AGATAS APS

Ordine dei Geologi
Trentino Alto Adige - Südtirol

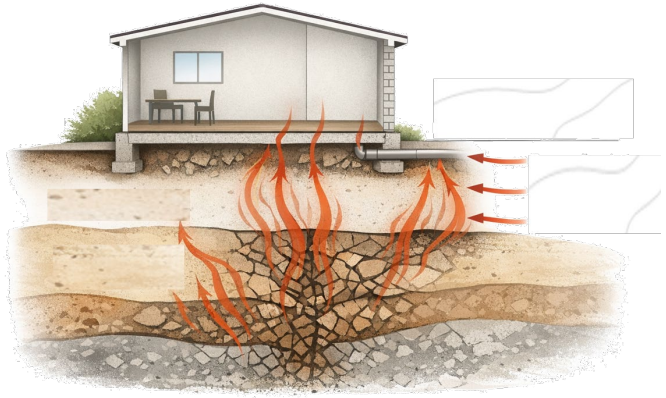
ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

Il Radon nella pianificazione urbanistica: obblighi di legge, matrici geologiche e sicurezza indoor

Centro Congressi Interbrennero – Interporto di Trento, 29 Ottobre 2026

I gas del suolo raccontano il territorio.

Applicazioni ambientali del soil gas e valutazione del potenziale geogenico di radon, dalla scala regionale al sito edilizio.



Alessandra Sciarra, Primo Ricercatore
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV)

Sotto i nostri piedi: un sistema di gas in movimento

ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

Nei livelli più superficiali del suolo viene stabilito un **equilibrio dinamico** tra suolo e atmosfera

I gas occupano pori, fratture e discontinuità

Produzione, consumo e trasporto modificano la composizione

Il segnale misurato integra processi geologici e ambientali



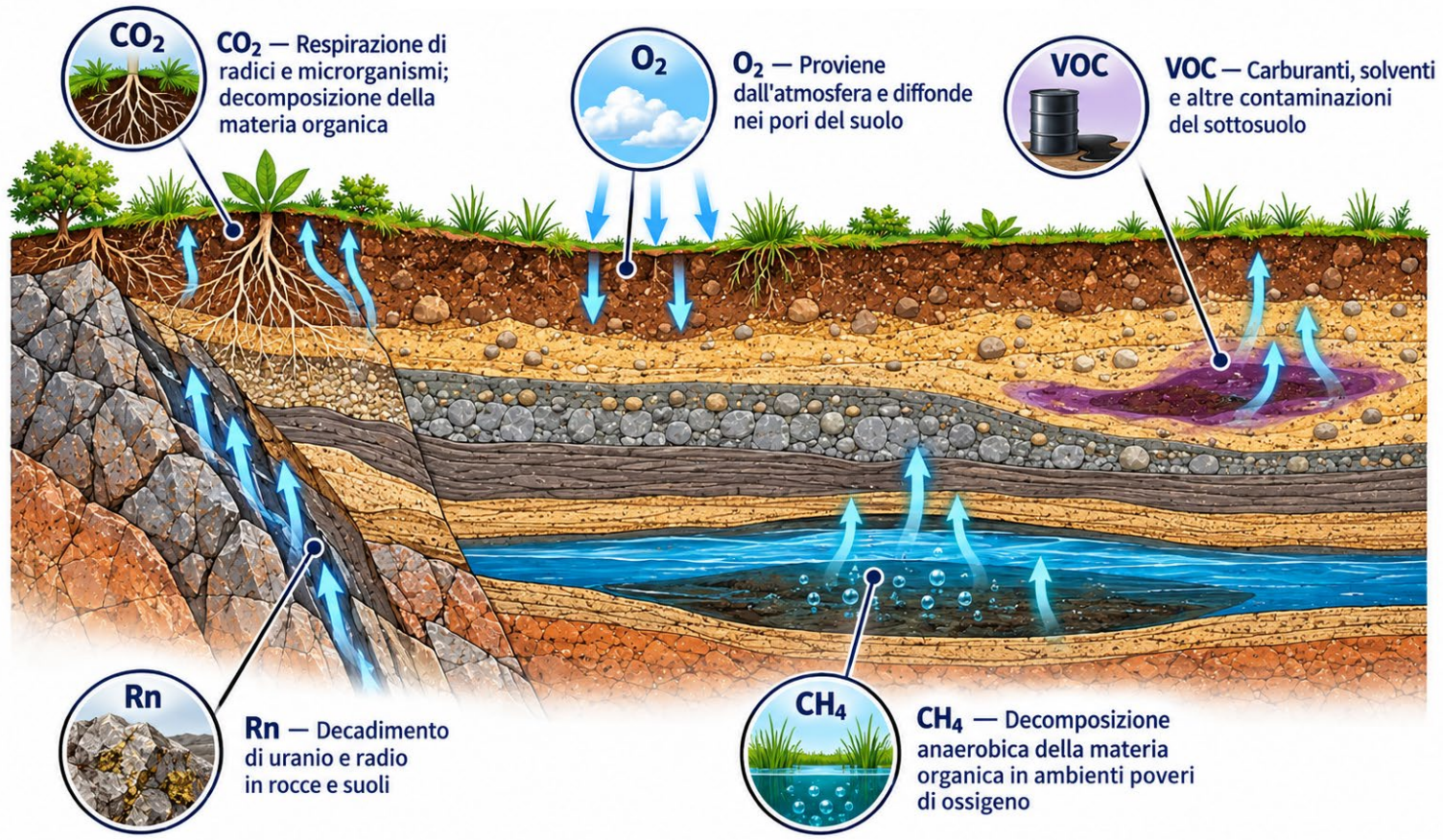
La raccolta di un elevato numero di campioni dalla zona vadosa del suolo e le analisi di più specie gassose (geo-gas e elementi in traccia) possono fornire importanti informazioni sui processi che avvengono nel sottosuolo e sulle condizioni ambientali al contorno.

Quali gas misuriamo e che cosa ci possono raccontare

ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

Nei gas del suolo possono coesistere componenti con origini e significati diversi.

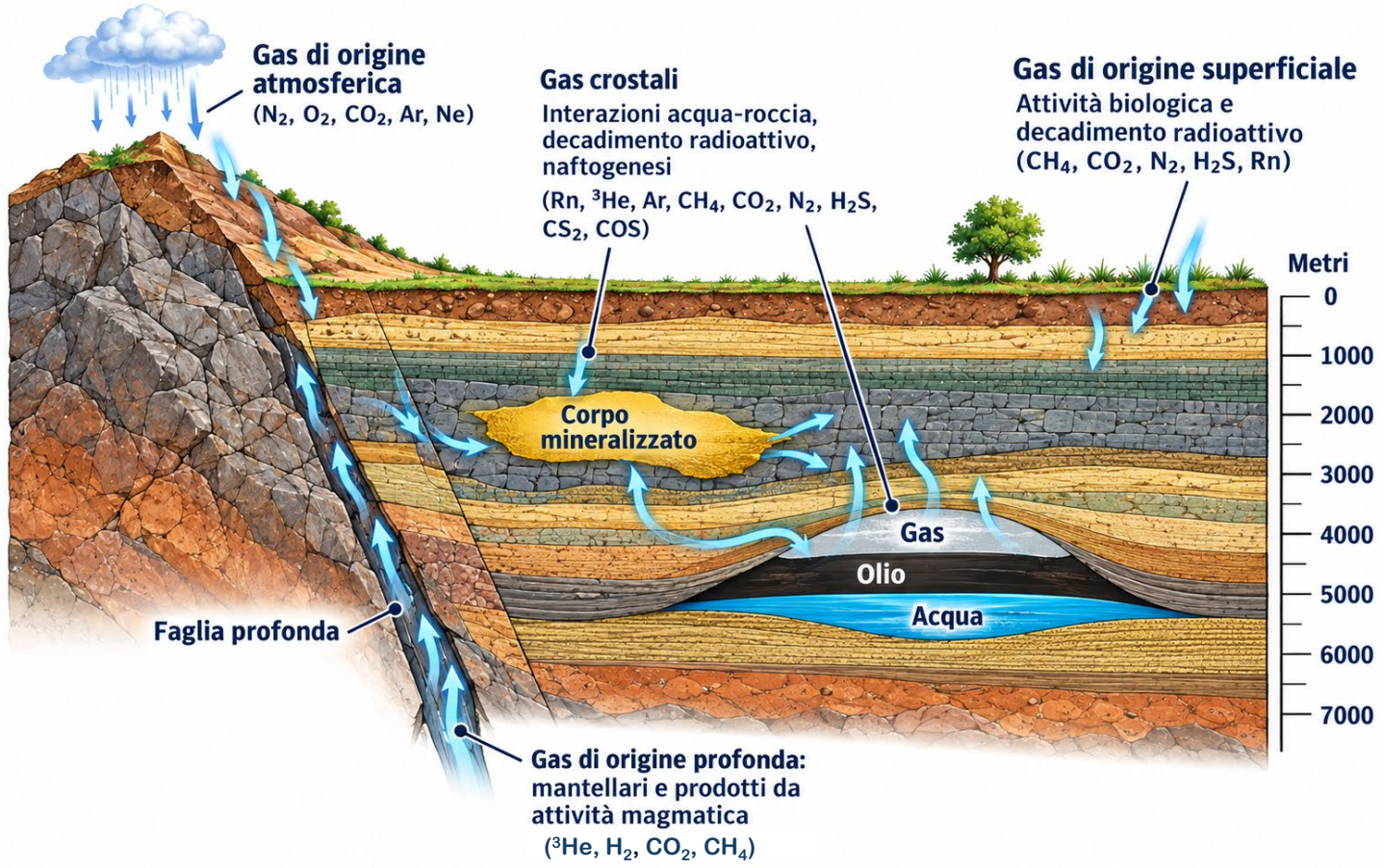
- CO_2: respirazione del suolo, degradazione e degassamento
- O_2: aerazione, consumo biologico e reazioni ossidative
- CH_4: processi biogenici, termogenici e possibili perdite
- ^{222}Rn e ^{220}Rn: sorgenti radioattive e trasporto
- VOC e altri gas: possibili indicatori di contaminazione



Origine dei gas nel suolo

I processi di degassamento terrestre determinano la risalita di un microflusso di geogas attraverso le faglie e le fratture presenti nella crosta, principalmente in aree tettonicamente attive, ma anche in aree più stabili. In base alla profondità della sorgente, è possibile definire l'origine dei gas: superficiale, crostale e profonda.

Attraverso lo studio della distribuzione superficiale dei gas endogeni (CO_2, CH_4, Rn, He) è possibile ottenere informazioni sui processi geologici che danno origine alla produzione di gas in profondità e, soprattutto, sulle strutture tettoniche responsabili della migrazione dei gas verso la superficie.

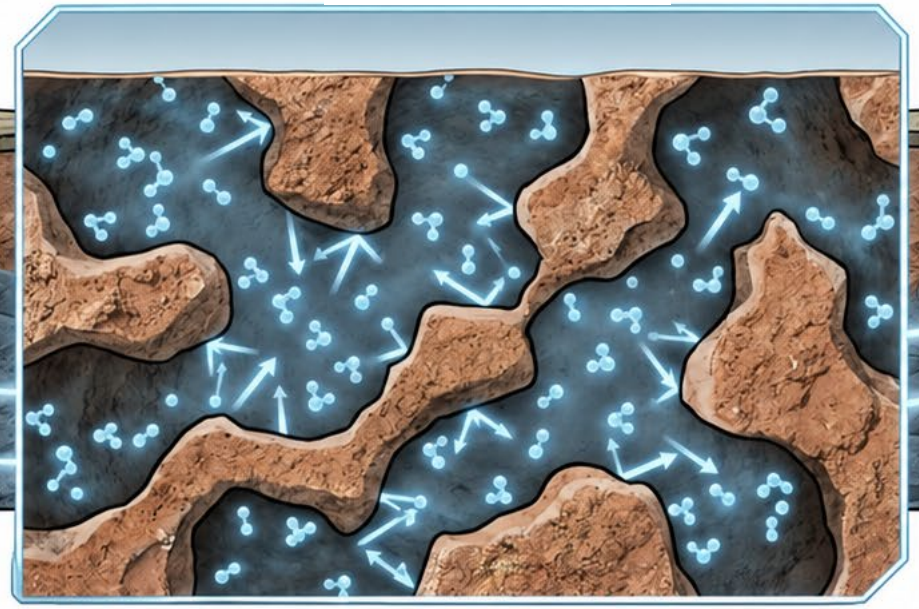


Dalla sorgente alla superficie: come si muovono i gas nel sottosuolo

ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

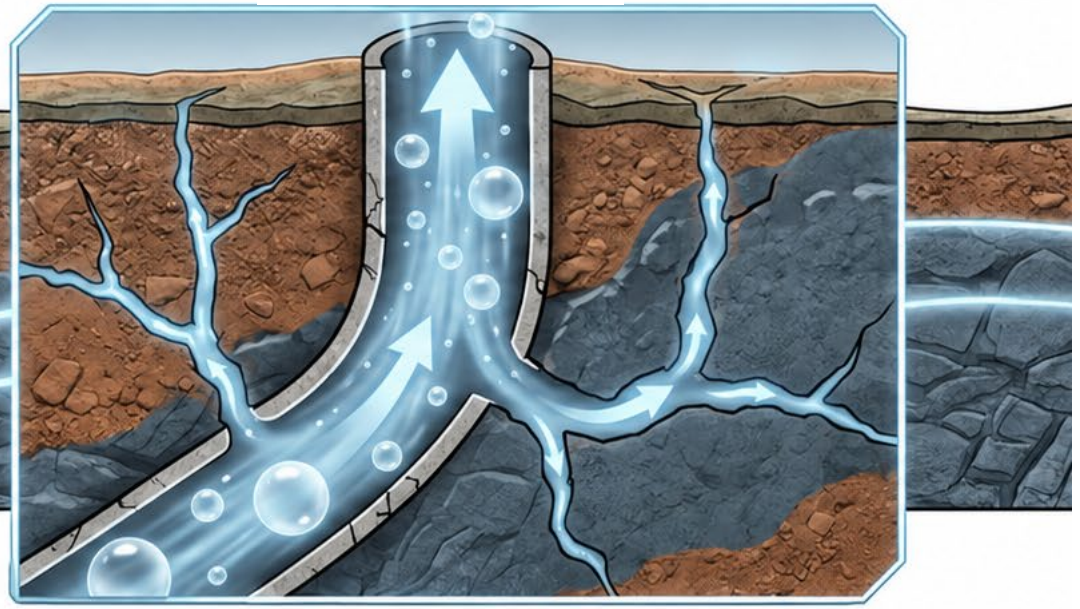
Due meccanismi di trasporto possono agire contemporaneamente

Diffusione



Guidata dal gradiente di concentrazione. Il movimento molecolare è determinato dalla porosità connessa, dalla tortuosità e dalla saturazione d'acqua nei pori. È un processo lento.

Advezione



Guidata da un gradiente di pressione. Una differenza di pressione muove il gas in massa attraverso pori e fratture. Per il radon (tempi di decadimento brevi), l'avvezione è cruciale per raggiungere la superficie.

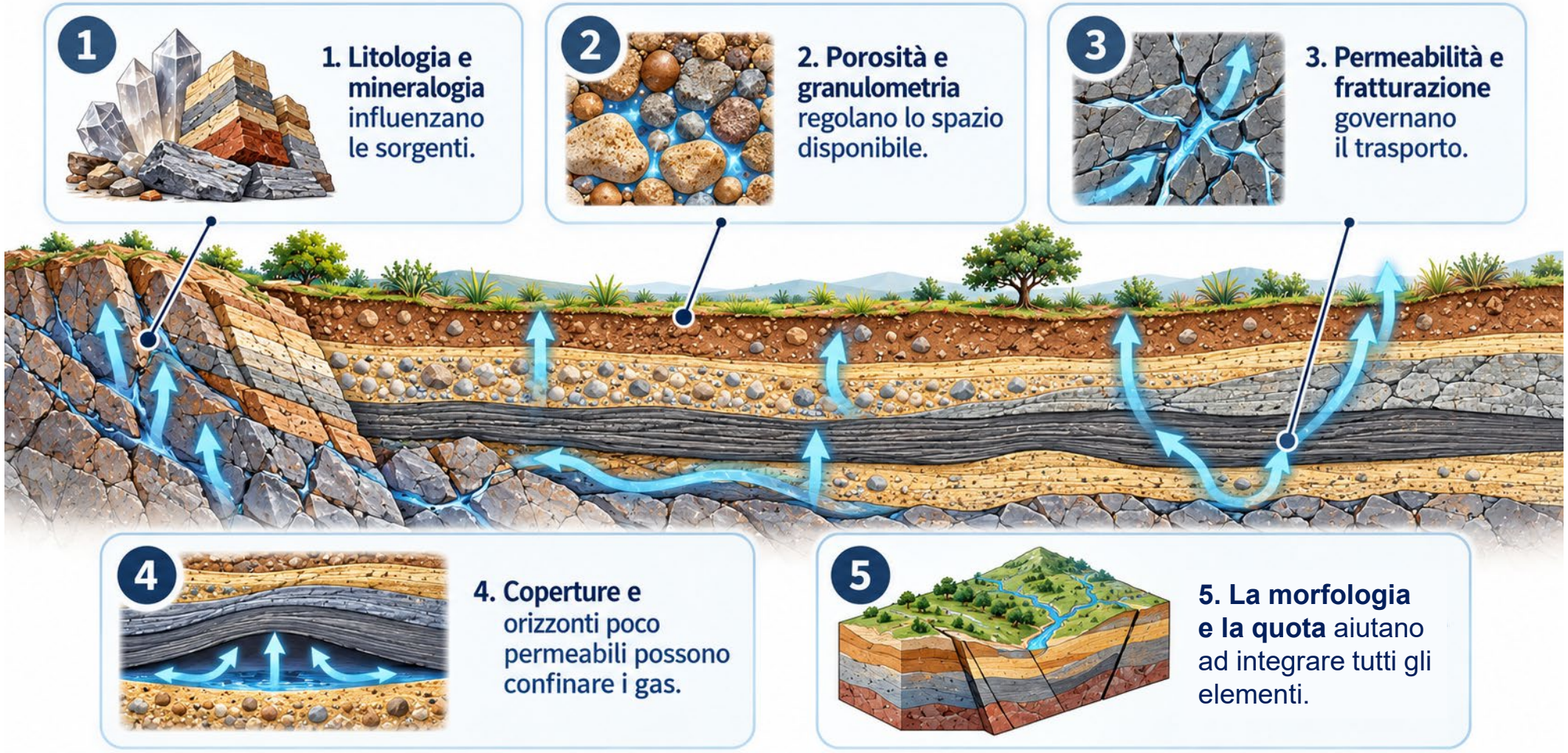
Per il radon, il decadimento limita il tempo disponibile per migrare

Emanazione alla scala del grano minerale



Litologia, fratture e permeabilità: le chiavi geologiche del segnale

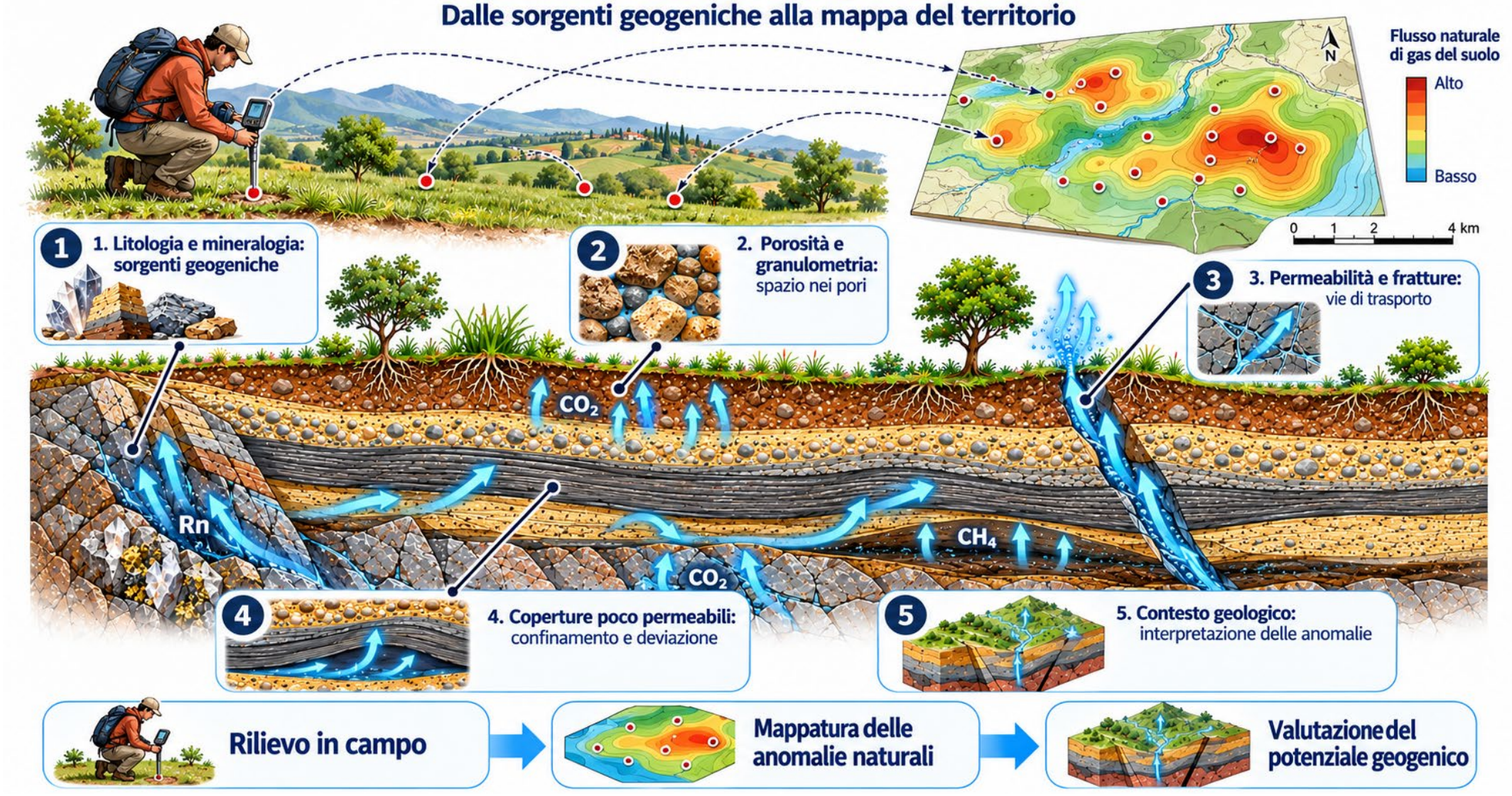
ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA



La stessa litologia può produrre segnali diversi in condizioni strutturali e idriche diverse

Le applicazioni ambientali: contaminazione, migrazione e perdite di gas

ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA



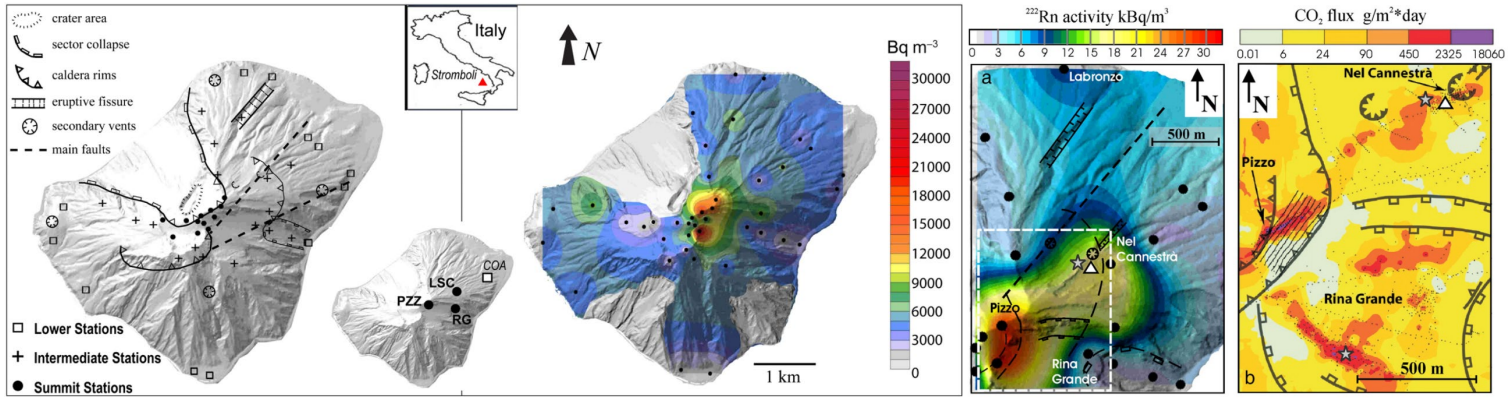
Le mappe di gas possono aiutare a riconoscere aree di emissione diffusa, percorsi preferenziali e variazioni legate alla struttura geologica.

Esempio di degassamento naturale

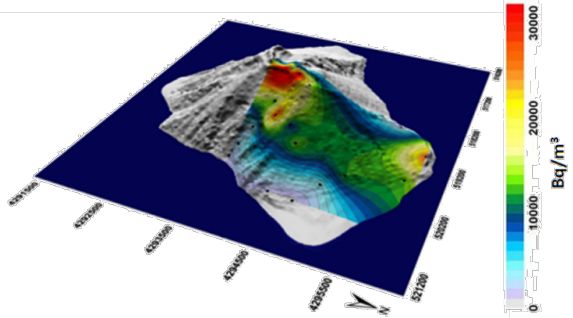
ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

Stromboli: monitoraggio discreto

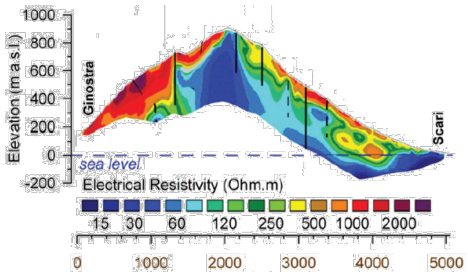
Nei vulcani a condotto aperto, nonostante il degassamento avvenga principalmente dal cratere, la mappatura di Rn e CO_2 nel suolo permette di identificare la presenza di strutture di degassamento diffuso.



(Cigolini et al., 2018)



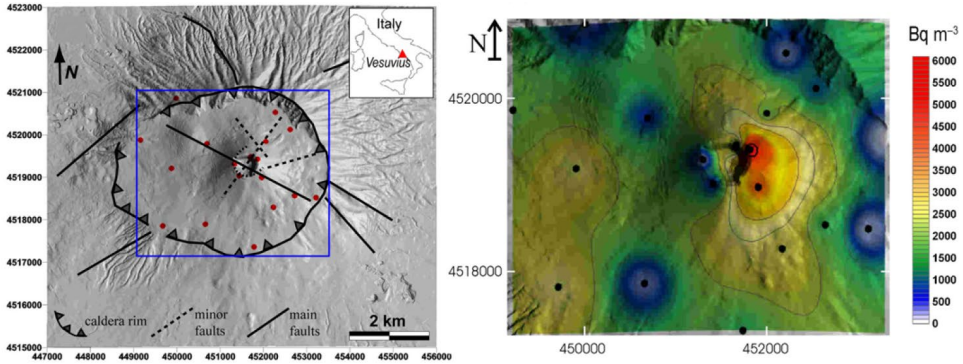
(Cigolini et al., 2018)



(Revil et al., 2011)

Vesuvio: monitoraggio discreto

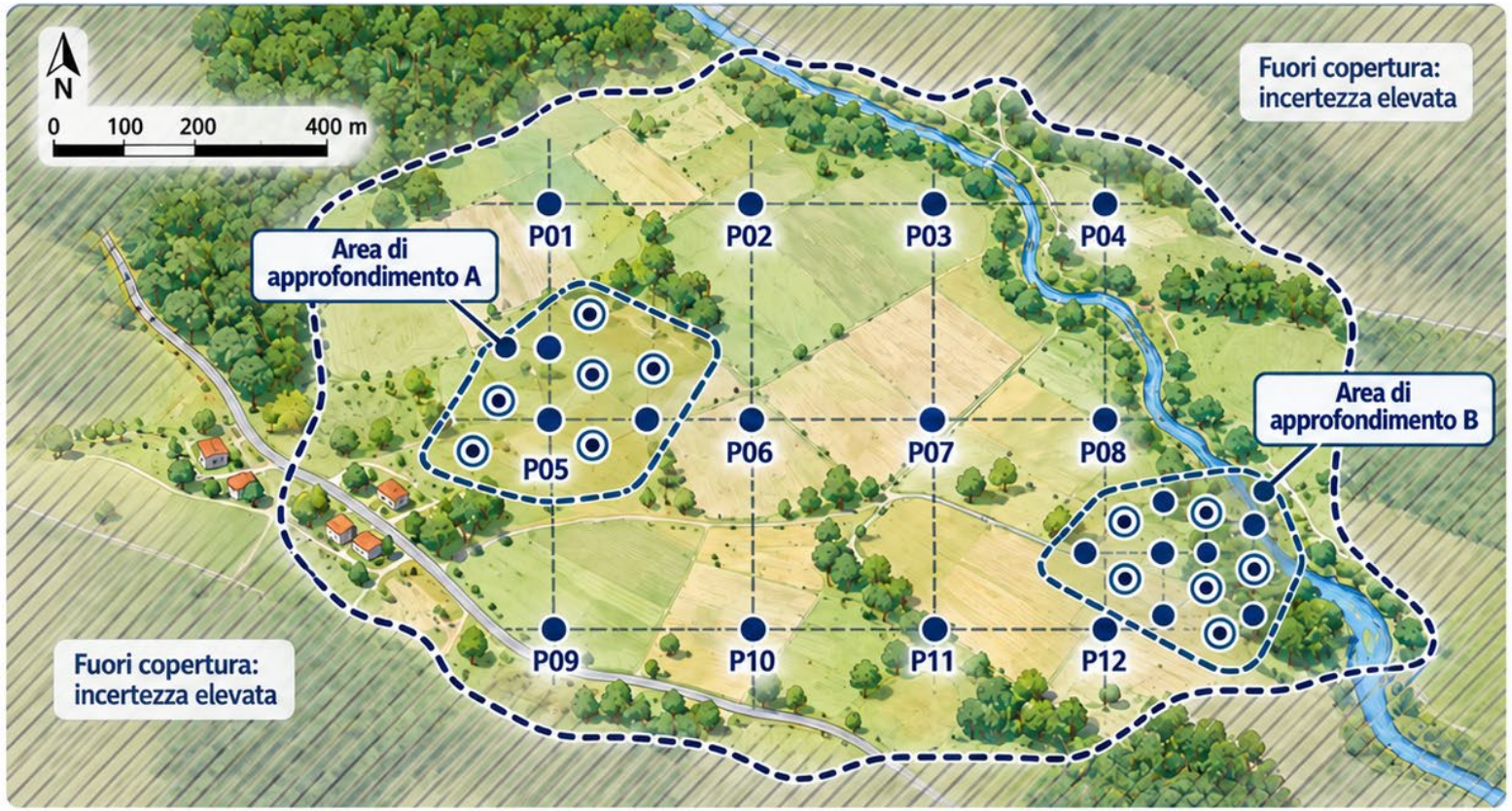
Nei vulcani a condotto chiuso la risalita di radon avviene principalmente attraverso le strutture di degassamento diffuso, evidenza superficiale del sistema idrotermale, ricco in fluidi (carriers), e dei sistemi di faglie e fratture.



(Cigolini et al., 2018)

Dai punti di misura alla mappa: progettare un’indagine soil gas

ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA



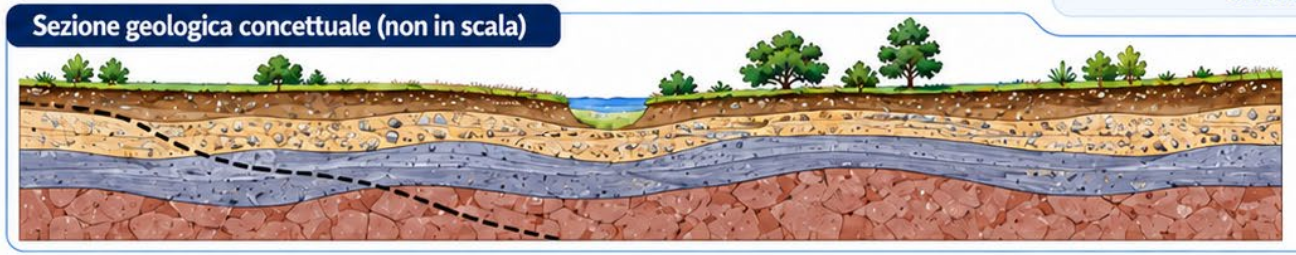
Passi per progettare l’indagine

1. Obiettivi, scala e modello concettuale
2. Selezionare punti e profondità di campionamento
3. **Protocollo coerente:** misure confrontabili
4. Registrare profondità, meteo, condizioni del terreno e operative
5. Integrare geologia, morfologia e uso del suolo
6. Verificare copertura spaziale e qualità dei dati
7. **Mappa e incertezza:** mostrare punti, copertura e limiti dell’interpolazione

Legenda

- Punto di misura
- Punto/area da approfondire
- Copertura dei punti misurati
- Tratteggio: copertura insufficiente

Sezione geologica concettuale (non in scala)



La densità di misura deve poter risolvere l’eterogeneità che interessa la decisione

Misurare bene: profondità, umidità e condizioni di campionamento

La qualità del dato dipende dalla corretta scelta della strumentazione e dalla procedura di campionamento

- Definire e documentare la profondità della sonda
- Controllare tenuta del circuito e possibili diluizioni, controllare spurgo, portata e depressione
- Registrare umidita e condizioni del terreno, piogge recenti, temperatura, pressione
- Rispettare tempi di stabilizzazione e misura
- Applicare controlli di qualità e misure replicate



Un prelievo non riuscito in terreno saturo non equivale a radon assente o uguale a zero

Misure accurate richiedono protocolli standardizzati e controlli di qualità

Un’anomalia non è ancora una spiegazione: interpretare i dati

ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

Un valore elevato diventa informazione quando supera i controlli e trova riscontri indipendenti.

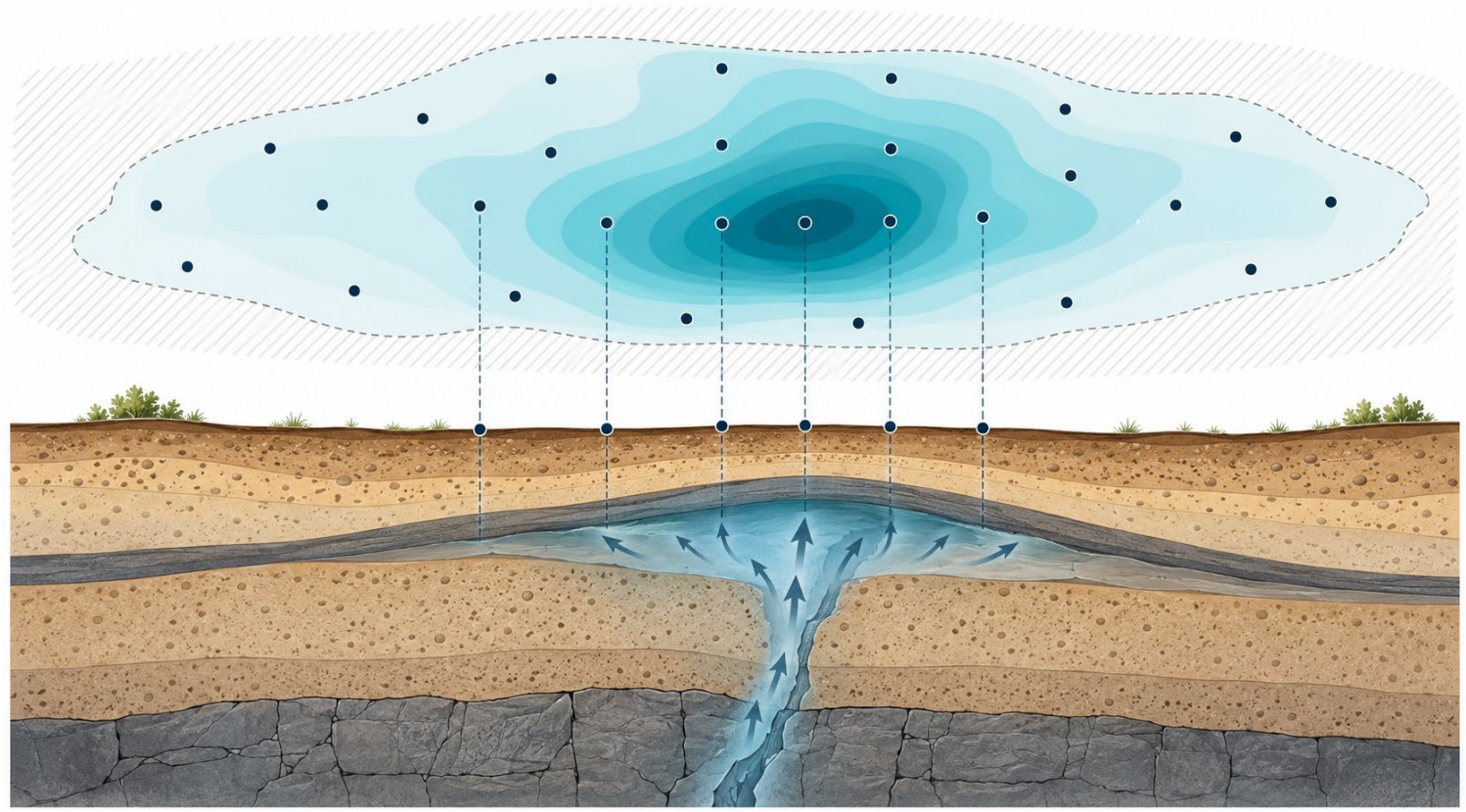
Prima: il dato è affidabile?

- Tenuta della sonda e del circuito
- Controllo strumentale e tempi di misura
- Confrontabilità con il fondo locale: distinguere variabilità naturale e anomalie significative
- Ripetibilità e incertezza, considerando condizioni temporali e meteorologiche

Poi: quale ipotesi lo spiega?

- Produzione locale o apporto migrato
- Coerenza con la geologia e con altri gas
- Ripetizione delle misure e punti di verifica
- Formulare ipotesi verificabili con indagini mirate

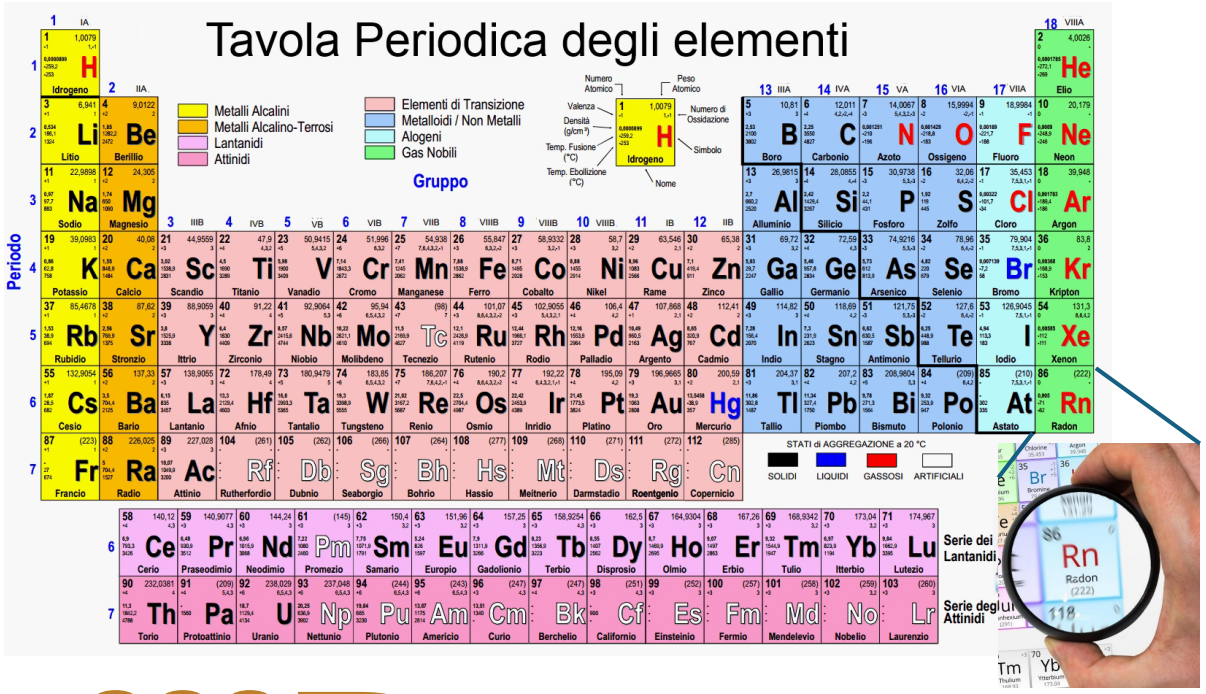
Mappa interpolata con anomalia evidenziata



Una co-anomalia radon-CO_2 suggerisce un trasporto accoppiato ma non costituisce prova diretta dell'origine profonda del gas. Sono necessari dati isotopici e sempre un approccio multidisciplinare.

Il radon nel suolo: origine, emanazione e trasporto

ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA



^{222}Rn 3,82 giorni

tempo di dimezzamento

Il ^{222}Rn deriva dal decadimento del ^{226}Ra nella serie dell'^{238}U

la sua concentrazione nel suolo riflette il bilancio tra tre processi:

Produzione

Il radio presente nei minerali genera radon.

Emanazione

Una frazione degli atomi prodotti passa dal solido ai pori.

Trasporto ed esalazione

Il gas migra nel terreno e può attraversarne la superficie.
Diffusione e advezione ne determinano il trasporto.
La concentrazione dipende da sorgente e condizioni del mezzo

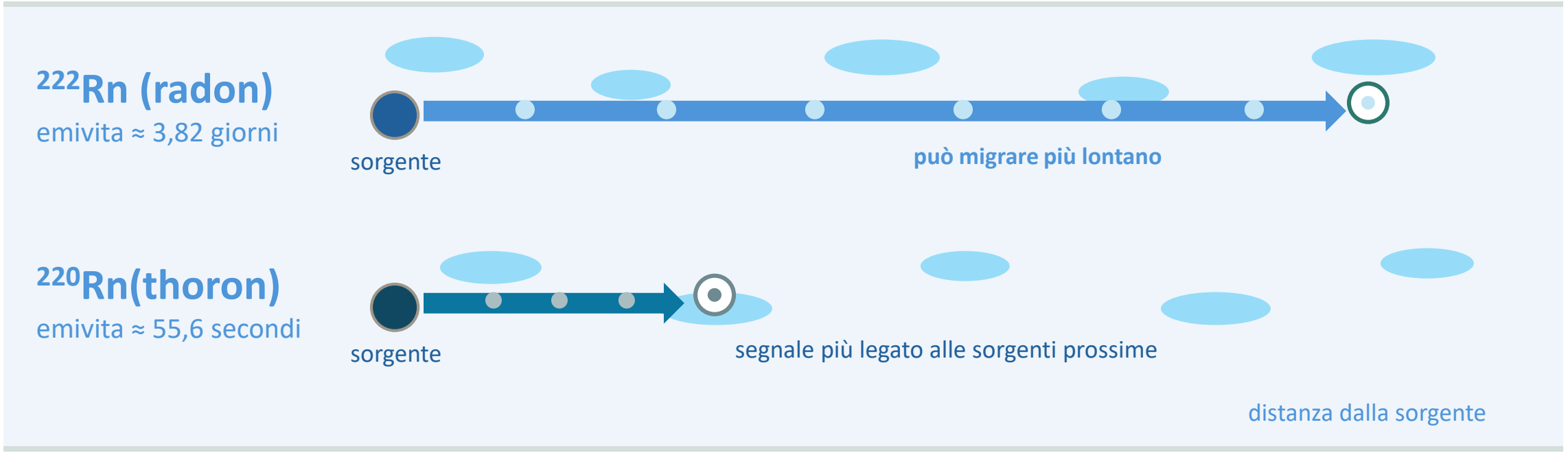
Chimicamente inerte, costituisce un tracciante fisico ideale.

Radon e thoron: informazioni complementari sul sottosuolo

ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

L'emivita condiziona la distanza percorribile prima del decadimento

LUNGHEZZA DI MIGRAZIONE RELATIVA DALLA SORGENTE



Schema qualitativo, non in scala. La migrazione effettiva dipende anche dalle condizioni del suolo.

Il thoron risente maggiormente delle sorgenti vicine; il radon può migrare su distanze maggiori.

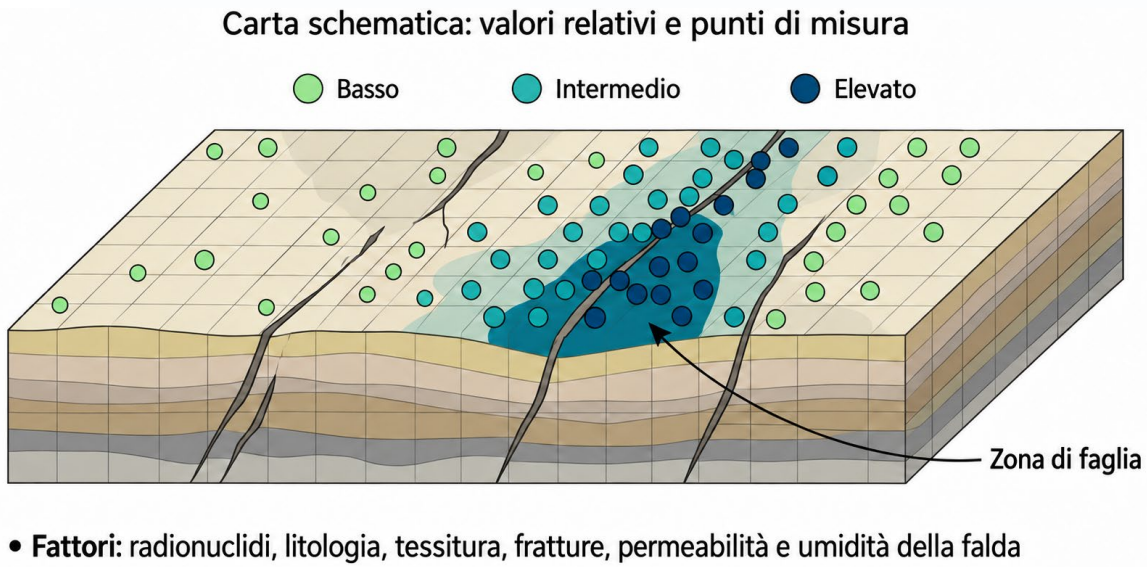
Il rapporto ^{220}Rn/^{222}Rn permette di valutare il contributo locale rispetto al trasporto profondo, a patto di impiegare strumenti capaci di separare gli isotopi (come lo spettrometro alfa RAD7/RAD8) e controlli rigorosi sul flusso.

Perché il radon varia nello spazio e nel tempo

ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

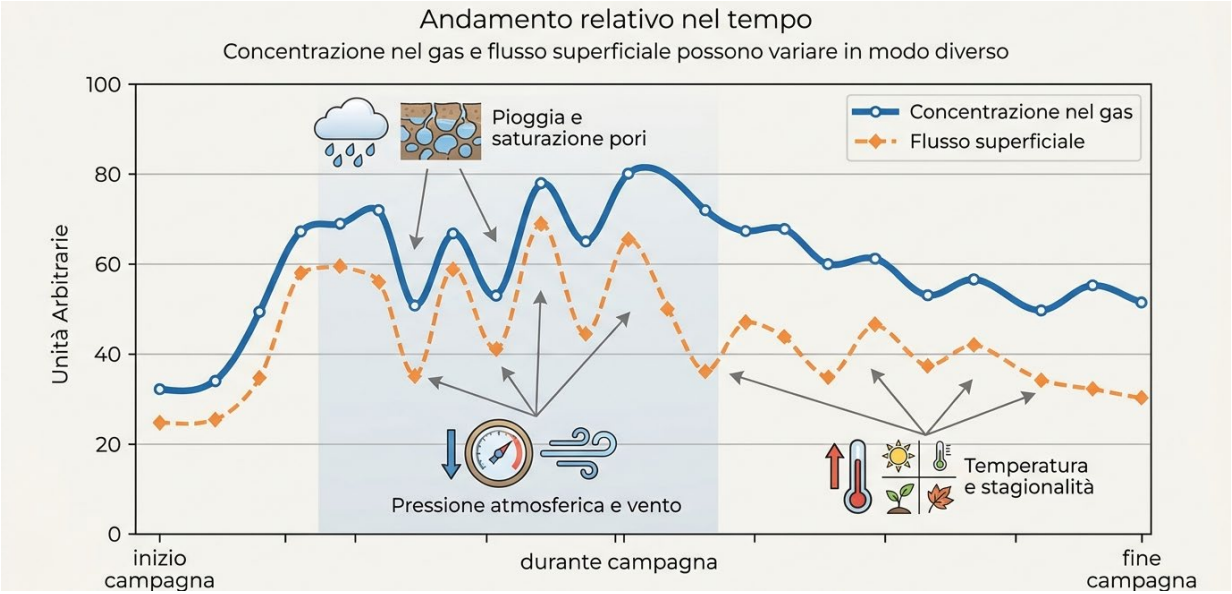
La distribuzione del radon nel suolo è eterogenea nello spazio e variabile nel tempo.

Variabilità spaziale



Radionuclidi, litologia, mineralogia e alterazione
Tessitura, fratture, riporti e permeabilità
Umidità, saturazione e profondità della falda

Variabilità temporale



Pioggia e saturazione dei pori · pressione atmosferica e vento
Temperatura, essiccamento, stagionalità e condizioni di misura

Concentrazione nel gas e flusso superficiale possono variare in modo diverso.

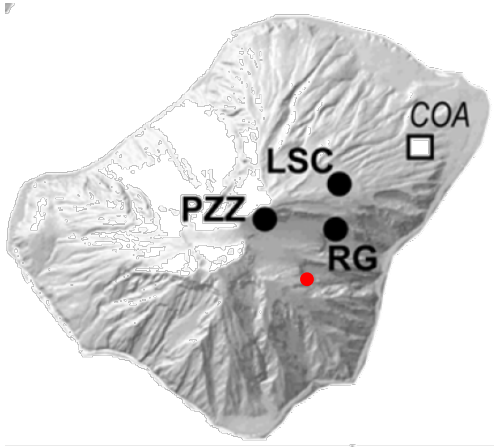
Una mappa acquisita in una campagna descrive anche le condizioni di quella campagna

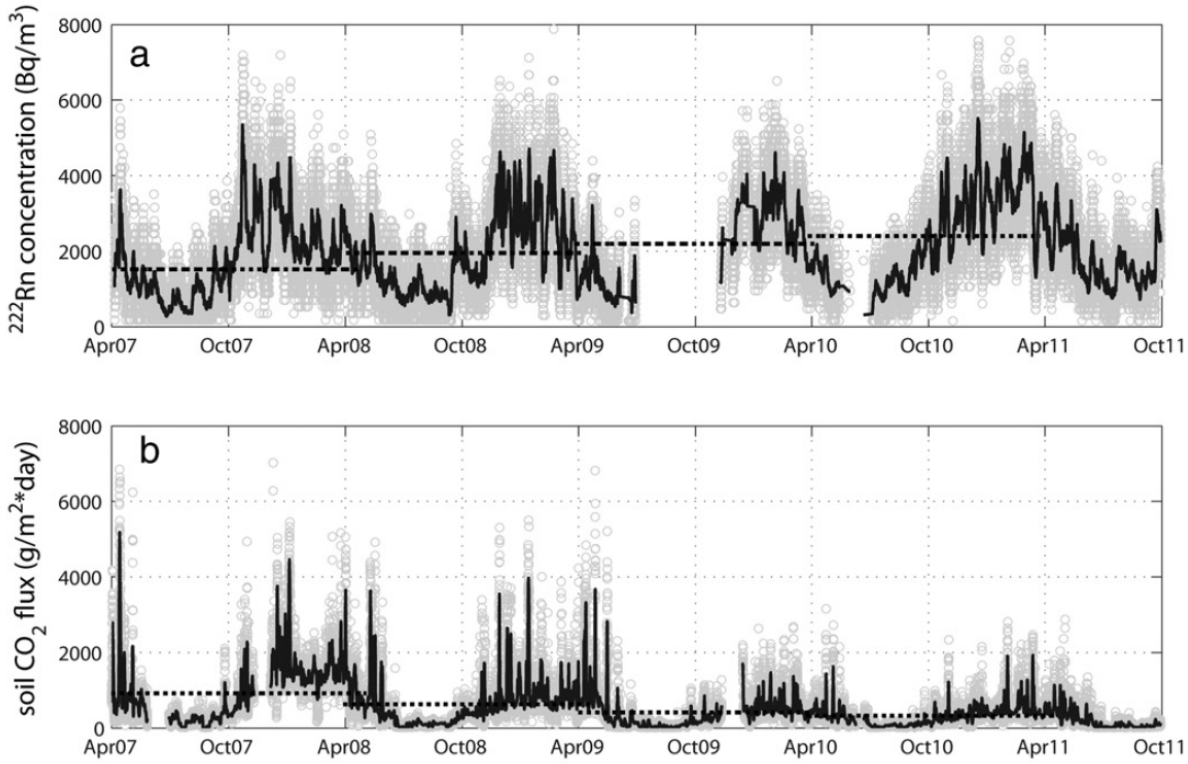
Monitoraggio continuo: distinguere variabilità ambientale e segnali da approfondire

ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

Stromboli: monitoraggio in continuo

Il monitoraggio in continuo del Rn e della CO_2 mette in evidenza le variazioni periodiche (giornaliere e stagionali) dovute ai fattori meteo e permette l'individuazione delle variazioni dovute all'attività vulcanica





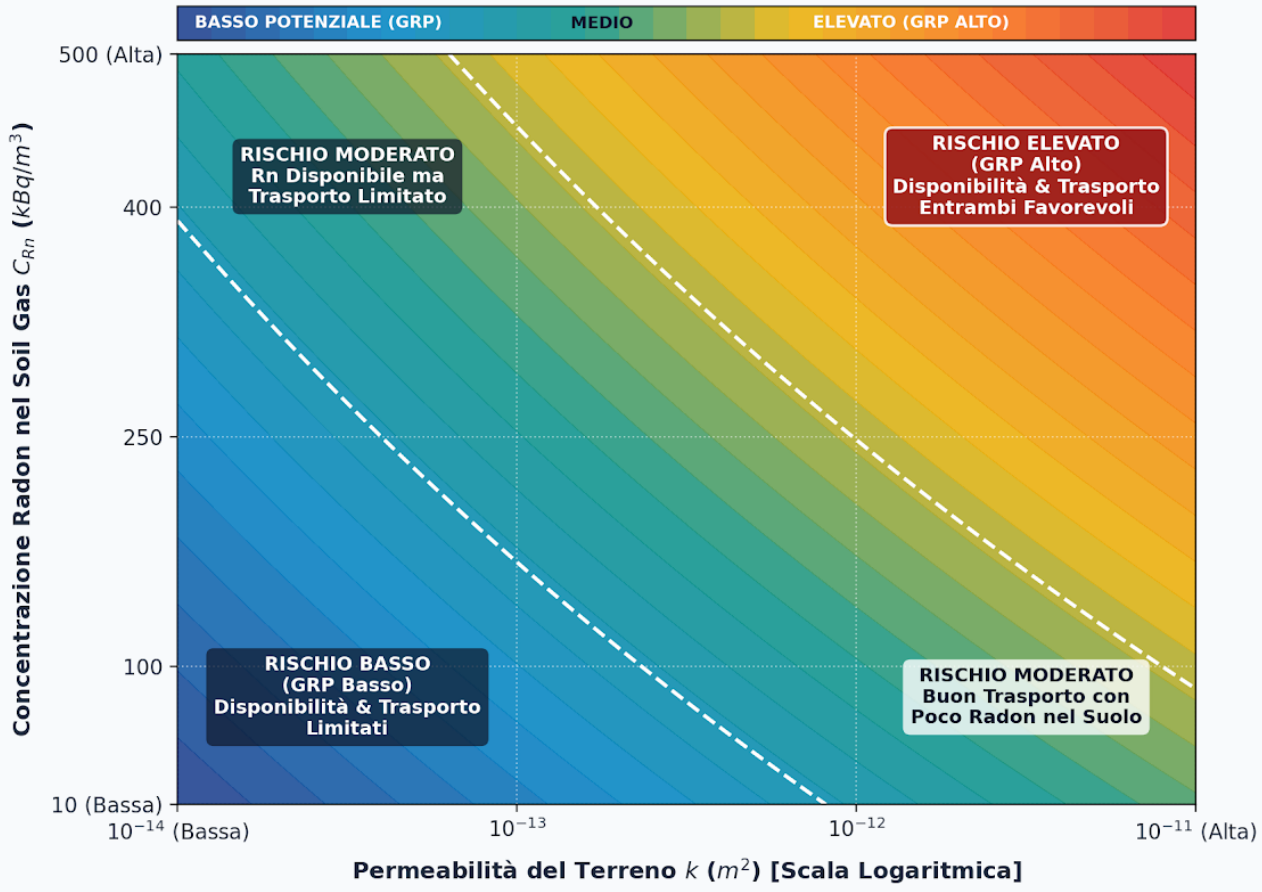
(Laiolo et al., 2016)

I due segnali rispondono in modo diverso alle variabili meteo (l'umidità del suolo per il radon, il vento per la CO_2).
La correzione delle serie temporali dai parametri meteorologici è indispensabile prima di attribuire un picco a variazioni della sorgente profonda.

Il potenziale geogenico di radon: oltre la sola concentrazione nel suolo

ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

Il potenziale geogenico di radon esprime la predisposizione naturale del terreno a fornire radon, in funzione della sua disponibilità nel sottosuolo e della capacità del gas di migrare verso la superficie.



Come interpretare il Potenziale Geogenico

PREDISPOSIZIONE NATURALE

Esprime la capacità originaria del terreno di fornire Radon in superficie, integrando disponibilità e mobilità.

DUE PARAMETRI CHIAVE

La sola concentrazione di Rn nel suolo non basta: la permeabilità (k) determina se il gas può migrare verso l'edificio.

RUOLO DELLA GEOLOGIA

Litologia, grado di fratturazione, alterazione e saturazione idrica spiegano come i due parametri si combinano.

MODELLI E CLASSIFICAZIONE

Non esistono soglie universali rigide: i metodi analitici dipendono dal modello e dalla scala d'indagine.

DISTINZIONE CON IL RADON INDOOR

Il GRP valuta la sorgente del terreno: NON coincide direttamente con il Radon Indoor, che dipende dall'edificio.

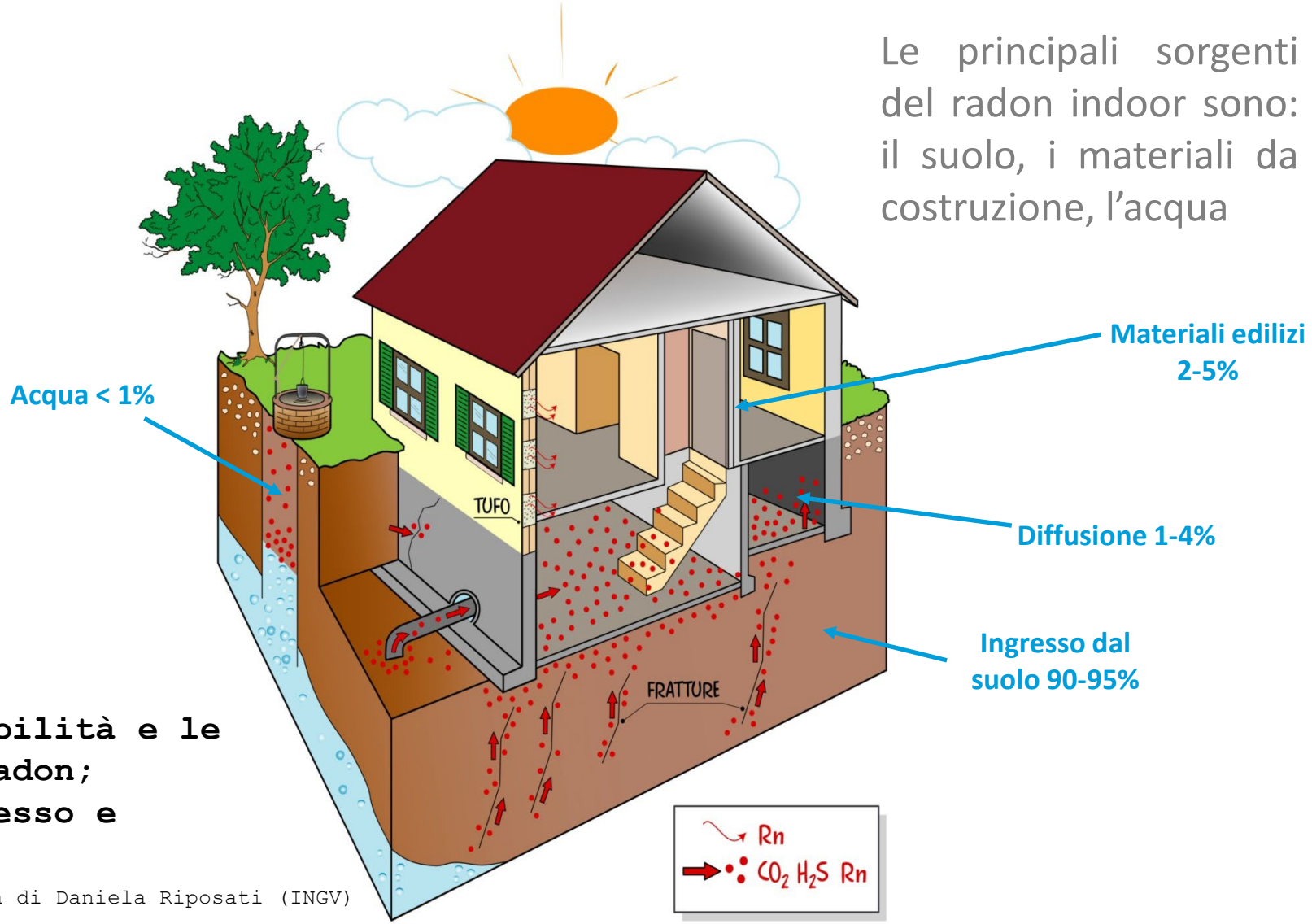
Concentrazione e permeabilità sono parametri chiave: la geologia spiega come si combinano.

Dal suolo all'edificio: il ruolo delle caratteristiche costruttive

ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

- Il radon può entrare attraverso fessure e attraversamenti
- La depressione interna può favorire l'ingresso
- Fondazioni e contatto terreno-edificio influenzano il flusso
- Ventilazione e ricambi d'aria condizionano l'accumulo
- Edifici vicini possono presentare concentrazioni differenti
- Per effetto dei flussi d'acqua in bagno, la concentrazione di radon può aumentare anche di 40 volte

Le principali sorgenti del radon indoor sono: il suolo, i materiali da costruzione, l'acqua



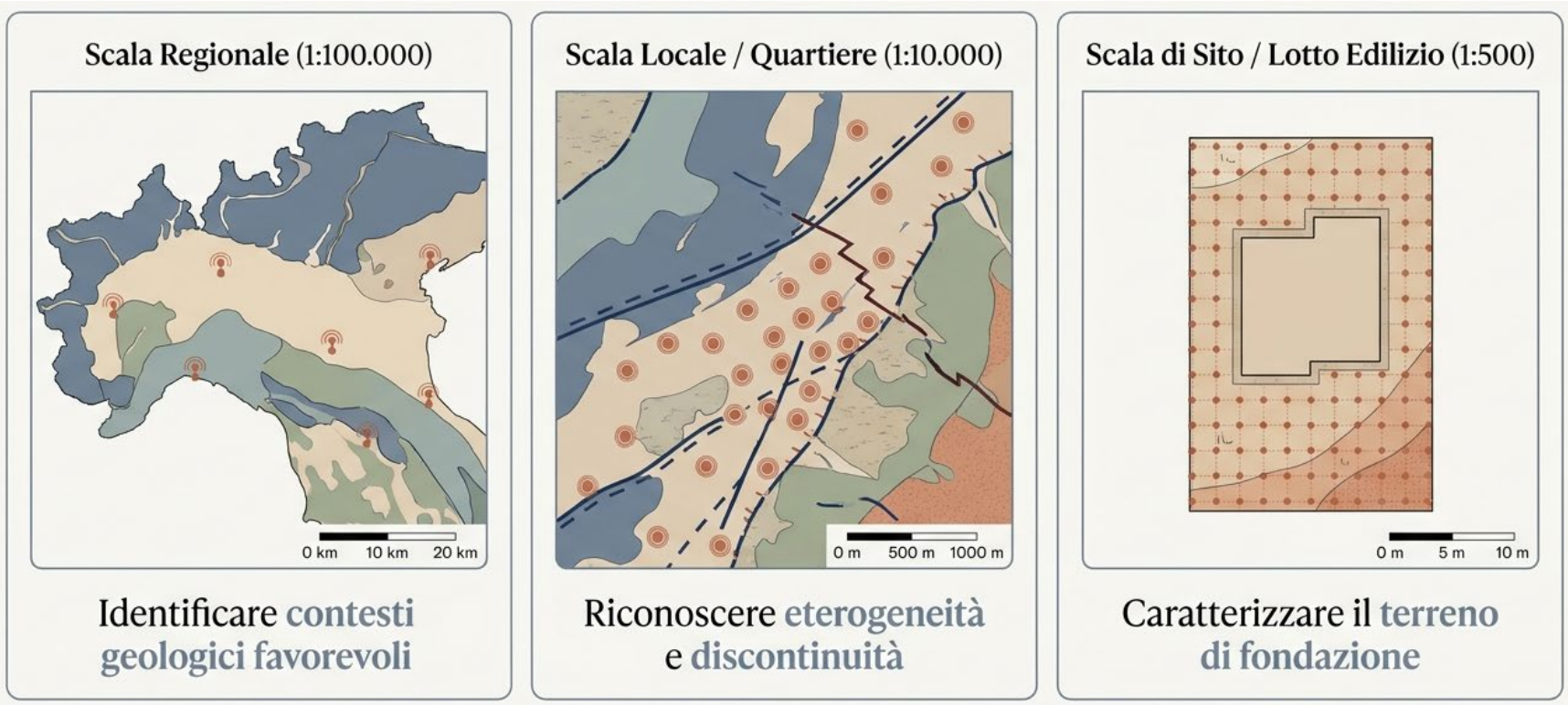
Il terreno determina la disponibilità e le possibilità di migrazione del radon; l'edificio ne condiziona l'ingresso e l'accumulo.

Grafica a cura di Daniela Riposati (INGV)

Dalla scala regionale al sito: cambiano le domande e il disegno d'indagine

ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

La stessa domanda sul radon cambia quando cambiamo scala.
La risoluzione deve seguire la decisione da prendere.

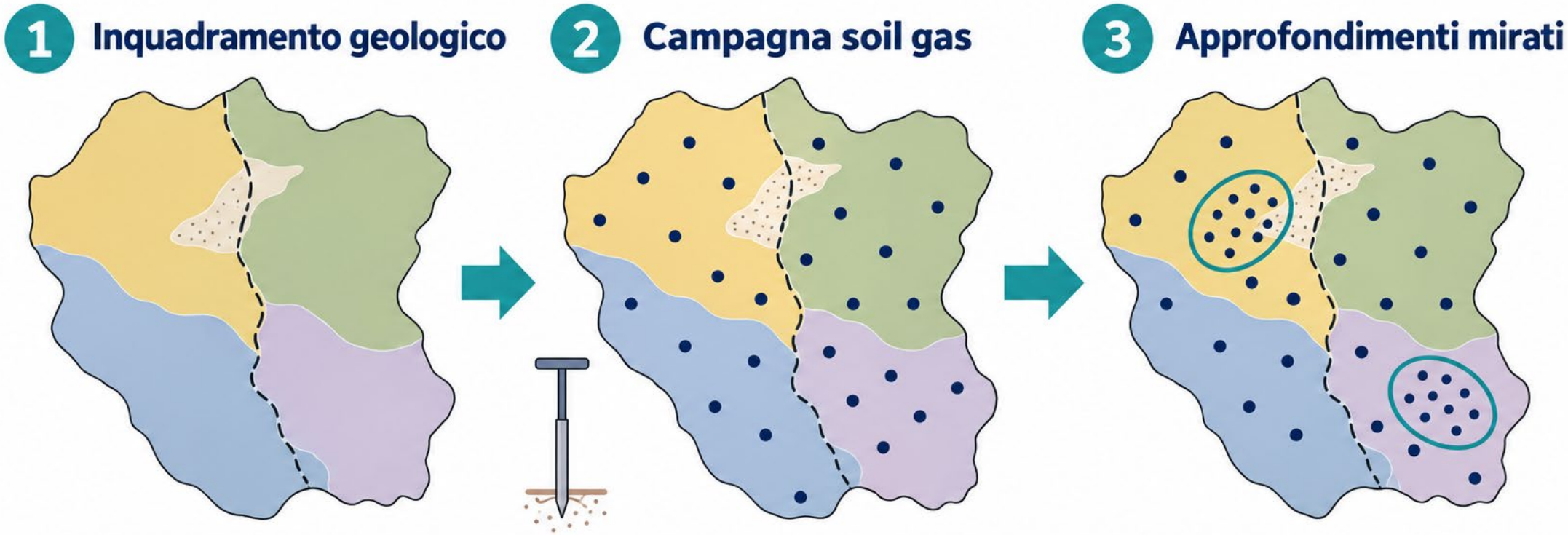


- Scala regionale: identificare contesti geologici che possono favorire una maggiore disponibilità o migrazione
- Scala locale: riconoscere eterogeneità e discontinuità, contrasti litologici e vie preferenziali
- Scala di sito: caratterizzare il terreno di fondazione
- Densità e distribuzione delle misure cambiano con la scala
- Ogni scala richiede un livello appropriato di dettaglio

Una carta regionale non attribuisce automaticamente una classe al singolo lotto.

Scala regionale: riconoscere i contesti geologici favorevoli al radon

ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA



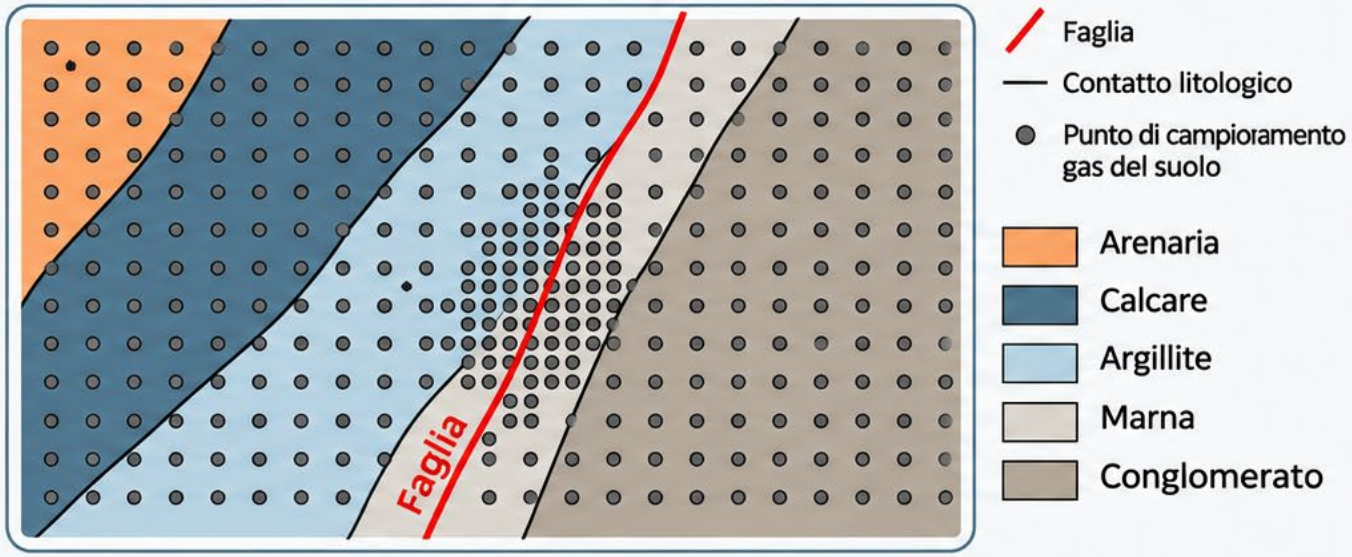
Le indagini regionali orientano la scelta delle aree da approfondire

Scala locale: individuare eterogeneità e vie di migrazione

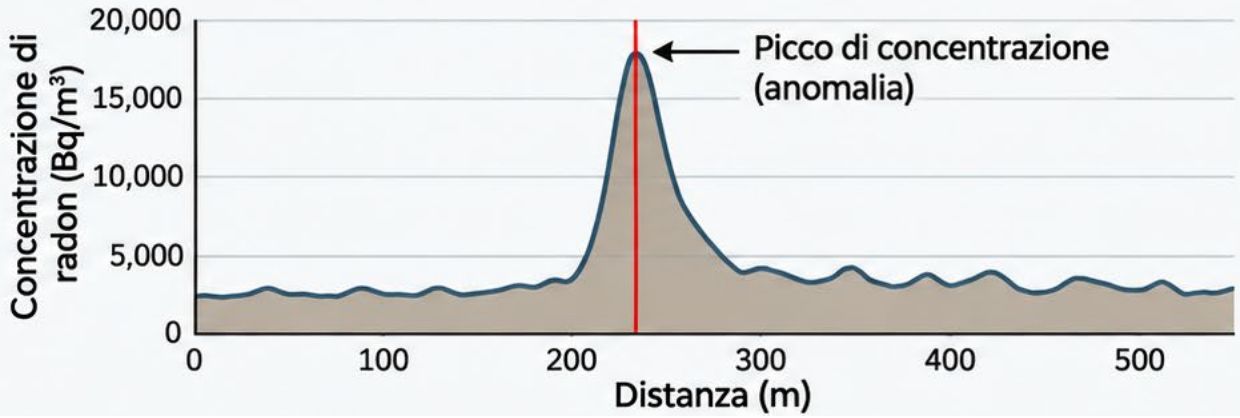
ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

Mappa Geologica Locale

Schema illustrativo



Profilo di concentrazione del radon

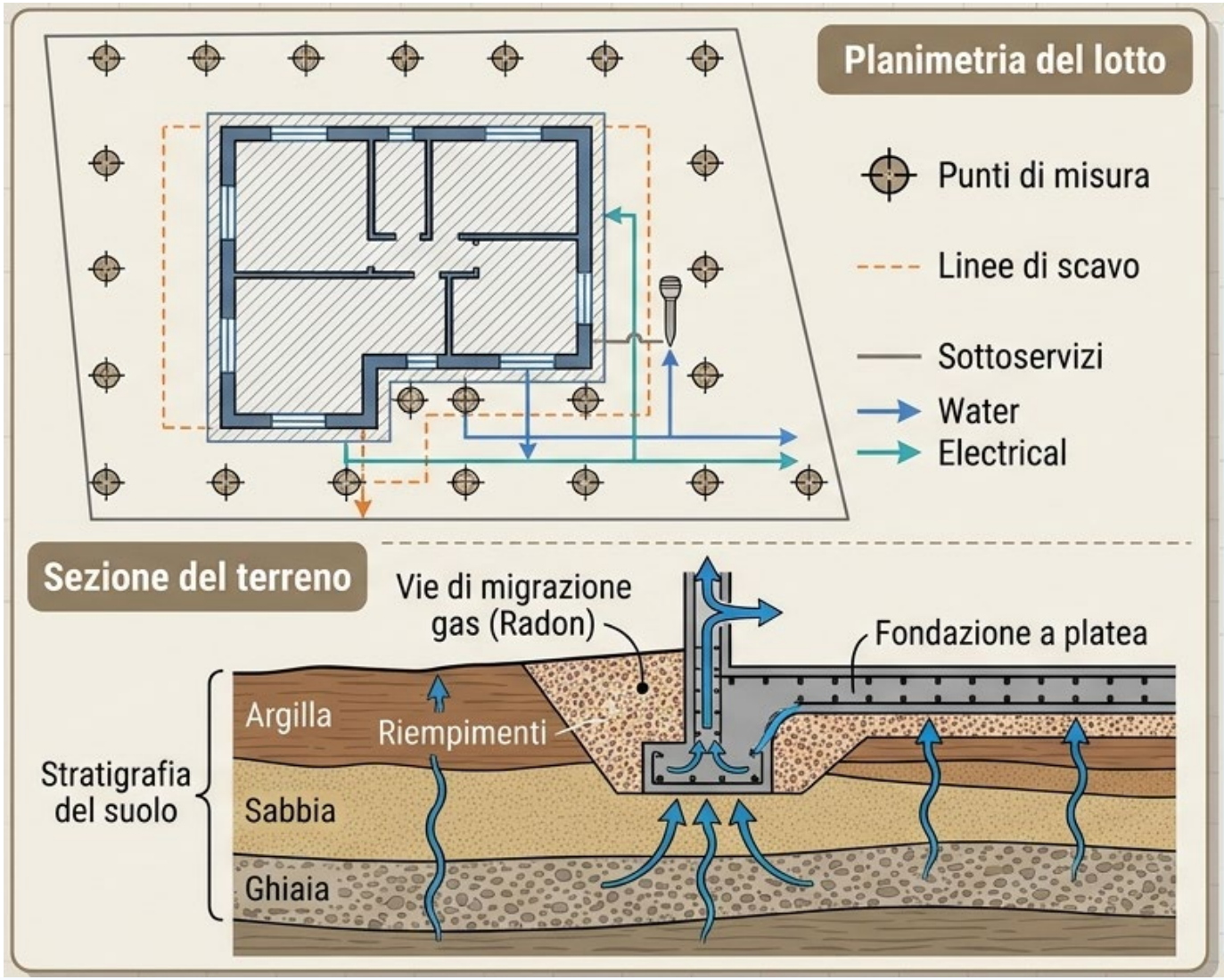


Metodologia chiave

- Individuare contatti litologici e strutture tettoniche
- Riconoscere variazioni di permeabilità
- Infittire il campionamento nelle aree di interesse
- Confrontare anomalie di radon e altri indicatori
- Validare le interpretazioni con informazioni indipendenti

Il sito edilizio: caratterizzare il terreno per orientare la prevenzione

ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA



Punti Chiave per l'Analisi del Sito

- Esaminare stratigrafia e caratteristiche del terreno
- Misurare radon e permeabilità con metodi coerenti
- Identificare riempimenti e discontinuità
- Considerare scavi, fondazioni e sottoservizi
- Fornire indicazioni per misure preventive proporzionate

L'obiettivo non è sostituire la misura indoor con una misura nel terreno, ma anticipare le condizioni da considerare e orientare le verifiche successive. Ogni conclusione va riferita alla porzione di sito effettivamente indagata.

Che cosa il soil gas permette di valutare e che cosa richiede misure indoor

ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

INDAGINE SOIL GAS

Soil Gas & Geologia



- **Caratteristiche della sorgente e del trasporto**

  Analisi della fonte di contaminazione gassosa e dei percorsi di migrazione sotterranea.



- **Permeabilità: predisposizione alla migrazione nel terreno**

  Valutazione della capacità del suolo di trasmettere fluidi gassosi e della vulnerabilità al trasporto.

MISURA INDOOR

Indoor & Edificio



- **Esposizione effettiva negli ambienti occupati**

  Quantificazione della concentrazione di gas radon, VOC, e altri inquinanti negli spazi di vita e lavoro.



- **Le misure indoor sono necessarie per valutare l'esposizione**

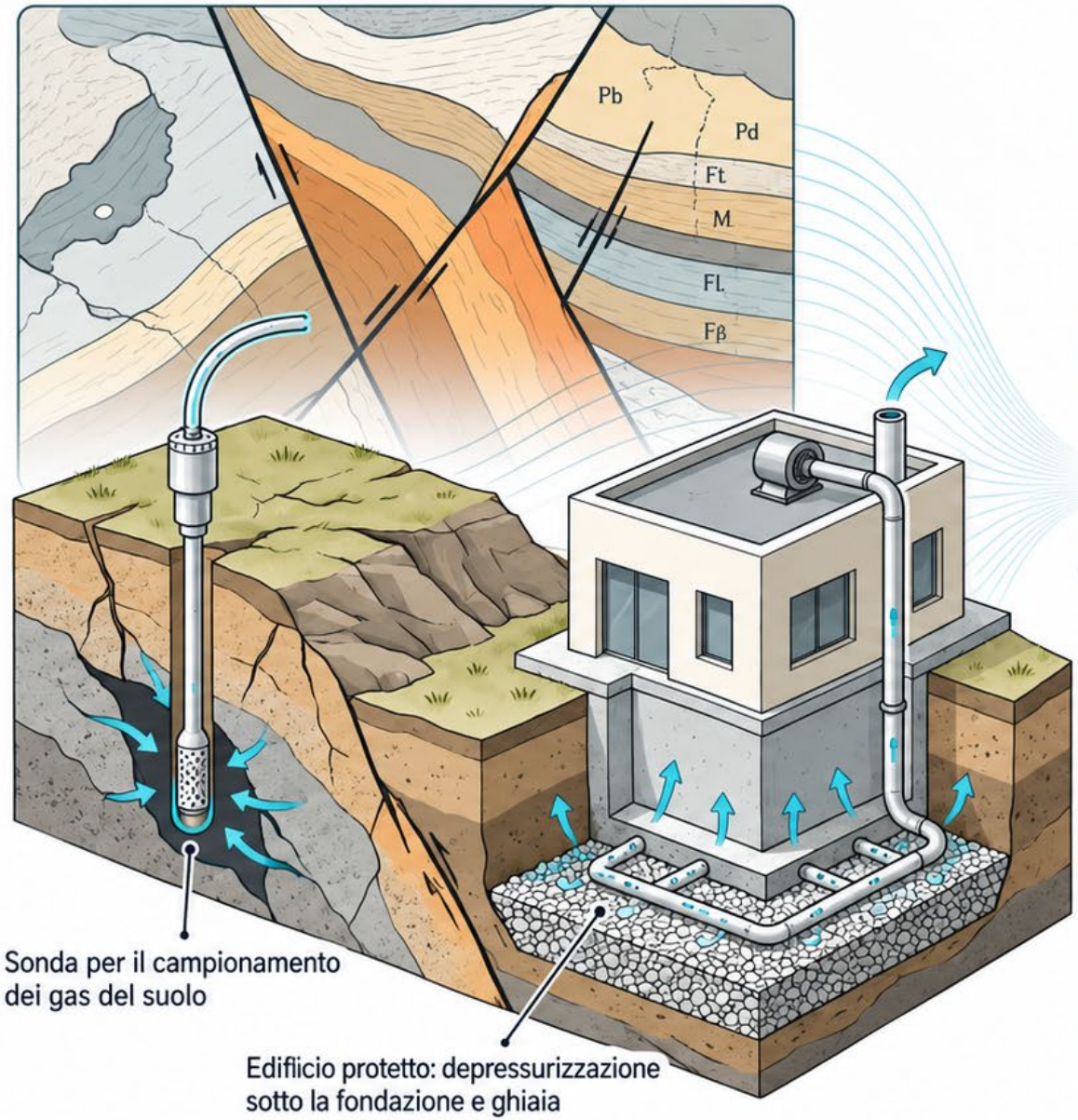
  Monitoraggio diretto per determinare il rischio reale per la salute umana e la necessità di bonifica.



Non esiste una conversione universale suolo-indoor

Conclusioni: dalla conoscenza geologica alla prevenzione

ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA



Il percorso dell'indagine si sintetizza in cinque indicazioni operative:

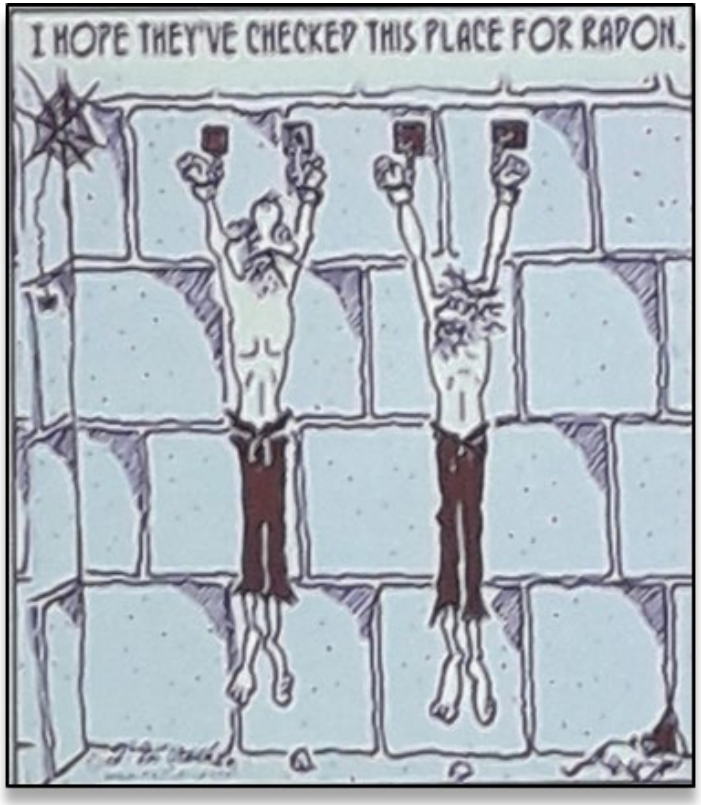
1. **Osservare i gas per comprendere il territorio**
   Monitoraggio costante per identificare anomalie e pattern geologici.

2. **Integrare misure, geologia e modelli di trasporto**
   Combinare dati sul campo con comprensione strutturale e simulazioni numeriche.

3. **Adattare le indagini alla scala e agli obiettivi**
   Calibrare l'approccio investigativo in base all'estensione territoriale e allo scopo del progetto.

4. **Distinguere potenziale geogenico ed esposizione indoor**
   Differenziare tra la sorgente naturale del gas e la sua penetrazione negli edifici.

5. **Trasformare i dati in decisioni tecniche motivate**
   Utilizzare le informazioni raccolte per progettare soluzioni di mitigazione e protezione efficaci.





Alessandra Sciarra-INGV alessandra.sciarra@ingv.it