

Meeting ARPA Lazio

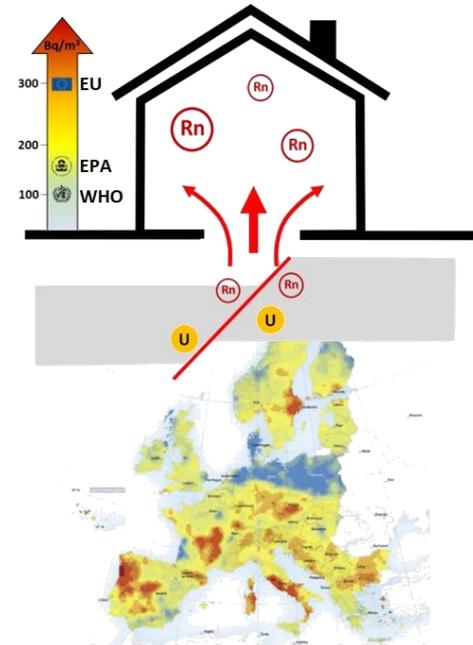
Radon un problema invisibile

9 Ottobre 2023 SALA CONVEGNI ABITART HOTEL
Via P.Matteucci 10-20 Roma

La valutazione del potenziale geogenico di radon per la pianificazione territoriale e la gestione del rischio indoor.

Giancarlo Ciotoli, PhD

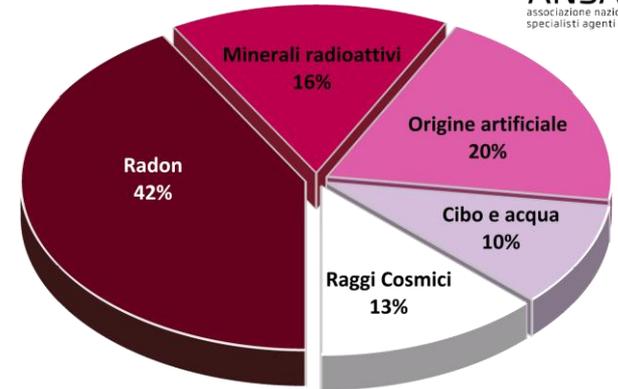
Consiglio Nazionale delle Ricerche
Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria



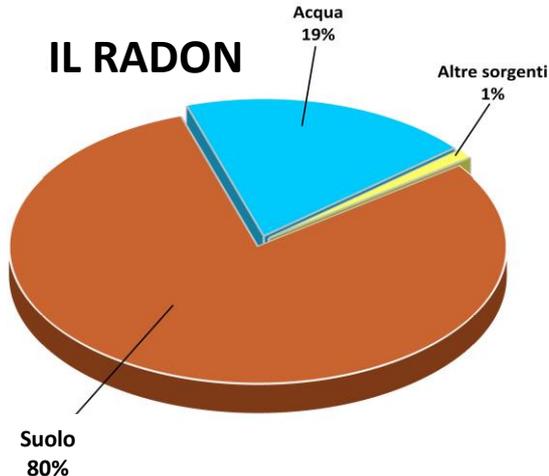
Sorgenti di radiazione

In media, l'80% delle radiazioni che assorbiamo è di origine naturale.

A questa si aggiunge la radiazione di origine artificiale (diagnostica medica per immagini: TAC, radiografie) 20% della radiazione assorbita.



IL RADON



- E' un gas nobile radioattivo, chimicamente inerte, con una vita media di circa 3.8 giorni
- E' ubiquitario nella crosta terrestre e il suolo rappresenta circa l'80% del radon presente in atmosfera, l'acqua il 19%
- Trasportato facilmente da altri gas (CO₂, CH₄) per distanze considerevoli in diversi ambienti geologici

La concentrazione del radon negli ambienti geologici dipende principalmente:

1.dall'abbondanza dei radionuclidi (Rn Source)

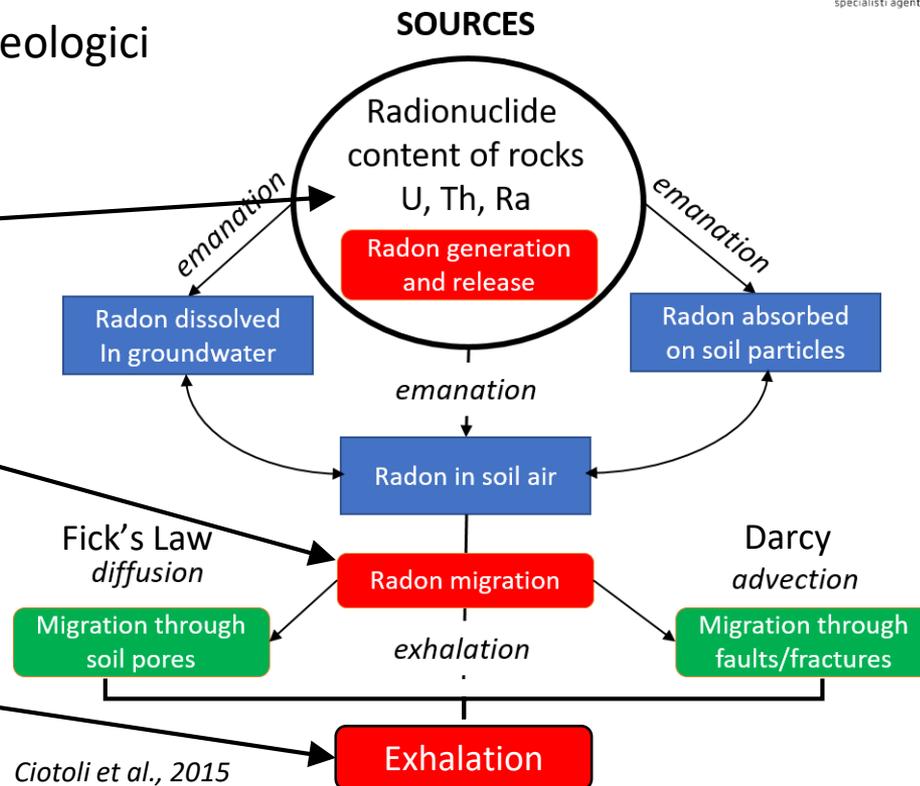
capostipiti delle catene di decadimento radioattivo (^{238}U , ^{232}Th e ^{235}U)

2.dai processi di migrazione (Tectonically

Enhanced Rn, TER; Benà et al., 2022) governati da permeabilità, porosità, e presenza di faglie che permettono il movimento del radon dal sottosuolo verso la superficie

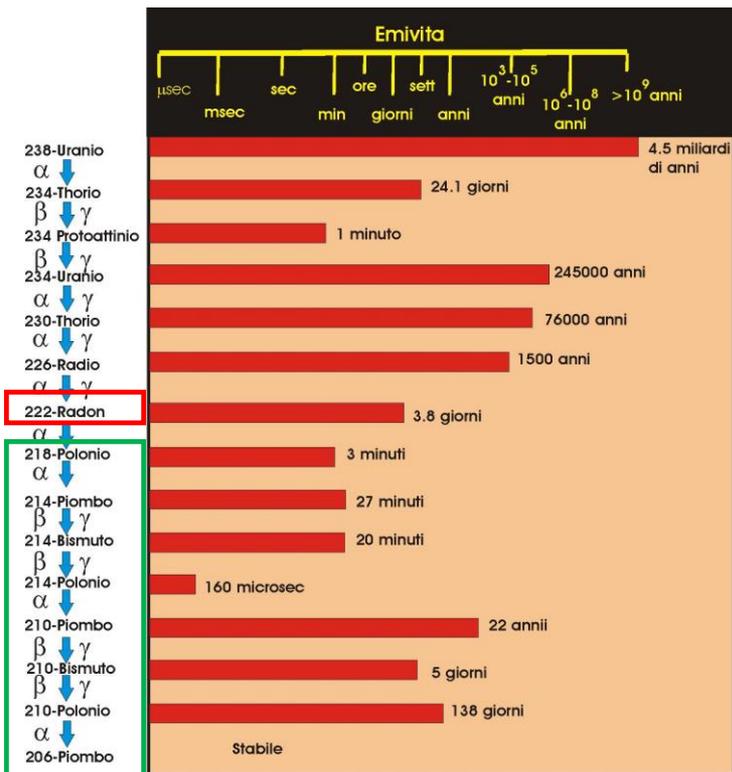
3.dal processo di esalazione superficiale (Rn

Exhalation, RnEX) che favorisce la diffusione del radon dal suolo verso l'atmosfera (radon disponibile per gli ambienti confinati).



1. Il decadimento radioattivo (Rn Source)

Catena di decadimento dell'uranio (^{238}U)



Isotopo genitore	Isotopo radon	Tempo di decadimento
^{238}U	^{222}Rn (radon)	3.82 g
^{232}Th	^{220}Rn (thoron)	55 sec
^{235}U	^{219}Rn (actinon)	3.96 sec

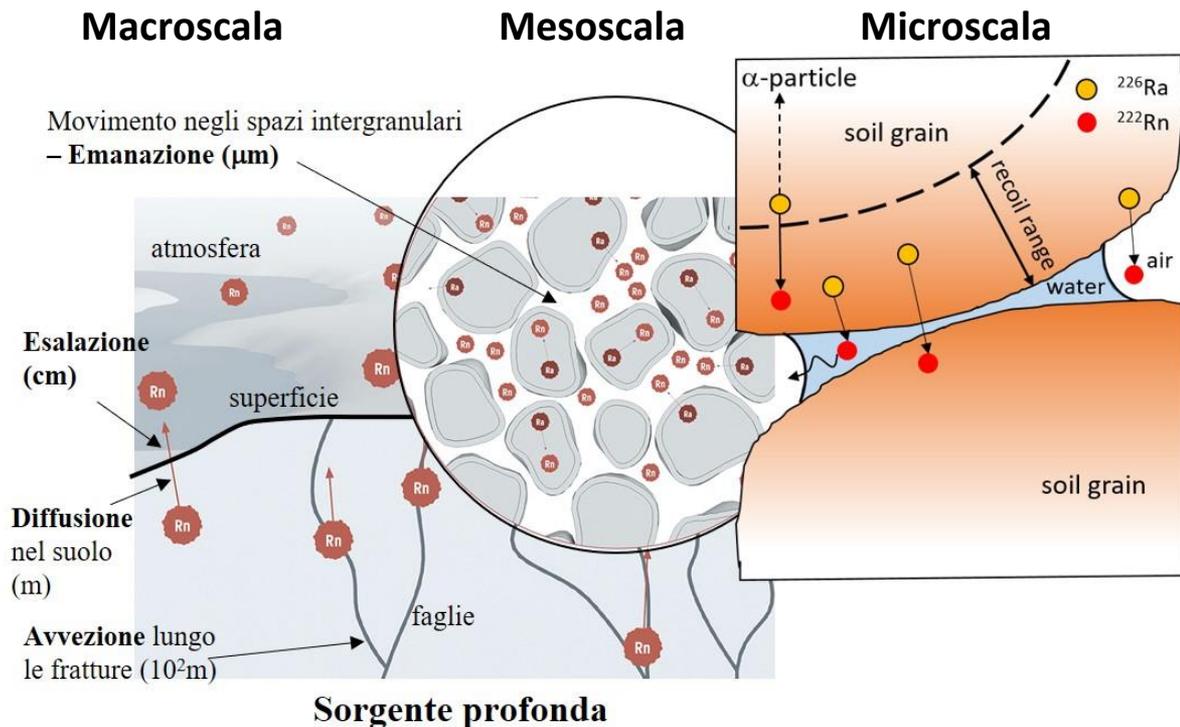
Il radon si trasforma in altre sostanze radioattive, dette figli, con tempi di decadimento differenti, tutti emittenti particelle α , β e γ .

Il radon, unico elemento gassoso, produce isotopi metallici molto reattivi che si depositano sulle superfici dell'apparato respiratorio (bronchi, polmoni) veicolati all'interno del corpo umano grazie a particelle di fumo, vapore acqueo, polveri.

2. Processi di migrazione nel sottosuolo (Tectonically Enhanced Radon, TER)

Il movimento del Rn nel sottosuolo/suolo dipende:

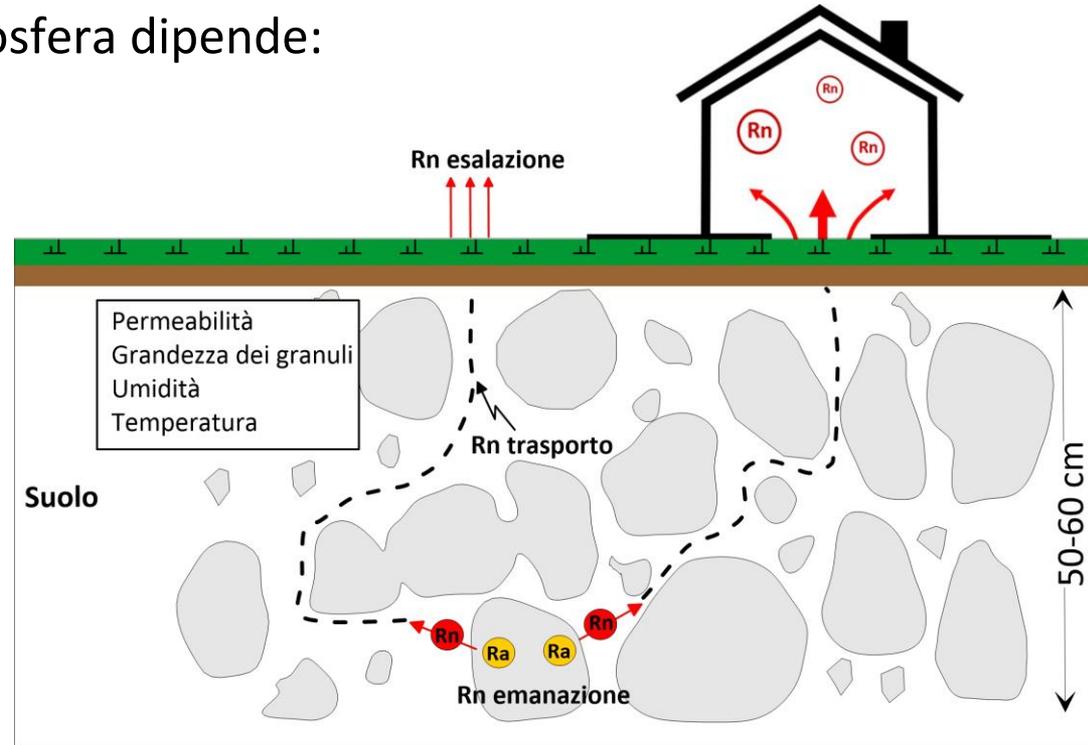
- dalla abbondanza della sorgente (^{238}U , ^{232}Th e ^{235}U)
- dalla capacità di rilasciare il Rn nei pori del suolo (coefficiente di emanazione)
- dai processi di migrazione (diffusione e avvezione lungo le faglie, Tectonic Enhanced Radon TER, Benà et al., 2022), e dalla presenza di gas carrier (CO_2 e CH_4)



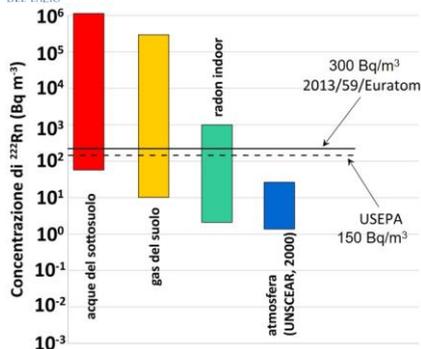
3. Processo di esalazione (RnEX)

L'esalazione del radon suolo-atmosfera dipende:

- dalla sorgente (^{238}U , ^{226}Ra nei granuli)
- dal coefficiente di emanazione delle rocce/suoli
- da permeabilità, umidità e temperature del suolo



La concentrazione del radon in natura e in diversi scenari geologici



Acque sottosuolo:

da centinaia a milioni di Bq m⁻³

Gas nel suolo:

da decine a centinaia di migliaia di Bq m⁻³

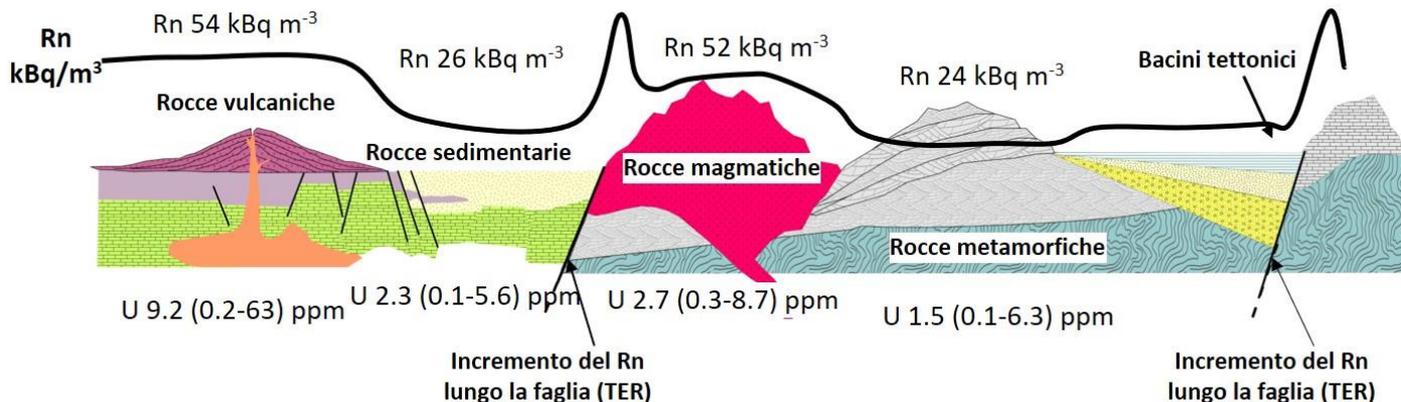
Indoor:

da unità a migliaia di Bq m⁻³

Atmosfera:

da decimi a unità Bq m⁻³

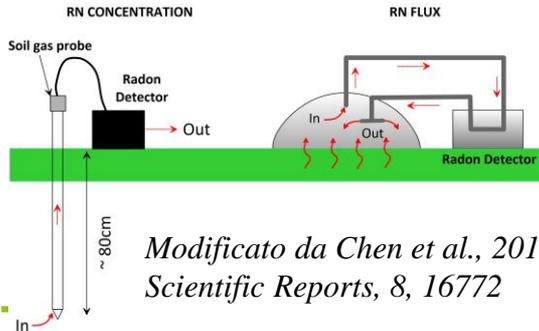
Considerando la differenza di magnitudo (fattore di 10³) tra le concentrazioni di Rn nel suolo e Rn indoor, anche valori bassi di Rn nel suolo (10kBq m⁻³) possono indurre in ambienti confinati concentrazioni elevate di Rn.



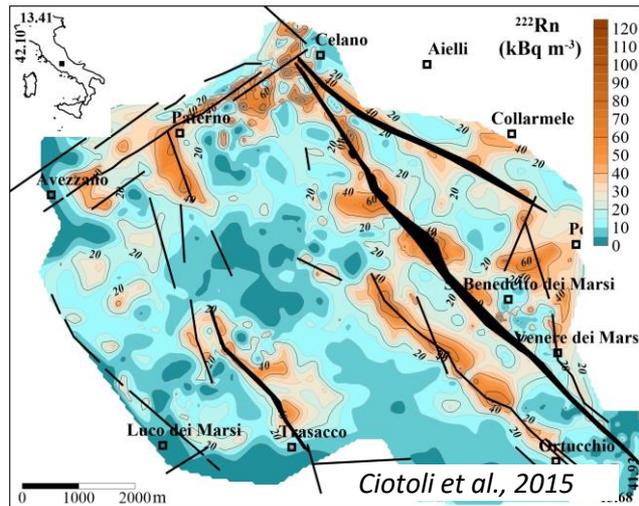
•Valori medi, min e max di uranio nelle rocce (Nogarotto, 2018)

•Valori medi di Rn nei gas del suolo (circa 30000 campioni in Italia)

Il **soil-gas survey** rappresenta una tecnica di indagine semplice e veloce per la misura della concentrazione dei gas del suolo (CO_2 , Rn, ecc.) e del flusso di esalazione. Permette l'identificazione delle vie di migrazione (faglie) e la raccolta di campioni anche su aree molto vaste.



Modificato da Chen et al., 2018
Scientific Reports, 8, 16772



- La piana del Fucino (Abruzzo) è il più grande bacino intermontano della catena appenninica.
- Substrato carbonatico sepolto sotto una spessa coltre di sedimenti alluvionali (fino a 900 m).
- Tettonica attiva
- Le anomalie Rn si trovano in corrispondenza di faglie.

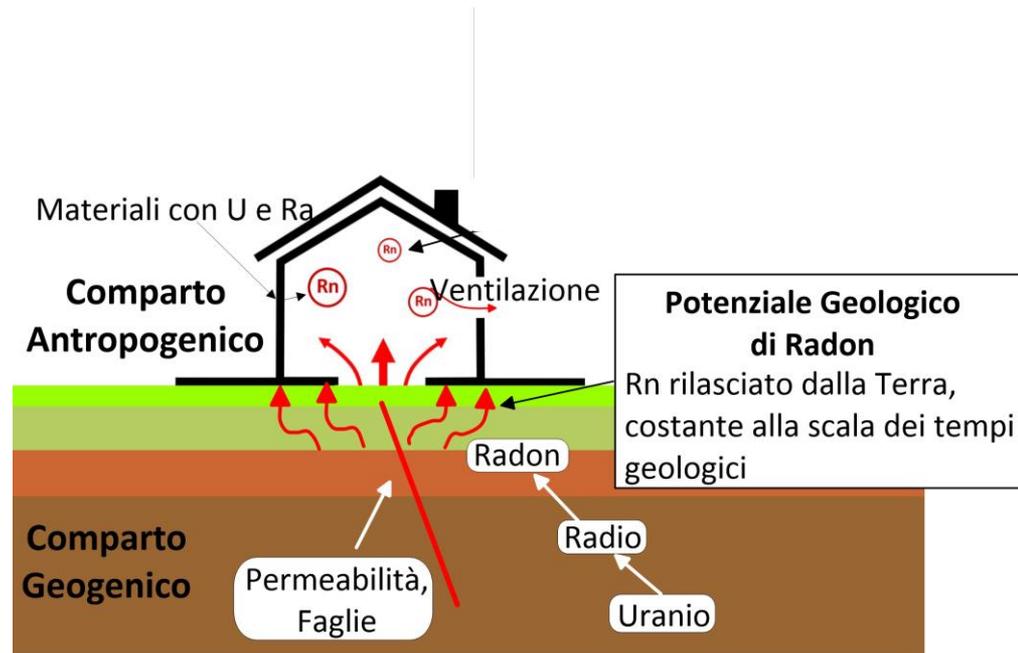
Radon: dalla geologia al rischio indoor

Esistono due aspetti da considerare nel passare dalla geologia alla valutazione della “pericolosità” da radon di un’area:

1. Il **potenziale geologico di radon (PGR)**.

Le anomalie di Rn nel suolo possono indicare zone con concentrazioni elevate di radionuclidi genitori (U, Th), oppure la presenza di faglie che ne favoriscono la migrazione (TER).

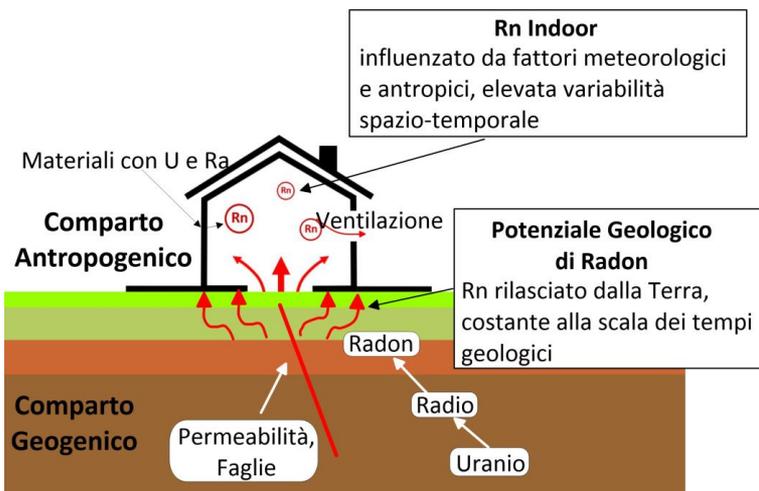
(Pericolosità del territorio) (Comparto Geogenico) (GRP = RnSource + TER)



Radon Priority Areas (RPA)

2. Radon Priority Area (RPA) (art. 103 Direttiva 2013/59/EURATOM)

Aree in cui la concentrazione di Rn indoor, originata da fattori geologici e/o ambientali e dalle caratteristiche dell'edificio, è più elevata del livello di riferimento nazionale in un significativo numero di edifici (15% nel Dlgs 101/2020). **(Comparto Geogenico + Antropogenico)**
(Vulnerabilità del territorio)



DECRETO LEGISLATIVO 31 luglio 2020, n. 101. *Allegato III (articolo 10)*

ELEMENTI DA PRENDERE IN CONSIDERAZIONE PER IL PIANO NAZIONALE D'AZIONE PER IL RADON CONCERNENTE I RISCHI DI LUNGO TERMINE DOVUTI ALL'ESPOSIZIONE AL RADON DI CUI ALL'ARTICOLO 10

1. Strategia per l'esecuzione di indagini sulle concentrazioni di radon in ambienti chiusi o concentrazioni di gas radon nel suolo al fine di stimare la distribuzione delle concentrazioni di radon in ambienti chiusi, per la gestione dei dati di misurazione e per la determinazione di altri parametri pertinenti (quali suolo e tipi di roccia, permeabilità e contenuto di radio-226 della roccia o del suolo).
2. Metodologie, dati e criteri utilizzati per la classificazione delle aree prioritarie o per la determinazione di altri parametri che possano essere utilizzati come indicatori specifici di situazioni caratterizzate da un'esposizione al radon potenzialmente elevata.

“significant number of buildings”

BSS - Articolo 103/3. Gli Stati membri individuano le aree in cui la concentrazione di radon (come media annuale) in un **numero significativo** (15% nel Dlgs 101/2020) di edifici che superano il livello di riferimento (300 Bq/m^3). Dall’anno di uscita della Direttiva 2013/59/EUR, è nata una discussione sul significato di questa indicazione “poco chiara”

Per lo più è stato interpretato come:

- Aree dove la IRC (media annua) $> \text{RL}$
- Aree con "frazione significativa" di edifici in un'area con $\text{IRC} > \text{RL}$

Obiettivi della radioprotezione: “ridurre il rischio”

“rischio e danno”

Il "danno" alla società dovuto all'esposizione al Rn è rappresentato dal numero di decessi per tumore polmonare. Assumendo una relazione lineare tra concentrazione di radon e effetto avverso sulla salute, questo numero è proporzionale all'esposizione collettiva.

Obiettivo della radioprotezione è duplice!

- 1. Proteggere gli individui da un'esposizione elevata, per ridurre il rischio individuale**
- 2. Evitare un'esposizione elevata per la collettività, perché il danno alla società è proporzionale all'esposizione collettiva**

Per il Rn, non esiste un rischio nullo: $IRC < \text{concentrazione in atmosfera (2 -20 Bq/m}^3\text{)}$: **impossibile**

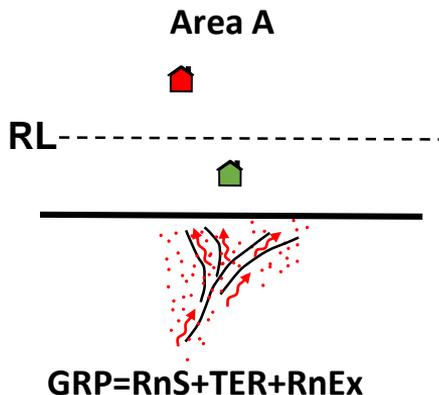
Più ragionevole: $IRC < 100 \text{ Bq/m}^3$, **ma i costi?**

Questo implica la discussione su come pesare salute vs costi.

Problema

Un'area A scarsamente popolata (basso numero di edifici) può essere una RPA, a causa dell'elevato IRC medio o dell'elevata frazione di case che superano RL.

$\text{prob}(\text{IRC} > \text{RL}) = 1/2 = 0.5$
⇒ RPA stato alto

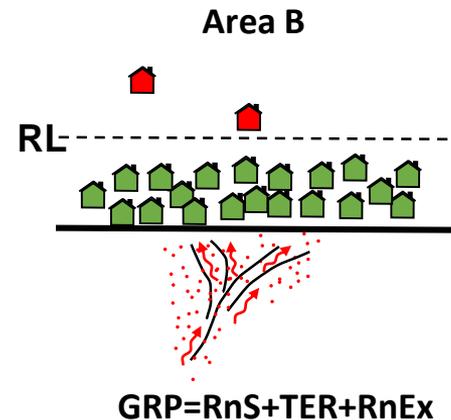


L'esposizione collettiva e quindi il rischio legato a Rn è basso.

D'altra parte, un'area B densamente popolata (molti edifici) può non essere RPA, a causa di un IRC medio basso o di una bassa frazione di case che superano l'RL.

$\text{prob}(\text{IRC} > \text{RL}) = 2/20 = 0.1$
⇒ RPA stato basso

Anche la media (IRC) in B < media(IRC) in A.



L'esposizione collettiva in B può essere superiore a quella in A sebbene l'area in A è definita una RPA.

Rivisitazione del concetto di Radon Priority Areas

Il concetto di RPA è compatibile con gli obiettivi della BSS?

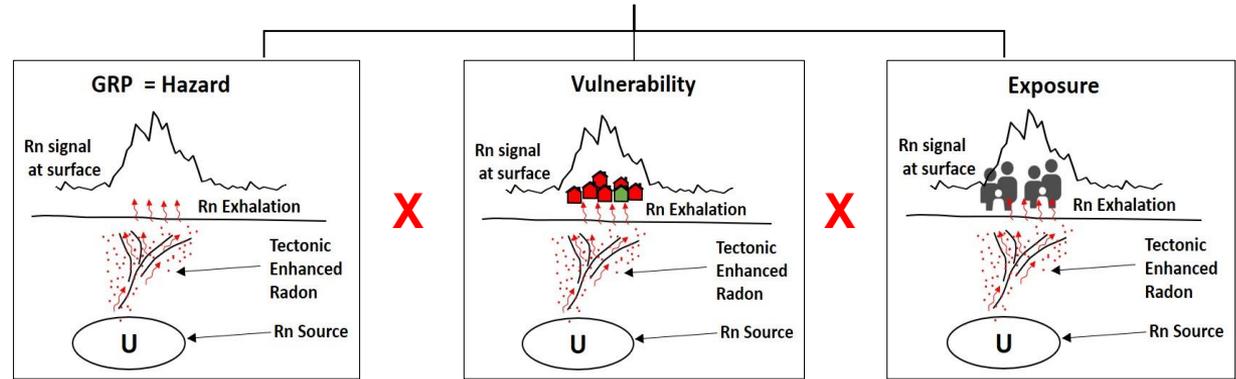
- ❑ L'interpretazione convenzionale assegna ad un'area un valore (IRC medio, oppure la probabilità di superare un RL) e/o uno stato RPA (S/N o diverse classi) in base ai suoi predittori (cioè IRC o altri). E' sicuramente giusto dare priorità a queste zone, ma limitare gli interventi solo a tali aree non sarebbe coerente con i principi di radioprotezione.
 - *In realtà il concetto di RPA sembrerebbe, in parte, contrario all'obiettivo della BSS, se si assume che essa sia soggetta a obiettivi generali di radioprotezione tra cui la riduzione del danno (= casi di tumore polmonare).*

Il pericolo (angl. Hazard) esiste anche se nessuno è coinvolto (PGR).

Si passa alla vulnerabilità quando si valutano anche le condizioni (ambientali, sociali, economiche, ...) che determinano la suscettibilità del bene (RPA).

Diventa un rischio (= una probabilità di danno), se c'è qualcuno che può essere danneggiato (Esposizione della popolazione).

Rn Collective RISK

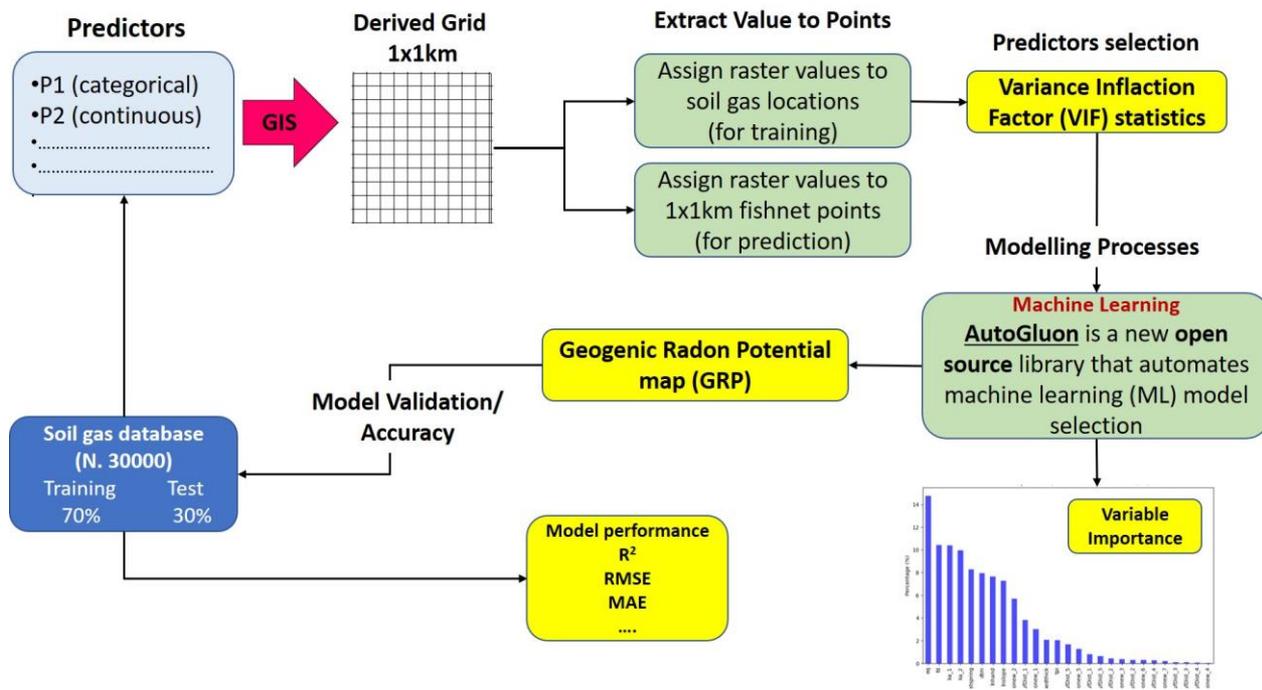


Poiché il PGR è il più importante predittore del IRC, il concetto di RPA è basato essenzialmente sulla pericolosità/vulnerabilità, ma non si può considerare un rischio!

La stima del Potenziale Geologico di Radon

- PGR (o la pericolosità /susceptibilità del territorio) è direttamente misurabile sul campo dalle concentrazioni di Rn nel suolo e dalla permeabilità (Neznal, 2003).
- Da circa una decina di anni, un considerevole lavoro viene investito nello sviluppo di modelli statistici per stimare il PGR (a piccola e grande scala) utilizzando variabili geologiche correlate al Rn (Predittori).

L'approccio statistico spaziale e geostatistico con modelli di tipo regressivo



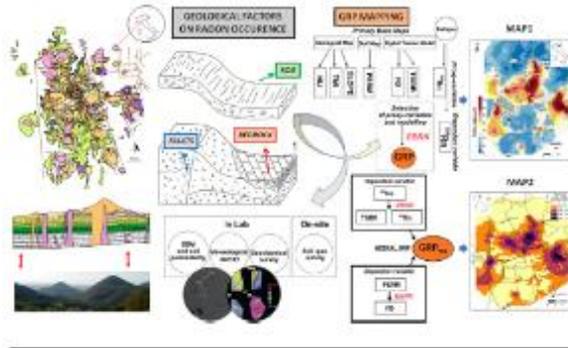
Mappe del Potenziale Geogenico di Rn a scala comunale

Le tecniche di mapping utilizzate per elaborare le mappe del PGR a scala comunale possono essere applicate in altri scenari geologici, e anche a differente scala, utilizzando variabili proxy geologico-geochimiche, geomorfologiche disponibili sui vari siti istituzionali.



The assessment of local geological factors for the construction of a Geogenic Radon Potential map using regression kriging. A case study from the Eugeanean Hills volcanic district (Italy)

Coletti et al., 2022



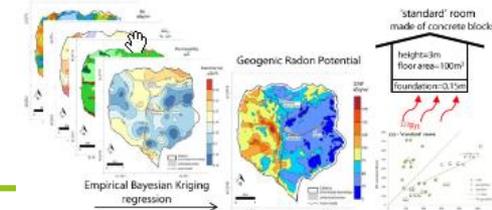
Article

Radon Hazard in Central Italy: Comparison among Areas with Different Geogenic Radon Potential



Mapping the geogenic radon potential and radon risk by using Empirical Bayesian Kriging regression: A case study from a volcanic area of central Italy

Giustini et al., 2019



Mappa del potenziale geologico del radon del Lazio (Ciotoli et al., 2017)

Journal of Environmental Radioactivity 166 (2017) 355–375

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Environmental Radioactivity

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jenvrad

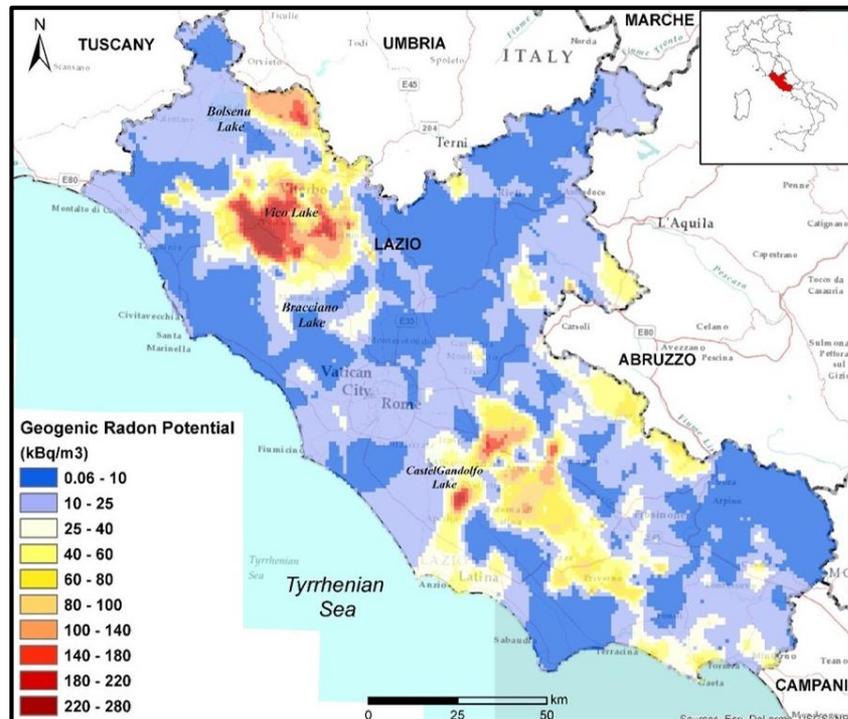


Geographically weighted regression and geostatistical techniques to construct the geogenic radon potential map of the Lazio region: A methodological proposal for the European Atlas of Natural Radiation

G. Ciotoli ^{a, b, *}, M. Voltaggio ^a, P. Tuccimei ^c, M. Soligo ^c, A. Pasculli ^d, S.E. Beaubien ^e, S. Bigi ^e



Stima del PGR mediante Regressione Geografica Pesata



Mappa preliminare del PGR a scala nazionale

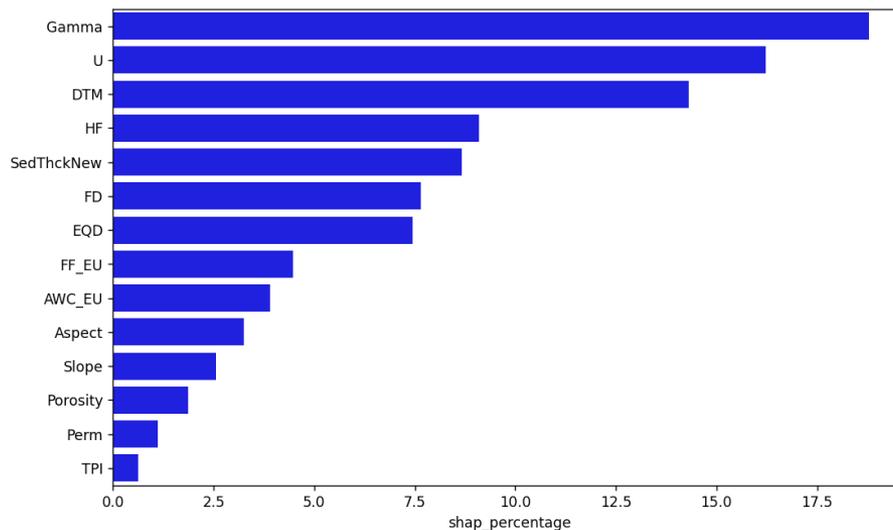
Dal Potenziale Geologico di Radon al Rischio Collettivo

AutoGluon best model fitting

model	RMSE		R2	
	Test	Training	Test	Training
WeightedEnsemble	-0.944	-0.960	0.543	0.535
LightGBMLarge*	-0.948	-0.968	0.540	0.520
LightGBM	-0.955	-0.966	0.531	0.521
LightGBMXT	-0.956	-0.976	0.530	0.527
CatBoost	-0.958	-0.974	0.530	0.523
XGBoost	-0.959	-0.971	0.527	0.506
ExtraTreesMSE	-0.961	-0.989	0.524	0.509
RandomForestMSE	-0.964	-0.986	0.513	0.505
NeuralNetFastAI	-1.017	-1.034	0.471	0.459
NeuralNetTorch	-1.018	-1.028	0.470	0.466
KNeighborsDist	-1.062	-1.095	0.423	0.394
KNeighborsUnif	-1.079	-1.090	0.405	0.400

LightGBM utilizza un approccio che cerca di minimizzare la differenza tra la previsione del modello e il valore effettivo.

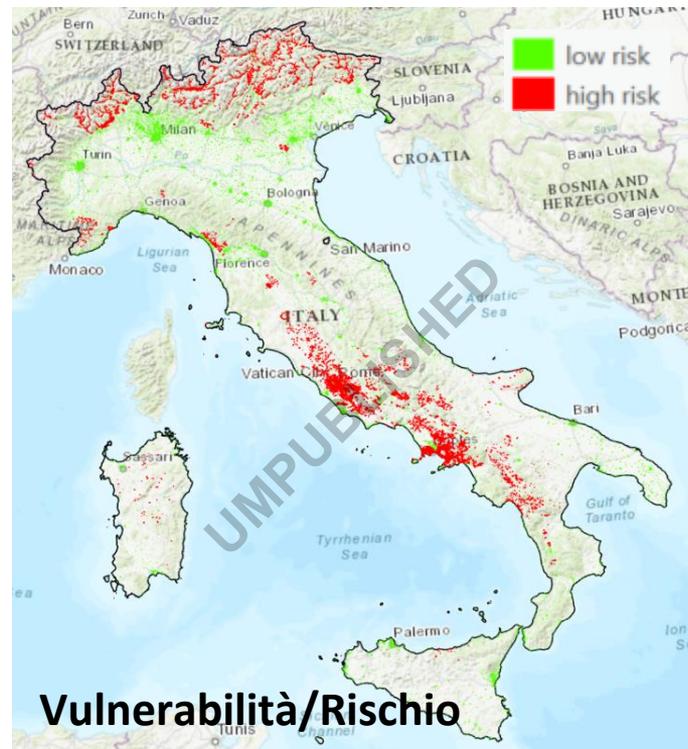
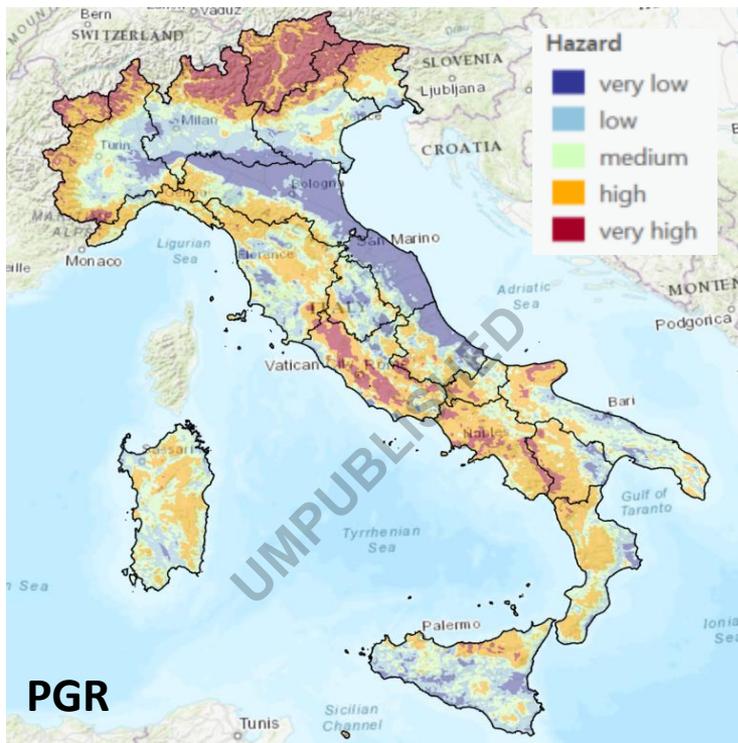
Importanza delle variabili nel modello



* Guolin K., Meng Q., Finley T., Wang T., Chen W., Ma W., Ye Q, Liu TY.
"Lightgbm: A highly efficient gradient boosting decision tree."
Advances in neural information processing systems 30 (2017).

Mappa preliminare del PGR a scala nazionale

Dal Potenziale Geologico di Radon al Rischio Collettivo

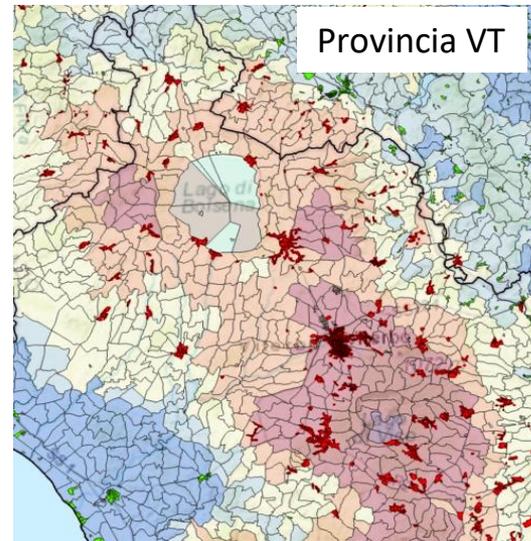
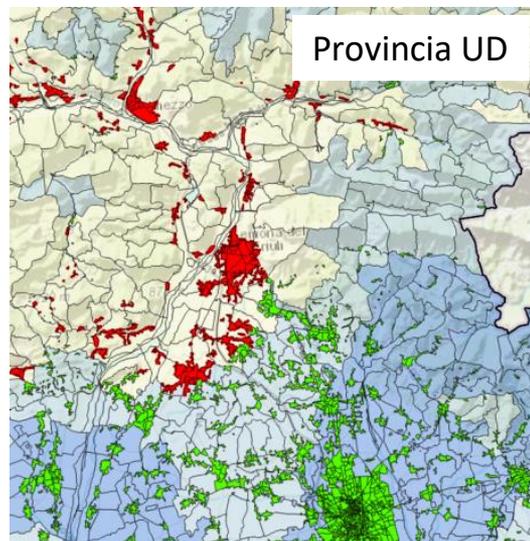
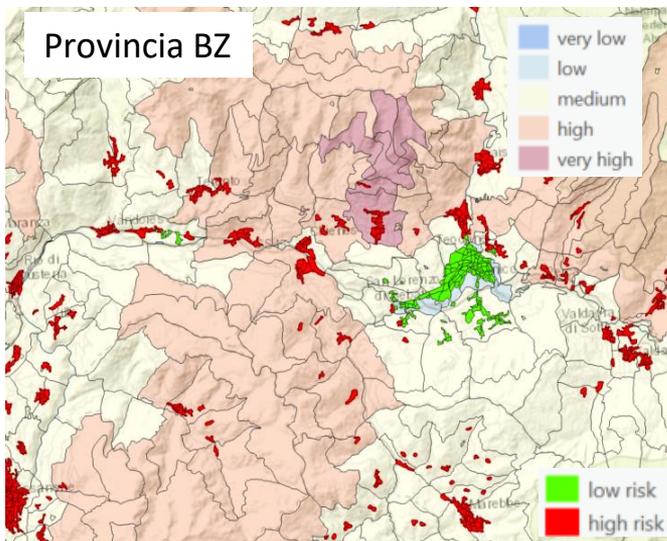


Mappa preliminare del PGR a scala nazionale

Dal Potenziale Geologico di Radon al Rischio Collettivo

Sezioni censuarie

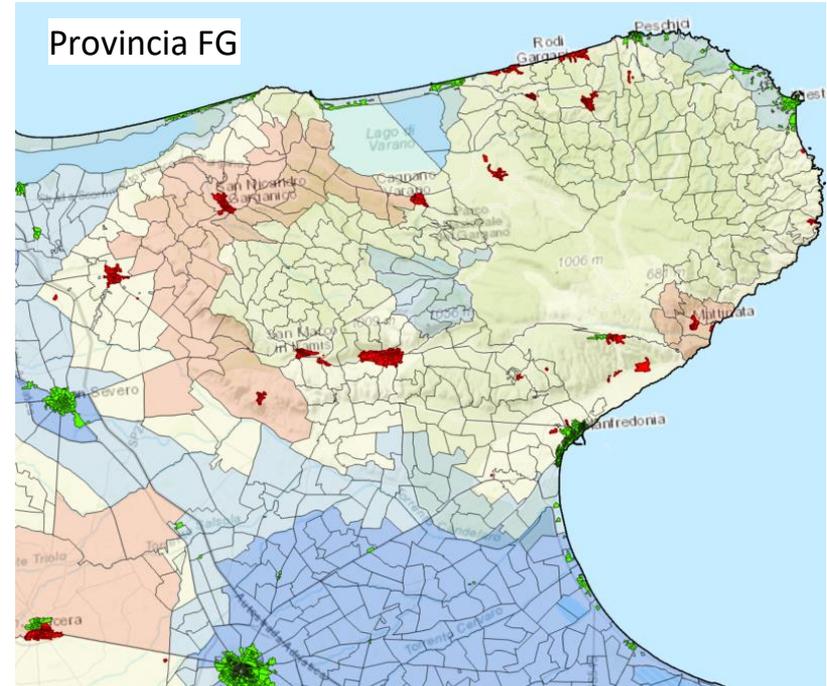
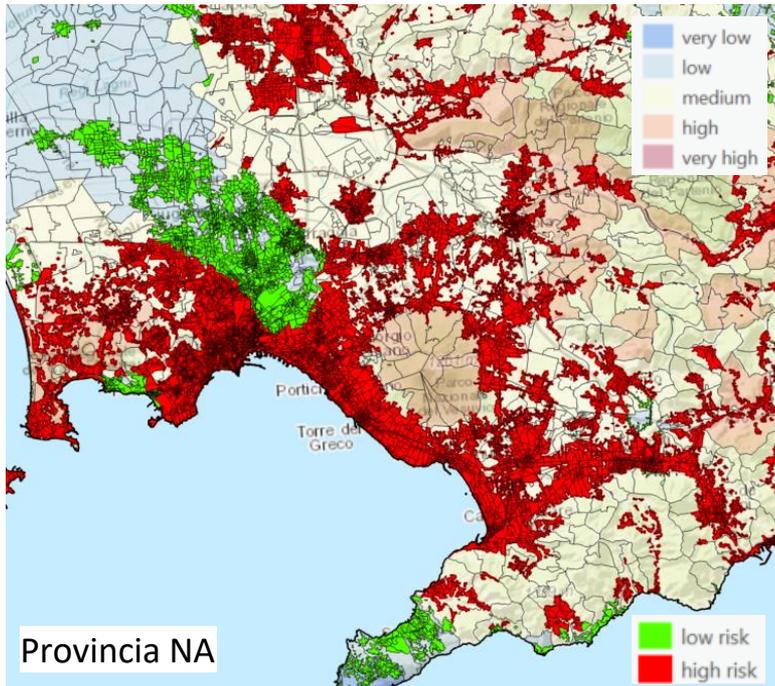
Sezioni censuarie con località tipo 1 e 2 (le più popolate), in verde le aree a rischio basso in rosso le aree a rischio alto. La mappa di base rappresenta il valore del potenziale geologico di radon mediato su tutte le sezioni censuarie.



Mappa preliminare del PGR a scala nazionale

Dal Potenziale Geologico di Radon al Rischio Collettivo

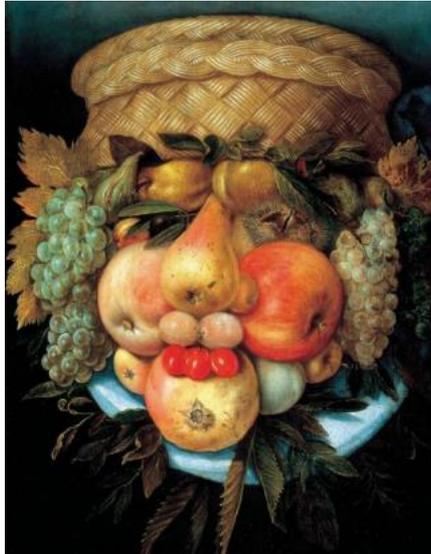
Sezioni censuarie: in verde e rosso le sezioni con località tipo 1 e 2 (le più popolate)



Conclusioni

- Il radon negli ambienti confinati dipende principalmente dalle caratteristiche geologiche, strutturali e geomorfologiche del territorio. Esso costituisce un fenomeno molto complesso governato da variabili eterogenee che possono interagire in modo interconnesso.
- Rispetto al Rn «geologico», più costante sia nello spazio che nel tempo, il Rn indoor mostra una forte variabilità spazio-temporale dovuta a fattori esterni (meteorologici e antropici) che complicano la costruzione di mappe di stima, soprattutto a scala locale.
- Attualmente, si usano tecniche di analisi geospaziale (regressione, machine learning, ecc.) e di geostatistica multivariata per valutare il potenziale di radon geologico, tuttavia sono necessari ulteriori studi e tentativi per definire l'incertezza delle diverse variabili, e dei modelli risultanti.
- La costruzione di mappe del PGR può costituire un importante strumento per l'analisi della pericolosità del territorio introducendo, inoltre, il nuovo concetto delle RPA geological-based. I due tematismi sono entrambi fondamentali: per la valutazione del rischio collettivo (pianificazione territoriale), e per la valutazione e la prevenzione del rischio individuale (organizzazione delle indagini indoor, e azioni di risanamento).

Il Potenziale Geologico di Radon!!



«Cesto di Frutta» di Giuseppe Arcimboldo
(ca. 1527–1593)

Grazie per l'attenzione

Giancarlo Ciotoli, PhD
Consiglio Nazionale delle Ricerche
Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria

giancarlo.ciotoli@cnr.it