

Mus. civ. Rovereto	Atti del Workshop in geofisica	14 dicembre 2012	123-139	2013
--------------------	--------------------------------	------------------	---------	------

VIRGINIA STRATI ⁽¹⁾, BALDONCINI MARICA ⁽¹⁾, BEZZON GIAN PIETRO ⁽²⁾,
 BROGGINI CARLO ⁽³⁾, BUSO GIAN PAOLO ⁽²⁾, CACIOLLI ANTONIO ⁽³⁾,
 CALLEGARI IVAN ⁽⁴⁾, COLONNA TOMMASO ⁽⁴⁾, FIORENTINI GIANNI ^(1,2,5),
 GUASTALDI ENRICO ⁽⁴⁾, KAÇELI XHIXHA MERITA ⁽⁶⁾, MANTOVANI FABIO ^(1,5),
 MASSA GIOVANNI ⁽⁴⁾, MENEGAZZO ROBERTO ⁽³⁾, MOU LILIANA ⁽²⁾,
 ROSSI ALVAREZ CARLOS ⁽³⁾, XHIXHA GERTI ^(1,5,7)

STUDIO PRELIMINARE DEL CONTENUTO DI RADIOATTIVITÀ DELLE PRINCIPALI FORMAZIONI ROCCIOSE DELLE AREE ALPINE, PREALPINE E COLLINARI DELLA REGIONE VENETO

Abstract - VIRGINIA STRATI, *et alii* - Preliminary study of the radioactivity distribution in the rocks of Veneto mountains.

This report illustrates the preliminary results of the «Rad_Monitor» project, whose objective is the production of the natural radioactivity map of the Veneto region. In particular the distributions of the major radionuclides i.e K, U, Th, are presented, which have been determined on the base of gamma spectroscopy measurements realized with the MCA_Rad system on rock samples coming from representative outcrops. The sampling was planned using the geological map of Veneto at scale 1:250,000 and the cartographic units were used also as a guide for the geological interpretation. The statistical analysis of the 486 measurements has been done assu-

⁽¹⁾ University of Ferrara, Department of Physics and Earth Science, Via Saragat, 1 - 44100 Ferrara, Italy
⁽²⁾ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Legnaro National Laboratory, Via dell'Università, 2 - 35020 Legnaro, Padova, Italy.

⁽³⁾ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Padova Section, Via Marzolo 8 - 35131 Padova, Italy.
⁽⁴⁾ University of Siena, Center for GeoTechnologies, Via Vetri Vecchi, 34 - 52027 San Giovanni Valdarno, Arezzo, Italy.

⁽⁵⁾ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Ferrara Section, Via Saragat, 1 - 44100 Ferrara, Italy.
⁽⁶⁾ University of Sassari, Botanical, Ecological and Geological Sciences Department, Piazza Università 21 - 07100 Sassari, Italy.

⁽⁷⁾ Agricultural University of Tirana, Faculty of Forestry Science, Kodër Kamëz - 1029 Tirana, Albania.

ming that the concentration of the natural radionuclides in each cartographic unit follows a lognormal distribution. Through a Matlab code the median values and the uncertainties of the three isotopes were computed. This leads to the preliminary radiological characterization of the principal cartographic units and to the realization of the thematic maps of the distribution of ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th and of the total specific activity.

Key words: Natural radioactivity - Gamma spectroscopy - Uranium, thorium and potassium - Rock formations - Veneto Region.

Riassunto - VIRGINIA STRATI, *et alii* - Studio preliminare del contenuto di radioattività delle principali formazioni rocciose delle aree alpine, prealpine e collinari della Regione Veneto.

Nel presente report vengono descritti i risultati preliminari del progetto di ricerca denominato «Rad_Monitor», il cui obiettivo finale consiste nella realizzazione della carta della radioattività naturale del territorio della regione Veneto. In particolare viene presentata la distribuzione dei maggiori radionuclidi primordiali, ovvero ^{40}K , ^{238}U e ^{232}Th , nelle aree Alpine, Prealpine e Collinari (APC) venete sulla base delle misure di spettroscopia gamma realizzate con il sistema MCA_Rad su campioni di roccia prelevati da affioramenti rappresentativi. Per la pianificazione del campionamento è stata adottata la Carta Geologica Regionale del Veneto a scala 1:250.000, le cui Unità Cartografiche (UC) sono state utilizzate anche come riferimento per l'interpretazione geologica dei dati. L'analisi statistica delle 486 misure è stata condotta assumendo che la concentrazione di radionuclidi naturali in ciascuna UC segua una distribuzione lognormale. Attraverso l'utilizzo di un codice Matlab sono stati calcolati i valori mediani e le incertezze dei tre isotopi. Ciò ha permesso una caratterizzazione radiologica preliminare delle principali UC nonché la realizzazione di carte tematiche relative alla distribuzione di ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th e dell'attività specifica totale.

Parole chiave: Radioattività naturale - Spettroscopia gamma - Uranio, torio e potassio - Formazioni rocciose - Regione Veneto.

1. INTRODUZIONE

Nel presente lavoro sono raccolti i risultati preliminari del progetto Rad_Monitor, un progetto di ricerca cofinanziato dalla Fondazione Cassa di Risparmio di Padova e Rovigo nell'ambito del bando «Progetti di Eccellenza 2009/2010». Il lavoro è stato eseguito da un team di ricercatori che afferiscono a diverse istituzioni, tra cui i Laboratori Nazionali di Legnaro dell'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare), il Centro di Geotecnologie dell'Università di Siena ed il Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra dell'Università di Ferrara. L'obiettivo finale del progetto consiste nel realizzare la carta della radioattività naturale del territorio della regione Veneto attraverso misure di spettroscopia gamma.

La radioattività è presente nell'ambiente che ci circonda e può essere originata da sorgenti naturali o artificiali. La radioattività naturale include due categorie di radionuclidi: i radionuclidi primordiali, originatisi con la formazione della Terra ed aventi vita media sufficientemente lunga, e i radionuclidi cosmogenici, prodotti in continuazione in seguito al bombardamento da parte dei rag-

gi cosmici di nuclei stabili presenti in atmosfera. L'obiettivo di questo lavoro è studiare la distribuzione dei maggiori radionuclidi primordiali, ovvero ^{40}K , ^{238}U e ^{232}Th nelle aree Alpine, Prealpine e Collinari (APC) venute attraverso misure di spettroscopia gamma realizzate con il sistema MCA_Rad su campioni di roccia prelevati da affioramenti rappresentativi.

2. LA RADIOATTIVITÀ NATURALE

La maggior parte degli elementi presente in natura è stabile, ma i nuclei di alcuni isotopi possiedono un surplus di energia che li rende instabili. Ciò fa sì che essi tendano a disintegrarsi per raggiungere uno stato di maggiore stabilità. I nuclidi che possiedono queste caratteristiche sono detti radionuclidi e il processo di disintegrazione prende il nome di decadimento radioattivo.

Il decadimento radioattivo è sempre un processo esoenergetico, nel quale l'energia viene liberata attraverso l'emissione di particelle (nuclei di elio, elettroni, positroni, neutrini, ecc.) e/o sottoforma di radiazione elettromagnetica. Il decadimento γ , a differenza dei decadimenti α e β , non cambia né il numero di massa A , né la carica Z di un nucleo. L'eccesso di energia nucleare viene rilasciato sotto forma di radiazione elettromagnetica. Il nucleo possiede dei livelli energetici spazati da bande di energie proibite: nel momento in cui un nucleo si trova in uno stato eccitato esso emette radiazione elettromagnetica al fine di raggiungere uno stato di minor energia, quindi più stabile. Pertanto l'energia della radiazione gamma è ben definita, pari alla differenza in energia tra i livelli nucleari coinvolti nella transizione ed è caratteristica del nucleo che la produce.

Il decadimento radioattivo spesso si verifica in una serie, o catena di decadimenti, in cui vengono prodotti isotopi a loro volta radioattivi; la catena si conclude nel momento in cui viene raggiunto un isotopo stabile. Il decadimento radioattivo è un processo puramente statistico: è impossibile prevedere in quale istante un certo nucleo si trasformerà, ma è possibile prevedere quanti nuclei saranno decaduti in media dopo un certo intervallo di tempo. Il numero di decadimenti che ci si aspetta avvenga in un certo intervallo di tempo dt , si definisce attività del campione (A) ed è proporzionale al numero di nuclei N presenti inizialmente nel campione:

$$A(t) = \frac{dN(t)}{dt} = \lambda N(t)$$

dove λ è la costante di decadimento tipica per ciascun decadimento. L'unità di misura dell'attività è il bequerel (Bq) che corrisponde ad un decadimento al secondo. Accanto all'attività si definisce l'attività specifica, espressa come attività per unità di massa: essa si misura in Bq/kg. Un'altra grandezza molto importante

è il tempo di dimezzamento $t_{1/2}$ definito come il tempo necessario affinché decada un numero di atomi pari alla metà degli atomi presenti inizialmente. Tra la costante di decadimento λ e il tempo di dimezzamento vale la seguente relazione:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

In un sistema chiuso, nel caso di una catena di decadimenti, se il tempo di dimezzamento dell'isotopo padre è molto più lungo di quelli degli isotopi figli si verifica la condizione dell'equilibrio secolare in cui le attività di tutti i radionuclidi sono le stesse. In tali condizioni la misura della concentrazione di uno degli elementi figli può essere utilizzata per stimare la concentrazione di uno qualsiasi degli altri elementi appartenenti alla serie di decadimento, ed in particolare quella del nucleo padre.

La spettroscopia gamma è una tecnica di misura in grado di quantificare l'attività specifica riconoscendo l'energia dei fotoni emessi dai radionuclidi attraverso l'analisi dello spettro gamma. Quest'ultimo è un istogramma che rappresenta la distribuzione dei fotoni provenienti da una certa sorgente in funzione della loro energia: analizzando lo spettro gamma è possibile ricavare le concentrazioni dei radioisotopi. L'unità di misura utilizzata per l'energia è l'elettronvolt, definito come l'energia acquistata da un elettrone libero quando passa attraverso una differenza di potenziale elettrico di 1 volt nel vuoto, ed è pari a $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$.

La radiazione terrestre deriva da quegli elementi radioattivi che sono stati sintetizzati durante la formazione del sistema solare che possiedono vite medie abbastanza lunghe da giustificare la loro attuale esistenza. Tra questi, quelli che vengono misurati abitualmente sono il ^{40}K , ^{238}U e il ^{232}Th .

Il ^{40}K è un isotopo radioattivo del potassio e si trova in un rapporto dello 0,012% rispetto al potassio presente in natura. La stima della quantità di potassio avviene tramite la rivelazione delle emissioni gamma (1460 keV) legate alla diseccitazione dell' ^{40}Ar che a sua volta si origina dal decadimento radioattivo del ^{40}K .

L'uranio è presente in natura in tre diversi isotopi aventi numeri di massa 234, 235 e 238. Nella crosta terrestre l'isotopo ^{238}U rappresenta il 99,275%, ^{235}U lo 0,720%, ed infine ^{234}U lo 0,005%. L' ^{238}U dà origine ad una catena di decadimenti attraverso i quali raggiunge l'isotopo stabile ^{206}Pb . Non tutti i nuclidi della serie emettono radiazione gamma, pertanto la rilevazione di uranio dipende dai raggi gamma emessi da alcuni prodotti di decadimento. I raggi gamma più importanti per ^{238}U sono quelli di energia pari a 610 keV, 1120 keV, 1740 keV originati dalle transizioni del ^{214}Bi . Il tempo di dimezzamento dell' ^{238}U è di $4,47 \cdot 10^9$ anni.

L'unico costituente del torio naturale è il ^{232}Th , la cui vita media è di 1.39×10^{10} anni. Analogamente ^{238}U , dà origine ad una catena di decadimento nella quale le emissioni gamma più importanti sono quelle prodotte dalla transizioni

del ^{208}Tl alle energie di 580 keV e 2614 keV. La catena di decadimento termina con l'isotopo stabile ^{208}Pb .

3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELL'AREA

L'area di studio di questo lavoro è la zona delle Alpi, Prealpi e Colline (APC) della Regione Veneto che coprono un'area di circa 7156 km² e costituiscono circa il 44% di tutto il territorio regionale.

La successione stratigrafica del Veneto, interamente compresa all'interno del Dominio Sudalpino, comprende un basamento cristallino di età paleozoica e sequenze di copertura di età compresa tra il Permiano e il Quaternario, costituite da rocce sedimentarie prevalentemente marine e da rocce vulcaniche.

Il basamento cristallino è costituito da rocce metamorfiche (argilloscisti, metabasalti, filladi, metarioliti) derivanti dalla ricristallizzazione e dalle deformazioni subite da arenarie, argille e rocce vulcaniche.

Le sequenze sedimentarie comprendono: conglomerati, arenarie, calcari, dolomie e marne del Paleozoico e sequenze in facies di scaglia, flysch e molasse del Terziario.

Le rocce vulcaniche che affiorano in Veneto rappresentano la testimonianza di due differenti cicli magmatici. Il primo, sviluppatosi nel Triassico, diede origine prima a prodotti di composizione riolitica, riodacitica e dacitica e in seguito a colate di composizione riolitica-dacitica e a prodotti andesitici e basaltici. Durante il Terziario, e in particolare nel Paleogene, si ha il secondo ciclo magmatico caratterizzato da un'intensa attività eruttiva basica caratterizzata da basalti di colata, ialoclastiti, breccie, filoni e camini vulcanici.

La concentrazione degli elementi che costituiscono le principali fonti di radioattività naturale terrestre dipende da vari fattori legati alla natura geologica del substrato. L'uso della spettroscopia gamma come strumento di «geological mapping» è strettamente vincolato alla conoscenza della geochimica dei radioelementi nelle rocce e dei processi che influenzano la loro distribuzione e mobilità. La cartografia geologica è, pertanto, un supporto imprescindibile per la pianificazione dei campionamenti e nello stesso tempo una chiave di lettura fondamentale in fase di elaborazione e analisi delle misure.

4. METODOLOGIA E STRUMENTAZIONE

La cartografia geologica utilizzata per la pianificazione del campionamento e l'interpretazione delle misure è costituita dalla Carta Geologica Regionale del Veneto a scala 1:250000 (ANTONELLI *et alii*, 1990).

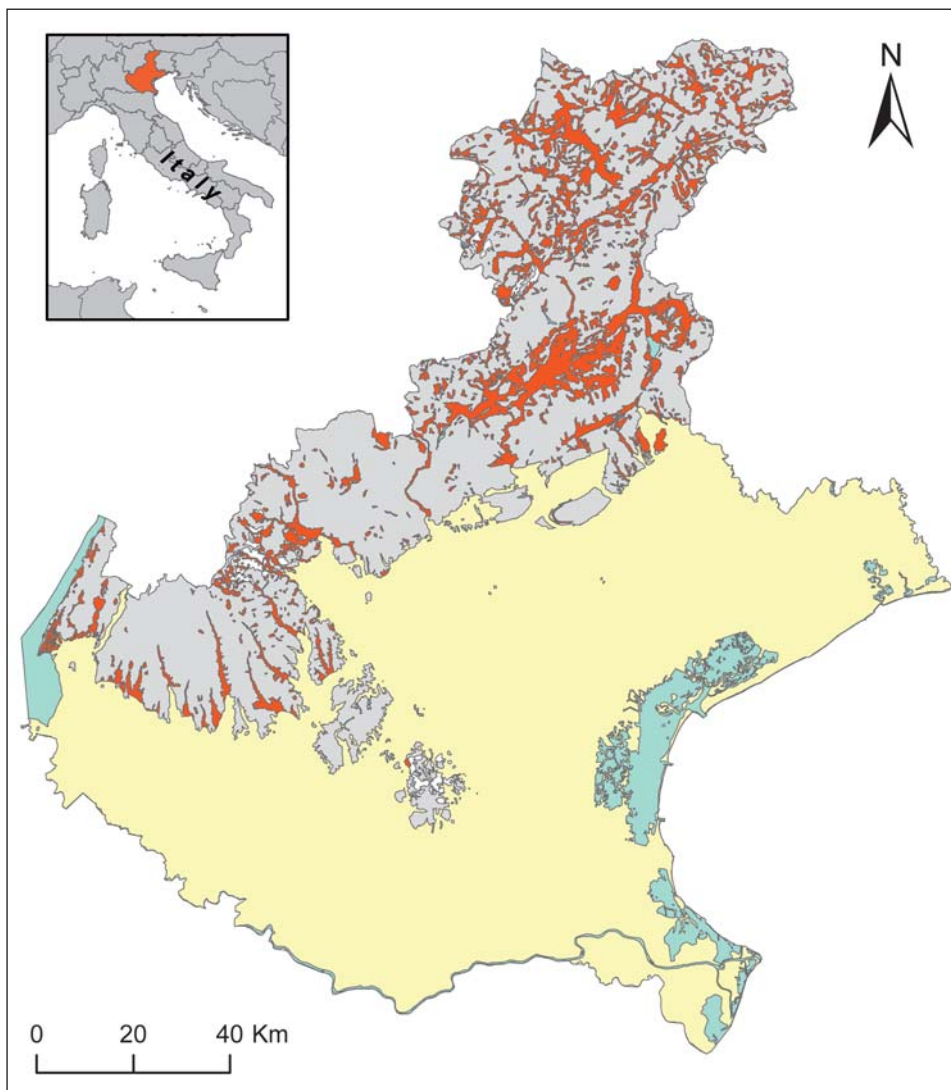


Fig. 1 - Distribuzione delle UC della carta geologica: in grigio le UC delle formazioni geologiche, in rosso le UC dei depositi quaternari delle aree APC.

Le 48 Unità Cartografiche (UC) delle aree APC comprendono 44 UC costituite da formazioni rocciose spesso riunite in gruppi omogenei per esigenze di scala e coprono il 76% dell'area di studio. Le restanti 4 UC comprendono i depositi alluvionali, fluvio-glaciali, lacustri e palustri di montagna, depositi eluvio-colluviali, detritici e di frana e infine depositi morenici e inframorenici (Fig. 1).

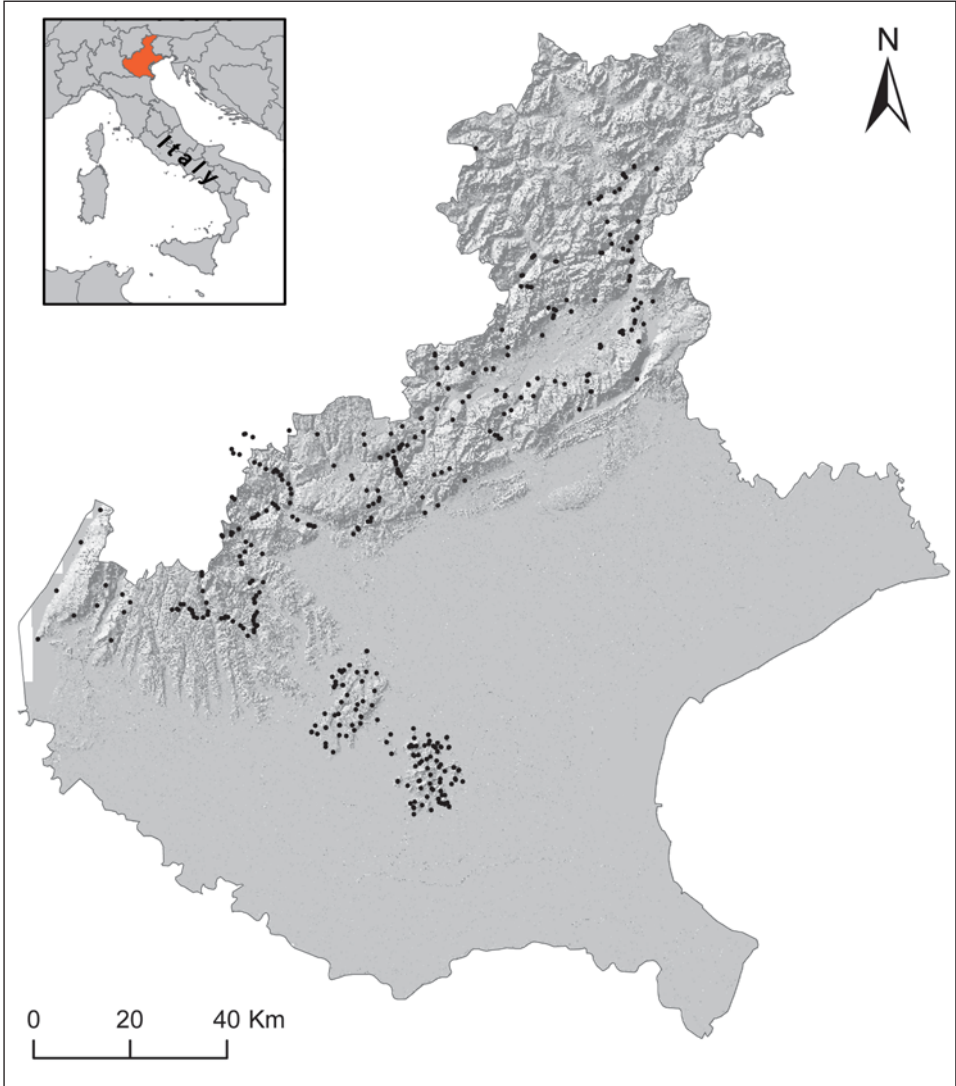


Fig. 2 - Ubicazione dei punti di raccolta dei campioni.

Il campionamento è stato pianificato in modo tale da ottenere una copertura il più possibile uniforme e statisticamente coerente dell'area di interesse. In particolare è stato prestabilito l'obiettivo di prelevare, per ciascuna UC, un numero di campioni tale da ottenere un rapporto tra area e numero di campioni minore o uguale a 25 km².

Nel periodo 2011-2012 sono stati raccolti 486 campioni, ovvero un campione ogni 15 km² (Fig. 2). Grazie ai campioni raccolti sono state investigate 30 UC che coprono 5200 km² ovvero il 73% della superficie delle APC. Le UC totalmente inesplorate sono 14 perciò, se si escludono le aree dei depositi, le aree completamente inesplorate costituiscono solo il 3% dell'area di studio.

Per ogni campione di roccia, prelevato da affioramenti freschi rappresentativi della formazione riconosciuta (Fig. 3a), sono state acquisite e archiviate in un apposito database informazioni di carattere generale (data e luogo di campionamento, coordinate GPS e condizioni climatiche) e di carattere geologico (sigla dell'UC, formazione, litologia, granulometria, grado di cementazione, tessitura, colore, minerali riconoscibili, stato dell'affioramento).

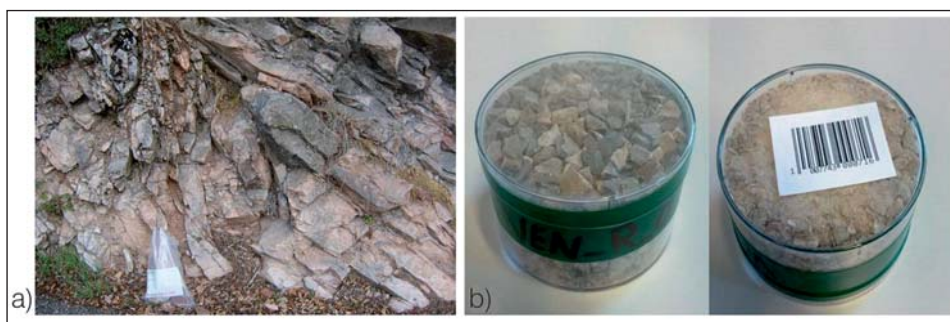


Fig. 3 - a) Esempio di affioramento all'interno della Formazione Scaglia Rossa con relativo campione raccolto. b) Campioni di roccia pronti ad essere analizzati con il sistema MCA_Rad.

Nei giorni successivi alla raccolta, i campioni sono stati preparati per essere confezionati in scatolette cilindriche di policarbonato di 180 cc (75 mm di diametro e 45 mm di altezza) sigillate da un nastro adesivo (Fig. 3b). Ogni campione è stato ben frantumato in modo da ottenere pezzetti di dimensioni non superiori a 0.5 cm. Le scatolette sono state successivamente pesate con una bilancia tecnica digitale (sensibilità di 0.1 g) ed etichettate con codici a barre in modo da identificare univocamente ogni singolo campione.

A 30 giorni dalla preparazione, i campioni sono stati misurati con il sistema MCA_Rad (Fig. 4), realizzato presso i Laboratori Nazionali di Legnaro (INFN) (XHXHA *et alii*, 2013). Il sistema è costituito da 2 rivelatori a semiconduttore HPGe (Hyper Pure Germanium) mantenuti ad una temperatura costante di -190°C con un sistema di raffreddamento ad azoto liquido. L'MCA_Rad è dotato inoltre di un sistema di schermatura costituito da rame e piombo, un sistema automatico di caricamento dei campioni ed un sistema di lettura di codice a barre.

L'analisi delle misure è stata condotta attraverso l'utilizzo del software di analisi jRadView realizzato appositamente per la gestione del sistema. Le infor-

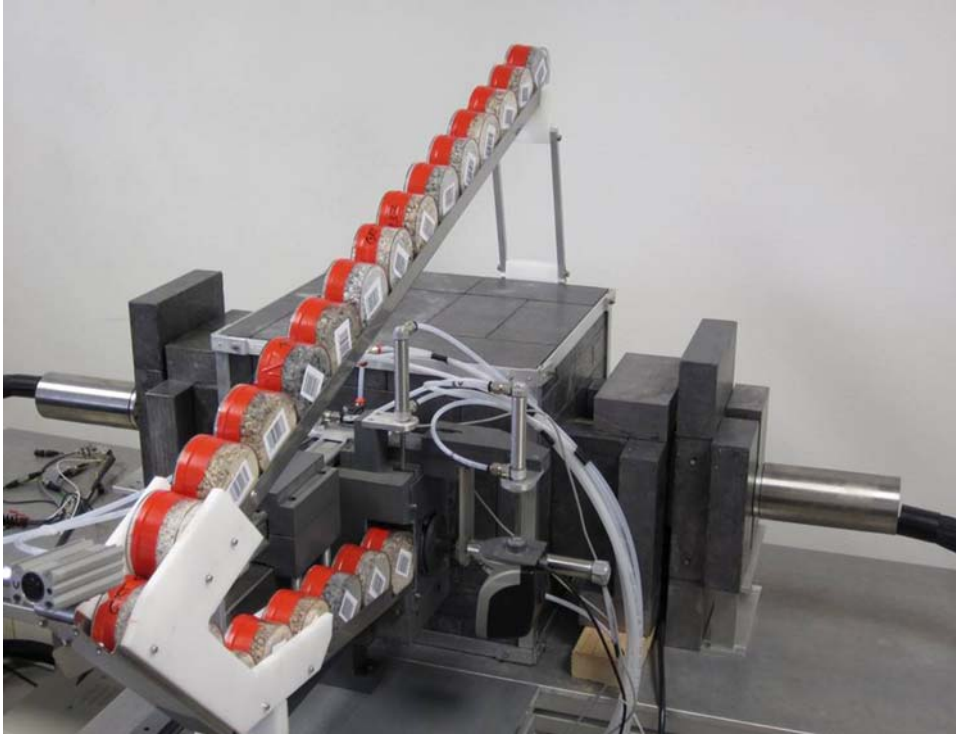


Fig. 4 - Il sistema di misura MCA_Rad.

mazioni necessarie, quali tempo di acquisizione (in questo caso 1 ora), peso della scatoletta e codice a barre vengono inserite attraverso un file di input. Al termine dell'analisi viene prodotto un file ASCII contenente tra l'altro le concentrazioni specifiche (Bq/kg) e le abbondanze degli isotopi di interesse (K, U e Th), che saranno inserite nel database.

5. ANALISI DEI DATI

Al fine di analizzare le distribuzioni del contenuto di radioattività naturale delle formazioni rocciose sono stati realizzati gli istogrammi di frequenza per ciascun radioisotopo includendo tutti i 486 campioni.

Come documentato da studi precedenti (AHRENS, 1954 e MALANCA, 1996), le distribuzioni del contenuto di ^{40}K , ^{238}U e ^{232}Th presentano una spiccata asimmetria positiva e risultano ben modellate da funzioni lognormali. Sulla base di tali osservazioni le successive analisi sono state condotte assumendo che le concen-

trazioni dei radioisotopi seguano, per ciascuna UC, una distribuzione lognormale, di cui si è studiata la mediana e la relativa deviazione standard.

Dopo aver calcolato per ogni isotopo la media e la deviazione standard dei logaritmi delle concentrazioni, attraverso l'utilizzo di un codice Matlab sono stati generati per ogni variabile 10^5 valori imponendo una distribuzione lognormale secondo il metodo di simulazione Monte Carlo. Tale codice prevede il calcolo dei parametri statistici (mediana ed 1 sigma) per i tre isotopi e per altre variabili da esse derivate, ovvero i rapporti Th/U e K/U e l'attività totale in Bq/kg. In Tab. 1 sono riportati i risultati ottenuti per ciascuna UC con la relativa descrizione delle formazioni geologiche e delle litologie presenti.

6. RISULTATI

L'analisi del contenuto di radioattività naturale delle formazioni rocciose delle aree APC ha portato alla realizzazione di un report dettagliato per ogni UC e all'elaborazione delle carte tematiche relative alla distribuzione di ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th e dell'attività specifica totale, A.

6.1 Sintesi dei risultati per ogni UC

Potendo disporre di un dataset originale e con un numero statisticamente significativo di campioni, è stato possibile caratterizzare il contenuto di radioattività in modo dettagliato per le principali UC. Lo studio, riportato nei dettagli in Strati, 2012 comprende:

- una descrizione sintetica delle formazioni e delle litologie appartenenti ad ogni UC;
- la caratterizzazione delle formazioni e delle litologie dei campioni raccolti;
- la descrizione del dataset analizzato, ovvero numero di campioni (C), rapporto tra area dell'UC e numero di campioni (A/C).
- sintesi dei risultati ottenuti.

6.2 Elaborazione delle carte tematiche

Le carte tematiche sono state realizzate attraverso una riclassificazione delle UC presenti nella carte geologica in base al contenuto di radioattività. In particolare è stata elaborata una legenda sulla base dei valori mediani di ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th e di A (attività specifica) ottenuti per ciascuna UC nella fase precedente di analisi: il range complessivo dei valori è stato suddiviso in 7 classi basate sui percentili dell'intero dataset (Fig. 1).

La scelta degli intervalli delle classi varia in funzione dello scopo finale della

UC	DESCRIZIONE	C	A [km ²]	K (%) ± ρ	U (ppm) ± ρ	Th (ppm) ± ρ	A (Bq/kg) ± ρ
6 b	Conglomerato di M. Parei, Arenaria glauconitica di Belluno <i>et al.</i> (conglomerati, arenarie) <i>Oligocene sup-Miocene sup.</i>	5	182	1.30 ^{+0.14} _{-0.12}	2.8 ^{+2.0} _{-1.2}	5.2 ^{+1.3} _{-1.0}	467 ⁺⁴⁹ ₋₄₄
7 a	Formazione di Calvene, Formazione di Salcedo, Calcareniti di Castelgomerto (calcari a nummuliti, calcareniti) <i>Eocene-Oligocene inf.</i>	48	281	0.08 ^{+0.16} _{-0.05}	1.6 ^{+2.2} _{-0.9}	0.6 ^{+1.3} _{-0.4}	58 ⁺⁶² ₋₂₉
7 b	Marne euganee, Calcare di S. Giustina <i>et al.</i> (marne e calcari) <i>Eocene-Oligocene inf.</i>	20	80	0.26 ^{+0.69} _{-0.19}	1.3 ^{+1.1} _{-0.6}	1.6 ^{+1.2} _{-0.7}	112 ⁺²¹⁸ ₋₉₆
8 a	Vulcaniti basaltiche (colate, filoni e camini) <i>Oligocene-Paleocene sup.</i>	11	183	1.09 ^{+0.9} _{-0.49}	1.4 ^{+2.1} _{-0.8}	6.2 ^{+8.6} _{-3.6}	407 ⁺²⁸⁵ ₋₅
8 b	Vulcaniti basaltiche degli Euganei (taloclastiti, tufi e breccie) <i>Oligocene-Paleocene sup.</i>	17	116	0.59 ^{+0.63} _{-0.3}	1.3 ^{+0.4} _{-0.3}	4.0 ^{+3.1} _{-1.8}	218 ⁺¹¹⁹⁹ ₋₉
9 a	Vulcaniti e corpi subvulcanici intermedio-acidi degli Euganei (Latiti) <i>Oligocene inf.</i>	8	5	2.41 ^{+1.05} _{-0.73}	3.3 ^{+0.1} _{-0.1}	11.0 ^{+5.1} _{-3.5}	843 ⁺³²⁹ ₋₄₅
9 b	Vulcaniti e corpi subvulcanici intermedio-acidi degli Euganei (Trachiti) <i>Oligocene inf.</i>	24	17	4.5 ^{+0.85} _{-0.72}	4.4 ^{+1.3} _{-1.0}	21.2 ^{+8.2} _{-6.1}	1554 ⁺²⁶⁹ ₋₂₅
9 c	Vulcaniti e corpi subvulcanici intermedio-acidi degli Euganei (Rioliti) <i>Oligocene inf.</i>	17	26	4.47 ^{+0.77} _{-0.66}	5.0 ^{+2.5} _{-1.6}	30.2 ^{+13.2} _{-9.3}	1600 ⁺²⁴⁷ ₋₂₁₅
10	Flysch bellunese (arenarie e calcareniti torbiditiche) <i>Eocene</i>	8	79	0.26 ^{+0.75} _{-0.19}	2.3 ^{+0.9} _{-0.6}	1.7 ^{+3.4} _{-1.1}	126 ⁺²³³ ₋₁₀₃
11	Scaglia Rossa, S. Variegata, S. Cinerea (calcari, calcari argillosi e marne) <i>Eocene inf.-Cretaceo sup.</i>	73	271	0.25 ^{+0.27} _{-0.13}	0.5 ^{+0.7} _{-0.2}	1.5 ^{+2.6} _{-0.4}	98 ⁺⁸⁷ ₋₄₄
12	Calcare del Monte Cavallo, Calcare del Cellina (calcari, calcareniti, calcari organogeni) <i>Cretaceo</i>	2	104	0.08 ^{+0.5} _{-0.07}	1.5 ^{+0.4} _{-0.3}	1.3 ^{+2.8} _{-0.9}	57 ⁺¹⁵⁷ ₋₂₉
13 a	Biancone, Calcare di Soccher (calcari e calcari argillosi selciferi) <i>Cretaceo-Malm</i>	51	798	0.14 ^{+0.11} _{-0.06}	0.4 ^{+0.3} _{-0.2}	0.8 ^{+1.0} _{-0.4}	55 ⁺³⁶ ₋₂₁

continua

UC	DESCRIZIONE	C	A [km ²]	K (%) ± ρ	U (ppm) ± ρ	Th (ppm) ± ρ	A (Bq/kg) ± ρ
14	Rosso Ammonitico, C. di Campotorondo, Formazione di Fonzaso (calcarei nodulari, selciferi) <i>Malm-Dogger</i>	22	177	0.16 ^{+0.15} _{-0.08}	0.3 ^{+0.4} _{-0.2}	1.0 ^{+0.6} _{-0.4}	50 ⁺⁴⁷ ₋₆₄
15 a	Calcare del Vajont, Dolomia di S. Boldo. (calcareniti oolitiche, talora dolomitizzate) <i>Dogger</i>	5	98	0.03 ^{+0.02} _{-0.01}	1.1 ^{+0.5} _{-0.3}	0.6 ^{+0.05} _{-0.05}	27 ⁺⁸ ₋₆
15 b	Formazione di Igne (calcarei selciferi e marne) <i>Dogger inf.-Lias sup.</i>	7	23	0.52 ^{+0.88} _{-0.32}	1.5 ^{+0.7} _{-0.5}	2.4 ^{+3.5} _{-1.4}	197 ⁺²⁷⁴ ₋₃₀
15 c	Formazione di Soverzene, Dolomia della Schiara. (dolomie, dolomie selciferi e breccie) <i>Lias med.-inf.</i>	4	77	0.04 ^{+0.05} _{-0.02}	1.0 ^{+0.9} _{-0.5}	0.7 ^{+0.2} _{-0.1}	30 ⁺¹⁹ ₋₁₁
16	Gruppo di S. Vigilio, Calcarei Grigi, Encrinite di Fanes (calcarei oolitici, encriniti, calcari) <i>Dogger-Lias</i>	43	844	0.05 ^{+0.09} _{-0.03}	1.0 ^{+0.8} _{-0.5}	0.7 ^{+0.4} _{-0.2}	38 ⁺³³ ₋₁₆
17a	Dolomia Principale (dolomie e calcari dolomitici) <i>Trias sup.</i>	66	761	0.03 ^{+0.09} _{-0.02}	2.1 ^{+3.2} _{-1.3}	0.4 ^{+0.7} _{-0.2}	45 ⁺⁵⁸ ₋₂₄
19	Formazione di S. Cassiano (areniti, calcareniti, breccie calcare) <i>Trias sup.</i>	1	52	2.02 ^{+0.05} _{-0.05}	2.8 ^{+0.2} _{-0.2}	10.5 ^{+0.7} _{-0.7}	710 ⁺¹⁶ ₋₁₆
20	Dolomia Cassiana, Dolomia dello Sciliar, Dolomia del Serla Sup., Calcare della Marmolada (calcarei e dolomie di piattaforma) <i>Trias sup.</i>	5	376	0.05 ^{+0.03} _{-0.02}	1.1 ^{+0.8} _{-0.5}	0.8 ^{+1.1} _{-0.5}	35 ⁺¹⁵ ₋₁₀
21 a	Formazione di Wengen (arenarie vulcaniche, breccie) <i>Trias medio</i>	9	141	2.09 ^{+4.56} _{-1.44}	3.4 ^{+1.6} _{-1.1}	10.6 ^{+1.0} _{-5.4}	755 ⁺¹⁴³⁰ ₋₄₂₅
21 b	Formazione dell'Acquatona, Fm. di Livinallongo, Arenarie di Zoppè (arenarie, calcari, c. selciferi) <i>Trias medio</i>	3	80	0.61 ^{+3.47} _{-0.52}	2.1 ^{+1.3} _{-0.8}	2.8 ^{+1.22} _{-2.3}	270 ⁺¹¹⁰² ₋₁₉₀
22 b	Andesiti (subvulcaniti, colate, filoni) <i>Trias medio</i>	7	21	3.09 ^{+0.31} _{-0.28}	2.8 ^{+0.8} _{-0.6}	11.9 ^{+2.1} _{-1.8}	11047 ⁺³³²⁵ ₋₂₅₅₁
23 a	Rioliti e daciti (corpi sub vulcanici) <i>Trias medio</i>	4	12	1.31 ^{+6.06} _{-1.08}	3.7 ^{+1.3} _{-1.0}	16.2 ^{+0.6} _{-0.6}	523 ⁺¹⁸⁹⁸ ₋₃₃₈
23 b	Rioliti (colate, filoni, camini vulcanici). <i>Trias medio</i>	4	7	4.39 ^{+1.22} _{-0.96}	4.6 ^{+2.6} _{-1.6}	15.6 ^{+1.0} _{-1.0}	1502 ⁺³⁸⁴ ₋₃₀₁

continua

UC	DESCRIZIONE	C	A [km ²]	K (%) ± ρ	U(ppm) ± ρ	Th (ppm) ± ρ	A (Bq/kg) ± ρ
24	Formazione di Agordo, Fm. dell'Ambata, Fm. a Gracilis, Fm. di Dont, <i>et al.</i> (calcari, arenarie, conglomerati e marne) <i>Trias medio</i>	1	52	0.43 ^{+0.02} _{-0.02}	2.0 ^{+0.1} _{-0.1}	2.1 ^{+0.4} _{-0.4}	168 ⁺⁷ ₋₇
25	Dolomia del Serla Inf., Formazione di Werfen. (dolomie e calcari, marne e gessi) <i>Trias med.-inf.</i>	2	152	0.49 ^{+0.07} _{-0.24}	1.9 ^{+0.05} _{-0.04}	2.1 ^{+1.4} _{-0.8}	187 ⁺¹⁴⁶ ₋₇₅
26 a	Formazione a Bellerophon (calcari e dolomie con gessi) <i>Permiano sup.</i>	1	40	0.68 ^{+0.03} _{-0.03}	5.4 ^{+0.2} _{-0.2}	2.9 ^{+0.4} _{-0.4}	291 ⁺¹⁰ ₋₁₀
26 b	Arenaria di Val Gardena, Conglomerato di Sesto (arenarie, siltiti e conglomerati) <i>Permiano sup.</i>	1	43	2.11 ^{+0.05} _{-0.05}	2.2 ^{+0.2} _{-0.2}	13.2 ^{+0.7} _{-0.7}	742 ⁺¹⁶ ₋₁₆
30 a	Sequenze metamorfiche di Agordo, Recoaro e Comelico (Filladi) <i>pre-Carbonifero</i>	16	101	3.33 ^{+1.74} _{-1.14}	3.2 ^{+0.8} _{-0.6}	18.3 ^{+2.6} _{-2.3}	1158 ⁺⁵⁴⁵ ₋₃₅₈

Tab. 1 - Tabella riassuntiva dei valori centrali e delle incertezze di K, U, Th e A per ciascuna UC studiata, C è il numero dei campioni ed A è l'area in km².

carta e da ciò che si intende mettere in evidenza (REIMANN, 2005). In questo studio è stato perseguito l'obiettivo principale di raggruppare all'interno di una stessa classe le UC con concentrazioni dei radioisotopi e attività totali simili.

Per ciascun isotopo, il limite superiore della prima classe è stato scelto sulla base dei valori di «Minum Detectable Activity» (MDA) registrati durante le fasi di misura. L'MDA è un parametro che definisce la minima quantità di nuclide radioattivo che può essere determinata in termini di limite di attività. All'interno del dataset analizzato molti campioni presentano valori di radioattività molto bassi e in particolare il 16%, il 6% e il 41% delle misure di concentrazione rispettivamente per il K, U e Th risultano essere inferiori all'MDA. In questi casi sono state assegnati i valori dell'MDA come valori di riferimento, ovvero 0.03 % per il potassio, 0.2 per l'uranio e 0.9 ppm per il torio (Fig. 5).

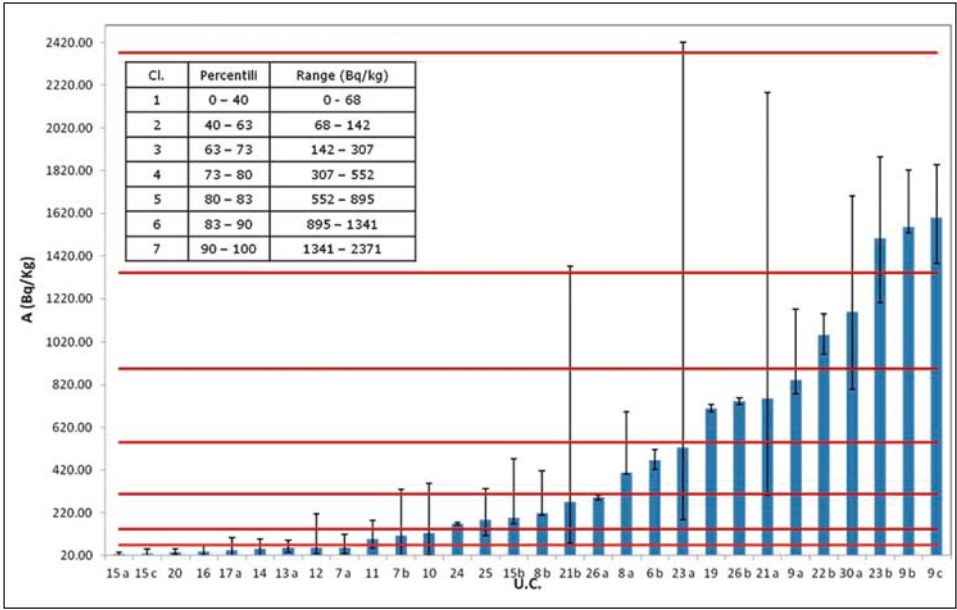


Fig. 5 - Distribuzione dei valori mediani di A delle U.C. con relative barre di errore; le linee rosse indicano i valori corrispondenti ai percentili scelti.

La presenza di depositi quaternari nelle aree APC ha portato ad adottare per la loro classificazione una strategia differente rispetto a quanto fatto per le 44 UC costituite da formazioni geologiche. È stato scelto infatti un approccio geo-statistico e, attraverso l'applicazione del metodo Inverse Distance Weighting (IDW), sono state stimate le classi dei poligoni dei depositi quaternari sulla base di quelle assegnate alle formazioni geologiche limitrofe.

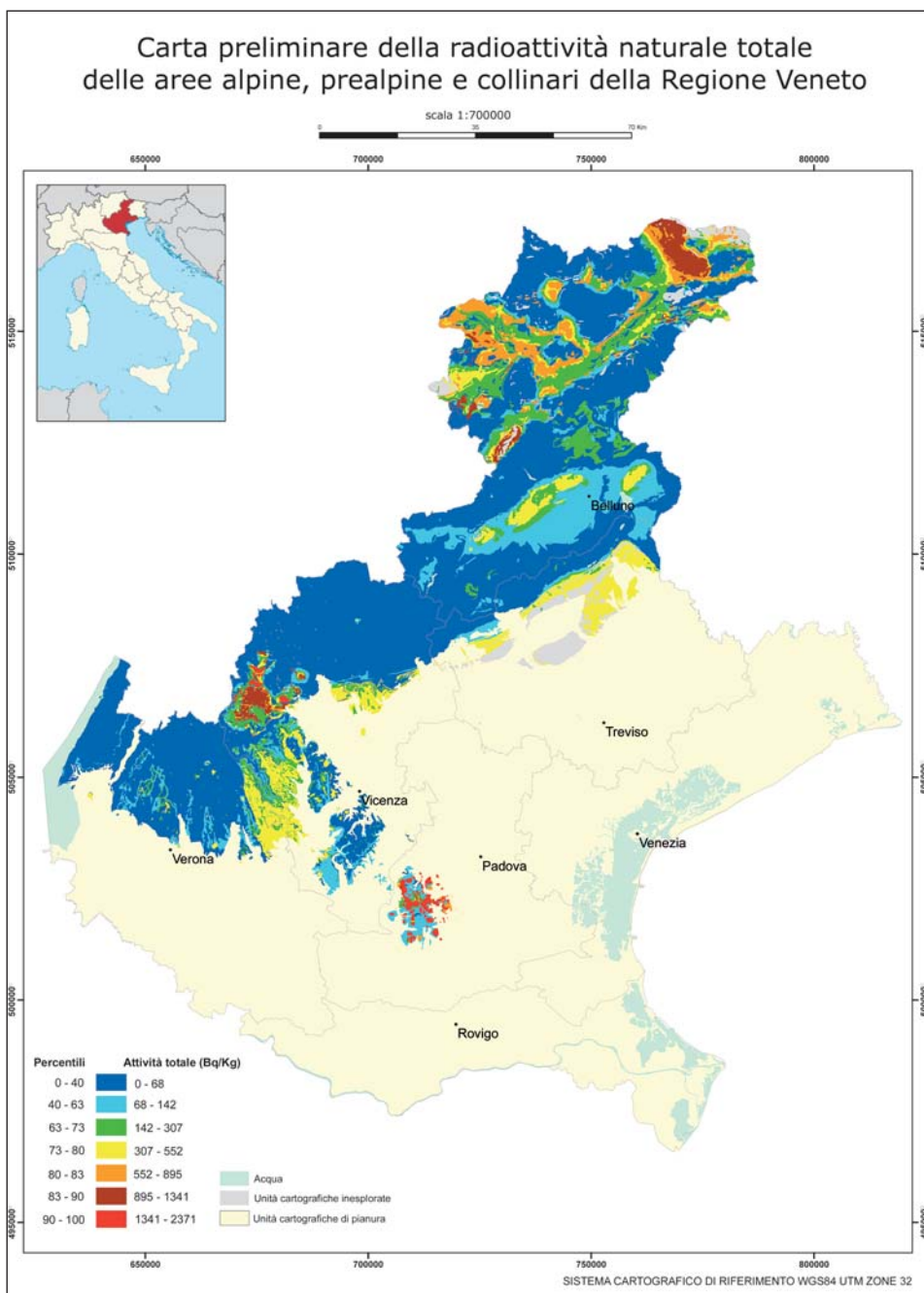


Fig. 6 - Carta preliminare della radioattività naturale totale delle aree Alpine, Prealpine e Collinari della Regione Veneto.

Il presente studio rientra in un progetto più ampio denominato Rad_Monitor, che si pone l'obiettivo di realizzare la carta della radioattività della regione Veneto attraverso misure di spettroscopia gamma su campioni, in situ e airborne. Nel presente report sono stati presentati i risultati preliminari della caratterizzazione delle principali UC delle aree Alpine, Prealpine e Collinari (APC) venete, sulla base dei dati ottenuti con il sistema MCA_Rad su campioni di roccia prelevati da affioramenti rappresentativi. Rispetto agli obiettivi prefissati, ovvero disporre di almeno un campione ogni 25 km², questo è un report preliminare basato su circa il 97% della superficie coperta da APC: esso ha comunque offerto alcune importanti indicazioni.

- La metodologia di campionamento basata sulla cartografia geologica si è rivelata efficace. Come risulta evidente dai dati riportati in tab. 1 e in fig. 5, le formazioni rocciose presentano una sostanziale omogeneità di radioisotopi nell'arco della loro estensione che a volte supera le centinaia di km. Nel caso di alcune formazioni si osserva una dispersione di valori per alcuni isotopi che può essere ricondotta all'eterogeneità del reservoir stesso. Uno studio di dettaglio basato sulla caratterizzazione litologica può essere un importante stimolo anche per una comprensione dell'ambiente deposizionale o orogenetico che ha originato la roccia stessa.
- Il 33.5 % delle aree APC (2403 km²) è costituito da tre UC: Biancone, Calcarei grigi e Dolomia Principale. Dalle misure di spettroscopia gamma è emerso che i valori mediani del contenuto di K e Th di tali formazioni sono prossimi o inferiori al MDA. Ciò ha richiesto un particolare studio per l'analisi di questi dati e per il futuro non si escludono ulteriori misure più prolungate per alcuni dei campioni raccolti. In ogni caso, risulta già evidente che circa un terzo delle aree APC del Veneto appartiene alla classe 1 della legenda della cartografia tematica, corrispondente a valori di contenuto di K e Th molto al di sotto delle medie mondiali.
- Il rapporto Th/U di alcune rocce sedimentarie carbonatiche è particolarmente anomalo e sarà sicuramente oggetto di ulteriori indagini. In molti campioni di dolomia e calcari dolomitici si registrano rapporti Th/U < 0.5, ben al di sotto del valor medio (Th/U = 1) riportato da (IAEA, 2003). Sicuramente processi di arricchimento in U di queste rocce vanno ricercati negli ambienti deposizionali che le hanno originate e nei successivi processi orogenetici.
- Il valore medio, citato in letteratura, del rapporto Th/U delle rocce sedimentarie carbonatiche è circa 1 (IAEA, 2003); le analisi dei dati portate avanti in questo lavoro confermano tale dato ad eccezione delle UC delle quali fanno parte dolomie e calcari dolomitici. Come si può osservare dalla Fig. 7 esse presentano valori del rapporto Th/U molto più bassi.

- Le rocce magmatiche appartenenti alle UC8a, 8b, 9a, 9b, 9c, 22b, 23a e 23b hanno concentrazioni di radionuclidi elevate e costituiscono le formazioni geologiche più radioattive delle aree APC. Risulta evidente come il contenuto di radioattività (ed in particolare di U) sia strettamente correlato all'acidità della roccia, ovvero al contenuto di silice. Questa evidenza può essere da stimolo per ulteriori indagini orientate alla comprensione dell'evoluzione dei fenomeni di magmatismo che hanno portato all'attuale messa in posto.
- L'UC 30a, costituita dalle filladi della sequenza metamorfica di Recoaro, presenta un alto contenuto di K, U e Th. Ciò potrebbe indicare che i sedimenti originari, dai quali si sono formate le filladi per ricristallizzazione metamorfica, hanno una componente vulcanica non trascurabile. Infatti tali rocce, appartenenti al basamento cristallino originatosi in seguito ai processi di età ercinica, trasformarono attraverso ricristallizzazioni metamorfiche e molteplici deformazioni i depositi originari costituiti da arenarie, argille, calcari e rocce vulcaniche.

BIBLIOGRAFIA

- AHRENS H.L., 1954 - The lognormal distribution of the elements (A fundamental law of geochemistry and its subsidiary), *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 5: 49-73.
- ANTONELLI R. *et alii*, 1990 - Carta Geologica della Regione Veneto, scala 1:250000, Regione del Veneto.
- DICKSON B.L. & SCOTT K.M., 1997 - Interpretation of aerial gamma ray surveys-adding the geochemical factors. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17 (2): 187-200.
- IAEA, 2003 - International Atomic Energy Agency, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, *IAEA-TECDOC-1363*, Vienna.
- MALANCA A. *et alii*, 1996 - Distribution of ²²⁶Ra, ²³²Th, and ⁴⁰K in Soils of Rio Grande do Norte (Brazil), *J. Environ. Radioactivity*, 30 (1): 55-67.
- REIMANN C., 2005 - Geochemical mapping: technique or art? *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 5: 359-370.
- STRATI V., 2012 - Analisi del contenuto di radioattività delle principali formazioni rocciose delle aree alpine, prealpine e collinari della Regione Veneto, finalizzata alla produzione di carte tematiche della distribuzione di radionuclidi naturali. *Tesi di Laurea, Siena*.

