di roccia calcarea di circa 120 m (figura 1.3). Le tre figure citate sono state elaborate dal Centro Escursionistico Naturalistico Speleologico (CENS).

2. Evidenze speleologiche, dati sperimentali e modelli compatibili

Dalle attuali conoscenze emerge chiaramente la mancanza di una parte di grotta, il cui livello dovrebbe trovarsi tra quota 300m e quota 400m oltre la mancanza di un collegamento tra i due sistemi di grotte. Si riscontra anche l'assenza dei grandi bacini di acqua solfurea visto che, a livello base del Fiume Sentino (quota 205m slm), fuoriesce una copiosa sorgente perenne e con portata stabile di acqua solfurea.

Dalla iniziale scoperta dei due sistemi di grotte, negli anni 1971- 1973, centinaia di speleologi da tutta Italia, e non solo, hanno esplorato ogni anfratto e disostruito decine di passaggi. Si è così giunti allo sviluppo attuale, ma il goal del collegamento non è stato ancora raggiunto.

Il Gruppo Speleo di Fabriano, artefice di numerose scoperte in questo complesso ipogeo, si è da tempo concentrato su questo obiettivo. Sulla base di studi precedenti, sono stati verificati i rilievi topografici e sono state individuate con buona affidabilità le zone in cui i rilievi dei due sistemi di gallerie si sovrappongono, sono state ispezionate meticolosamente tutte le sale, le gallerie, i cunicoli in quelle aree. Il risultato è stato negativo, nel senso che non c'è nessun cunicolo o struttura fessurata che metta in comunicazione le due cavità considerate lungo questo spessore di 120 metri.

La zona di sovrapposizione più interessante risulta comunque essere quella evidenziata nel rilievo con i due cerchi rossi: in questa zona vi è una sovrapposizione planimetrica ed una distanza altimetrica di circa 120 m, in questa zona si concentrano le nostre ricerche riassumibili nei punti che seguono:

- delle essenze profumate sono state rilasciate in una delle zone più significative della grotta inferiore; a distanza di circa 4 ore si è avvertita la presenza dell'essenza nella grotta superiore;
- sono stati fatti esplodere dei petardi nelle due aree test ed il suono è stato udito debolmente;
- colpi di mazza battuti sulla roccia della grotta superiore sono stati uditi nella grotta inferiore;
- sono stati installati due apparecchi radio, uno nella grotta superiore ed uno nella grotta inferiore, nelle due aree in test con potenza 50 W, frequenza 144.050 MHz, antenne ground plane da 95 cm; il segnale in fonìa è stato ricevuto perfettamente da entrambe le stazioni che hanno potuto parlare regolarmente.

Spostando di qualche metro la posizione delle antenne/radio il segnale scompare per poi riapparire in corrispondenza di un'altra posizione. Il livello del segnale ricevuto non è stato rilevato con precisione non avendo lo strumento apposito: su 5 tacche del display del RX ne apparivano 3-4. Scendendo ad una potenza di 5W con la stazione della grotta inferiore (antenna ground plane) e utilizzato un palmare da 3W nella grotta superiore. Il segnale era debole (1-2 livelli dell'indicatore analogico), ma la comprensione era buona.

L'area in test nella grotta superiore è costituita dal fondo di una ampia galleria (chiamata sala franosa) nella quale una delle pareti è chiaramente uno specchio di faglia. Il pavimento è costituito da un corpo di frana di spessore variabile formato da blocchi di roccia da pochi cm³ a svariati m³. Nella grotta inferiore l'area di test è una sala alla quale giungono diverse gallerie, molto concrezionata. Il soffitto presenta qualche piccola fessurazione (larghezza 1-3 cm), ma è sostanzialmente formato da roccia compatta.

Le due aree sono situate molto lontano dagli ingressi 1-2 km e per raggiungerle occorre superare un intricato di gallerie e cunicoli.

Sono state effettuate delle prove con gli stessi apparati tra due punti comunicanti della medesima grotta: a distanze già di poche decine di metri, in presenza di strettoie o gallerie fuori del raggio visivo, non si riusciva a realizzare alcun collegamento.

D'altronde è questa l'esperienza di vari gruppi speleo che hanno provato la trasmissione radio in grotta, a varie frequenze con i più diversi apparati: quando si va fuori della portata ottica la comunicazione non è realizzabile.

La nostra situazione non trova quindi spiegazione, almeno al livello delle nostre conoscenze e numerose domande sono senza risposta:

- come può un'onda elettromagnetica ad una frequenza di 144MHz propagarsi attraverso uno strato di roccia compatta dello spessore di 120 metri?
- se questo non è possibile, quale è lo spessore massimo di calcare che l'onda può superare? (soltanto un sottile diaframma - quanto sottile? - ci separa da un grande vuoto tra le due grotte?)
- un'onda siffatta può propagarsi attraverso strette fessure o discontinuità della roccia? Ad esempio lungo una faglia?
- perché la propagazione non avviene in gallerie tra loro comunicanti?
- la propagazione di onde generate dal colpo di una mazza da 1,5 Kg direttamente sulla roccia può percorrere una distanza di 120m tanto da essere chiaramente udite nella grotta inferiore? Tale propagazione può essere correlata alla propagazione delle onde radio?

Prima di procedere alle varie simulazioni bisogna partire da un modello che caratterizzi il mezzo esistente tra le due cavità che vogliamo investigare. Schematicamente e rifacendosi a rilievi topografici sappiamo che lo spessore di roccia è circa di 120 m. Non potendo eseguire una misura diretta (sismica a riflessione), georadar o geoelettrica, poiché le cavità irregolari e

chiuse producono una serie di echi ineliminabili, non ci rimane che interpretare gli esperimenti descritti sopra ipotizzando il mezzo con caratteristiche e strutture che non confliggano con i risultati sperimentali eseguiti dal GSF. La propagazione del suono fa pensare a una struttura senza vuoti, ma ciò non toglie che ve ne possano essere.

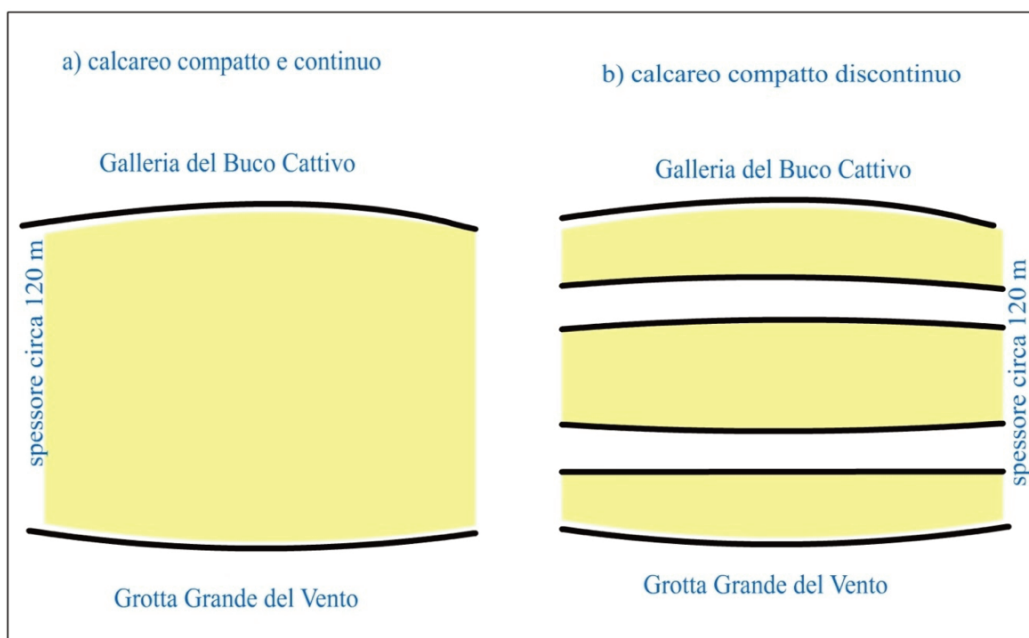


Figura 2.1 Schema dei vari modelli compatibili con le risultanze sperimentali: (a) continuo, (b) discontinuo.
Figure 2.1 Outline of the various models compatible with experimental results: (a) continuous, (b) non-continuous.

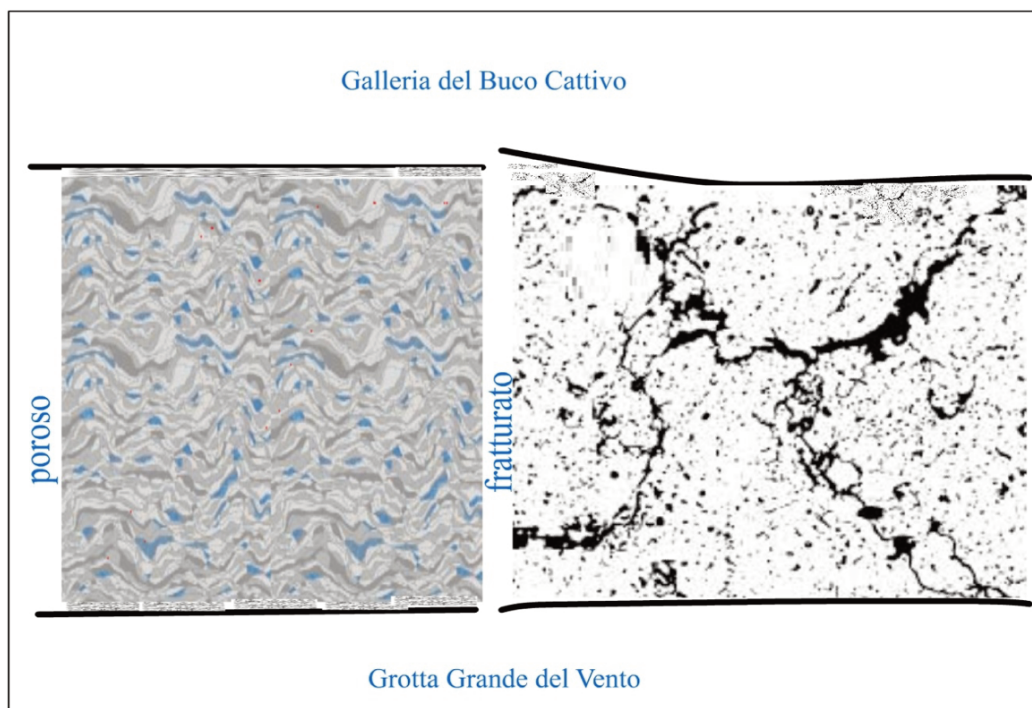


Figura 2.2 Schema dei vari modelli compatibili con le risultanze sperimentali (poroso e fratturato).
Figure 2.2 Outline of the various models compatible with experimental results (porous and fractured).

Ovviamente non lungo il percorso dell'onda acustica e dell'onda radio.

Il mezzo fuori dalla direzione privilegiata della propagazione acustica e radio potrebbe presentare cavità più o meno rilevanti, fratturazioni e porosità non evidenti all'esame visivo. Tuttavia i modelli di propagazione acustica e radio per forza di cose debbono escludere tali cavità, in quanto incompatibili con le osservazioni.

Fratturazioni e porosità non possono trovarsi lungo il percorso dell'onda acustica e radio come dimostreremo. La continuità nella struttura del mezzo è evidenziata dal fatto che il suono ascoltato a seguito dei colpi di mazza nella cavità del Buco Cattivo è stato percepito chiaramente nella Grotta Grande del Vento. Piccoli petardi esplosi nella Grotta Grande del Vento sono stati uditi flebilmente nella cavità del Buco Cattivo. D'altra parte, per la diffusione di sostanze odorose, bisogna ammettere che tali strutture debbano per forza di cose esistere, non necessariamente lungo il percorso privilegiato dell'onda acustica.

Insomma, le ipotesi di continuità del mezzo proposte rimangono parzialmente valide in quanto alcune risultanze sperimentali restano valide. I modelli che includano discontinuità del mezzo nella propagazione radio e acustica non portano ai risultati osservati.

Si ipotizza pertanto uno spessore continuo di 120 m per la propagazione radio e acustica nelle zone dove sono stati eseguiti i relativi esperimenti, con eventuali fratturazioni e/o porosità consistenti con il trasporto e la diffusione chimica osservata attraverso le due gallerie. Per completare il quadro e avere anche una analisi quantitativa delle proprietà elettriche e meccaniche del mezzo, il gruppo speleologico ha pro-

dotto campioni di roccia che sono stati analizzati nei laboratori dell'INGV. I campioni che, da un punto di vista elettrico non hanno proprietà magnetiche, si caratterizzano per avere valori di resistività molto elevate $\rho \cong 1 \cdot 10^5$ Ohm-m, ossia una conducibilità $\sigma \cong 1 \cdot 10^{-5}$ S/m. Per le analisi che seguiranno queste sono grandezze estremamente significative in quanto consentono di valutare l'assorbimento sofferto da un'onda elettromagnetica nell'attraversare l'intero spessore. Sono state inoltre stimate le proprietà meccaniche del calcare la cui densità è risultata approssimativamente $\rho_m = 2400$ kg/m³ e una velocità di propagazione longitudinale di 2800 m/s.

3. Modello di trasporto e diffusione dell'aerosol

La figura 2.2 illustra uno dei possibili modelli di trasporto e diffusione di aerosol in fase gassosa. Abbiamo determinato che i fenomeni fisici implicati possono essere il trasporto e convezione sia in mezzi porosi che fratturati. I due modelli ipotizzati in figura sosterrebbero entrambi fenomeni dove è applicabile la legge di Darcy [Webb, 2006]. L'equazione scritta per un mezzo come quello ipotizzato sopra si esprime come:

$$q = -\frac{k}{\mu} \frac{dP}{dl} \tag{3.1}$$

dove: q [m/s] è il flusso, dP/dl il gradiente di pressione, k [m²] è la permeabilità e μ [(kg/m)·s] è la viscosità. Questa legge descrive il flusso sulla superficie unitaria, molto semplice nello spazio libero ma le condizioni al contorno richiedono un modello e una elaborazione numerica. L'equazione (3.1)

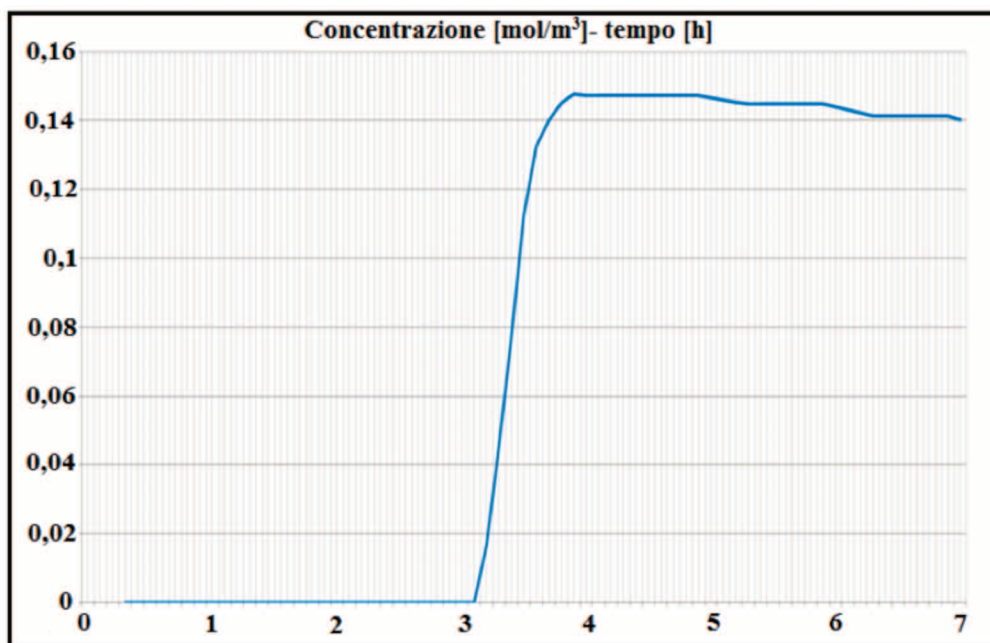


Figura 3.1 Concentrazione in moli/m³ in funzione del tempo nella cavità superiore.
 Figure 3.1 Concentration of aerosol in moli/m³ vs time in the upper cavity.

descrive la propagazione di un gas in un mezzo poroso o fratturato al variare dei parametri k e μ differenti per il tipo di mezzo ipotizzato. Per quanto concerne il nostro lavoro, sulla base dei dati raccolti si è proceduto all'implementazione di un modello di trasporto disponibile nel programma implementato [COMSOL Multiphysics Reference Guide, 2012] che ben si presta alla descrizione della diffusione nei mezzi fratturati e porosi. Il programma di simulazione di aerosol in un mezzo poroso ha fornito i valori di concentrazione in funzione del tempo dopo la propagazione attraverso lo spessore di roccia porosa come in figura 3.1. Tale simulazione per una porosità dell'ordine di 0.33 %, permeabilità $k=3 \cdot 10^{-5}$ [m²] e viscosità $\mu = 1.814 \cdot 10^{-5}$ [Pa·s] ha fornito risultati compatibili con l'esperimento in grotta. Infatti ponendosi all'uscita dello spessore tra le due cavità solo dopo 3 ore circa appaiono significative concentrazioni di aerosol.

È stato preso in considerazione anche il fenomeno della diffusione [Crank, 1975]. Tale processo può essere descritto, ed è concettualmente più comprensibile, dalla teoria cinetica dei gas, ma per una trattazione quantitativa, si ricorre una descrizione più termodinamica e in particolare alla prima legge o alla seconda legge di Fick, a seconda che il processo sia stazionario o impulsivo. Nel secondo caso si mette in relazione la variazione nel tempo t della concentrazione c rispetto al gradiente spaziale della stessa concentrazione attraverso il coefficiente di diffusione D , come di seguito:

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} = \nabla(D(x,t) \cdot \nabla c(x,t)) \quad (3.2a)$$

Il coefficiente di diffusione D visto come grandezza macroscopica gioca un ruolo importante e tiene conto del tipo di gas, la fase (gassosa, liquida e solida) in cui esso si diffonde e di altri parametri che caratterizzano il mezzo. Nel caso unidimensionale dove il coefficiente D non dipende, entro certi limiti, dalla concentrazione si ha:

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c(x,t)}{\partial x^2} \quad (3.2b)$$

Le soluzioni analitiche sono necessarie quando si ha la necessità di applicare modelli come quelli descritti in figura 2.2. Se la concentrazione a distanza x è indicata con c_x , la concentrazione iniziale con c_0 ($t=0$) a una distanza tra $x > 0$ e ∞ e con c_s indichiamo la concentrazione $t=0$ in $x=0$, l'equazione (3.2b) può essere risolta analiticamente come:

$$\frac{c_x - c_0}{c_s - c_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (3.3)$$

La simulazione è stata eseguita con il programma Mathcad che ha la funzione $\operatorname{erf}(z)$ incorporata. Il risultato è che il processo di diffusione, ancorché in fase gassosa, è stato di scarso interesse in questo tipo di esperimento. Un centinaio di grammi di sostanza liberata in una delle cavità, in quattro ore può raggiungere al massimo una decina di metri in un

mezzo fratturato e ancor meno in un mezzo poroso, quando non si considerano fenomeni di trasporto.

Dato che i modelli ipotizzati in figura 2.2 non sono affatto affidabili, l'analisi di questo capitolo indica solo che vi è un passaggio d'aria da una cavità all'altra attraverso fratture e/o porosità. I risultati della simulazione, in cui i valori dei coefficienti sono stati scelti per aderire alle osservazioni del gruppo speleologico, sono compatibili con quanto osservato.

4. Modello di propagazione radio

In questa sezione si prende in considerazione la propagazione radio e acustica. Questi due fenomeni propagativi rispondono e si avvalgono di un modello che tiene conto di un mezzo continuo e compatto, dato che discontinuità, cavità di varie dimensioni, fratture e/o porosità, assorbono energia elettromagnetica e meccanica che riducono fortemente le proprietà propagative. In questo caso si considera il modello continuo e compatto dato in figura 2.1. Già con il solo valore della conducibilità $\sigma = 0.2089 \cdot 10^{-5}$ S/m si stabilisce la profondità di penetrazione d in metri che fornisce una prima idea dell'attenuazione dell'onda nella roccia. La grandezza d dà la distanza per cui l'ampiezza dell'onda si attenua di un fattore $1/e$:

$$\delta \approx \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \sigma}} \quad (4.1)$$

con ω frequenza angolare e μ_0 permeabilità magnetica del vuoto date in tabella 1 e 2 la grandezza d è $\cong 29$ m. Questo è un primo calcolo che ci aiuta nella comprensione della propagazione delle onde e.m in mezzo siffatto.

Il calcolo della propagazione nel mezzo con le possibili attenuazioni si ha adottando il modello in figura 2.1. Schematizzando il problema come l'onda elettromagnetica che deve attraversare uno spessore compatto e continuo di roccia di circa 120 m. Dai parametri radio che il gruppo sperimentale ha fornito e come si ricava dal manuale di istruzione [YAESU FT7900R, 2009] abbiamo potenze in trasmissione che vanno da 3 W a 50 W e antenne stilo con polarizzazione verticale. A pagina 2 dello "FT 7900R Operating Manual" Specifications ci sono almeno 2 parametri di grande interesse che riguardano il ricevitore e senza i quali non si possono fare valutazioni quantitative. I parametri sono: la "Sensitivity" sensibilità (cioè la minima potenza in ricezione) e "Antenna impedance" (impedenza d'antenna). La sensibilità del ricevitore, parametro estremamente importante per la nostra elaborazione, è 0.2 μ V per lo YAESU FT 7900R. L'impedenza d'antenna è 50 Ohm. Tutti i calcoli sono stati eseguiti con MATHCAD che permette anche calcoli simbolici dove numerose costanti radio elettriche già predefinite, ma che per comodità del lettore sono riportate anche in tabella 4.1 e 4.2.

Frequenza	$f = 144 \cdot 10^6$ Hz
Frequenza angolare	$\omega = 2 \pi \cdot f$
Velocità della luce nel vuoto	$c = 3 \cdot 10^8$ m/s
Lunghezza d'onda	$\lambda = c/f \cong 2$ m
Guadagno d'antenna TX e RX	$G = 1.64$

Tabella 4.1 Parametri di radio trasmissione e ricezione.
Table 4.1 Transmitting and receiving radio parameters.

Conduttività	$\sigma = 10^{-5}$	S/m
Permeabilità magnetica del vuoto	$\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$	$\Omega \cdot s/m$
Permittività dielettrica relativa della roccia	$\epsilon_r = 10$	
Indice di rifrazione e.m. della roccia	$n = \epsilon_r^{1/2} = 3.162$	
Permittività del vuoto	$\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$	F/m
Spessore di roccia	$r_s = 120$	m

Tabella 4.2 Costanti fisiche del mezzo.
Table 4.2 Physical constants of the medium.

Per risolvere il nostro problema e valutare quantitativamente utilizzeremo qui e in seguito i seguenti simboli, riportati in tabella 4.3 con le relative unità di misura.

Potenza in ricezione	$P_{RX} =$ da valutare	W
Tensione in ricezione	$V_{RX} =$ da valutare	V
Sensibilità in ricezione	$V_{RX} = 0.2$	μV
Resistenza d'ingresso in antenna per la ricezione	$R = 50$	W
Potenza in trasmissione	$P_{TX} = 3$ oppure 50	W
Guadagno d'antenna in ricezione	$G_{RX} = 2.16$	dB
Guadagno d'antenna in trasmissione	$G_{TX} = 2.16$	dB

Tabella 4.3 Parametri radioelettrici del rice-trasmettitore.
Table 4.3 Electrical radio parameters of the receiver and transmitter.

Il primo calcolo riguarda la potenza in ricezione P_{RX} a partire dalla potenza trasmessa P_{TX} senza attenuazioni se non la divergenza sferica. La potenza in ricezione in questo ameno caso è data da:

$$P_{RX} = P_{TX} \cdot \left(\frac{G\lambda}{4\pi r}\right)^2 \tag{4.2}$$

e se non vi fossero attenuazioni e guadagni se non quello dipendente dalla distanza assumerebbe questa forma molto semplice. La potenza P_{RX} con i dati in tabella è dell'ordine di pochi μW avendo impiegato un $P_{TX} = 3$ W. Vanno però considerate tutte le attenuazioni dell'onda radio e in questo caso va aggiunto un fattore L di attenuazione totale al denominatore dell'equazione (4.2).

$$P_{RX} = P_{TX} \cdot \frac{1}{L} \cdot \left(\frac{G\lambda}{4\pi r}\right)^2 \tag{4.3}$$

Esprimendo in dBm P_{TX} nell'equazione (4.3), attraverso la relazione $P_T = 10 \log(P/0.001)$, com'è di prassi si facilitano molto i calcoli [Bianchi e Sciacca, 2003]. A parte l'attenuazione geometrica L_G già considerata nella (4.2), il fattore L dipende da molti termini $L = L_a + L_r + L_t + L_p$ come specificato qui di seguito in tabella 4.4 e calcolati in dB insieme alla perdita geometrica:

Simboli		Valore in dB
L_G	perdita geometrica	52.896
L_a	perdita per assorbimento del mezzo	0.627
L_r	perdita per riflessione all'interfaccia aria/roccia	5.69
L_t	perdita per riflessione all'interfaccia roccia/aria	1.364
L_p	perdita per de-polarizzazione e modi	6-12

Tabella 4.4 Riassuntivo dell'attenuazione radioelettrica.
Table 4.4 Summary of the radio-electric attenuation.

Ciò precisato si calcolano i singoli termini in dB tramite le relazioni che seguiranno.

Perdita geometrica:

$$L_G = 20 \cdot \log\left(\frac{G\lambda}{4\pi r}\right) \tag{4.4}$$

Attenuazione del mezzo [Bianchi, 1990]:

$$L_a = 8.856 \cdot \left(\frac{\sigma}{2cn\epsilon_0}\right) \cdot r_s \quad (4.5)$$

Attenuazione per riflessione attraverso l'interfaccia aria-roccia:

$$L_r = 10 \cdot \log(R) \text{ dove } R = \left[\frac{(1-n)}{(1+n)}\right]^2 \quad (4.6)$$

Attenuazione per trasmissione attraverso l'interfaccia roccia-aria:

$$L_t = 10 \cdot \log(R) \quad (4.7)$$

Attenuazione per de-polarizzazione:

$$L_p = 6 \quad (4.8)$$

Per una potenza in trasmissione di 3 W si ha una potenza in trasmissione $P_T = 34.771$ in dBm. Parimenti la potenza in ricezione P_R espressa in dBm sarà:

$$P_R = P_T - L_G - L_a - L_r - L_t - L_p \quad (4.9)$$

$$P_R = 34.771 - 56.158 - 0.627 - 5.69 - 1.364 - 6 = -37.809 \text{ dBm}$$

Questa grandezza va trasformata in W e, successivamente in V per essere confrontata con il parametro sensibilità del ricevitore. La potenza P_{RX} in W è calcolata nella seguente:

$$P_{RX} = \frac{P_R}{1000} = \frac{10^{-10}}{1000} \quad (4.10)$$

$P_{RX} = 1.656 \cdot 10^{-7}$ W e attraverso l'impedenza d'antenna pari a 50 Ohm fornisce:

$$V_{RX} = (P_{RX} \cdot 50)^{1/2} \cdot 10^6 \quad (4.11)$$

Pertanto $V_R = 2.878 \mu\text{V}$ è la tensione all'ingresso del ricevitore, dove è stata assunta una impedenza d'ingresso di 50 Ohm. È questo valore che si deve confrontare con la sensibilità del ricevitore che è $0.2 \mu\text{V}$.

Come abbiamo dimostrato, applicando il modello cosiddetto compatto e continuo di figura 2.1a, il segnale radio di 144 MHz e potenza di 3 W effettivamente può essere ricevuto dall'apparato ricevente YEASU -FT 7900R. La spessa schermatura della montagna sovrastante favorisce ulteriormente la comunicazione rendendo l'ambiente elettromagnetico silenzioso: una vera camera anecoica. La comunicazione sarebbe molto improbabile se considerassimo rumori elettromagnetici come in ambiente esterno poiché è il rapporto segnale rumore in antenna, la grandezza di maggiore interesse. Applicando il modello in figura 2.1b l'onda radio subisce attenuazioni di 11 dB circa per ogni discontinuità nel mezzo roccioso come descritto in figura 2.1b. Se il mezzo

fosse ghiaioso/poroso o variamente fratturato si potrebbero avere attenuazioni aggiuntive per fenomeni di multipath e assorbimenti L_a dovuti a causa di una maggiore conducibilità, per umidità e infiltrazioni d'acqua nel mezzo.

5. Modello di propagazione del suono

I modelli considerati nella figura 2.1a e 2.1b si prestano bene sia per la descrizione della propagazione elettromagnetica, sia per descrizione della propagazione acustica. Il mezzo compatto e continuo sostiene sia la propagazione longitudinale che trasversale. La prima è la più veloce e la meno attenuata. La propagazione trasversale subisce un'attenuazione maggiore. Nel primo caso, quello delle onde longitudinali, e tratteremo solo questo modo di propagazione acustica, si possono assimilare a onde di pressione che possono essere descritte formalmente quasi come del caso elettromagnetico. Sarà usata la stessa terminologia e valutati i contributi attenuativi, eccezion fatta per l'attenuazione dovuta alla polarizzazione. Dovremo quindi considerare i fenomeni seguenti: attenuazione geometrica, attenuazione del mezzo, riflessione, trasmissione, rifrazione e diffrazione ma non la polarizzazione. Conserveremo quasi la stessa terminologia ricordandoci che la propagazione avviene per la differenza tra la pressione del mezzo non perturbato e la pressione massima causata dall'onda e la risposta elastica di richiamo del mezzo e dalla sua densità. La velocità c_s di propagazione del suono dipende dalle caratteristiche del mezzo, in particolare l'elasticità espresso dal modulo di Young $[N/m^2]$ e la densità ρ_m secondo la relazione:

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{\rho_m}} \quad (5.1)$$

La velocità c_s è importante per il calcolo della lunghezza d'onda λ , dato che da questa si ricava l'attenuazione del mezzo e l'impedenza acustica. Nella tabella 5.1 sono riportati i valori della densità del mezzo, del modulo di elasticità di Young, della velocità, dell'attenuazione dell'impedenza acustica $[Ns/m^3]$ con le relative dimensioni, per un mezzo compatto, poroso e aria [Gravilov e Fan, 2009].

Escludendo altri modi di propagazione (trasversale, superficiale ecc.), per il solo modo longitudinale sono riportati altri parametri d'interesse alle differenti frequenze nei mezzi considerati (vedi tabella 5.2).

L'intensità acustica I $[J/s m^2]$ rappresenta la quantità d'energia che attraversa l'unità di superficie nell'unità di tempo ed è data analiticamente dalla relazione:

$$I = \frac{p^2}{2\rho c_s} = \frac{p^2}{2z} \quad (5.2)$$

dove z è il prodotto di ρ_m e c_s , definita come impedenza acustica. Per ogni materiale si possono avere più valori d'impe-

	compatto	ghiaioso/poroso	aria	
densità	$\rho_m = 2400$	$\rho_m = 1800$	$\rho_a = 1.225$	kg/m ³
modulo di elasticità di Young				N/m ²
velocità del suono nel calcare	$c_s = 2800$	$c_s = 1700$	$c_s = 340.5$	m/s
attenuazione	$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.8$	$\alpha \cong 0$	dB/λ
impedenza acustica	$z = 6.72 \cdot 10^6$	$z = 3.6 \cdot 10^6$	$z = 417$	Kg/m ² s o Ns/ m ²

Tabella 5.1 Grandezze fisiche del mezzo compatto, ghiaioso/poroso nella propagazione del suono [da Duncan et al., 2009].
Table 5.1 Physical quantities of compact medium, sandy/porous in the sound propagation [after Duncan et al., 2009].

frequenza	f = 200 Hz	f = 2000 Hz
lunghezza d'onda (c_s/f)	$\lambda \cong 14$ m (roccia)	$\lambda = 1.4$ m (roccia)
lunghezza d'onda (c_s/f)	$\lambda \cong 1.7$ m (aria)	$\lambda = 1.7$ m (aria)

Tabella 5.2 Frequenza e parametri dipendenti considerati nella propagazione longitudinale del suono.
Table 5.2 Frequency-dependent parameters considered in longitudinal propagation of sound.

denza acustica a seconda della modalità di propagazione (onde longitudinali, trasversali o superficiali), qui prenderemo in considerazione quella longitudinale per uniformità di trattazione, dato che i fluidi e l'aria non sostengono altri modi propagativi. L'impedenza acustica nella (5.2) da un'idea chiara sulla propagazione dell'onda in un mezzo omogeneo ma quando si presentano discontinuità nel materiale o all'interfaccia tra mezzi diversi bisogna tener conto anche delle riflessioni e trasmissioni tra i differenti mezzi [Yang-Hann, 2010]. Per tale ragione l'energia (potenza o densità di potenza) all'interfaccia tra due mezzi con differente impedenza acustica z_1 e z_2 , la grandezza I subisce variazioni importanti al punto che solo una piccola frazione dell'energia che si propaga nel primo mezzo talvolta riesce a propagarsi nel secondo mezzo. Il coefficiente di riflessione R tiene conto della differente ampiezza d'onda all'interfaccia tra i due mezzi aventi differenti impedenze acustiche:

$$R = \left(\frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right) \tag{5.3}$$

Mentre il R^2 ci fornisce la percentuale (numero tra zero e uno) dell'energia riflessa all'interfaccia. Posti questi rimandi

teorici, si passa all'interpretazione dell'esperimento eseguito dagli speleologi. L'esperimento di propagazione del suono (descritti nei punti b e c) è stato un esperimento qualitativo (non conosciamo esattamente né l'intensità sonora alla sorgente, né al punto di ricezione), tuttavia si possono ipotizzare alcuni "range" di valori che consentono una descrizione semi-quantitativa dei fenomeni osservati. Il campo uditivo dell'uomo si estende da una frequenza di circa 20 Hz fino a 20.000 Hz e un'intensità sonora da 0 a 130 dB, cioè dalla minima soglia di percezione dell'orecchio medio dell'uomo fino alla cosiddetta soglia del dolore e oltre. Dalla descrizione di questo esperimento si può ipotizzare un livello d'intensità sonora in ricezione dalle due frequenze considerate 200 Hz e 2000 Hz. L'impulso sonoro (colpo di mazza o petardo) si compone di tante armoniche che vengono disperse dal mezzo arrivando al punto di ascolto con intensità diverse in quanto le alte frequenze vengono maggiormente attenuate. Si possono ipotizzare dei valori intorno a 120 dB per i petardi e circa 110 dB per il colpo di mazza. Vedremo che le incertezze intorno a questi valori sono trascurabili rispetto alle singole perdite all'interfaccia aria-roccia e roccia-aria per via della diversa impedenza acustica o rispetto alle perdite da mezzo compatto a mezzo ghiaioso/poroso. La frequenza a 200 Hz è stata udita in maniera percettibile con un livello d'intensità sonora che possiamo stabilire intorno ai 30 dB, con un margine d'incertezza di più o meno di 10 dB, ma vedremo che non è importante ragionare di fino. Il modello compatto sostiene anche altri modi di propagazione come quello di taglio ma le attenuazioni sono maggiori $\alpha = 0.2$ dB/λ con una velocità di propagazione più bassa di circa 1700 m/s, che in questa analisi non consideriamo. Modelli ghiaiosi/porosi o l'aria non sostengono questo modo di propagazione. Con le grandezze prima calcolate in tabella abbiamo attenuazioni del mezzo pari a 0.857 dB per frequenze di 200 Hz e 8.857 dB a 2000 Hz attraverso 120 m di spessore di roccia.

In tabella 5.3 riportiamo i valori delle attenuazioni calcolati analogamente al caso delle onde radio.

Simboli		Valore in dB
L_G	perdita geometrica	52.576 assumiamo $\cong 52.5$
L_a	perdita per assorbimento del mezzo (2000 Hz)	8.857 assumiamo $\cong 8.5$
L_a	perdita per assorbimento del mezzo (200 Hz)	0.857 assumiamo $\cong 1$
L_r	perdita per riflessione all'interfaccia aria/roccia	$\cong 36$
L_t	perdita per riflessione all'interfaccia roccia/aria	$\cong 1$

Tabella 5.3 Riassuntivo dell'attenuazione dell'onda acustica a 200 Hz.
Table 5.3 Summary of the acoustic wave attenuation at 200 Hz.

A questo punto alla stregua di quanto fatto nel caso elettromagnetico possiamo scrivere la seguente:

$$I_R = I_T - L_G - L_a - L_r - L_t \quad (5.4)$$

dove I_R è l'intensità dell'onda acustica al punto di ascolto, I_T è l'intensità dell'onda al punto sorgente e le altre grandezze sono quelle in tabella 5.3. Rimane da determinare l'intensità della sorgente dell'onda I_T in termini di dB alla frequenza scelta (200 Hz o 2000 Hz) entro una opportuna banda B di qualche decina di Hz, ammettendo che non vi siano effetti dispersivi significativi nella banda B . Ora faremo un certo numero di ipotesi che potrebbero discostarsi dalla realtà ma che nei prossimi esperimenti potranno essere d'aiuto. Nel caso di una sorgente sonora di 120 dB, quale può essere l'intensità sonora di un petardo, nella banda B assumiamo che I_T sia $\cong 100$ dB d'intensità sonora possano essere realistici trasmessa e ricevuta possiamo considerare circa, dalla (5.4) inserendo i rispettivi valori numerici alle grandezze in gioco, al punto di ricezione avremo:

$$I_R = 100 - 52.5 - 1 - 36 - 1 \cong 9.5 \text{ dB}$$

dove è stato preso in considerazione un mezzo compatto e continuo come in figura 2.1a. Questa intensità sonora è effettivamente molto debole (quasi al limite) per essere percepita durante l'esperimento di propagazione del suono. I petardi esplosi in aria nella cavità subiscono una grave attenuazione aggiuntiva dovuta alla riflessione con una perdita

L_r di 36 dB come si riscontra applicando la (5.3) per il calcolo di L_r con le due impedenze acustiche dell'aria z_1 e del calcare z_2 . Per quanto concerne l'esperimento con i colpi di mazza sulla roccia nella Galleria del Buco Cattivo, si può ripetere il calcolo assumendo un'intensità sonora I_T circa 90 dB. In questo, dato l'accoppiamento diretto della sorgente acustica, avremo:

$$I_R = 90 - 52.5 - 1 - 1 \cong 35.5 \text{ dB}$$

Il risultato di 35 dB circa è notevole in quanto questa intensità sonora può essere facilmente percepita dallo sperimentatore, soprattutto in ambiente anecoico. Applicando il modello in figura 2.1b l'onda acustica subisce attenuazioni di 36 + 1 dB per ogni discontinuità incontrata. Se il mezzo fosse ghiaioso poroso secondo le nostre calcoli bisognerebbe aggiungere un'altra decina di dB di attenuazione, cosa che renderebbe impossibile ricevere i livelli sonori di partenza alle frequenze menzionate. Questi risultati sono confortati dagli esperimenti i quanto si è addirittura riusciti a contare i colpi di mazza mentre l'ascolto dello scoppio dei petardi è stato incerto.

Conclusioni

La propagazione delle onde radio e acustiche, secondo i modelli adottati di figura 2.1a e 2.1b e figura 2.2a e 2.2b suggerirebbe un modello compatto continuo senza discontinuità, poiché ogni discontinuità del mezzo introdurrebbe ulteriori attenuazioni quasi intollerabili nella propagazione del suono (circa 37 dB ulteriori) per ciascuna discontinuità incontrata e circa 11 dB di attenuazione per le onde radio. In questa analisi semi-quantitativa a causa di alcune incertezze che riguardano la determinazione delle grandezze elettriche del mezzo, possiamo pertanto affermare che l'onda elettromagnetica si propaga senza ipotizzare cavità aggiuntive tra la Grotta del Vento e la galleria del Buco Cattivo, separate nello spessore di roccia calcarea di circa 120 m. Pertanto un modello cosiddetto compatto-continuo dello spessore di roccia agevola molto la propagazione ed è supportato dagli esperimenti eseguiti dal GSF. Viceversa possiamo inferire che ogni discontinuità degraderebbe il segnale radio introducendo attenuazioni aggiuntive dovute all'interfaccia aria-roccia. Infatti l'onda radio si propaga nella roccia calcarea anche considerando valori di 3 W di potenza trasmessa con una conduttività del mezzo $\sigma = 0.001 \text{ S/m}$ o inferiori. Nella roccia calcarea σ può assumere valori che vanno da 0.001 a 0.00001 S/m rendendo sempre possibile la propagazione. A maggior ragione utilizzando potenze di 50 W e $\sigma = 0.00001 \text{ S/m}$ avremo un segnale in ricezione di circa 15.62 mV. Circa quattro ordini di grandezza maggiore della sensibilità del ricevitore. Se il mezzo fosse ghiaioso/poroso o variamente fratturato si

potrebbero avere attenuazioni aggiuntive per fenomeni di multipath e assorbimenti a causa di una maggiore conducibilità del mezzo. Da notare la circostanza favorevole secondo cui la ricezione avviene in assenza di rumore elettromagnetico, data la schermatura della montagna. Questo senza dubbio è un enorme vantaggio e gli apparati di rice-trasmissione operano come in camera anecoica. Le variazioni di segnale registrate dal gruppo sperimentale, spostando anche di pochi metri gli apparati sono principalmente dovute alla perdita per de-polarizzazione, differenti modi di propagazione e multipath all'interno delle cavità. L'onda acustica in un modello compatto-continuo generata dai colpi di mazza (impulso sonoro) si propaga con un'attenuazione inferiore rispetto allo scoppio dei petardi ed anche questo è confermato dagli esperimenti. Il modello compatto-discontinuo come pure quelli ghiaiosi/porosi e fratturati esposti nella figura 2.1 e 2.2 non consentono la propagazione del suono per via delle interfacce, assorbimenti e multi riflessioni. Questo non vuol dire che non vi siano ulteriori cavità tra Grotta Grande del Vento e la galleria del Buco Cattivo, ma che se queste ci fossero non sarebbero nella direzione principale di propagazione. L'altro aspetto della diffusione di essenze profumate implica fratturazioni e porosità in punti non visibili e forse marginali rispetto alla direzione privilegiata delle onde radio e acustiche. Contrariamente a quanto avviene per la propagazione radio e acustica, dove crediamo di proporre un'analisi più quantitativa, dato che i modelli ipotizzati sono più affidabili, dall'analisi nel capitolo 3 si evince che vi è un passaggio d'aria da una cavità all'altra attraverso fratturazioni e/o porosità. Mentre la diffusione di aerosol in fase gassosa è invece un processo estremamente lento incompatibile con le risultanze sperimentali. Infine in appendice sono riportate le risposte alle domande iniziali del gruppo speleologico.

Bibliografia

- Bianchi C., (1990). *Note sulle interazioni delle onde elettromagnetiche con il plasma ionosferico*, monografia N. 2 dell'Istituto Nazionale di Geofisica, Roma.
- Bianchi C., Sciacca U., (2003). *La radiopropagazione nei ghiacciai: considerazioni utili per l'elaborazione di dati da radar glaciologico*. Quaderni di Geofisica INGV, n. 28 Roma.
- Borioni M., (2010). *Sottoterra* Edizioni HESIS Fabriano.
- COMSOL Multiphysics, *Reference Guide* 1998-2012, www.comsol.com., pp. 1664.
- Crank J., (1975). *The mathematics of diffusion*, Clarendon Press Oxford Second Edition, pp 414, Duncan.
- Galdenzi S. and Teruyuki M., (2003). *Gypsum Deposits in the Frasassi Caves, Central Italy*. Journal of Cave and Karst studies 65(2): 111-125.
- Gravilov J.A, A., Fan L., (2009). *Acoustic propagation over lime-*

stone seabeds, Proceedings of Acoustic, 23-25 November 2009, Adelaide, Australia.

- Duncan A.J., Gavrilov A.N., and Li F., (2009). *Acoustic propagation over limestone seabeds*. In *Australian Acoustical Society, Nov 12, 2009*, Adelaide, Australia: University of Adelaide.
- Menichetti M., (2013). *Karst Processes and Carbon Flux in the Frasassi Caves, Italy*. Speleogenesis-oral, Italy; In: Filippi M. and Bosák P., eds, 16th International Congress of Speleology Proceedings, V. 3, pp. 376-378.
- FSM-Federazione Speleologica Marchigiana, (2010). *Stigobionti, vita acquatica nelle Grotte di Frasassi*, curata da Alessandro Montanari.
- Webb S.W., (2006). *Theory and Applications of Transport in Porous Media*. C. Ho and S. Webb Editors, Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 440.
- Yang-Hann Kim, (2010). *Sound Propagation: An Impedance Based Approach*, John Wiley & Sons, Singapore, pp. 416.
- YEASU, (2009). *FT 7900R Operating Manual*, VERTEX STANDARD, CO., ltd Japan.

Appendice

In questa appendice sono state riportate alcune delle domande che il GSF si era posto e le relative risposte dedotte da questo lavoro.

D1) Come può un'onda elettromagnetica ad una frequenza di 144MHz propagarsi attraverso uno strato di roccia compatta dello spessore di 120 metri?

R1) *Può, ma essa viene fortemente attenuata. Se assumiamo che la roccia abbia una resistività $\rho = 10^3 - 10^5$ Ohm per metro, l'onda si attenua di un fattore 1/e alla distanza (profondità di penetrazione) di 1,32 -13 m. Questo è un aspetto importante che è stato trattato quantitativamente nel modello di radio propagazione.*

D2) Se attraverso uno spessore compatto questo non è possibile, quale è lo spessore massimo di calcare che l'onda può superare ipotizzando cavità nel mezzo?

R2) *Con le grandezze elettromagnetiche e meccaniche del mezzo abbiamo preso in considerazione vari modelli dello spessore calcareo compatto-continuo ghiaioso/poroso e fratturato. I risultati farebbero propendere per uno spessore compatto-continuo lungo la direzione principale di propagazione ed, eventualmente, strutture fratturate e/o porose, che sicuramente sono presenti, più marginali.*

D3) Un'onda elettromagnetica con le caratteristiche descritte nel testo può propagarsi attraverso strette fessure o discontinuità della roccia? Ad esempio lungo una faglia?

D3) *Si può pensare a un'onda condotta o diffratta. Non sarebbe difficile se le dimensioni del condotto fossero dell'ordine del metro per l'onda elettromagnetica, ma non ci sono evidenze di simili condotti né strutture o cunicoli più ridotti dell'ordine di decine di cm.*

D4) Perché la propagazione non avviene in gallerie tra loro comunicanti?

R4) *In questo caso i fenomeni di multi-path (o interferenza distruttiva) non danno molte probabilità di successo nella comunicazione radio. Il multipath può dar luogo a interferenze distruttive che abbattano il segnale.*

D5) La propagazione di onde sonore generate dal colpo di una mazza da 1,5 Kg direttamente sulla roccia può percorrere una distanza di 120 m tanto da essere chiaramente udite nella grotta inferiore? Tale propagazione può essere correlata alla propagazione delle onde radio?

R5) *Sì. Questo fa pensare con maggiore probabilità a uno spessore di roccia compatto e continuo. Ogni interruzione introduce attenuazioni intollerabili nella propagazione del suono a causa della grande differenza tra l'impedenza acustica della roccia e dell'aria. Alla stessa stregua le diverse impedenze elettriche tra la roccia e l'aria attenuano ulteriormente l'onda elettromagnetica ad ogni discontinuità roccia-aria e aria roccia.*

Indice

Introduzione	4
1. La speleogenesi del complesso carsico	5
2. Evidenze speleologiche, dati sperimentali e modelli compatibili	7
3. Modello di trasporto e diffusione dell'aerosol	9
4. Modello di propagazione radio	10
5. Modello di propagazione del suono	12
Conclusioni	14
Bibliografia	15
Appendice	17

Quaderni di Geofisica

ISSN 1590-2595

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

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

Rapporti tecnici INGV

ISSN 2039-7941

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

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

Miscellanea INGV

ISSN 2039-6651

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

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

Coordinamento editoriale e impaginazione

Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2017 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

<http://www.ingv.it>



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia