

**P. DE FELICE, S. MIGLIORISI, S. TOMA, A. FAZIO,
M. CAPONE, L. SPAGNUOLO, M. CAPOGNI,
L. RINALDI, F. CARDELLINI, P. MARTUCCI,
A. EMBRIACO, V. DE COSTE, A.C. IAFRATI,
M. PINTO, C. SILVESTRI, G. CAPPADOZZI,
A. DE DONATO, P. CARCONI, A. PETRUCCI**

Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti
Centro Ricerche Casaccia

PROGRAMMA NAZIONALE PER L’AFFIDABILITÀ DELLE MISURE DI RADIAZIONI IONIZZANTI BASATO SU CONFRONTI INTERLABORATORIO (ILC) RAPPORTO TECNICO CONCLUSIVO

RT/2025/8/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

P. DE FELICE, S. MIGLIORISI, S. TOMA, A. FAZIO,
M. CAPONE, L. SPAGNUOLO, M. CAPOGNI,
L. RINALDI, F. CARDELLINI, P. MARTUCCI,
A. EMBRIACO, V. DE COSTE, A.C. IAFRATI,
M. PINTO, C. SILVESTRI, G. CAPPADOZZI,
A. DE DONATO, P. CARCONI, A. PETRUCCI

Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti
Centro Ricerche Casaccia

**PROGRAMMA NAZIONALE PER L’AFFIDABILITÀ
DELLE MISURE DI RADIAZIONI IONIZZANTI
BASATO SU CONFRONTI INTERLABORATORIO (ILC)
RAPPORTO TECNICO CONCLUSIVO**

RT/2025/8/ENEA

ENEA

AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L’ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina www.enea.it

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

PROGRAMMA NAZIONALE PER L’AFFIDABILITÀ DELLE MISURE DI RADIAZIONI IONIZZANTI BASATO SU CONFRONTI INTERLABORATORIO (ILC) RAPPORTO TECNICO CONCLUSIVO

P. De Felice, S. Migliorisi, S. Toma, A. Fazio, M. Capone, L. Spagnuolo, M. Capogni, L.I. Rinaldi,
F. Cardellini, P. Martucci, A. Embriaco, V. De Coste, A.C. Iafrati, M. Pinto, C. Silvestri,
G. Cappadozzi, A. De Donato, P. Carconi, A. Petrucci

Riassunto

L’Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti dell’ENEA (INMRI-ENEA, Istituto Metrologico Nazionale in virtù della Legge 273/91) ha organizzato un Programma nazionale per la promozione dell’affidabilità delle misure di radiazioni ionizzanti basato su Confronti InterLaboratorio (ILC).

Il Programma è stato finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico (MiSE), Direzione generale per il mercato, la concorrenza, la tutela del consumatore e la normativa tecnica (DGMCTCNT) nell’ambito delle iniziative e studi in materia di controlli sugli strumenti di misura, in contesti di particolare rilevanza per i consumatori con risvolti per la salute e la sicurezza.

L’obiettivo del Programma è stato la tutela del cittadino/consumatore in ogni ambito in cui siano presenti radiazioni ionizzanti, ovvero i pazienti ed i loro familiari, nelle applicazioni mediche, così come qualunque cittadino che viva ed operi in ambienti sottoposti a sorveglianza, o che si nutra di prodotti controllati. Tale tutela è garantita dalla promozione dell’affidabilità delle misure.

La misurazione delle radiazioni ionizzanti trova ampio impiego nei settori ambientale, medico (radiodiagnostica, medicina nucleare e radioterapia), industriale (nucleare) e della ricerca scientifica, sia per esigenze di radioprotezione sia per ottimizzazione dell’efficacia dell’impiego stesso di tale tipo di radiazioni. Misurazioni affidabili, effettuate con strumentazione e metodi adeguati, rappresentano un elemento imprescindibile per un’ottimale protezione ed utilizzazione.

Tale affidabilità è valutata e promossa mediante Confronti InterLaboratorio (ILC) estesi al maggior numero di Partecipanti raggiunti nell’ambito del programma, su diverse tematiche. Gli ILC sono stati orientati ad aspetti metrologici di base, con elevata ricaduta sul cittadino/consumatore.

I Partecipanti al Programma sono stati soggetti pubblici e privati operanti sul territorio nazionale e che effettuino, a vario titolo, misurazioni di radiazioni ionizzanti. Mediante gli ILC proposti essi hanno potuto confermare la validità delle loro misure o individuare e correggere eventuali criticità. La partecipazione al Programma è stata gratuita, ma esigenze di natura temporale e organizzativa hanno imposto limitazioni al numero di adesioni accettate. Le iscrizioni ricevute sono state valutate in ordine esclusivamente cronologico.

Per ciascuna tipologia di ILC previsto, i Partecipanti hanno potuto confrontare i risultati delle loro misurazioni con i valori assegnati ai misurandi, forniti dall’INMRI. Tutti i risultati sono stati trattati e presentati in forma anonima (mediante codici riservati) per garantire la riservatezza dei Partecipanti. A tal fine il personale dell’INMRI coinvolto nel Programma ha sottoscritto una Dichiarazione di riservatezza, specifica per i dati pertinenti al Programma, e aggiuntiva a quella già sottoscritta dal personale stesso per le attività istituzionali e di servizio dell’INMRI.

Parole chiave: Radiazioni ionizzanti, misura, applicazioni mediche, medicina nucleare, contaminazione superficiale, radon, interconfronto, dose, radioprotezione

SOMMARIO

1	DEFINIZIONI	5
2	INTRODUZIONE	6
2.1	Il Programma	6
2.2	Informazioni di partecipazione	6
2.3	Comitato Scientifico	7
2.4	Contatti	7
2.5	Patrocini.....	8
2.6	Introduzione agli ILC	8
2.6.1	ILC 1 Attività di radionuclidi in una soluzione liquida acquosa.....	8
2.6.2	ILC 2 Attività di radiofarmaci.....	8
2.6.3	ILC 3 Concentrazione di attività del ²²² Rn in aria	8
2.6.4	ILC 4 Misura di dose assorbita in acqua	9
2.6.5	ILC 5 Equivalente di dose personale	10
2.6.6	ILC 6 Contaminazione superficiale	10
3	OGGETTO DEGLI ILC	10
3.1	Misurando	10
3.1.1	ILC 1 Attività di radionuclidi in una soluzione liquida acquosa.....	10
3.1.2	ILC 2 Attività di radiofarmaci.....	11
3.1.3	ILC 3 Concentrazione di attività del ²²² Rn in aria	11
3.1.4	ILC 4 Misura di dose assorbita in acqua	12
3.1.5	ILC 5 Equivalente di dose personale	13
3.1.6	ILC 6 Contaminazione superficiale	13
3.2	Metodo di misura e attrezzature	14
3.2.1	ILC 1 Attività di radionuclidi in una soluzione liquida acquosa.....	14
3.2.2	ILC 2 Attività di radiofarmaci.....	14
3.2.3	ILC 3 Concentrazione di attività del ²²² Rn in aria	15
3.2.4	ILC 4 Misura di dose assorbita in acqua	15
3.2.5	ILC 5 Equivalente di dose personale	16
3.2.6	ILC 6 Contaminazione superficiale	16
3.3	Valori di riferimento ed incertezze	17
3.3.1	ILC 1 Attività di radionuclidi in una soluzione liquida acquosa.....	17
3.3.2	ILC 2 Attività di radiofarmaci.....	17
3.3.3	ILC 3 Concentrazione di attività del ²²² Rn in aria	17
3.3.4	ILC 4 Misura di dose assorbita in acqua	17

3.3.5	ILC 5 Equivalente di dose personale	18
3.3.6	ILC 6 Contaminazione superficiale	18
4	SVOLGIMENTO DEGLI ILC	19
4.1	ILC 1 Attività di radionuclidi in una soluzione liquida acquosa.....	19
4.2	ILC 2 Attività di radiofarmaci.....	20
4.3	ILC 3 Concentrazione di attività del ²²² Rn in aria	21
4.4	ILC 4 Misura di dose assorbita in acqua	22
4.5	ILC 5 Equivalente di dose personale	22
4.6	ILC 6 Contaminazione superficiale	24
5	ANALISI E PRESENTAZIONE DEI RISULTATI	25
5.1	Analisi dati	25
5.2	Presentazione risultati.....	28
5.2.1	ILC 1 Attività di radionuclidi in una soluzione liquida acquosa.....	28
5.2.2	ILC 2 Attività di radiofarmaci.....	35
5.2.3	ILC 3 Concentrazione di ²²² Rn in aria	40
5.2.4	ILC 4 Misura di dose assorbita in acqua	43
5.2.5	ILC 5 Equivalente di dose personale	44
5.2.6	ILC 6 Contaminazione superficiale	48
6	DISCUSSIONE DEI RISULTATI DI CIASCUN ILC	51
6.1	ILC 1 Attività di radionuclidi in una soluzione liquida acquosa	51
6.2	ILC 2 Attività di radiofarmaci	52
6.3	ILC 3 Concentrazione di ²²² Rn in aria.....	52
6.4	ILC 4 Misura di dose assorbita in acqua	53
6.5	ILC 5 Equivalente di dose personale.....	53
6.6	ILC 6 Contaminazione superficiale	55
7	CONCLUSIONI	56
8	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	57

1 DEFINIZIONI

I sei Confronti Interlaboratorio (ILC) organizzati nell'ambito del Programma Nazionale sull'affidabilità delle misure di radiazioni ionizzanti (di seguito "Programma") hanno coinvolto diversi Enti ed Istituti sul territorio nazionale. In questo documento sono utilizzate le seguenti definizioni, tratte dalla normativa di riferimento, norma ISO 17043:2010 in materia di confronti interlaboratorio [UNI 2010, ISO 2010]:

<i>INMRI</i>	Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti dell'ENEA, i cui laboratori sono ubicati presso il Centro Ricerche Casaccia, via Anguillarese 301, Santa Maria di Galeria (RM). INMRI fornisce i valori assegnati per ciascun misurando di ciascun confronto.
<i>Partecipante</i>	Laboratorio che partecipa al programma in uno o più degli ILC previsti.
<i>Confronto Interlaboratorio (ILC)</i>	Organizzazione, esecuzione e valutazione di misurazioni o prove sugli stessi oggetti o su oggetti simili, da parte di due o più laboratori in conformità a condizioni prestabilite [UNI 2010, ISO 2010].
<i>Referente Tecnico dell'INMRI</i>	Punto di contatto INMRI per aspetti tecnici legati ad uno specifico ILC (vedi elenco contatti in volantino) e per invio della Scheda Risultati. Il <i>Referente Tecnico</i> dell'INMRI è tenuto alla clausola di riservatezza.
<i>Punto di Contatto Generale del Partecipante</i>	Punto di contatto del <i>Partecipante</i> per aspetti legati alle fasi di Iscrizione e Prenotazione al Programma
<i>Referente Tecnico del Partecipante</i>	Punto di contatto del <i>Partecipante</i> per aspetti tecnici legati ad uno specifico ILC e per invio della documentazione tecnica.
<i>Referente Spedizioni dell'INMRI</i>	Punto di contatto dell'INMRI per aspetti legati alle spedizioni di materiali e strumenti.
<i>Referente Spedizioni del Partecipante</i>	Punto di contatto del <i>Partecipante</i> per aspetti legati al ricevimento e spedizioni di materiali e strumenti.
<i>Nota Informativa</i>	Documento descrittivo delle operazioni da svolgere per il corretto uso di materiali/strumenti e compilazione della Scheda Risultati necessari allo svolgimento dell'ILC.
<i>Scheda Risultati</i>	Scheda che il <i>Partecipante</i> deve compilare, ed inviare ad INMRI, immettendo i risultati delle misure.
<i>Scheda Partecipante</i>	Documento utilizzato per comunicare al <i>Partecipante</i> il proprio Codice Riservato.
<i>Numero d'Iscrizione</i>	Numero progressivo per ciascun <i>Partecipante</i> che si iscrive al programma, indipendentemente dal numero di ILC a cui partecipa.
<i>Codice Riservato</i>	Codice che identifica in modo anonimo il <i>Partecipante</i> nelle fasi di presentazione dei risultati e indipendentemente dal numero di ILC a cui partecipa.
<i>Dichiarazione di Presa in Carico</i>	Dichiarazione del <i>Partecipante</i> di corretta presa in carico o smaltimento dei Materiali di Riferimento Certificati trattenuti.

2 INTRODUZIONE

2.1 Il Programma

L'Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti dell'ENEA (INMRI-ENEA, Istituto Metrologico Nazionale in virtù della Legge 273/91) ha organizzato un Programma nazionale per la promozione dell'affidabilità delle misure di radiazioni ionizzanti basato su Confronti InterLaboratorio (ILC).

Il Programma è stato finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico (MiSE), Direzione generale per il mercato, la concorrenza, la tutela del consumatore e la normativa tecnica (DGMCTCNT) nell'ambito delle iniziative e studi in materia di controlli sugli strumenti di misura, in contesti di particolare rilevanza per i consumatori con risvolti per la salute e la sicurezza.

L'obiettivo del Programma è stato la tutela del cittadino/consumatore in ogni ambito in cui siano presenti radiazioni ionizzanti, ovvero i pazienti ed i loro familiari, nelle applicazioni mediche, così come qualunque cittadino che viva ed operi in ambienti sottoposti a sorveglianza, o che si nutra di prodotti controllati. Tale tutela è garantita dalla promozione dell'affidabilità delle misure.

La misurazione delle radiazioni ionizzanti trova ampio impiego nei settori ambientale, medico (radiodiagnostica, medicina nucleare e radioterapia), industriale (nucleare) e della ricerca scientifica, sia per esigenze di radioprotezione sia per ottimizzazione dell'efficacia dell'impiego stesso di tale tipo di radiazioni. Misurazioni affidabili, effettuate con strumentazione e metodi adeguati, rappresentano un elemento imprescindibile per un'ottimale protezione ed utilizzazione.

Tale affidabilità è valutata e promossa mediante Confronti InterLaboratorio (ILC) estesi al maggior numero di *Partecipanti* raggiunti nell'ambito del programma, su diverse tematiche. Gli ILC sono stati orientati ad aspetti metrologici di base, con elevata ricaduta sul cittadino/consumatore.

I *Partecipanti* al Programma sono stati soggetti pubblici e privati operanti sul territorio nazionale e che effettuino, a vario titolo, misurazioni di radiazioni ionizzanti. Mediante gli ILC proposti essi hanno potuto confermare la validità delle loro misure o individuare e correggere eventuali criticità.

La partecipazione al Programma è stata gratuita, ma esigenze di natura temporale e organizzativa hanno imposto limitazioni al numero di adesioni accettate. Le iscrizioni ricevute sono state valutate in ordine esclusivamente cronologico.

Per ciascuna tipologia di ILC previsto, i *Partecipanti* hanno potuto confrontare i risultati delle loro misurazioni con i valori assegnati ai misurandi, forniti dall'INMRI. Tutti i risultati sono stati trattati e presentati in forma anonima (mediante codici riservati) per garantire la riservatezza dei *Partecipanti*. A tal fine il personale dell'INMRI coinvolto nel Programma ha sottoscritto una Dichiarazione di riservatezza, specifica per i dati pertinenti al Programma, e aggiuntiva a quella già sottoscritta dal personale stesso per le attività istituzionali e di servizio dell'INMRI.

2.2 Informazioni di partecipazione

Ciascun ILC è stato orientato ad una diversa tipologia di misura ed è stato condotto mediante uno specifico protocollo sperimentale. I protocolli hanno previsto la distribuzione/circolazione di materiali o strumenti di riferimento, secondo i casi.

Per ciascun ILC è stato pubblicato un calendario con le date proposte per lo svolgimento delle misure. I *Partecipanti* si sono iscritti al Programma compilando un modulo online. Successivamente essi hanno potuto selezionare gli ILC d'interesse e prenotare la loro partecipazione scegliendo la data più consona tra quelle offerte e ancora libere. Le spese di spedizione dei materiali o strumenti di riferimento, da e

verso i *Partecipanti* sono state a carico di INMRI¹.

I protocolli sono stati supportati da Note Informative, con indicazioni sullo svolgimento dell'ILC e sull'invio dei risultati, e da Schede Risultati, da compilare a cura del *Partecipante* ed inviare all'INMRI tramite un modulo online opportunamente predisposto dall'INMRI.

Ulteriori informazioni riguardanti i protocolli degli ILC, le iscrizioni, il calendario delle prove, e tutta la documentazione sono stati resi disponibili sulle pagine web dell'INMRI.

2.3 Comitato Scientifico

Il Programma si è avvalso del contributo altamente qualificato di un Comitato Scientifico che riflette le competenze nei diversi settori specialistici previsti.

La composizione del Comitato Scientifico è la seguente:

Nominativo	Affiliazione
La Marra Daniela	MiSE
De Felice Pierino	INMRI-ENEA
De Angelis Cinzia	ISS
Fantuzzi Elena	ENEA
Fontani Sonia	ISIN
Magnoni Mauro	ARPA Piemonte
Mancini Francesco	SOGIN
Pugliese Mariagabriella	Università degli Studi di Napoli Federico II
Russo Serenella	AUSL Toscana Centro
Trevisi Rosabianca	INAIL

2.4 Contatti

- *Organizzatore:*
ENEA - Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare
Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti
C.R. Casaccia, Via Anguillarese, 301
S.M. Galeria I-00123 Roma - ITALY
- *Segreteria scientifica:*
Pinto Massimo, INMRI-ENEA
Eventuali richieste di chiarimento possono essere indirizzate a:
massimo.pinto@enea.it

Per aspetti specifici di ciascun ILC, sono stati indicati i seguenti referenti tecnici:

ILC	<i>Referente Tecnico dell'INMRI</i>
1	M. Capone, mauro.capone@enea.it
2	M. Capogni, marco.capogni@enea.it
3	F. Cardellini, francesco.cardellini@enea.it
4	A. Embriaco, alessia.embriaco@enea.it
5	M. Pinto, massimo.pinto@enea.it
6	P. Carconi, pierluigi.carconi@enea.it

¹ Ad eccezione dello ILC 5 in cui i partecipanti hanno spedito, a loro spese, i dosimetri da irraggiare presso INMRI (tratta *Partecipante* -> INMRI).

2.5 Patrocini

L'elenco degli Enti e le Associazioni patrocinate è stato mantenuto aggiornato sulle pagine web dell'INMRI. Aspetti specifici di ciascun ILC sono trattati nel seguito del presente capitolo.

2.6 Introduzione agli ILC

I paragrafi seguenti riportano introduzioni specifiche agli ILC organizzati, sottolineandone l'importanza in ciascun specifico settore.

2.6.1 ILC 1 Attività di radionuclidi in una soluzione liquida acquosa

La capacità di misura della concentrazione di attività di radionuclidi in matrici liquide acquose è un'esigenza particolarmente sentita nel Paese, considerate le numerose applicazioni nel campo della sorveglianza ambientale, delle applicazioni mediche, industriali, nucleari e della ricerca scientifica.

Nel corso degli anni l'INMRI ha organizzato, in collaborazione con le Istituzioni preposte alla sorveglianza della radioattività ambientale (ora ISIN, ex-ISPRA e, ancor prima, ex-APAT) numerose campagne di taratura e confronti interlaboratorio, coinvolgendo i laboratori afferenti alla REte di Sorveglianza nazionale per il controllo sulla RADioattività ambientale (RESORAD) oltre a numerosi altri soggetti attivi in questo settore sul territorio nazionale (Università, Enti, Ospedali, Laboratori privati). Tali campagne hanno avuto l'obiettivo di garantire, per tutti i laboratori coinvolti, la riferibilità a livello nazionale ed internazionale ad un comune campione ("standard") di riferimento, sviluppato e mantenuto presso l'INMRI. Tali campagne, grazie anche alla loro periodicità, hanno consentito di realizzare, per i laboratori interessati, i presupposti tecnico-scientifici per raggiungere adeguati livelli di accuratezza e di affidabilità.

Per quanto detto, l'ILC 1 è stato rivolto, prevalentemente, a misurazioni di concentrazione di attività di radionuclidi di interesse ambientale mediante spettrometria gamma (individuazione e quantificazione dei radionuclidi gamma-emettitori presenti) e metodi radiochimici (quantificazione dello ^{90}Sr). Il livello di concentrazione di attività scelto rientra nel campo di applicazione delle tecniche di monitoraggio ambientale.

2.6.2 ILC 2 Attività di radiofarmaci

La capacità di misura dell'attività di radionuclidi d'interesse della medicina nucleare, mediante attivimetri, è un'esigenza molto sentita nel Paese, considerati i numerosi centri di medicina nucleare che utilizzano radiofarmaci per diagnostica e terapia e le numerose applicazioni mediche di radiofarmaci.

La normativa di legge e tecnica vigente [GU, 2005] richiede che la strumentazione necessaria per determinare l'attività e la purezza radiochimica del radiofarmaco debba essere adeguatamente schermata dall'influenza della radiazione ambientale e opportunamente tarata. Inoltre, si richiede che l'attività dei radiofarmaci sia nota con incertezza inferiore al 10%. Anche per i centri di produzione di radiofarmaci, presenti nel Paese, l'accuratezza della misura di attività è necessaria come richiesto dalla legislazione vigente.

Ad oggi l'INMRI ha soddisfatto numerose richieste di taratura di attivimetri, provenienti da singoli centri di produzione o da centri di medicina nucleare del Paese. Non era ancora stato svolto, tuttavia, un ILC a carattere nazionale in questo settore.

Pertanto, tale ILC si è reso necessario per promuovere il raggiungimento, indipendentemente dalla catena di riferibilità di ciascun *Partecipante*, di adeguati livelli di accuratezza e di affidabilità delle misure nel settore dell'attività di radiofarmaci.

2.6.3 ILC 3 Concentrazione di attività del ^{222}Rn in aria

La capacità di misura della concentrazione di attività di radon in aria, in particolare del suo andamento temporale, è un'esigenza particolarmente sentita non solo nel Paese, ma nel mondo intero, considerata la diffusione di misure di radon in numerose applicazioni nel campo della sorveglianza ambientale, delle abitazioni e dei luoghi di lavoro, nonché nello studio dei processi di diffusione del radon negli edifici e la valutazione dell'efficacia delle opportune azioni di rimedio.

Nel corso degli anni l'INMRI, spesso in collaborazione con l'Associazione Italiana di Radioprotezione (AIRP), ha organizzato diversi ILC a livello nazionale ed internazionale nel settore delle misure di concentrazione di radon in aria. Tali campagne, grazie anche alla loro periodicità, hanno consentito di realizzare, per i laboratori interessati, i presupposti tecnico-scientifici per raggiungere adeguati livelli di accuratezza e di affidabilità.

La grande maggioranza degli ILC svolti fino ad ora hanno riguardato dosimetri passivi ad integrazione come i dosimetri a tracce nucleari CR39 o dosimetri basati su elettretti. Pochissimi sono invece gli ILC destinati a strumenti di misura elettronici atti a registrare l'andamento della concentrazione di radon nel tempo. Pertanto, un tale ILC si è reso necessario per estendere anche a questo settore le verifiche di affidabilità su citate.

In particolare, tenuto conto del diffondersi sul mercato di nuovi dispositivi di piccole dimensioni e dal prezzo contenuto entro mille euro, si è resa necessaria una verifica del corretto utilizzo di questi nuovi strumenti.

2.6.4 ILC 4 Misura di dose assorbita in acqua

L'attuazione di programmi per l'assicurazione della qualità dei trattamenti radioterapici è un'esigenza fondamentale dei centri di radioterapia per garantire la sicurezza dei pazienti, anche in termini di adeguamento alla direttiva Europa 2013/59/Euratom [EURATOM, 2013] e alla normativa nazionale, D. Lgs. 101 del 31 Luglio 2020 [DLGS, 2020]. Nell'ambito della garanzia di qualità, lo svolgimento di confronti interlaboratorio su tematiche di misura riguardanti la dosimetria in radioterapia ha un ruolo determinante per la verifica della corretta implementazione dei protocolli dosimetrici nei singoli centri di radioterapia, per la validazione di tecniche e procedure operative adottate localmente e per la valutazione del grado di equivalenza delle misurazioni effettuate nei diversi centri sul territorio nazionale.

In Italia si contano due esperienze di confronti pilota nel settore della dosimetria in radioterapia, entrambe promosse dall'Istituto Superiore di Sanità. La prima è stata condotta nei primi anni del 2000, la seconda è in corso e riguarda un programma di audit clinici e dosimetrici applicati alle tecniche Intensity-Modulated Radiotherapy (IMRT) e Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT). Entrambe le attività sono legate a progetti finanziati dal Ministero della Salute coinvolgendo un numero ristretto di centri. Queste esperienze hanno evidenziato la difficoltà nel programmare a livello nazionale confronti periodici che estendano la partecipazione a tutti i centri italiani. Ancora su questo tema, nel 2018 è stata avviata una collaborazione scientifica tra l'INMRI e l'Associazione Italiana di Fisica Medica e Sanitaria (AIFM). Nell'ambito di tale collaborazione è stata offerta ai centri di radioterapia italiani la possibilità di eseguire confronti bilaterali, ovvero audit dosimetrici, nei quali l'INMRI verifici e certifichi che il centro misuri correttamente la dose assorbita in acqua in uno specifico set-up sperimentale corrispondente alle condizioni di taratura dell'acceleratore clinico. Il consistente numero di richieste ricevute per questa tipologia di confronto ha confermato l'esigenza a livello nazionale di programmi continuativi di confronti dosimetrici nel settore medico della radioterapia.

In tale contesto, l'ILC 4, proposto nell'ambito della convenzione tra MiSE e INMRI, è stato rivolto alla verifica della capacità di misura in Italia della grandezza dose assorbita in acqua nel settore della radioterapia con fasci esterni di fotoni e di stabilire il grado di uniformità dell'affidabilità delle

misurazioni. Le condizioni di misura sono estese a quelle richieste per l'implementazione delle tecniche e modalità di radioterapia più avanzate.

2.6.5 ILC 5 Equivalente di dose personale

La misura di equivalente di dose personale $H_p(10)$ costituisce parte fondamentale della radioprotezione per il monitoraggio dell'esposizione esterna del personale esposto alle radiazioni ionizzanti per motivi professionali, in ambito sanitario come in ambito nucleare, di gestione di rifiuti radioattivi, nel *decommissioning* di ex impianti nucleari e nelle attività di ricerca scientifica. Sebbene i *Partecipanti* a questo Programma Nazionale possono aver già partecipato ad altre campagne di confronto interlaboratorio, come per esempio nell'ambito dei programmi di confronto offerti dalla rete EURADOS, il Programma Nazionale finanziato dal MiSE ha offerto l'opportunità di prendere visione delle odierne capacità di misura di servizi dosimetrici distribuiti sul territorio nazionale. Inoltre, attraverso le adesioni dei *Partecipanti*, è stato possibile effettuare una stima del numero dei servizi di dosimetria operanti sul territorio nazionale, che, come da recenti disposizioni (art. 127 D.Lgs. 101/2020) [DLGS, 2020], devono comunicare la loro attività ad ISIN.

2.6.6 ILC 6 Contaminazione superficiale

La corretta misura del rateo di emissione superficiale di radiazioni alfa o beta è necessaria per la valutazione della contaminazione superficiale di materiali e oggetti in molteplici applicazioni nel campo della sorveglianza ambientale, delle applicazioni mediche, industriali, nucleari e della ricerca scientifica. Ad oggi l'INMRI ha soddisfatto numerose richieste di taratura di contaminometri, provenienti da laboratori del Paese che utilizzano questi strumenti per varie necessità. Non era ancora stato svolto, tuttavia, un ILC a carattere nazionale in questo settore.

Pertanto, tale ILC si è reso necessario per promuovere il raggiungimento, indipendentemente dalla catena di riferibilità di ciascun *Partecipante*, di adeguati livelli di accuratezza e di affidabilità delle misure nel settore della contaminazione superficiale.

Il livello di rateo di emissione scelto rientra nel campo di applicazione delle tecniche di monitoraggio ambientale.

3 OGGETTO DEGLI ILC

3.1 Misurando

La partecipazione a ciascun ILC non ha vincolato i *Partecipanti* all'adesione a tutte le prove offerte nello ILC a cui essi si erano iscritti. Infatti, ogni *Partecipante* ha scelto, per ciascun ILC verso cui avesse interesse, le prove a cui partecipare e, per ciascuna di esse, ha dovuto inviare un unico risultato. Aspetti specifici di ciascun ILC sono trattati di seguito.

3.1.1 ILC 1 Attività di radionuclidi in una soluzione liquida acquosa

I misurandi oggetto dell'ILC 1 sono stati le concentrazioni di attività di radionuclidi gamma-emettitori e dello ^{90}Sr presenti in un Materiale di Riferimento Certificato (MRC) costituito da una soluzione liquida acquosa tracciata con radionuclidi gamma-emettitori e con ^{90}Sr . Per gamma-emettitori si sono considerati quelli con fotoni di energia compresa tra 40 keV e 2000 keV che il *Partecipante* ha dovuto individuare misurandone la concentrazione di attività.

Il MRC è stato prodotto dall'INMRI in uno o più cicli di produzione, garantendo l'equivalenza dei diversi lotti. Le caratteristiche del MRC sono riportate in

Tabella 1, dove è stata indicata la composizione chimica del MRC (omettendo dati che possano indicare la presenza di particolari radionuclidi).

Per l'esecuzione del confronto, l'INMRI ha fornito a ciascun *Partecipante* un campione di MRC del volume pari a 1 L.

Tabella 1 - Caratteristiche del MRC utilizzato nell'ILC 1.

Tipo di MRC	soluzione liquida acquosa
Matrice e radionuclidi	sorgente liquida in soluzione acquosa tracciata con una miscela di radionuclidi emettitori gamma (energia tra 40 keV e 2000 keV) e ^{90}Sr
Volume totale	50 L
Densità	circa 1 g/cm ³
Composizione chimica del MRC	soluzione acquosa in ambiente acido HCl 1÷4 M + 25 µg/g di alcuni elementi trascinatori inattivi (<i>carrier</i>) sotto forma di cloruri
Altri elementi presenti	tracce di elementi stabili usati come trascinatori (<i>carrier</i>)
Misurando	concentrazione di attività di radionuclidi gamma-emettitori e dello ^{90}Sr
Aliquota di MRC consegnata a ciascun <i>Partecipante</i>	1 L
Concentrazione di attività per radionuclide	nell'intervallo 0,2 - 2 Bq/L
Intervallo di energia considerato	40 keV - 2000 keV
Confezionamento	contenitore in PET con tappo a vite e doppia busta sigillata, in contenitore di cartone con assorbitore d'urto

3.1.2 ILC 2 Attività di radiofarmaci

I misurandi oggetto dell'ILC sono stati le attività dei radionuclidi $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{18}F e ^{177}Lu in tre distinte sorgenti, in soluzione liquida acquosa, che il *Partecipante* ha preparato con attività pari a 50 MBq. Oggetto dell'ILC è stato quindi dimostrare la capacità di misurare l'attività e la capacità di somministrare il valore di attività richiesta. Le condizioni sperimentali selezionate per l'ILC sono riportate in Tabella 2.

Tabella 2 - Condizioni sperimentali per la determinazione dei misurandi (ILC 2).

Radionuclide per diagnostica SPECT	$^{99\text{m}}\text{Tc}$
Radionuclide per diagnostica PET	^{18}F
Radionuclide teranostici	^{177}Lu
Radiazioni emesse	γ , β
Attività da "somministrare" (valore nominale)	50 MBq
Fiala utilizzata	P6 - INMRI
Geometria fiala	cilindrica (h 54,0 x ϕ 21,7 mm)
Volume di soluzione	4 cm ³
Strumenti utilizzati	Attivimetro portatile

3.1.3 ILC 3 Concentrazione di attività del ^{222}Rn in aria

Il misurando oggetto dell'ILC 3 è stato la concentrazione di attività di radon (^{222}Rn) in aria in tre diversi

intervalli temporali della durata indicativa di quattro giorni, all'interno di un unico ciclo di esposizione. Ulteriore misurando è stato il valore medio della concentrazione di radon nell'intero ciclo di esposizione.

L'ILC 3 è stato rivolto a misurazioni di concentrazione di attività di radon ^{222}Rn in aria di interesse, prevalentemente, ambientale mediante monitori elettronici di radon in aria che possono memorizzare le concentrazioni medie di radon ad intervalli di tempo regolari (ora o frazione di ora). I livelli di concentrazione di attività rientrano nel campo di applicazione delle tecniche di monitoraggio ambientale.

Gli strumenti inviati dai *Partecipanti* sono stati sottoposti, per un determinato intervallo temporale, a definite condizioni di esposizione al gas radon naturalmente presente nell'impianto campione "camera radon praticabile" dell'INMRI. Le esposizioni al radon hanno avuto una durata indicativa di tre settimane, anche in considerazione del fatto che gli strumenti più economici possono avere bisogno di almeno 24 ore di misura per fornire risultati attendibili. Durante l'esposizione, tutti gli strumenti hanno registrato l'andamento temporale della concentrazione di attività di radon.

Avendo registrato un numero di adesioni che non consentiva un'unica esposizione nella camera praticabile dell'INMRI, sono state organizzate due esposizioni, garantendo l'equivalenza dei diversi cicli di esposizione.

Per assicurare la riferibilità nelle misure effettuate, l'INMRI ha disposto gli strumenti in esame su opportuni tavoli da laboratorio provvedendo a registrare con cura la posizione di ogni monitore, anche con l'aiuto di opportuna documentazione fotografica. Sui tavoli è stato anche disposto un adeguato numero di strumenti di riferimento preventivamente tarati dall'INMRI per la grandezza di interesse dell'ILC 3.

Le condizioni sperimentali selezionate per l'ILC 3 sono riportate in Tabella 3.

Tabella 3 - Condizioni sperimentali per la misura della concentrazione di radon in aria (ILC 3).

Sorgente di riferimento	radon naturale
Gas radioattivo	^{222}Rn (radon)
Campo di radiazione	α, β, γ
Ambiente di esposizione	Camera radon praticabile dell'INMRI
Condizioni ambientali	Temperatura: $15 \div 30$ °C Umidità: $30 \div 80$ % e Pressione atmosferica
Intervallo di concentrazione di attività	$400 \div 6000$ Bq/m ³
Numero di intervalli temporali di esposizione	3
Durata di ciascun intervallo temporale di esposizione	4 giorni
Durata complessiva del ciclo di esposizione	3 settimane
Strumenti utilizzati dai <i>Partecipanti</i>	Monitori attivi di radon

3.1.4 ILC 4 Misura di dose assorbita in acqua

Il misurando oggetto dell'ILC4 è stato la dose assorbita in acqua (D_w), che rappresenta la grandezza dosimetrica di riferimento per i trattamenti di radioterapia con fasci di radiazione esterni. Come stabilito nei protocolli dosimetrici concordati a livello internazionale [IAEA, 2006; McEwen, 2014; IAEA, 2017] i fasci di radiazione per radioterapia devono essere caratterizzati in termini di D_w erogata in determinate condizioni di misura, specifiche per tipo di radiazione e tecnica o modalità di trattamento radioterapico.

L'ILC 4 è stato focalizzato sulla verifica delle capacità di misura di D_w in un set di condizioni sperimentali, significative per valutare l'inclusione dei campi piccoli di fotoni nei sistemi di elaborazione dei piani di trattamento radioterapico dei pazienti. Le condizioni sperimentali selezionate per l'ILC sono riportate

in

Tabella 4.

Tabella 4 - Condizioni sperimentali per la misura di D_w (ILC 4).

Fascio di radiazioni	fotoni, 6 MV filtrato
Profondità in acqua del punto di misura	10 cm
Dimensioni minime del fantoccio di acqua	30 cm x 30 cm x 30 cm
Distanza dalla sorgente del punto di misura	100 cm (ovvero distanza dell'isocentro)
Dimensioni del campo di radiazione alla posizione del punto di misura	2 cm x 2 cm 3 cm x 3 cm 5 cm x 5 cm 2 cm x 12 cm 10 cm x 10 cm

Il campo 10 cm x 10 cm è stato incluso nel set di condizioni sperimentali al fine di valutare la componente di variabilità dei risultati dell'ILC 4 tra i diversi *Partecipanti* da attribuire a differenze nelle modalità di taratura degli acceleratori.

3.1.5 ILC 5 Equivalente di dose personale

La grandezza oggetto di misura per il confronto è stato l'equivalente di dose personale, $H_p(10, \alpha)$, dove α indica l'angolo di incidenza delle radiazioni sul dosimetro, ed i misurandi sono i seguenti tre:

1. un valore di $H_p(10, \alpha = 0)$ in fasci di radiazioni gamma emesse da sorgenti di ^{137}Cs secondo normativa ISO 4037:2019 [UNI EN, 2021-1, UNI EN, 2021-3];
2. un valore di $H_p(10, \alpha = 0)$ in fasci di radiazioni x filtrate di medie energie della serie a spettro largo; in particolare è stata scelta la qualità W-80 della serie a spettro 'largo' con energia media di circa 56,3 keV, secondo normativa ISO 4037:1996 [ISO, 1996];
3. un valore di $H_p(10, \alpha = 60^\circ)$ in fasci di radiazioni x, in fasci di radiazioni X filtrate di medie energie della stessa qualità di cui al punto 2, con angolo di incidenza α diverso da zero.

Salvo rinuncia alla partecipazione ad una specifica misura, delle tre indicate sopra, il numero totale dei dosimetri che il *Partecipante* ha fornito è stato non meno di 23, come dettagliato in Tabella 5:

Tabella 5: Dosimetri associati a ciascun misurando.

Misurando	Numero di dosimetri
$^{137}\text{Cs}, \alpha = 0^\circ$	6: quattro irraggiati, due di riserva
Raggi x medie energie, qualità W-80, $\alpha = 0^\circ$	6: quattro irraggiati, due di riserva
Raggi x medie energie qualità W-80, $\alpha = 60^\circ$	6: quattro irraggiati, due di riserva
Fondo	5
Totale	23

3.1.6 ILC 6 Contaminazione superficiale

I misurandi oggetto dell'ILC 6 sono stati i ratei di emissione superficiale da Sorgenti Piane Estese (SPE), nell'angolo solido di 2π sr, di radiazione alfa e beta da un emettitore alfa, ^{241}Am , e da un emettitore beta-puro, $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, secondo normativa ISO 8769 [ISO, 2020] e ISO 7503 [ISO, 2016a; ISO, 2016b].

Le SPE sono state fornite dall'INMRI, le condizioni sperimentali selezionate per l'ILC sono riportate in Tabella 6.

Tabella 6 - Condizioni sperimentali per la determinazione del misurando (ILC 6).

Radionuclide alfa-emettitori	^{241}Am
Radionuclidi beta-emettitori	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$
Campo di radiazione	α, β^-
Intervallo di misura del rateo di emissione superficiale delle sorgenti	$1 \cdot 10^2 \div 3 \cdot 10^3 (\text{s}^{-1})$
Tipo sorgente	piana estesa solida
Geometria sorgente	10 cm x 15 cm
Strumenti utilizzati dai <i>Partecipanti</i>	contaminametri

3.2 Metodo di misura e attrezzature

Ciascun *Partecipante* ha seguito le proprie usuali procedure e set-up sperimentali, sia per la preparazione dei campioni e/o degli strumenti che per la loro manipolazione o posizionamento.

Tutte le misurazioni sono state effettuate dal *Partecipante* utilizzando le proprie attrezzature sperimentali (oppure, nel caso dello ILC 4, utilizzando i dosimetri inviati dall'INMRI) ed avvalendosi del personale a disposizione del proprio laboratorio.

Aspetti specifici di ciascun ILC sono trattati nel seguito.

3.2.1 ILC 1 Attività di radionuclidi in una soluzione liquida acquosa

Metodi di misura e relativi dettagli sperimentali (volume di soluzione utilizzata, geometria di misura, metodo radiochimico utilizzato per lo ^{90}Sr , ecc.) sono stati a discrezione del *Partecipante*.

Se il volume della sorgente o i livelli di concentrazione di attività fossero stati diversi da quelli usualmente utilizzati dal *Partecipante*, potrebbe essere stato necessario effettuare concentrazioni/diluizioni o apportare le dovute correzioni per differente geometria, riportandole, debitamente, nella Scheda Risultati. Le eventuali diluizioni, al massimo per un fattore 5x, potevano essere effettuate direttamente con acqua ultra-pura o bidistillata determinando accuratamente (per via gravimetrica) il fattore di diluizione applicato.

3.2.2 ILC 2 Attività di radiofarmaci

Per lo svolgimento dell'ILC ai *Partecipanti* è stato chiesto di preparare le diverse sorgenti con valore prestabilito di attività pari a 50 MBq determinato in base a misurazioni effettuate mediante l'attivimetro in dotazione al *Partecipante*.

Il *Partecipante* ha effettuato la lettura delle sorgenti preparate mediante un attivimetro portatile fornito dall'INMRI, nelle condizioni sperimentali specificate in Tabella 2, registrando il valore ottenuto nella Scheda Risultati.

Sono state svolte le seguenti operazioni:

- ricezione da parte del *Partecipante* dell'attivimetro portatile fornito dall'INMRI;
- accensione, stabilizzazione dello strumento e determinazione del fondo strumentale, seguendo le indicazioni riportate nella Nota Informativa;

- c) preparazione delle sorgenti dei radionuclidi previsti e somministrazione di un volume pari a 4 cm^3 e attività 50 MBq (determinato in base all'attivimetro di proprietà del *Partecipante*) di ciascun radionuclide in tre diverse fiale (geometria P6) fornite dall' INMRI;
- d) acquisizione delle letture dello strumento portatile fornito dall'INMRI con le sorgenti preparate dal *Partecipante*.

Il *Partecipante* ha realizzato autonomamente le condizioni di misura di

Tabella 2 ed utilizzato le proprie attrezzature per stabilire l'attività di 50 MBq da somministrare.

È stata responsabilità del *Partecipante* verificare che tutta la strumentazione dell'INMRI abbia raggiunto le condizioni di stabilità prima di effettuare le misurazioni. È stata cura del *Partecipante* evitare che nei pressi dell'attivimetro portatile fornito da INMRI e utilizzato per le misurazioni ci fossero altri campi di radiazione.

3.2.3 ILC 3 Concentrazione di attività del ^{222}Rn in aria

Per lo svolgimento dell'ILC ai *Partecipanti* è stato richiesto di comunicare in anticipo il modello dello strumento con cui intendevano partecipare all'ILC, specificando anche se lo strumento dovesse essere collegato ad apposito alimentatore oppure fosse dotato di batterie con autonomia di almeno 20 giorni. I *Partecipanti* hanno potuto partecipare con più di uno strumento indicandone, se a loro nota, la sensibilità (es. in termini di conteggi/min per Bq/m^3).

Gli strumenti esposti sono stati rinviati a ciascun *Partecipante* che ha scaricato i dati registrati e ne ha effettuato l'analisi. Per ognuna delle condizioni sperimentali, il *Partecipante* ha fornito all'INMRI i valori di concentrazione di attività di radon misurati su tutto l'intervallo temporale di esposizione e sui tre intervalli temporali specificati come da Tabella 3.

Sono state svolte le seguenti operazioni:

- a) ricezione da parte dell'INMRI dei monitori radon inviati da ciascun *Partecipante*;
- b) prove di buon funzionamento dei monitori ricevuti presso l'INMRI;
- c) avvio del ciclo di esposizioni e acquisizione delle letture dei monitori dei *Partecipanti*;
- d) termine dell'esposizione e restituzione dei monitori ai *Partecipanti*;
- e) lettura dei dati registrati dai monitori a cura di ciascun *Partecipante*.

Il *Partecipante* autonomamente ha provveduto a scaricare i dati registrati dal/dagli strumento/i con cui ha partecipato all'ILC e ad elaborarli tenendo presente le condizioni di misura riportate in Tabella 3.

L'INMRI si è impegnato ad informare di eventuali mal funzionamenti riscontrati dei monitori dei *Partecipanti*.

L'INMRI si è infine assicurato che durante le misurazioni non ci fossero stati altri campi di radiazione nei pressi dei monitori esposti.

3.2.4 ILC 4 Misura di dose assorbita in acqua

Il *Partecipante* ha dovuto irraggiare nel proprio fascio di radiazione un rivelatore a stato solido, di tipo attivo, nelle condizioni sperimentali specificate in

Tabella 4 e registrare nella Scheda Risultati il segnale prodotto dal rivelatore a seguito dell'irraggiamento.

Il segnale prodotto dal rivelatore è stato rilevato mediante un elettrometro di classe di riferimento, fornito dall'INMRI unitamente al rivelatore e al cavo di collegamento.

Con riferimento alla Figura 1, il rivelatore, impermeabile, è stato irraggiato in modalità assiale, con il proprio punto di riferimento posto alla profondità di misura specificata.

Per quanto riguarda le dimensioni del campo di radiazione, il *Partecipante*, compatibilmente con il sistema di collimazione di cui dispone, ha realizzato le dimensioni più vicine possibile a quelle di Tabella 4 ed ha riportato nella Scheda Risultati le dimensioni effettivamente realizzate.

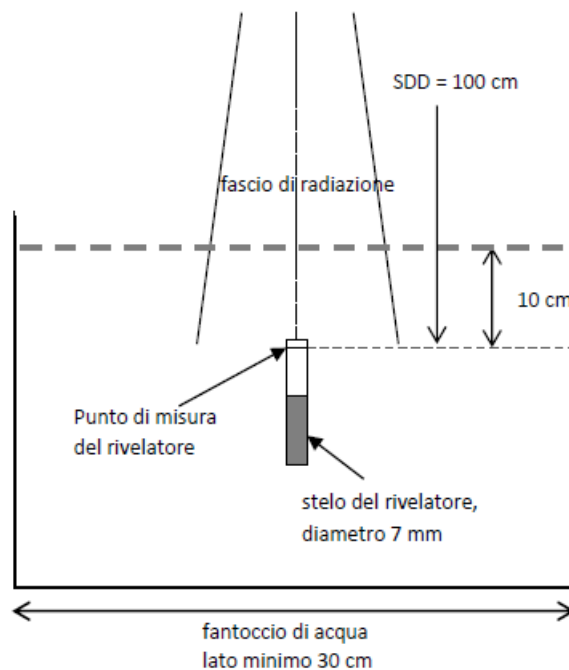
I valori di dose da somministrare, D_{ILC} , sono stati prestabiliti dall'INMRI, in termini di numero di unità

monitor da erogare o in termini di valore di D_w erogata al punto di misura. Nello specifico:

- per il campo 10 cm x 10 cm, il *Partecipante* ha dovuto somministrare 400 unità monitor e riportare nella Scheda Risultati il valore di D_w erogata alla profondità di misura, valore determinato in base all'output di riferimento dell'acceleratore;
- per gli altri campi, il *Partecipante* ha dovuto somministrare il numero di unità monitor calcolate dal Treatment Planning System (TPS) per erogare alla profondità di misura valori di D_w prestabiliti dall'INMRI e comunicati al *Partecipante* con la Nota Informativa.

In ogni diversa condizione di misura, l'irraggiamento è stato ripetuto 5 volte. Il segnale prodotto è stato rilevato e registrato per ogni irraggiamento effettuato.

Figura 1 - Schema del set-up sperimentale per ILC 4 (disegno non in scala).



3.2.5 ILC 5 Equivalente di dose personale

La lettura dell'equivalente di dose personale è stata effettuata secondo le procedure di misura normalmente eseguite presso il laboratorio del *Partecipante*, avendo debitamente tenuto in conto la lettura di fondo, per ciascun misurando, effettuata sui dosimetri che INMRI ha indicato di *non* aver irraggiato.

Ogni dosimetro è stato opportunamente codificato dal *Partecipante* prima dell'invio all'INMRI per l'irraggiamento, come descritto in seguito (par. 4.5).

3.2.6 ILC 6 Contaminazione superficiale

Il *Partecipante* ha realizzato autonomamente le condizioni di misura di Tabella 6 e ha scelto autonomamente lo strumento per eseguire le misurazioni richieste e stabilire il valore del misurando per ciascuna sorgente oggetto dell'ILC.

Azioni svolte dal *Partecipante*:

- a) accensione, stabilizzazione dello strumento e determinazione del fondo strumentale, seguendo le indicazioni riportate nella Nota Informativa;
- b) acquisizione delle letture delle Sorgenti Piane ed Estese (SPE) mediante lo strumento del *Partecipante*, rispettando le condizioni sperimentali, seguendo le indicazioni riportate nella Nota Informativa fornita ad ogni *Partecipante*;

- c) registrazione delle letture nella Scheda Risultati messa a disposizione dall'INMRI su una piattaforma web;
- d) spedizione delle due SPE al *Partecipante* successivo.

3.3 Valori di riferimento ed incertezze

I valori di riferimento utilizzati sono stati determinati dall'INMRI sulla base dei campioni nazionali primari e secondari sviluppati e mantenuti dall'INMRI stesso. Tali campioni sono stati confrontati con analoghi campioni sviluppati da altri Istituti Metrologici Nazionali nell'ambito dell'accordo CIPM-MRA e, pertanto, sono equivalenti.

L'incertezza estesa ($k=2$) del valore di riferimento del misurando deriva dal contributo di diverse fonti. Tali fonti sono associate sia ai metodi con cui si realizza presso l'INMRI il campione della grandezza relativa al misurando, sia ai metodi di successiva disseminazione del campione.

L'incertezza estesa ($k=2$) del valore del misurando, fornito dal *Partecipante*, è stata anch'essa risultante dalla combinazione di diverse fonti, valutate e riportate dal *Partecipante* unitamente alla indicazione del metodo di valutazione utilizzato (tipo A o B).

Aspetti specifici di ciascun ILC sono trattati nel seguito del presente capitolo.

3.3.1 ILC 1 Attività di radionuclidi in una soluzione liquida acquosa

La riferibilità metrologica del Materiale di Riferimento Certificato (MRC) utilizzato nel presente ILC è ai campioni primari di attività di tali radionuclidi mantenuti presso l'INMRI.

Il MRC è stato preparato per diluizione gravimetrica, fino al volume finale di circa 50 L, di una sorgente liquida acquosa tarata con i sistemi campione dell'INMRI. L'omogeneità del MRC è stata accuratamente controllata a livello di volume di 0,5 L.

Le incertezze dei valori di riferimento rientrano nell'intervallo 1-3% ($k=1$), in funzione del radionuclide e del livello di omogeneità del MRC.

3.3.2 ILC 2 Attività di radiofarmaci

La riferibilità metrologica delle misure di attività, realizzate con l'attivometro portatile, è ai campioni primari di attività dei radionuclidi di interesse del presente ILC mantenuti presso l'INMRI.

3.3.3 ILC 3 Concentrazione di attività del ²²²Rn in aria

La riferibilità metrologica della concentrazione di radon di riferimento per l'ILC è ai campioni di attività di tale radionuclide mantenuto presso l'INMRI. Gli andamenti temporali e l'omogeneità della concentrazione sono stati mantenuti con ventilatori e controllati con opportuni monitori attivi dislocati all'interno del locale di esposizione. L'equivalenza tra le due ripetizioni di cicli di esposizione effettuate è stata garantita dall'INMRI. Le incertezze dei valori di riferimento si sono collocate nell'intervallo 2-3% ($k=1$).

3.3.4 ILC 4 Misura di dose assorbita in acqua

Il complesso di misura costituito di rivelatore, elettrometro e cavo a basso rumore, è stato tarato in termini di D_w nel fascio di radiazione gamma di riferimento del ⁶⁰Co, per confronto indiretto con il campione primario di D_w mantenuto presso l'INMRI.

L'INMRI ha determinato mediante la

Formula 1 il valore della dose assorbita in acqua effettivamente somministrata al rivelatore negli irraggiamenti effettuati dal *Partecipante*.

Formula 1

$$D_{w,Q,f} = M_{Q,f} N_{D,w} k_{Q,f}$$

dove Q indica la qualità del fascio di fotoni utilizzato, espressa in termini di $TPR_{20,10}$ o $\%dd(10)$; f indica le dimensioni del campo di radiazione; M_0 è il valore del segnale prodotto dal rivelatore derivato dai dati di lettura registrati dal *Partecipante* e comunicati all'INMRI; $N_{D,w}$ è il coefficiente di taratura del complesso di misura alla qualità di riferimento del ^{60}Co ; $k_{0,f}$ è un fattore correttivo complessivo, determinato dall'INMRI, che corregge per la differente risposta del complesso di misura nel fascio di radiazione Q e dimensione di campo f rispetto alle condizioni sperimentali di taratura.

Alla qualità Q e per il campo f , il valore di $D_{w,Q,f}$ determinato con la Formula 1 rappresenta il valore di riferimento, D_{rif} , per il confronto.

L'incertezza complessiva sul valore di D_{rif} deriva dal contributo di diverse fonti. Tali fonti sono associate sia ai metodi con cui si realizza presso l'INMRI l'unità di misura della dose assorbita in acqua (mediante il corrispondente campione nazionale), la taratura del complesso di misura e la determinazione dei fattori correttivi, sia alla misurazione del segnale prodotto dal rivelatore durante gli irraggiamenti effettuati dal *Partecipante*.

Per quanto riguarda l'incertezza sui valori delle dosi erogate che il *Partecipante* ha comunicato all'INMRI, tale incertezza include sia l'incertezza associata al metodo adottato dal *Partecipante* per la determinazione della dose assorbita nel punto di misura, sia le incertezze associate al posizionamento del rivelatore, alla riproducibilità dell'output dell'acceleratore e all'uniformità del campo di radiazione.

3.3.5 ILC 5 Equivalente di dose personale

La *referibilità* delle misure nell'ILC 5 è stata assicurata:

- a) Per gli irraggiamenti in fasci di radiazioni gamma emesse da sorgenti di ^{137}Cs , dal campione di misura di riferimento dell'INMRI della grandezza kerma in aria K_a , riferibile al campione di K_a del Bureau International des Poids et Mesures (BIPM);
- b) Per gli irraggiamenti in fasci di radiazioni x filtrate di medie energie, al campione nazionale di K_a dell'INMRI, la camera ad aria libera di tipo "Attix" mod. Victoreen 481.

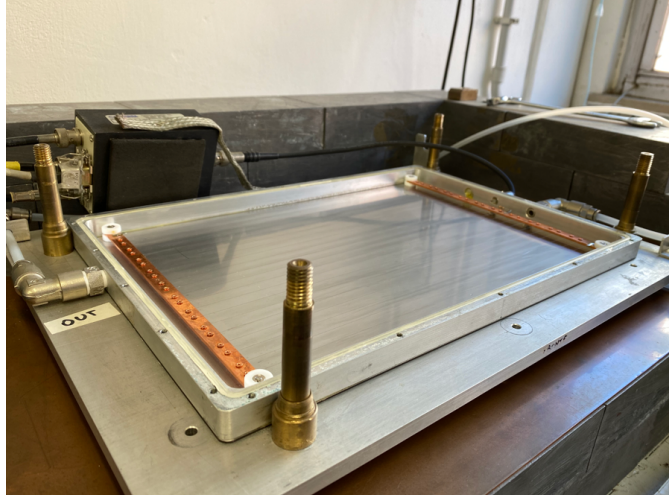
Ai fini del confronto, ai valori di equivalente di dose $H_p(10)$ impartiti sui dosimetri di tipo passivo di proprietà del *Partecipante* è stato associato il valore della corrispondente incertezza.

3.3.6 ILC 6 Contaminazione superficiale

Le Sorgenti Piane Estese (SPE) utilizzate per l'ILC 6 sono state caratterizzate in termini di rateo di emissione superficiale mediante un campione secondario dell'INMRI della stessa grandezza fisica, a sua volta riferibile al campione primario italiano validato mediante confronti internazionali con altri Istituti Metrologici Primari. In particolare, il campione primario utilizzato è basato su un contatore proporzionale a flusso di gas operante in geometria $2\pi sr$ (Figura 2). Esso può operare senza alcuna finestra di ingresso del campo di radiazione (modalità window-less), effettuando in tal modo misurazioni assolute di sorgenti piane estese realizzate su supporti elettricamente conduttori. Questo sistema campione è conforme alla norma ISO 8769 [ISO, 2016a] che fornisce le caratteristiche specifiche delle sorgenti campione piane estese α o β emittenti necessarie a tarare gli strumenti ed avere quindi misure riferibili.

Figura 2 - Contatore proporzionale a flusso di gas utilizzato dall'INMRI per la realizzazione del campione primario nazionale di

rateo di emissione superficiale da SPE.



L'incertezza del rateo di emissione superficiale fornito dal secondario è stata calcolata mediante la seguente formula:

Formula 2

$$u(E) = \sqrt{\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^2 \cdot [(u_{L\text{ media}})^2 + (u_{\text{lettura SORGENTE}})^2 + (u_{F\text{ media}})^2 + (u_{\text{lettura FONDO}})^2] + \left(\frac{\bar{L} - \bar{F}}{\varepsilon^2}\right)^2 \cdot u(\varepsilon)^2}$$

dove:

- $u_{\text{lettura SORGENTE}} = \frac{\text{risoluzione}}{2\sqrt{3}} = u_{\text{lettura FONDO}}$ è lo scarto tipo di lettura della SORGENTE e del FONDO;
- $u_{L\text{ media}} = \frac{u_L}{\sqrt{m}}$ è lo scarto tipo della media delle letture (con m numero di letture);
- $u_{F\text{ media}} = \sqrt{\frac{1}{4}u_{\bar{F}1}^2 + \frac{1}{4}u_{\bar{F}2}^2}$ è lo scarto tipo della media del fondo;
- $u(\varepsilon)$ è l'incertezza associata all'efficienza;
- \bar{L} è la media delle letture per singola SPE, in cps;
- \bar{F} è la media delle letture del fondo, in cps;
- ε è l'efficienza del contaminometro del *Partecipante*;
- $u_{\bar{F}1}$ e $u_{\bar{F}2}$ sono, rispettivamente, le incertezze del valore medio del fondo prima e dopo la misura con la sorgente.

4 SVOLGIMENTO DEGLI ILC

4.1 ILC 1 Attività di radionuclidi in una soluzione liquida acquosa

Le sorgenti da utilizzare nell'ILC sono state selezionate accuratamente per ottenere nella soluzione finale concentrazioni di attività di radionuclidi di interesse prevalentemente ambientale. La preparazione della soluzione ha avuto inizio una volta stabiliti quali radionuclidi inserire e le rispettive concentrazioni di attività.

Per il controllo della soluzione e dei campioni in tutte le fasi del procedimento sono state utilizzati spettrometri gamma ad elevata risoluzione (HPGe) e camera a ionizzazione.

La fase preparativa della soluzione ha visto inizialmente la realizzazione della soluzione madre in cui sono stati inseriti sali stabilizzanti analoghi ai corrispondenti radionuclidi, definiti 'carrier'.

Le sorgenti radioattive, contenute in fiale dette "master", sono state inserite nella soluzione dopo averne prelevata un'aliquota, la cui massa è stata accuratamente misurata con bilancia analitica ed introdotta nelle fiale in geometria di riferimento, che sono state misurate mediante spettrometria gamma con rivelatore al germanio iperpuro al fine di determinarne la concentrazione di attività.

Un'aliquota di ogni fiala così realizzata è stata poi inserita in una miscela intermedia di soluzione acquosa, del volume di 1,0 L, avente la stessa composizione chimica delle fiale originali per un controllo intermedio.

Tale miscela intermedia è stata poi quantitativamente trasferita nel contenitore finale portando ad un volume di circa 50 L di soluzione acquosa contenente i carrier.

Dalla soluzione finale così preparata, contenente carrier, radionuclidi, acido cloridrico e acqua, sono stati prelevati 40 campioni in flaconi sigillati dal volume di circa 1L, ad ogni flacone di Materiale Certificato di Riferimento (MCR) è stato assegnato un codice univoco.

4.2 ILC 2 Attività di radiofarmaci

Dopo aver completato l'iscrizione e comunicato la propria disponibilità ad effettuare le misure, Il *Partecipante* ha avuto a disposizione lo strumento per una settimana:

- la strumentazione è stata recapitata il lunedì mattina;
- le misure si sono svolte tra martedì e giovedì;
- l'intera strumentazione è stata ritirata il venerdì pronta per essere spedita al successivo *Partecipante*.

Il complesso di misura è stato inizialmente spedito dall'INMRI, poi è stato trasferito da un *Partecipante* all'altro secondo le indicazioni dell'INMRI. Al *Partecipante* è stata affidata la predisposizione del pacco per la successiva spedizione avendo cura che la strumentazione sia stata riconsegnata senza alcuna traccia di contaminazione radioattiva e nelle condizioni in cui è stato ricevuto.

Tutte le istruzioni circa lo svolgimento delle misurazioni e dell'ILC 2 sono state comunicate al *Partecipante* attraverso l'invio della Nota Informativa e del Manuale dello strumento.

In particolare, all'interno delle istruzioni sono state riportate:

- caratteristiche dei materiali/strumenti utilizzati per l'ILC;
- operazioni di misura da eseguire;
- registrazione dei risultati delle misurazioni;
- controllo preventivo e visivo di buono stato dei materiali/strumenti ricevuti;
- assicurazione che nel laboratorio di misura non ci siano fonti radioattive diverse dal campione da misurare;
- assicurazione di aver posizionato bene il campione da misurare secondo la geometria di misura del *Partecipante*;
- esecuzione della misura secondo diverse letture ripetute a tempi diversi.

Infine, Ai *Partecipanti* è stato chiesto di compilare la Scheda Risultati predisposta dall'INMRI collegandosi alla pagina web adibita alla ricezione dei risultati.

In particolare, al *Partecipante* è stato chiesto di inserire:

- il valore di Attività, e la data e l'ora di riferimento della misura effettuata con l'attivimetro di proprietà del *Partecipante* e l'incertezza associata;
- i valori delle letture effettuate con l'attivimetro di proprietà dell'INMRI, e la corrispondente data e ora di riferimento.

A conclusione della fase operativa del confronto, il *Partecipante* ha inserito i dati ottenuti nell'apposita

Scheda Risultati all'interno della pagina web comunicata. Successivamente tali dati vengono analizzati utilizzando i codici segreti dei *Partecipanti*. Hanno aderito all'IILC sulla capacità di misura di attività mediante calibratori di dose 24 centri.

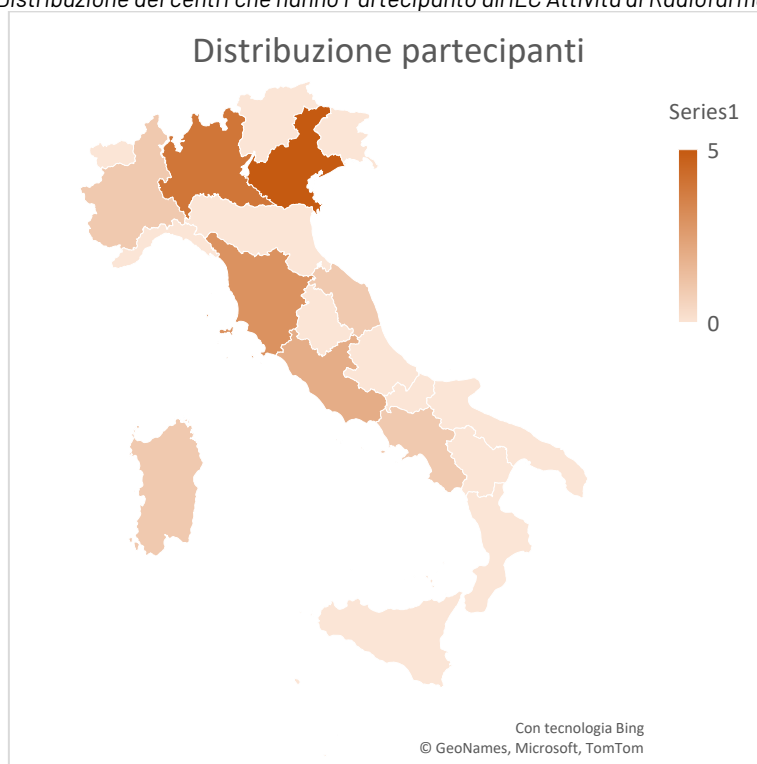
Il maggior numero di *Partecipanti* che ha aderito al progetto è dislocato nel Nord Italia, mentre minore riscontro si è avuto con il Sud e le Isole.

In particolare, più della metà dei centri si trova nel Nord Italia (16) seguita dal Centro (6) e il numero inferiore di adesioni si è avuto dal Sud e Isole dove solamente due centri hanno aderito all'IILC 2 (Figura 3).

Alla data della presente relazione hanno concluso l'IILC la totalità dei centri di cui:

- 24 centri hanno effettuato l'IILC con il ^{99m}Tc
- 22 centri hanno effettuato l'IILC con il ^{18}F
- 8 centri hanno effettuato l'IILC con il ^{177}Lu

Figura 3 - Distribuzione dei centri che hanno Partecipato all'IILC Attività di Radiofarmaci



4.3 IILC 3 Concentrazione di attività del ^{222}Rn in aria

Sono stati effettuati due cicli di misure, uno a giugno ed uno a luglio 2022, in cui hanno partecipato laboratori diversi.

Le misure sono state condotte nella sala radon praticabile di INMRI ENEA, un ampio locale del volume di circa 150 metri cubi. Il radon proviene dal basamento del locale che, in fase di costruzione, è stato riempito di lapillo vulcanico naturalmente ricco di ^{226}Ra . La diffusione del radon dal basamento al volume della sala radon praticabile è agevolata dal fatto che il locale è in leggera depressione rispetto all'ambiente esterno. Le concentrazioni di radon all'interno del locale possono essere regolate aprendo e chiudendo apposite saracinesche nell'impianto di aereazione della camera stessa; tuttavia, la concentrazione di radon resta in parte soggetta alle condizioni climatiche esterne e non è sempre costante nel tempo anche se si fissa la posizione delle saracinesche dell'impianto di aereazione. Queste circostanze, però, non sono uno svantaggio, anzi rendono il test più simile a quanto succede

effettivamente negli ambienti di lavoro e nelle abitazioni dove si possono verificare repentine variazioni di concentrazione del radon in seguito all'apertura di porte o finestre o di variazioni delle condizioni atmosferiche esterne.

Nella sala radon sono stati collocati due ventilatori per migliorare l'omogeneità spaziale della concentrazione di radon entro limiti accettabili.

I *Partecipanti* hanno provveduto alla spedizione degli strumenti *Partecipanti* all'ILC 3, una volta arrivati al centro ricerche ENEA Casaccia, sono stati consegnati all'istituto INMRI.

Gli strumenti dei *Partecipanti* sono stati collocati su un ampio ripiano di circa 330 cm x 120 cm, ai due estremi del ripiano sono collocati due strumenti di riferimento di INMRI ENEA. Le posizioni di ogni strumento nel ripiano sono state registrate.

Al termine dell'esposizione al radon, gli strumenti sono stati spediti dall'istituto INMRI ai rispettivi *Partecipanti*.

I *Partecipanti* hanno comunicato i valori di concentrazione di radon misurati nei tre intervalli e il valore di esposizione totale con le relative incertezze mediante compilazione dell'apposita Scheda Risultati.

4.4 ILC 4 Misura di dose assorbita in acqua

L'INMRI dispone di due set di misura che hanno viaggiato tra i *Partecipanti* in parallelo. L'ILC 4 è stato articolato su cicli di 3 *Partecipanti* per ogni set di misura. Per ogni ciclo le operazioni sono state:

- a) Il *Partecipante* riceve la strumentazione comprensiva di elettrometro, cavo di segnale e rivelatore (microDiamond) inviato dall'INMRI
- b) Il *Partecipante* effettua l'irraggiamento in un'unica sessione tra il giovedì e il sabato della settimana in cui riceve la strumentazione
- c) Durante gli irraggiamenti, il *Partecipante* compila la Scheda Risultati inserendo le misure per ogni configurazione di irraggiamento
- d) terminate le misure, il *Partecipante* predispone la strumentazione per invio al centro successivo
- e) Ogni tre *Partecipanti*, la strumentazione rientra in INMRI per controlli di verifica di buon funzionamento al termine dei quali INMRI predispone l'invio per un nuovo ciclo di tre *Partecipanti*.

4.5 ILC 5 Equivalente di dose personale

Per l'ILC 5 sono state raccolte 19 adesioni, da cui è emersa una prevalenza di servizi dosimetrici in questione nel centro e nel nord Italia.

L'avvio dei lavori necessari per la realizzazione dell'ILC 5 è avvenuto nel mese di maggio 2022; tuttavia, agli iscritti impossibilitati a rispettare la scadenza prefissata, è stata data la possibilità di partecipare ad un secondo turno avvenuto nel mese di settembre 2022.

Per ciascun misurando oggetto dell'ILC 5 si è scelto di irraggiare 4 dosimetri; è stato, dunque, chiesto ai *Partecipanti* di inviare i propri dosimetri personali in un numero non inferiore a 23, prevedendo 2 dosimetri di riserva per ciascuna misura a fronte di possibili errori e 5 dosimetri destinati alla rilevazione del fondo ambientale.

L'individuazione dei valori di equivalente di dose personale da impartire ai dosimetri è avvenuta tramite attribuzione casuale, per ciascun *Partecipante*, considerando un intervallo compreso tra 2 e 30 mSv. Lo stesso principio di casualità è stato adottato per associare i dosimetri inviati a ciascuno dei tre misurandi.

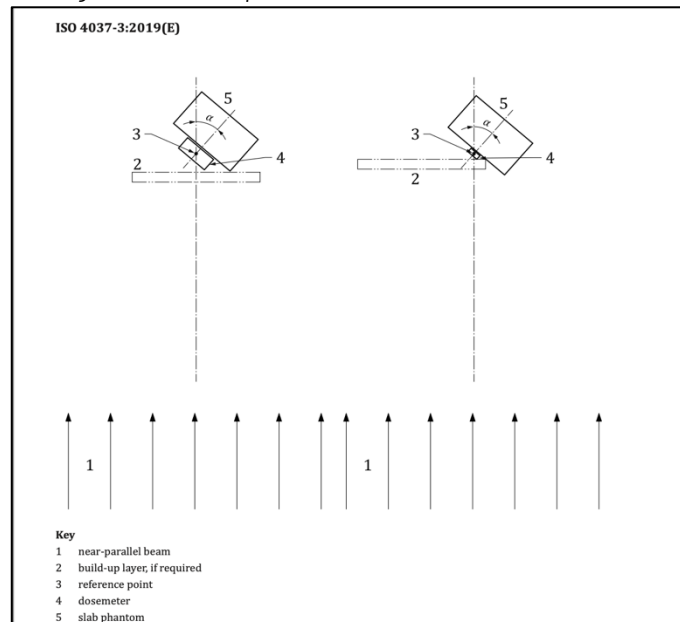
I dosimetri passivi sono stati inviati dai *Partecipanti* all'INMRI, ciascuno riportante un'etichetta

indicante un identificativo costituito dal codice riservato associato ad ogni iscritto e un numero seriale da 1 al numero massimo dei dosimetri inviati, dunque minimo 23.

Gli irraggiamenti sono stati eseguiti su fantoccio "ISO Slab" (ISO 4037-3:2019): per le radiazioni gamma si è utilizzato un fantoccio interamente costituito da PMMA; per le radiazioni X si è, invece, utilizzato un fantoccio in PMMA riempito di acqua distillata. Il fantoccio è stato posizionato a 0° rispetto all'asse longitudinale del fascio di radiazioni o opportunamente ruotato a 60° a seconda del misurando, in conformità alle norme (ISO 4037:1996 per i raggi X, ed ISO 4037:2019 per il ^{137}Cs).

I dosimetri sono stati posizionati al centro del fantoccio, rispettando le dimensioni dei diametri isodose al 98% per i differenti misurandi (11 cm per i raggi X e 15 cm per il ^{137}Cs) come richiesto dalla normativa di riferimento (ISO 4037-3:2019). Il fantoccio ISO Slab è stato posto ad una distanza tale da essere interamente investito dal fascio di radiazioni; tale distanza corrisponde a 2 metri per il ^{137}Cs e 3.09 metri per i raggi X ed è pari alla distanza dal centro della sorgente di radiazioni e il centro dello spessore del dosimetro posizionato sulla superficie frontale del fantoccio, come mostrato in Figura 4 (riprodotto da ISO 4037-3:2019).

Figura 4 - Schema posizionamento dosimetri su fantoccio.



In particolare, per gli irraggiamenti effettuati con angolo di incidenza pari a 60° , quando impossibilitati a posizionare tutti i dosimetri lungo lo stesso asse verticale, è stato previsto di suddividere in due parti la procedura di irraggiamento, invertendo, dopo il raggiungimento della prima metà della dose prescritta, la posizione dei dosimetri, così che tutti e quattro i dosimetri venissero investiti dal fascio in maniera uniforme. Di tale scelta si è tenuto debitamente conto nel calcolo dell'incertezza sul valore del kerma in aria riferito al punto di misura e, conseguentemente, del valore di equivalente di dose personale impartito.

Per il primo turno, gli irraggiamenti sono stati effettuati nel periodo compreso tra il 16 maggio e il 27 maggio 2022, presso i laboratori del settore dosimetria dell'INMRI. Il secondo turno ha previsto irraggiamento per la sola giornata del 16 settembre 2022. I parametri di influenza ambientali durante il primo periodo sono stati i seguenti: temperatura compresa tra 24.5°C e 27.7°C ; umidità compresa tra 33% e 61%; pressione atmosferica compresa tra 992.3 hPa e 1011.2 hPa; per il secondo turno, invece, sono stati registrati i seguenti parametri: temperatura di circa 22.0°C ; umidità relativa di circa il 78%;

pressione atmosferica 992.3 hPa.

Una volta terminati gli irraggiamenti si è proceduto alla restituzione dei dosimetri dei *Partecipanti*, tramite corriere espresso, allegando una lettera informativa con indicazioni circa gli identificativi dei dosimetri irraggiati.

I *Partecipanti*, ricevuti gli strumenti, hanno provveduto ad effettuare le letture, ciascuno utilizzando il proprio sistema di lettura e la propria apparecchiatura. Fatte tutte le debite valutazioni, gli utenti si sono poi impegnati a comunicare le proprie letture tramite il modulo online già citato, ad INMRI, il quale ha potuto procedere con l'analisi dei dati.

4.6 ILC 6 Contaminazione superficiale

Le Sorgenti Piane ed Estese (SPE) sono state caratterizzate in termini di rateo di emissioni superficiale (s^{-1}), mediante un campione secondario dell'INMRI, direttamente riferibile al campione primario, come già discusso nel paragrafo 3.3.6. Il campione secondario dell'INMRI consiste in un contaminometro (Figura 5) collegato ad un alimentatore stabilizzato di tensione e tarato mediante SPE delle quali si conosce il valore di riferimento del rateo di emissione.

Figura 5 - Campione secondario per SPE, presso l'INMRI.



Prima di essere spedite ai *Partecipanti*, le due SPE sono state controllate mediante il campione secondario, sono state quindi spedite ai *Partecipanti* che ne hanno fatto richiesta tramite la piattaforma di registrazione. Il *Partecipante* una volta effettuata le misure, nelle condizioni e nei modi illustrati nella lettera informativa ha inviato le due SPE al *Partecipante* successivo fino ad arrivare all'ultimo *Partecipante*, il quale le ha rinviate all'INMRI, dove sono state ricontrollate.

Come sarà discusso nel dettaglio nei successivi paragrafi, il *Partecipante* ha comunicato mediante la piattaforma le letture (esprese in conteggi per secondo, cps) e le efficienze dello strumento utilizzato ai due radionuclidi con le incertezza associate. Da questi dati l'INMRI ha calcolato il rateo di emissione per ogni *Partecipante* così da determinare:

- scarto relativo percentuale (R)
- l'errore normalizzato (E_n).

5 ANALISI E PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

L'INMRI ha predisposto una pagina web appositamente creata per il Programma, attraverso la quale i *Partecipanti* hanno potuto inviare i propri risultati. L'accesso alla piattaforma è stato riservato ai soli utenti iscritti al Programma, ai quali sono state fornite le proprie credenziali di accesso, costituite da nome utente e password, note soltanto ai singoli *Partecipanti*.

La piattaforma ha ospitato sei moduli da compilare, uno per ciascuno degli ILC previsti dal programma stesso; ciascun *Partecipante*, una volta effettuato l'accesso, ha potuto visualizzare soltanto gli ILC a cui si è iscritto. Ad ogni invio di dati, i risultati sono stati recepiti e salvati su un database e scaricati, all'occorrenza, come un file .csv o .xlsx da cui si è potuto procedere con le analisi.

Ad ogni utente sono stati concessi più invii di moduli: per ciascun ILC è valso l'ultimo invio in ordine temporale ai fini dell'analisi.

A conferma del corretto inserimento dei dati nei moduli è stato predisposto per feedback l'invio di una email di conferma: tale email viene ricevuta sia dall'INMRI sia dall'utente.

5.1 Analisi dati

L'analisi dei risultati si è basata sul confronto dei valori dei misurandi forniti da ciascun *Partecipante* con i valori di riferimento degli stessi misurandi forniti dall'INMRI. Gli scarti ottenuti sono stati analizzati con riferimento alle incertezze riportate dal *Partecipante* e quelle dichiarate dall'INMRI.

I risultati del confronto sono analizzati in termini di indicatori comunemente adoperati in prove valutative e confronti interlaboratorio [ISO, 2016]. Tra essi:

- differenza percentuale (o scarto percentuale o scarto%) dei valori del misurando forniti dal *Partecipante*, M , e quelli di riferimento forniti dall'INMRI, M_{rif} :

Formula 3²

$$R = \frac{M - M_{rif}}{M_{rif}} \times 100$$

- errore normalizzato o indice di compatibilità:

Formula 4

$$E_n = \frac{M - M_{rif}}{\sqrt{U^2 + U_{rif}^2 - 2U_{cp}^2}}$$

dove U è l'incertezza estesa (fattore di copertura $k=2$) associata al valore di M come dichiarato dal *Partecipante*, U_{rif} è l'incertezza estesa ($k=2$) di M_{rif} stimata dall'INMRI e U_{cp} è l'eventuale componente di incertezza ($k=2$) comune al *Partecipante* e all'INMRI, in quanto associata al *Campione Nazionale* utilizzato come origine della catena di riferibilità per le misurazioni o ad altri dati comuni (esempio dati nucleari). Entro due mesi dall'invio dei risultati ciascun *Partecipante* ha ricevuto, in forma riservata, i risultati relativi alle proprie misurazioni. Solo nel caso dello ILC 4, il *Partecipante* ha potuto conoscere l'esito delle proprie prove ricevendo un rapporto globale, dal quale ha potuto identificare il proprio risultato utilizzando il codice segreto che gli è stato comunicato all'iscrizione.

² In questo documento si farà uso dello stesso simbolo R per indicare due stimatori diversi che saranno correttamente definiti all'interno del paragrafo cui si riferiscono.

I due indicatori sopra descritti sono stati applicati per l'analisi dei risultati degli ILC 1, ILC 3, ILC 4. Per gli altri sono stati considerati indicatori, in sostituzione o in aggiunta come descritto nel seguito di questa sezione, allineandoci alla pratica comune nei settori interessati da quegli ILC.

ILC 2 Attività di Radiofarmaci

I dati recepiti dall'INMRI sono stati valutati in termini di due indicatori comunemente adoperati in prove valutative ed interlaboratorio già citati precedentemente (R e E_n).

Con riferimento all'errore normalizzato si utilizza la Formula 4, trascurando l'incertezza comune al Partecipante e l'ENEA, U_{cp} .

Il parametro R permette di identificare i centri che hanno effettuato una misura accurata mentre l'estimatore statistico E_n fornisce un'informazione aggiuntiva: identifica la capacità da parte del Partecipante di stimare correttamente l'incertezza sul proprio dato. Oltre all'errore normalizzato e lo scarto percentuale, si è deciso quindi di utilizzare anche un terzo criterio di valutazione delle prove per questo specifico ILC, basato sulla condizione per cui si ha, contemporaneamente, un valore di R inferiore in modulo al 10% e un valore di E_n in modulo inferiore a 1. Rispetto a questo terzo criterio saranno presentati i risultati nel prossimo paragrafo.

ILC 5 Equivalente di dose personale

I dati recepiti dall'INMRI sono stati messi a confronto con i valori di riferimento forniti da INMRI per la grandezza $H_p(10)$, i quali sono comprensivi delle incertezze estese (JCGM 2008).

Il confronto tra le letture inviate dai Partecipanti e i valori di riferimento è stato fatto in conformità alla norma ISO 14146, utilizzata dal gruppo europeo di dosimetria EURADOS per gli interconfronti nell'ambito della dosimetria per la radioprotezione.

In particolare, lo stimatore statistico utilizzato per valutare i risultati del confronto per le misure considerate è il rapporto tra le misure fornite dal Partecipante e i valori di riferimento forniti da ENEA-INMRI, indicato con il simbolo "R", ossia "risposta" (Formula 5).

Formula 5³

$$R = \frac{H_p(10, \alpha)_{Partecipante}}{H_p(10, \alpha)_{INMRI}}$$

Tale risultato viene successivamente messo in relazione e confrontato con altri due valori, che si determinano applicando la formula indicata nel paragrafo §7.1.1 della ISO 14146, qui di seguito riportata:

Formula 6

$$0.71 \left(1 - \frac{2 * \frac{H_0}{1.33}}{\frac{H_0}{1.33} + H_c} \right) \leq R \leq 1.67 \left(1 + \frac{H_0}{4 * H_0 + H_c} \right)$$

Nella

Formula 6, H_0 indica il valore minimo di dose personale, fissata pari a 0.1 mSv (ISO 14146, 2018), H_c indica il valore di riferimento fornito dall'INMRI ed infine R è la risposta già citata precedentemente. La prova

³ In questo documento si farà uso dello stesso simbolo R per indicare due stimatori diversi che saranno correttamente definiti all'interno del paragrafo cui si riferiscono.

è considerata superata se risulta soddisfatta la disequazione in Formula 6. In questa non si fa esplicito riferimento alle incertezze associate alle misure; tuttavia, una componente di incertezza è considerata per definire i valori dei due limiti inferiore e superiore. Le incertezze estese associate ai valori di riferimento H_C sono state, invece, utilizzate per approssimare i valori forniti dai *Partecipanti* con un numero di cifre corrispondenti alle prime due cifre significative dell'incertezza stessa, al fine di uniformare la precisione di rappresentazione del valore fornito da INMRI con i valori forniti dai *Partecipanti*. Le incertezze estese con cui l'INMRI emette i propri valori di riferimento sono mediamente: 4.5% per il ^{137}Cs ; 6% per i raggi X alla qualità W-80 con angolo pari a 0° ; 8% per i raggi X alla qualità W-80 con angolo pari a 60° .

ILC 6 Contaminazione superficiale

I risultati del confronto sono stati analizzati in termini degli indicatori già citati in questo paragrafo. I valori di scarto percentuale ed errore normalizzato sono stati calcolati in base alle elaborazioni dei dati sperimentali comunicati dai *Partecipanti* che sono descritte di seguito.

Il rateo di emissione superficiale del *Partecipante M* (vedi Formula 11 e Formula 12) è stato calcolato a partire dai dati forniti dai *Partecipanti* (10 letture del fondo iniziale, 10 letture dell'emissione superficiale, 10 letture del fondo finale e l'efficienza del rivelatore per emissioni α da ^{241}Am e β da ^{90}Sr), nel modo descritto di seguito.

Si è calcolato il valore medio del fondo iniziale \bar{F}_i e finale \bar{F}_f per i due tipi di emissione α e β (per brevità si riportano solo le formule relative all'emissione α , quelle per l'emissione β sono identiche leggendo β al posto di α):

Formula 7

$$\bar{F}_{i,\alpha} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n F_{j,\alpha}; \quad \bar{F}_{f,\alpha} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n F_{f,\alpha}.$$

Si è poi eseguita la media aritmetica \bar{F}_α di questi due valori per ottenere il valore di fondo da sottrarre alla media \bar{L}_α della lettura effettuata con le sorgenti

Formula 8

$$\bar{F}_\alpha = \frac{1}{2} (\bar{F}_{i,\alpha} + \bar{F}_{f,\alpha}).$$

La media \bar{L}_α delle letture è calcolata come:

Formula 9

$$\bar{L}_\alpha = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n L_{j,\alpha}$$

al quale si sottrae la media del fondo \bar{F}_α ottenendo la lettura netta \mathcal{L}_α

Formula 10

$$\mathcal{L}_\alpha = (\bar{L}_\alpha - \bar{F}_\alpha).$$

Il rateo di emissione \bar{M}^0 della sorgente è stato ottenuto dalla lettura netta, \mathcal{L}_α , e dall'efficienza, ε , fornita dal *Partecipante*:

Formula 11

$$\bar{M}^0 = \frac{L_\alpha}{\varepsilon} = \frac{(\bar{L}_\alpha - \bar{F}_\alpha)}{\varepsilon}$$

riferito alla data di misura. I valori \bar{M}^0 sono stati quindi corretti per decadimento, ottenendo M_{rif} , espresso ad una comune data di riferimento (07-02-1996):

Formula 12

$$\bar{M} = \bar{M}^0 \cdot e^{-\lambda \Delta t}$$

dove λ è la costante di decadimento del radionuclide considerato e Δt è il tempo trascorso dalla data di riferimento alla data di misura.

5.2 Presentazione risultati

5.2.1 ILC 1 Attività di radionuclidi in una soluzione liquida acquosa

La maggioranza dei laboratori (29 *Partecipanti*) ha inviato i risultati entro la scadenza del 30 settembre 2022 e 5 *Partecipanti* hanno inviato risultati entro la scadenza del 15 ottobre 2022.

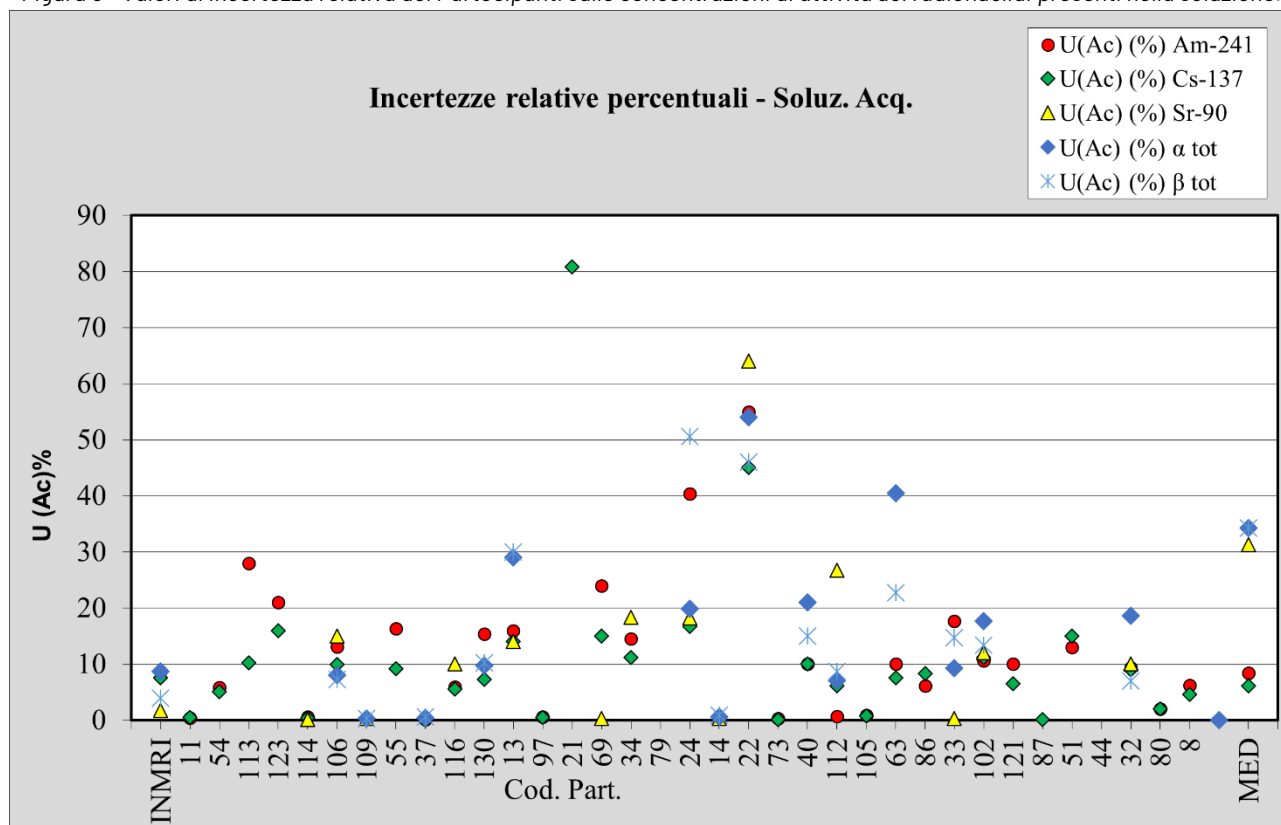
Nella soluzione acquosa sono stati introdotti i seguenti radionuclidi: Am-241, ¹³⁷Cs e ⁹⁰Sr, di cui sono riportati i valori di riferimento con le relative incertezze, assolute e relative. I dati di riferimento INMRI sono riportati in Tabella 7.

Tabella 7 - Dati di riferimento dell'INMRI per i radionuclidi presenti nella soluzione acquosa e rispetto ai quali i valori dei misurandi forniti dai *Partecipanti* sono stati analizzati.

Radionuclide	Concentrazione di Attività	Incertezza estesa assoluta	Incertezza estesa relativa
	Ac	U(Ac) (k=2)	U(Ac) (k=2)
	[Bq/kg]	[Bq/kg]	[%]
²⁴¹ Am	2,800	0,244	8,7
¹³⁷ Cs	3,046	0,230	7,6
⁹⁰ Sr	1,448	0,025	1,7
α Totale	2,800	0,244	8,7
β Totale	5,942	0,233	3,9

L'incertezza estesa (k=2) del valore di riferimento del misurando deriva dal contributo di diverse fonti. Tali fonti sono associate ai metodi con cui si realizza presso l'INMRI il campione della grandezza relativa al misurando. L'incertezza estesa $U(k=2)$ del valore del misurando fornito dal *Partecipante*, è anch'essa risultante dalla combinazione di diverse fonti che i *Partecipanti* devono considerare. Le incertezze fornite dai *Partecipanti* sui propri misurandi sono riportate in Figura 6.

Figura 6 - Valori di incertezza relativa dei Partecipanti sulle concentrazioni di attività dei radionuclidi presenti nella soluzione.



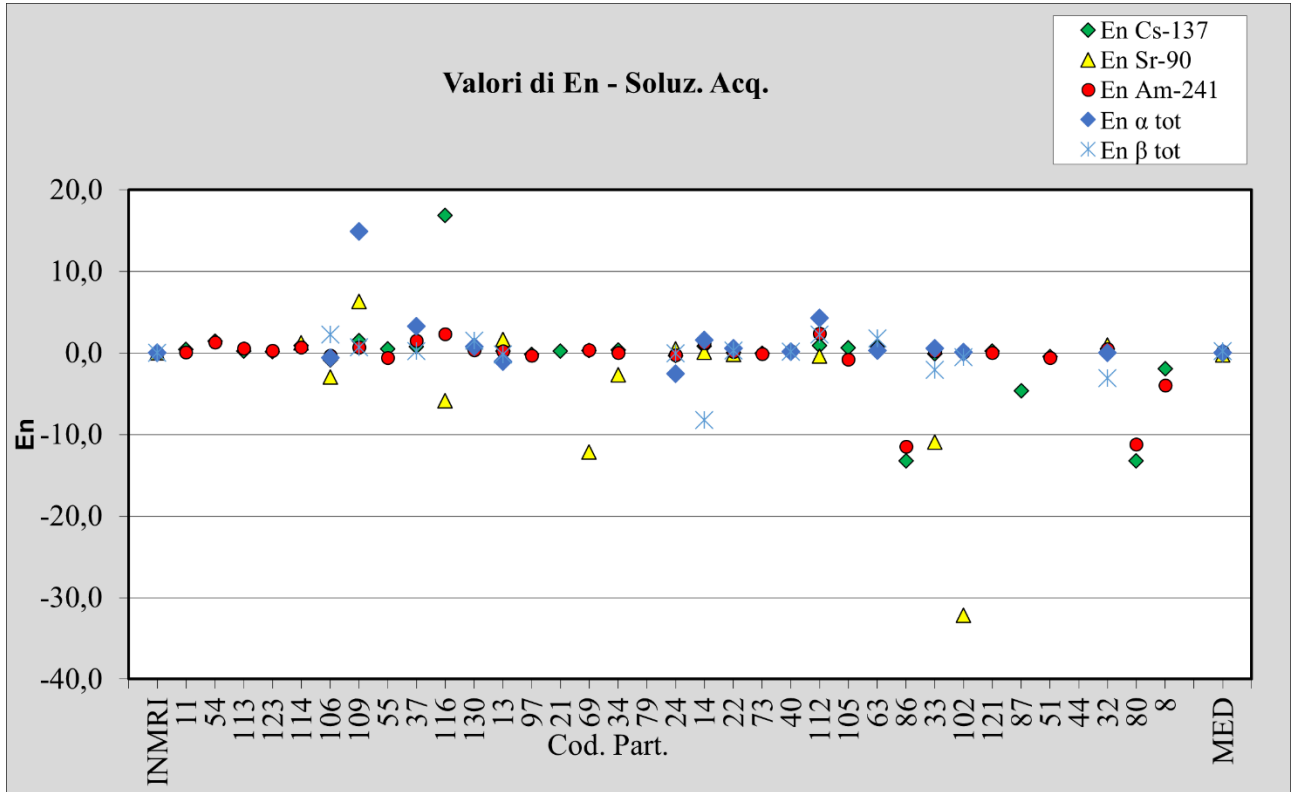
Valutazione dell'errore normalizzato, E_n

Per quanto riguarda la valutazione dell'errore normalizzato (Formula 4) dei dati forniti dai Partecipanti è stata condotta l'analisi riassunta nella Tabella 8 e il relativo grafico dei risultati (Figura 7).

Tabella 8 - Analisi dei risultati dell'errore normalizzato.

	Dati con $E_n > 1$	Dati con $E_n < 1$	valori accettabili non	Totale dei risultati pervenuti
^{241}Am	2	4	18,75%	32
^{137}Cs	1	4	15,63%	32
^{90}Sr	0	6	42,8%	14
Concentrazione di attività α totale	3	2	35,71%	14
Concentrazione di attività β totale	2	3	35,71%	14

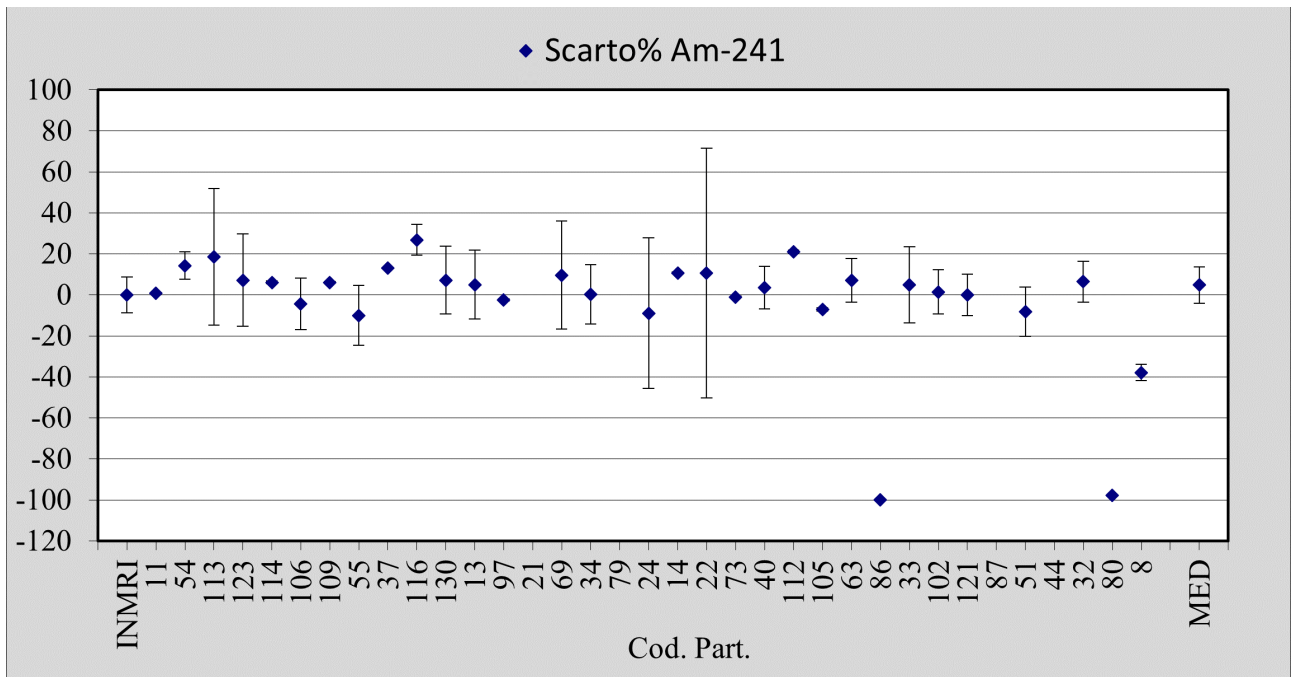
Figura 7 - Valori dell'errore normalizzato calcolati con i dati forniti dai Partecipanti.

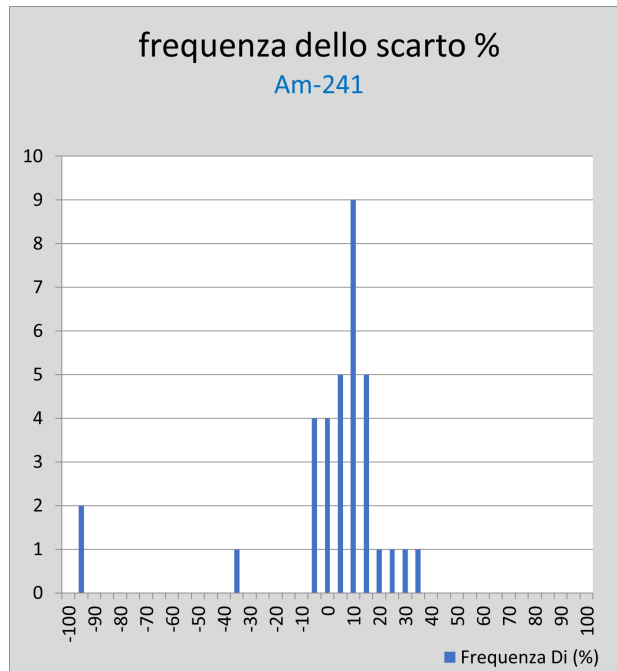


Risultati dello scarto sulla concentrazione di attività dell'²⁴¹Am:

Sul totale di 32 risultati di concentrazione di attività dell'²⁴¹Am (Figura 8) riportati dai Partecipanti il 37,5 % dei risultati dello scarto percentuale è compreso nell'intervallo [5%-10%] rispetto al valore di riferimento. Lo scarto medio complessivo è del 5,85%.

Figura 8 - Scarto sulla concentrazione di attività dell'²⁴¹Am e la frequenza degli scarti dal valore di riferimento.

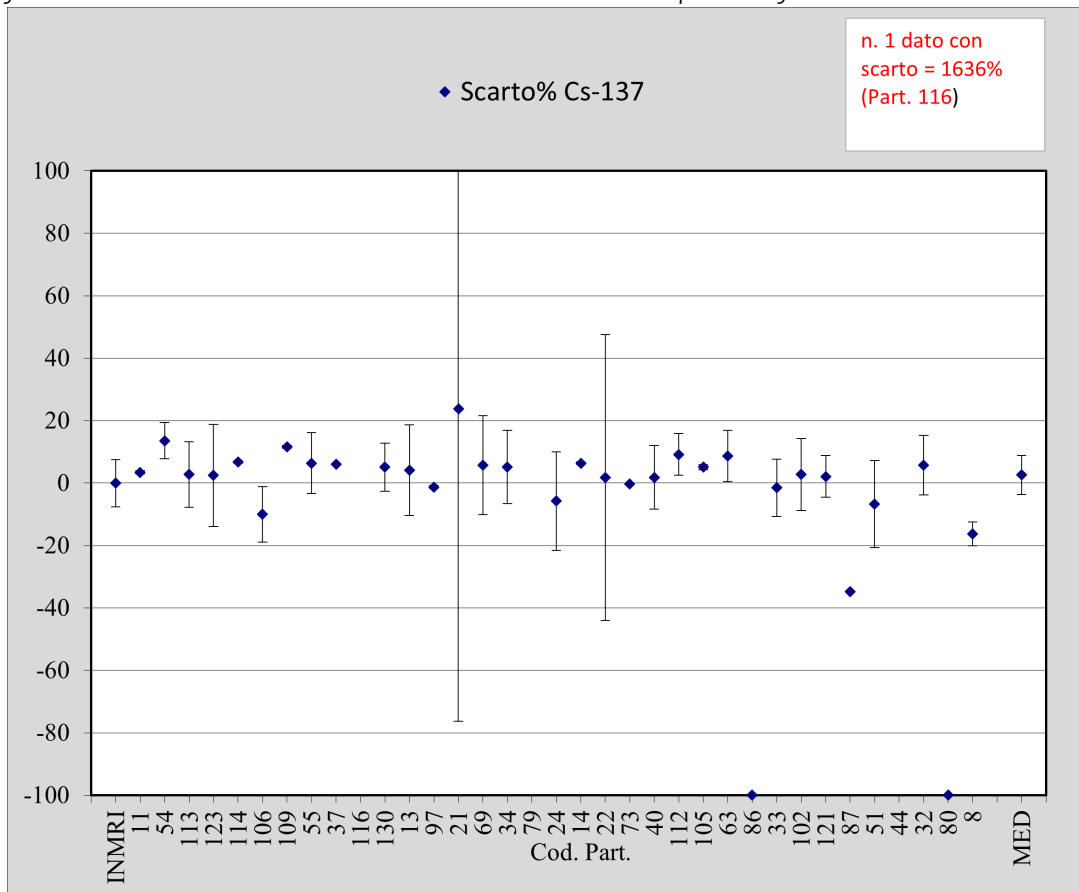


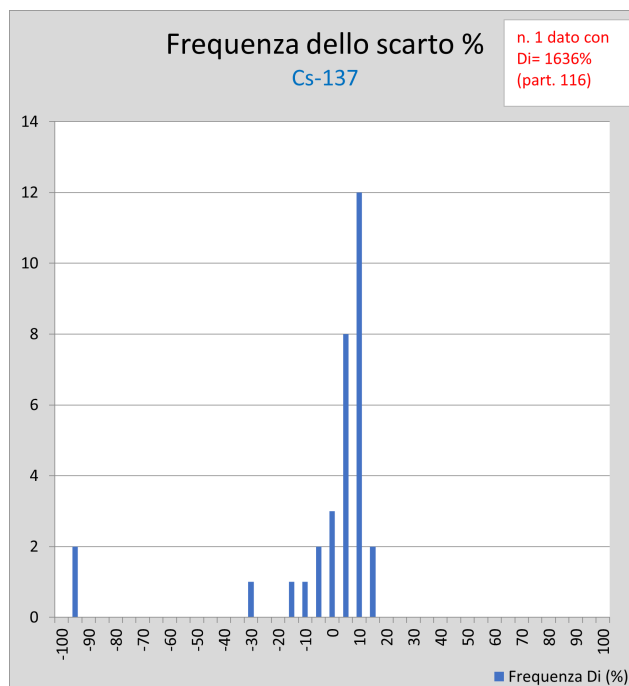


Risultati dello scarto sulla concentrazione di attività del Cesio-137:

Sul totale di 32 risultati di concentrazione di attività del ¹³⁷Cs (Figura 9) nel 37,5% dei risultati lo scarto % è compreso nel range 5% < R < 10% e nel 37,5% dei risultati è R < 5% rispetto al valore di riferimento e lo scarto medio complessivo è del 2,57 %.

Figura 9 - Scarto sulla concentrazione di attività del Cesio 137 e la frequenza degli scarti dal valore di riferimento.



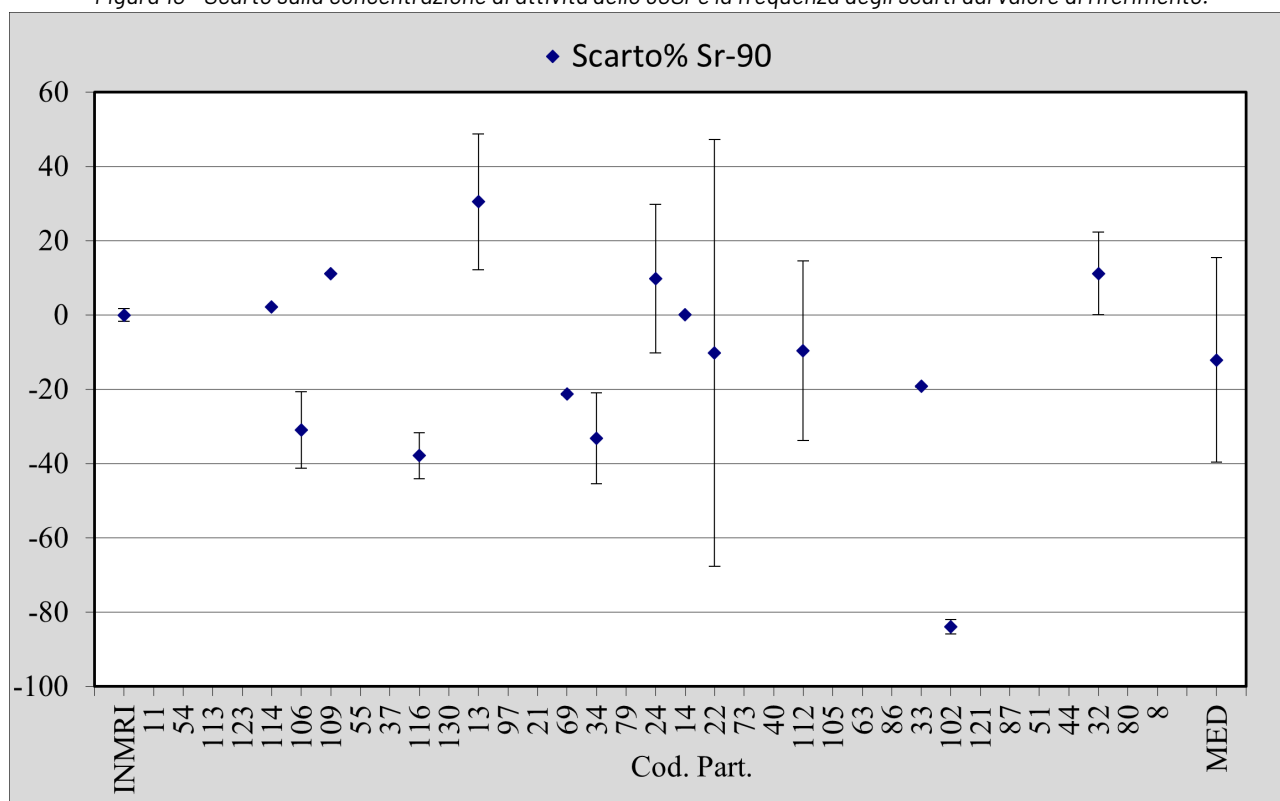


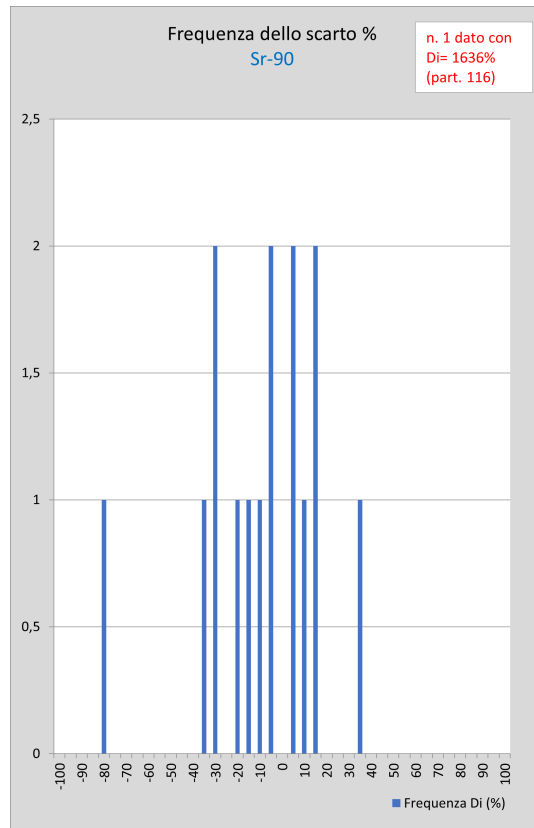
Risultati dello scarto sulla concentrazione di attività dello ⁹⁰Sr:

Sul totale di 14 risultati di concentrazione di attività del ⁹⁰Sr (

Figura 10), 5 risultati hanno riportato uno scarto R> 30% rispetto al valore di riferimento e solo il 14,28%, cioè 2 Partecipanti riportano uno scarto inferiore al 5%, lo scarto medio complessivo è pari a -12,08%.

Figura 10 - Scarto sulla concentrazione di attività dello ⁹⁰Sr e la frequenza degli scarti dal valore di riferimento.

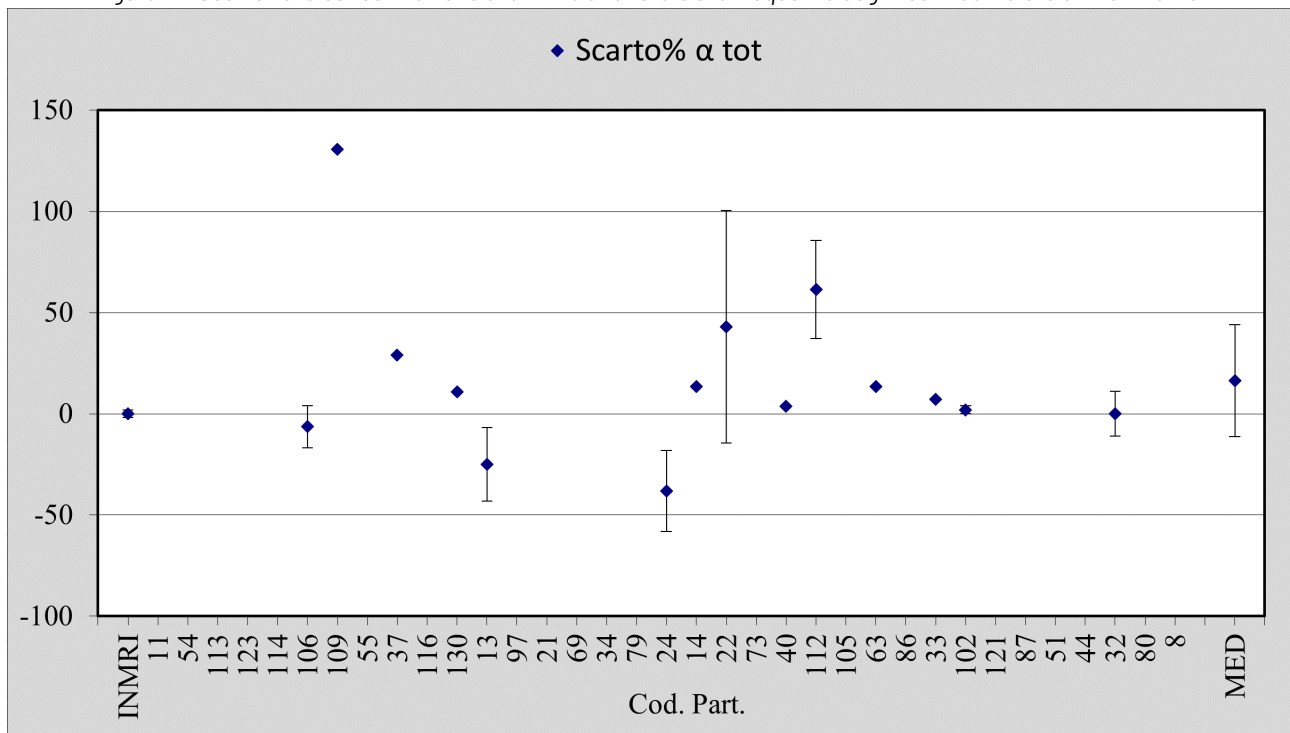


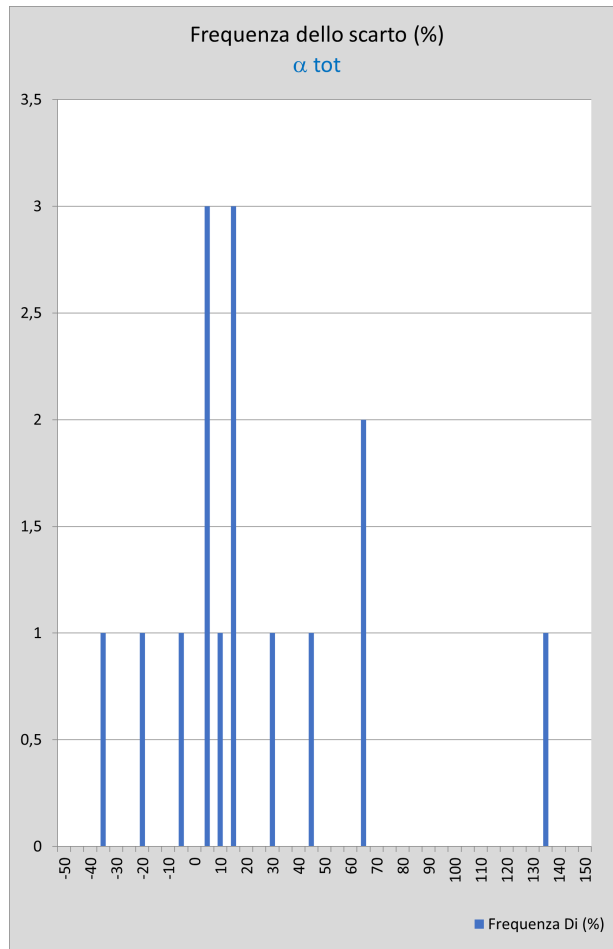


Risultati dello scarto sulla concentrazione di attività alfa totale:

Sul totale di 14 risultati di concentrazione α totale (Figura 11) il 35,71% presenta uno scarto inferiore al 5% rispetto al valore di riferimento.

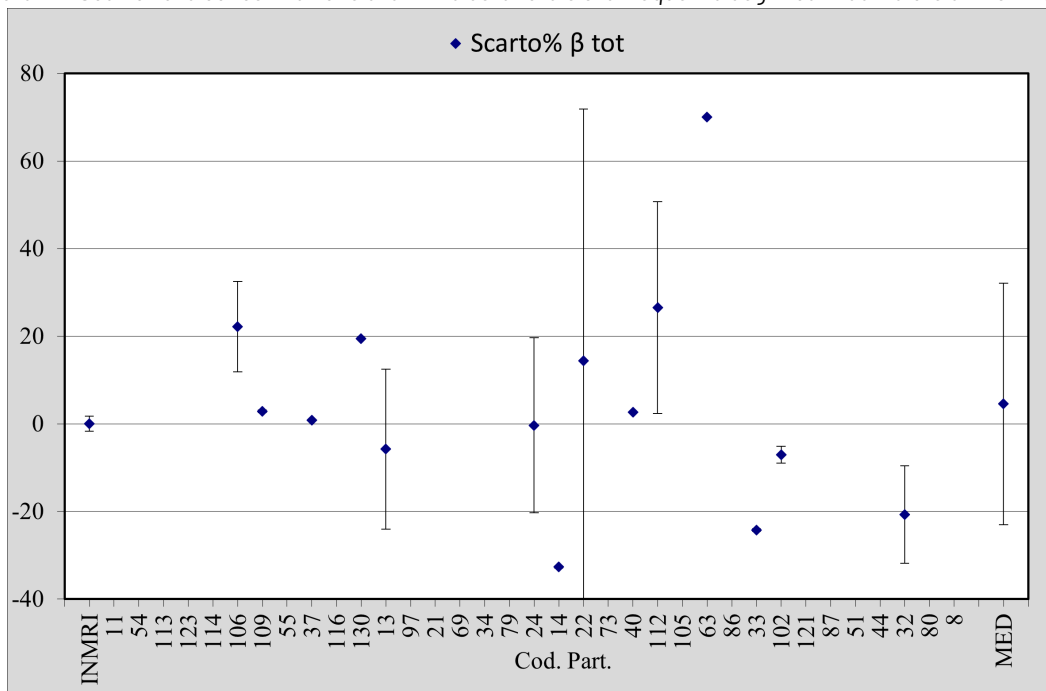
Figura 11 - Scarto sulla concentrazione di attività alfa totale e la frequenza degli scarti dal valore di riferimento.

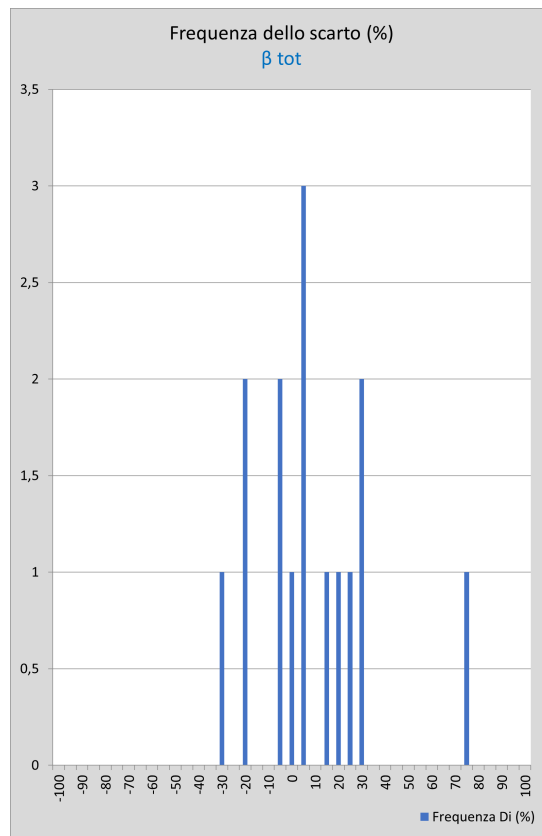




Risultati dello scarto sulla concentrazione di attività beta totale: Sul totale di 14 risultati di concentrazione β totale (Figura 12) il 28,57% presenta uno scarto inferiore al 5% rispetto al valore di riferimento.

Figura 12 - Scarto sulla concentrazione di attività beta totale e la frequenza degli scarti dal valore di riferimento.





I Partecipanti allo ILC 1 hanno ricevuto un Rapporto Tecnico di Partecipazione Individuale.

5.2.2 ILC 2 Attività di radiofarmaci

Nel caso dell'ILC 2 il superamento delle prove è stato valutato utilizzando tre criteri distinti (vedasi paragrafo 5.1). Nelle illustrazioni seguenti oltre al limite superiore del 10% per lo stimatore scarto percentuale è stato mostrato anche il limite del 5% poiché anche questo valore è spesso utilizzato. Tuttavia l'analisi dell'esito delle prove si basa sul limite dello scarto percentuale posto al 10%. Si riportano di seguito i risultati ottenuti.

Con riferimento al ^{18}F :

- lo scarto percentuale (
-
- *Figura 13*) rispetto al valore di riferimento risulta essere all'interno dei limiti del 10% per ciascun centro che ha svolto l'ILC (22 su 22);
- non tutti i centri (17 su 22) hanno ottenuto un risultato accettabile in termini del parametro En (*Figura 14*).

Figura 13 - Scarto percentuale del ^{18}F tra il valore di riferimento fornito dall'INMRI e il valore dichiarato dal Partecipante.

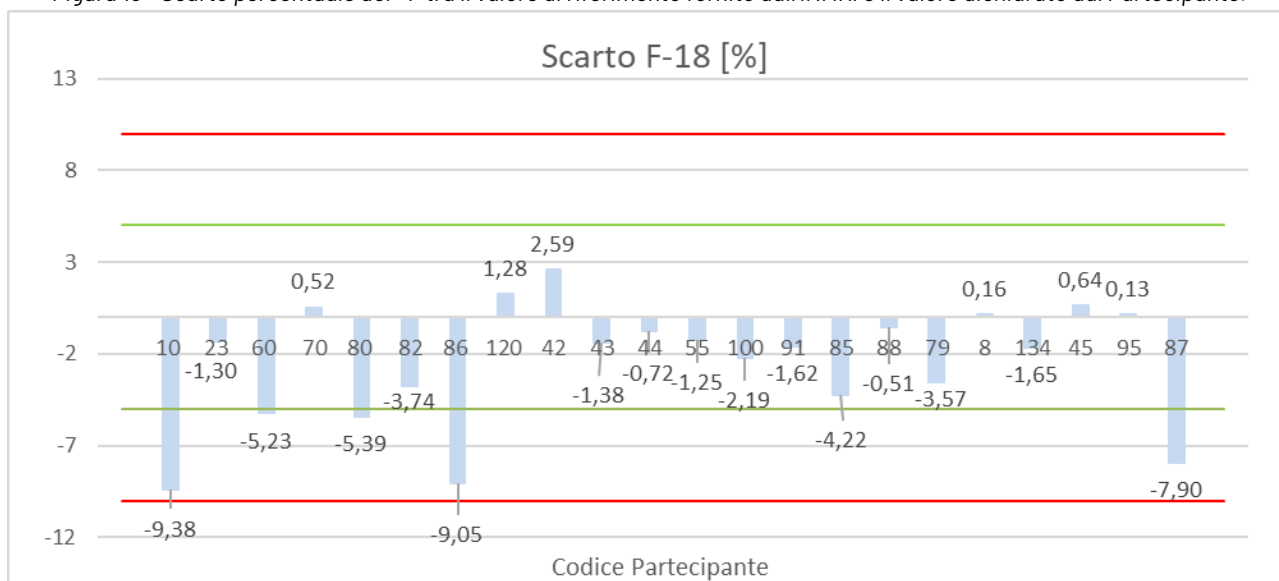
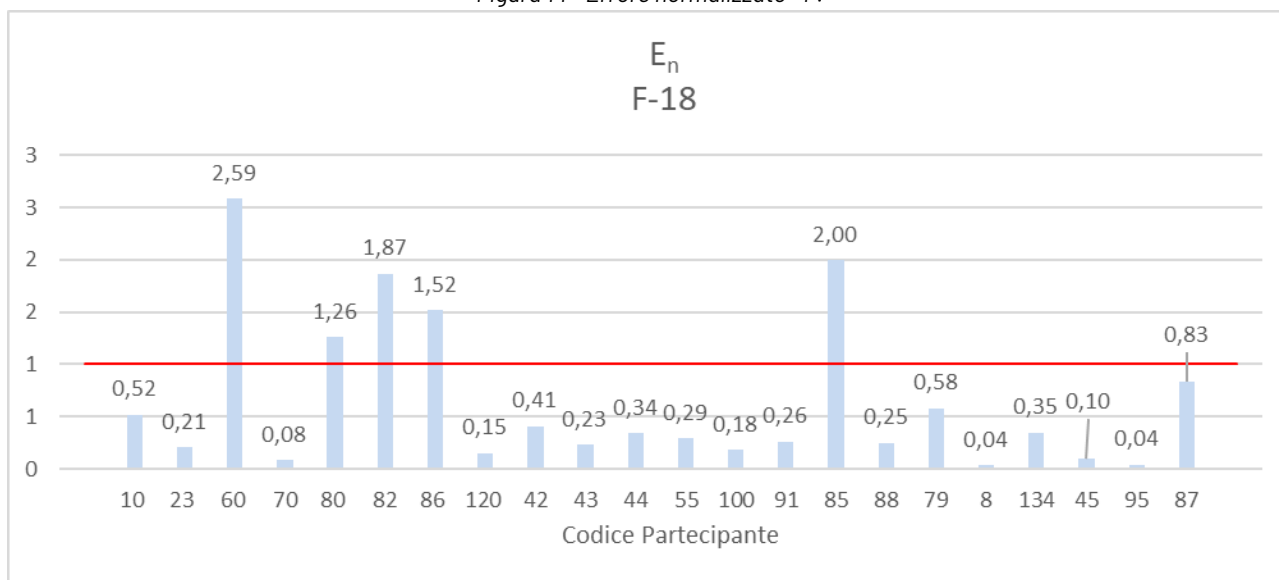


Figura 14 - Errore normalizzato ^{18}F .



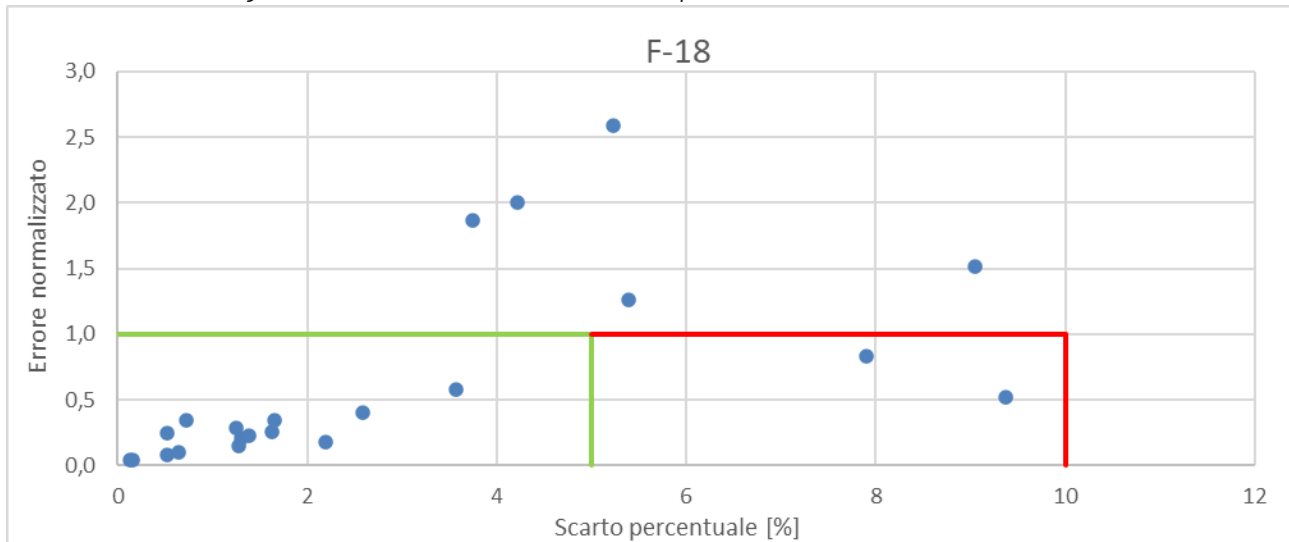
Come già citato al paragrafo 5.1, si è scelto di usare un terzo criterio di valutazione delle prove di cui al confronto, basato sulla condizione per cui si ha, contemporaneamente, un valore di R inferiore in modulo al 10% e un valore di E_n in modulo inferiore a 1 (

Figura 15). In tal modo si può notare che i Partecipanti che hanno ottenuto uno scarto, R , inferiore, in modulo, al 10% e quindi hanno effettuato la misura con accuratezza, non è detto che abbiano ottenuto un valore del parametro E_n inferiore a 1.

L'estimatore statistico E_n dà un'informazione sulla capacità del Partecipante di stimare l'incertezza sul proprio dato, evidenziando che, nei casi in cui R è inferiore al 10% ed E_n è superiore a 1, l'incertezza

fornita dal *Partecipante* risulta essere molto piccola.

Figura 15 - Valutazione simultanea tra scarto percentuale ed errore normalizzato ^{18}F .



Dalla

Figura 15 risulta che 17 centri su 22 hanno superato la prova quando si considera come criterio di accettabilità l'intersezione delle due condizioni sopra citate.

Con riferimento al ^{177}Lu possiamo dire che:

- lo scarto percentuale (Figura 16) rispetto al valore di riferimento risulta essere all'interno dei limiti del 10% per ciascun centro che ha svolto l'intekonfronto (8 su 8);
- non tutti i centri (7 su 8) hanno ottenuto un risultato accettabile in termini del parametro E_n (Figura 17).

Figura 16 - Scarto percentuale del ^{177}Lu tra il valore di riferimento fornito dall'INMRI e il valore dichiarato dal Partecipante.

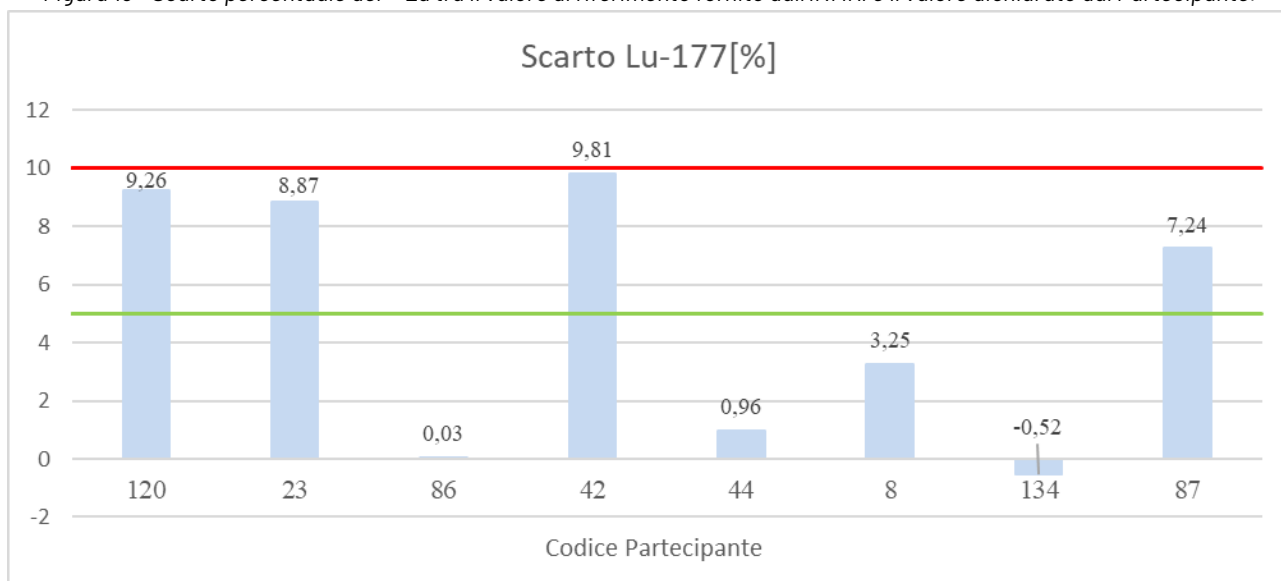
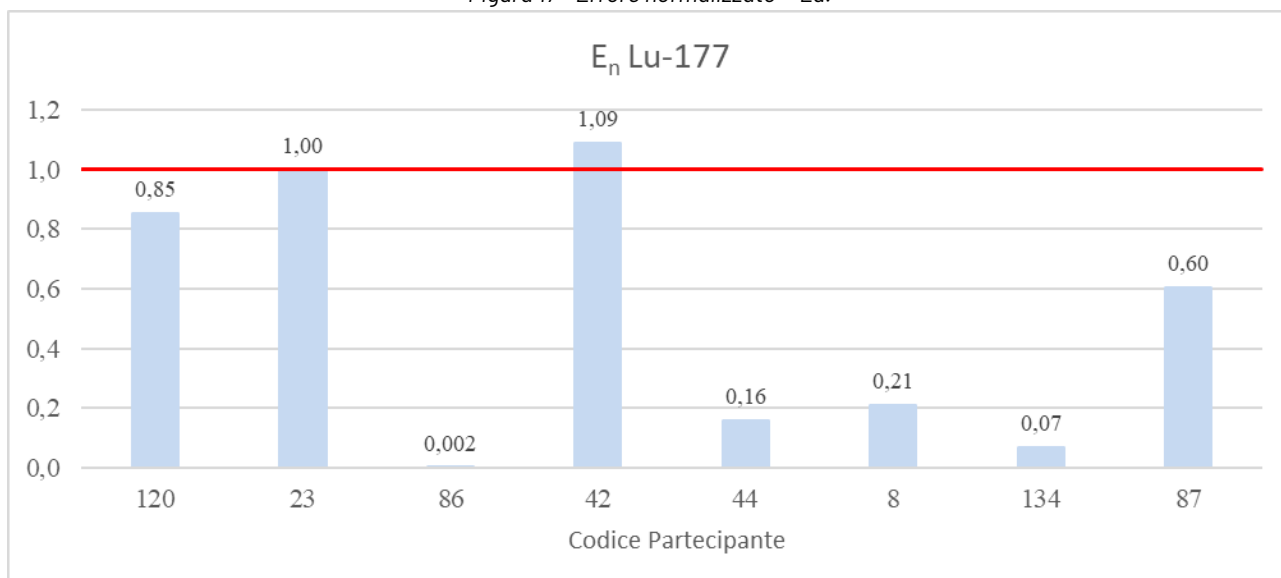
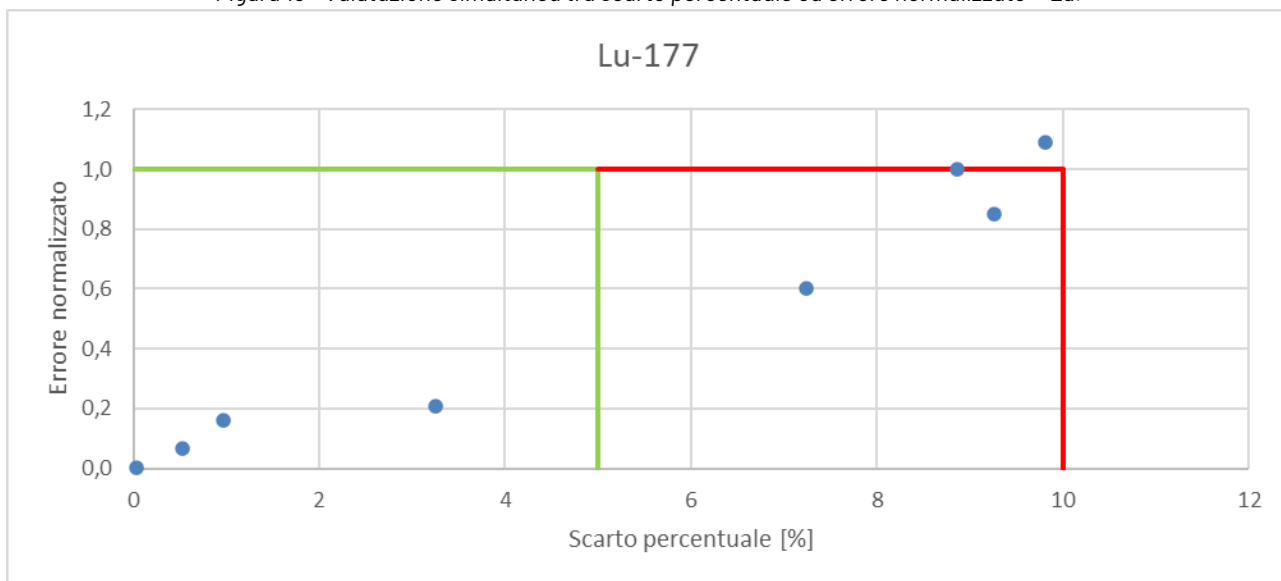


Figura 17 - Errore normalizzato ^{177}Lu .



Pertanto, come nel caso del ^{18}F , si è scelto di usare un terzo criterio di valutazione delle prove di cui al confronto, basato sulla condizione per cui si ha, contemporaneamente, un valore di R inferiore in modulo al 10% e un valore di E_n in modulo inferiore a 1 (Figura 18).

Figura 18 - Valutazione simultanea tra scarto percentuale ed errore normalizzato ¹⁷⁷Lu.



Dalla Figura 18 risulta che 7 centri su 8 hanno superato la prova quando si considera come criterio di accettabilità l'intersezione delle due condizioni sopra citate.

Con riferimento al ^{99m}Tc possiamo dire che:

- lo scarto percentuale (Figura 19) rispetto al valore di riferimento risulta essere all'interno dei limiti del 10% per tutti i centri che hanno svolto l'ILC tranne due (22 su 24);
- non tutti i centri (20 su 24) hanno ottenuto un risultato accettabile in termini del parametro E_n (Figura 20).

Figura 19 - Scarto percentuale del ^{99m}Tc tra il valore di riferimento fornito dall'INMRI e il valore dichiarato dal Partecipante.

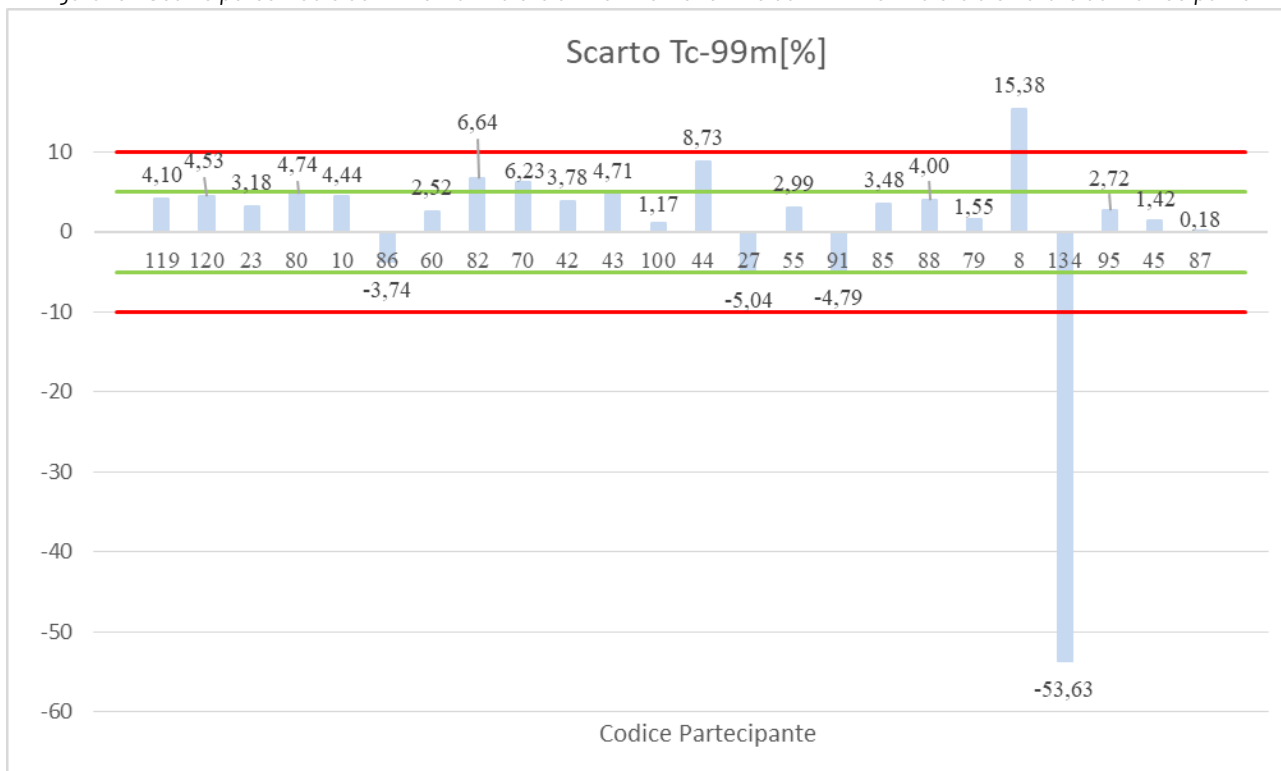
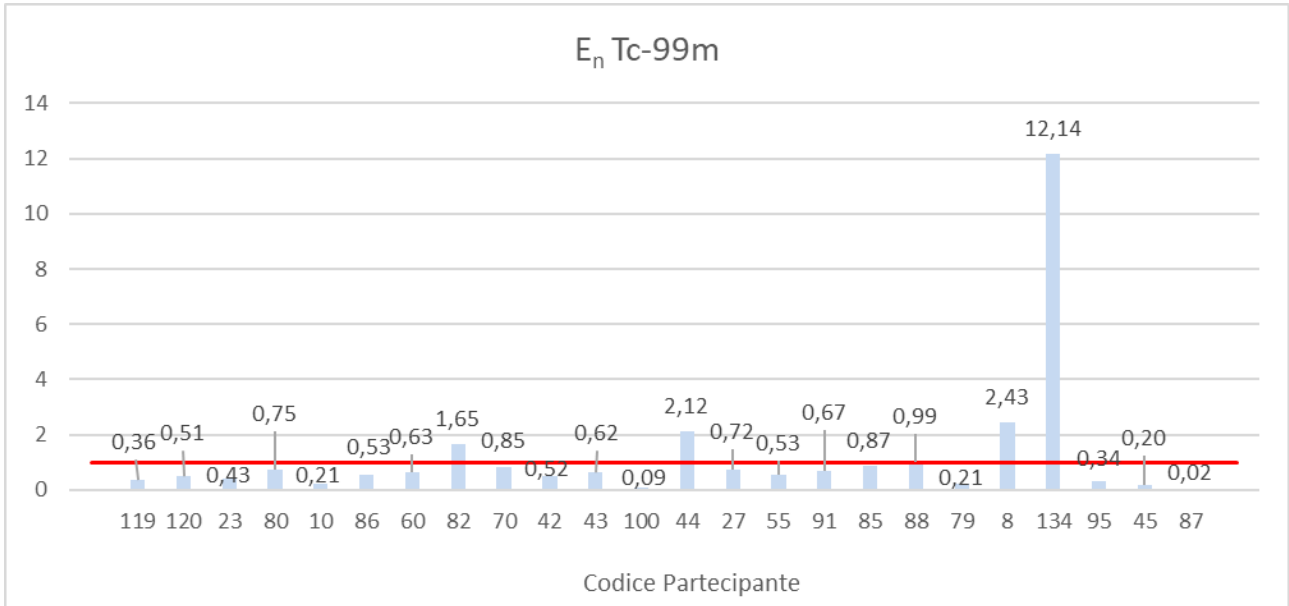
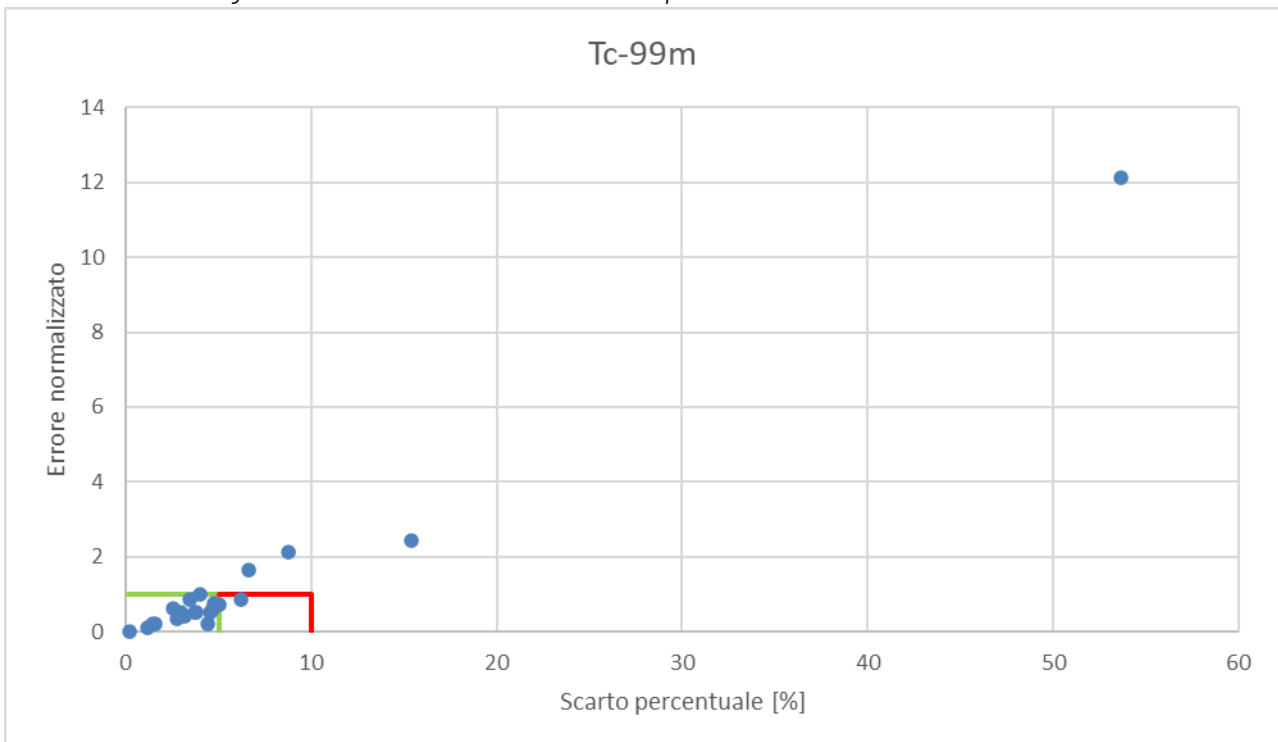


Figura 20 - Errore normalizzato ^{99m}Tc.



Pertanto, anche in questo caso, si è scelto di usare un terzo criterio di valutazione delle prove di cui al confronto, basato sulla condizione per cui si ha, contemporaneamente, un valore di R inferiore in modulo al 10% e un valore di E_n in modulo inferiore a 1 (Figura 21).

Figura 21 - Valutazione simultanea tra scarto percentuale ed errore normalizzato ^{99m}Tc.



Dalla Figura 21 risulta che 20 centri su 24 hanno superato questa prova quando si considera come criterio di accettabilità l'intersezione delle due condizioni sopra citate.

I Partecipanti allo ILC 2 hanno ricevuto un Rapporto Tecnico di Partecipazione Individuale.

5.2.3 ILC 3 Concentrazione di ²²²Rn in aria

I valori misurati da INMRI sono riportati nella Tabella 9 e Tabella 10

Tabella 9 - Valori misurati da INMRI durante la seconda esposizione

Intervallo	Concentrazione di attività (Bq m⁻³)	Temperatura (°C)	Pressione (mbar)	Umidità (%)
Primo	1039±26	29±0,5	1000±4	43±4
Secondo	5239±94	28±0,2	1002±1,5	64±3
Terzo	3276±62	28±0,2	1001±1,5	60±4
Esposizione totale (kBq h m ⁻³): 929±17				

Tabella 10 - Valori misurati da INMRI durante la prima esposizione.

Intervallo	Concentrazione di attività (Bq m⁻³)	Temperatura (°C)	Pressione (mbar)	Umidità (%)
Primo	1208±55	27±0,5	997±4	47±4
Secondo	4524±135	28±0,2	1000±1,5	60±3
Terzo	2337±58	29±0,2	1000±1,5	50±4
Esposizione totale (kBq h m ⁻³): 726±22				

La

Figura 22 e la Figura 23 mostrano i valori degli indicatori valutativi (Formola 3 e Formola 4) ottenuti dai vari *Partecipanti*, il codice strumento è un numero casuale assegnato ad ogni strumento *Partecipante* per garantire la segretezza dei risultati dei vari *Partecipanti*.

Si è fissato, come criterio di accettabilità, un valore in modulo della differenza percentuale minore o uguale al 10%.

In accordo con la norma ISO [ISO, 2016], si ha che un valore dell'errore normalizzato in modulo minore o uguale a 1 indica un esito soddisfacente della prova.

Figura 22 - Valore assoluto della differenza percentuale ottenuto dai Partecipanti.

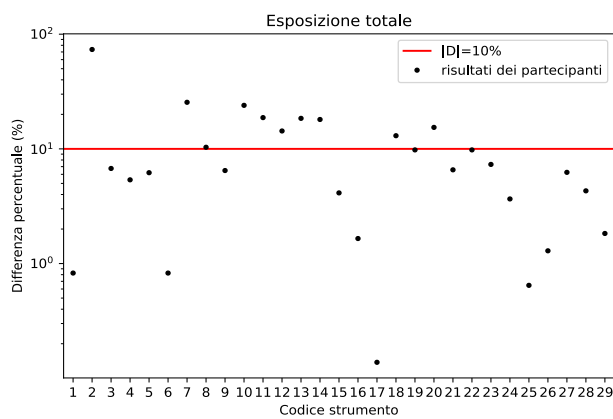
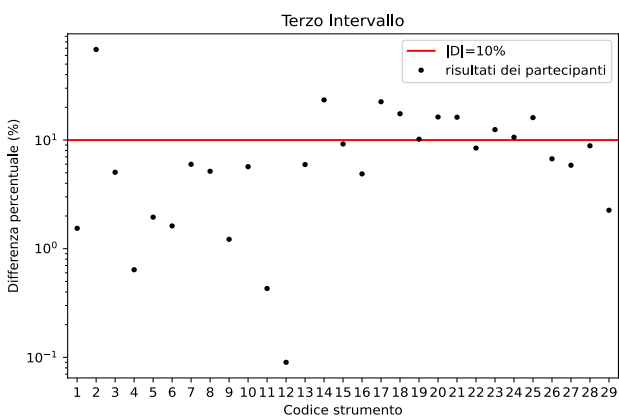
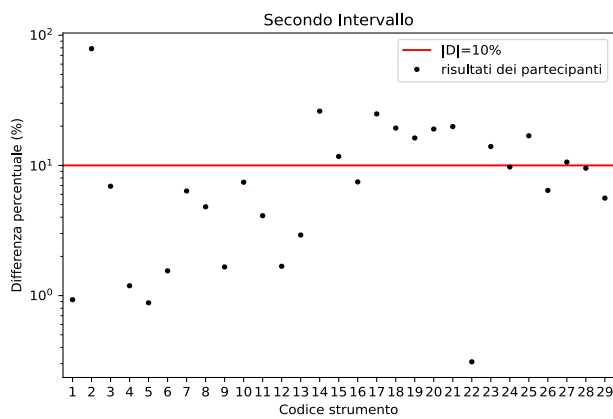
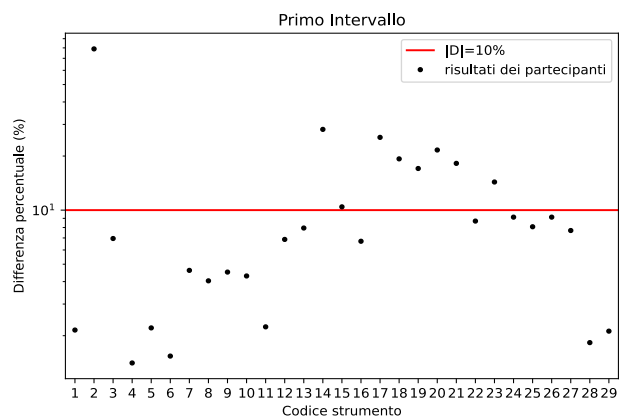
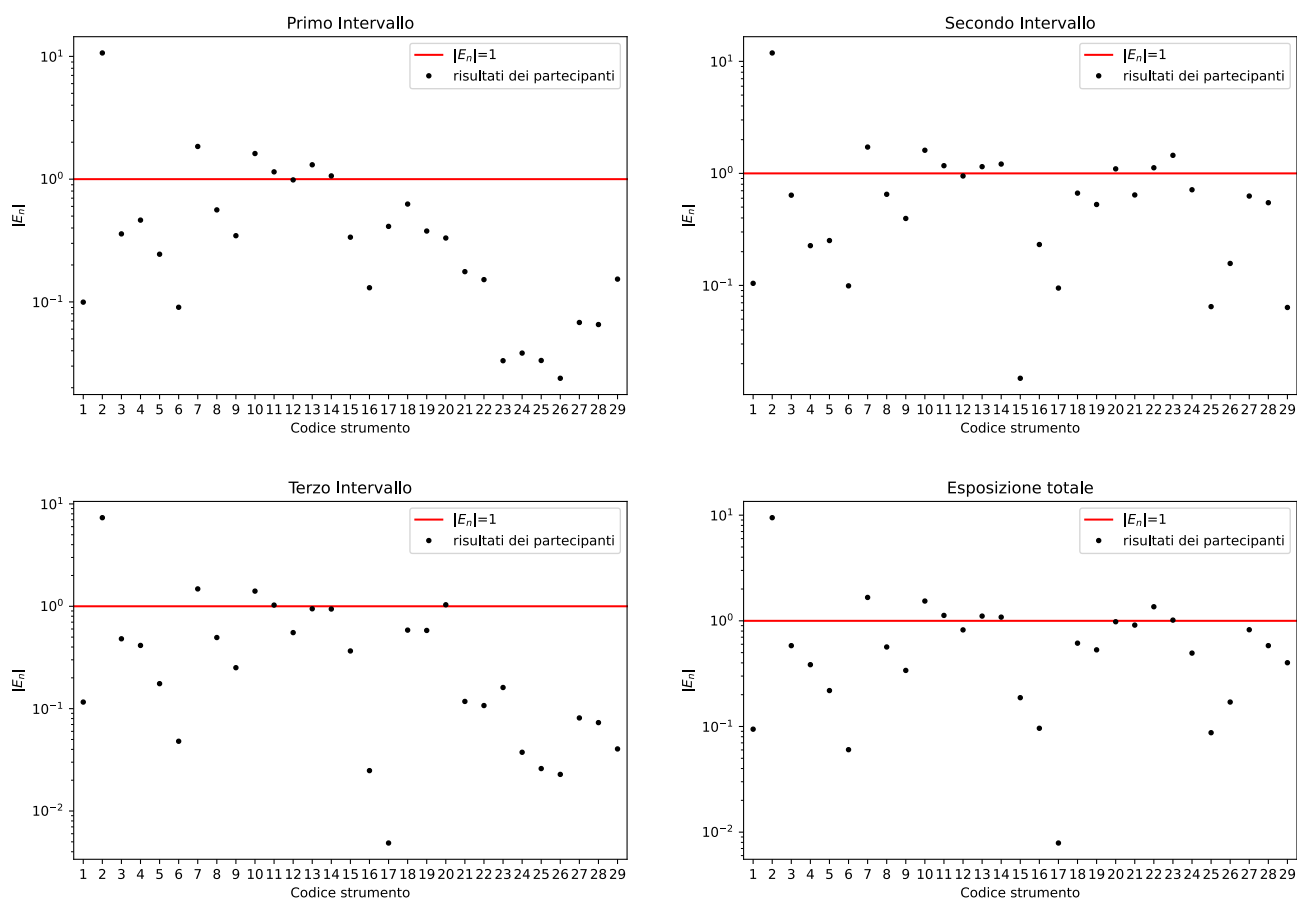


Figura 23 - Valore assoluto dell'errore normalizzato ottenuto dai Partecipanti.



Dall'osservazione della

Figura 22 si ha che, dei 29 strumenti *Partecipanti*, 31%, 38% e 35% dei dispositivi supera il limite fissato del valore assoluto della differenza percentuale rispettivamente nel primo, secondo e terzo intervallo di misura. Il 35% dei dispositivi supera il limite fissato quando si considera l'esposizione totale.

Dall'osservazione della Figura 23 si ha che, dei 29 strumenti *Partecipanti*, 21%, 31% e 17% dei dispositivi supera il limite fissato del valore assoluto dell'errore normalizzato rispettivamente nel primo, secondo e terzo intervallo di misura. Il 28% dei dispositivi supera il limite fissato quando si considera l'esposizione totale.

In generale, si osserva che la percentuale di strumenti che supera il limite dell'errore normalizzato è minore della percentuale di strumenti che supera il limite della differenza percentuale.

I *Partecipanti* allo ILC 3 hanno ricevuto un Rapporto Tecnico di Partecipazione Individuale.

5.2.4 ILC 4 Misura di dose assorbita in acqua

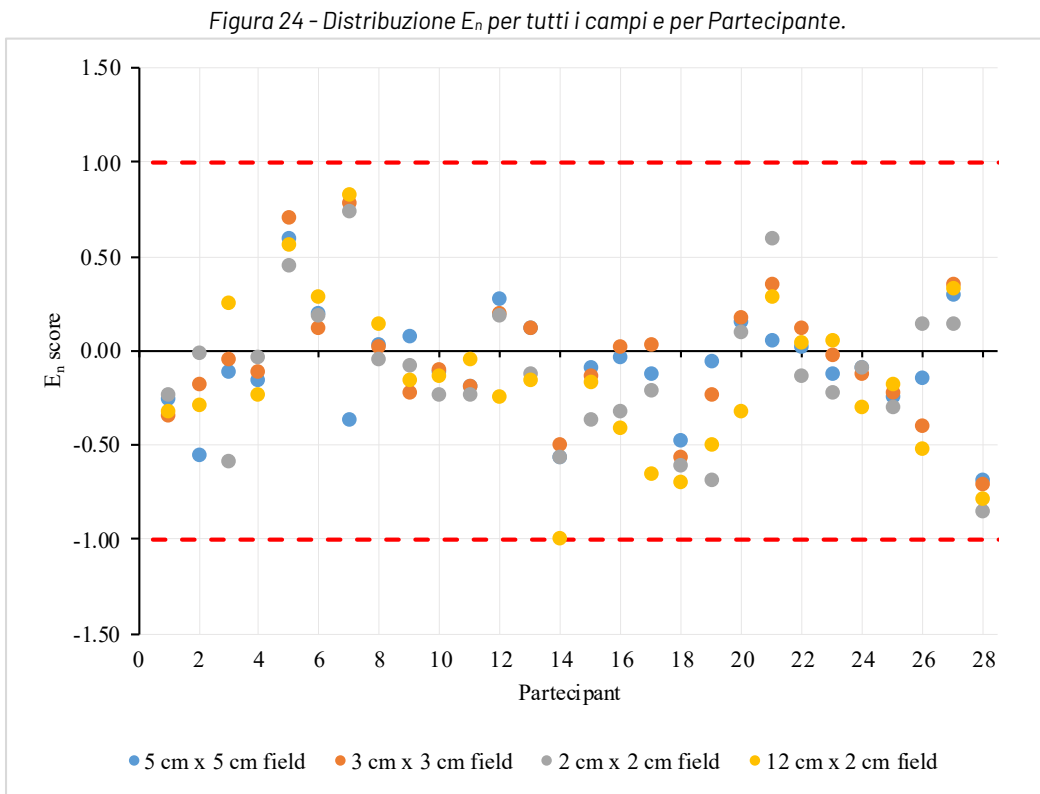
I Centri di Radioterapia che si sono iscritti all'ILC4 sono cinquanta. Di questi, è stato possibile completare l'ILC4 per ventotto *Partecipanti* a causa di un guasto che ha determinato l'interruzione di tutte le attività sperimentali nei laboratori di dosimetria delle "alte dosi" dell'INMRI ed, in particolare, ha determinato l'interruzione prematura dello ILC 4. Si riportano i risultati raccolti relativi ai ventotto centri che hanno potuto partecipare.

Campo di radiazione:

- 5 cm x 5 cm: Tutti i valori rientrano nel range dell'indice di compatibilità, per $k=2$ $-1.0 \leq E_n \leq 1.0$ dei quali, l'85.7% dei dati raccolti nell'intervallo, per $k=1$ $-0.5 \leq E_n \leq 0.5$

- 3 cm x 3 cm: Tutti i valori rientrano nel range dell'indice di compatibilità, per $k=2$ $-1.0 \leq E_n \leq 1.0$ dei quali, l'85.7% dei dati raccolti nell'intervallo, per $k=1$ $-0.5 \leq E_n \leq 0.5$
- 2 cm x 2cm: Tutti i valori rientrano nel range dell'indice di compatibilità, per $k=2$ $-1.0 \leq E_n \leq 1.0$ dei quali, il 75.0% dei dati raccolti nell'intervallo, per $k=1$ $-0.5 \leq E_n \leq 0.5$
- 12 cm x 2 cm: Tutti i valori rientrano nel range dell'indice di compatibilità, per $k=2$ $-1.0 \leq E_n \leq 1.0$ dei quali, il 71.4% dei dati raccolti nell'intervallo, per $k=1$ $-0.5 \leq E_n \leq 0.5$

Si riportano i risultati in Figura 24.



5.2.5 ILC 5 Equivalente di dose personale

Di seguito sono presentati i dati raccolti per l'ILC5, considerando sia le informazioni preliminari sui dosimetri che i risultati dell'ILC.

Figura 25 - Distribuzione della tipologia di Rivelatori utilizzati nell'ILC.

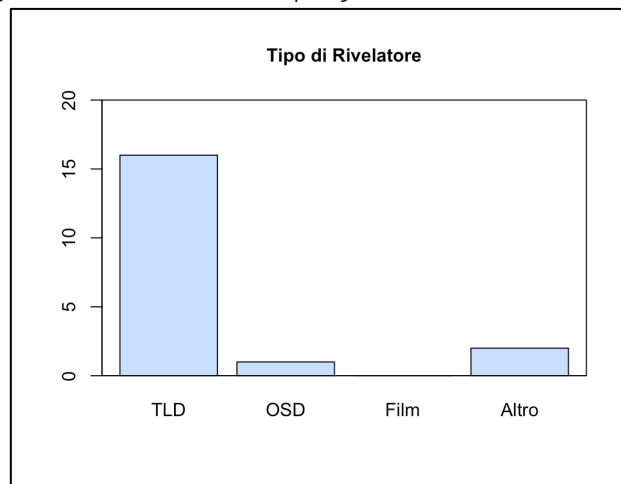


Figura 26 - Distribuzione della riferibilità metrologica dei Partecipanti.

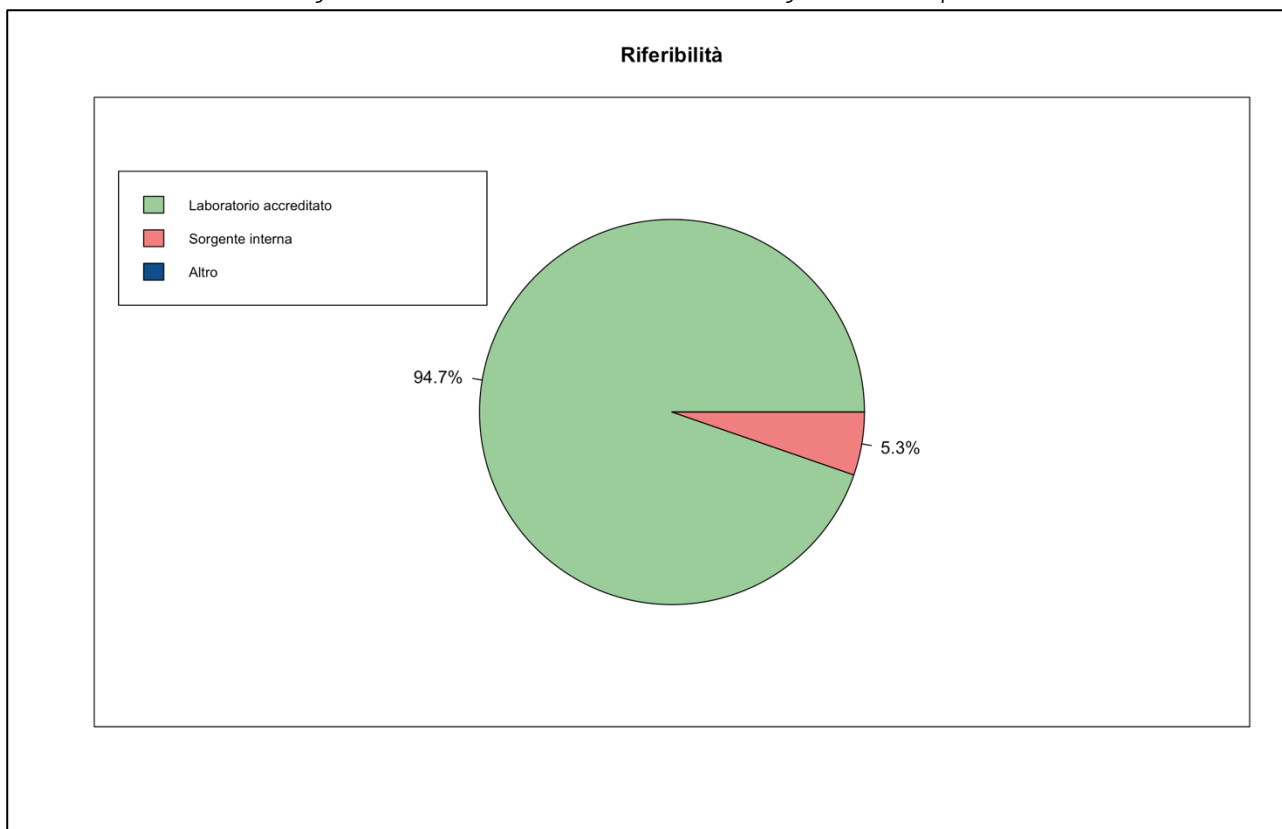
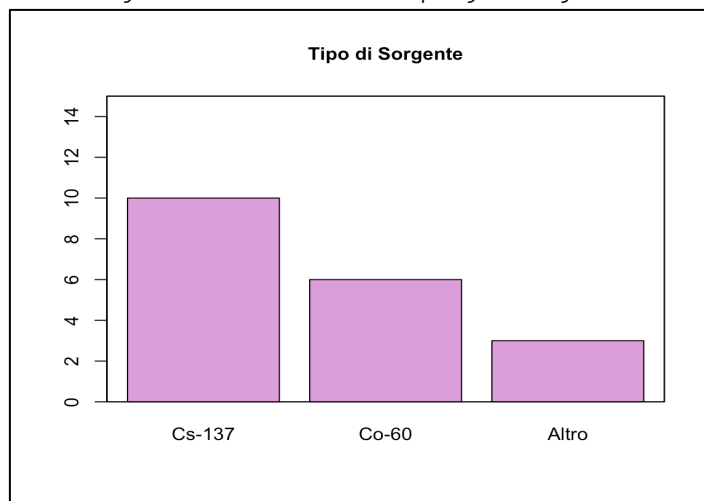


Figura 27 - Distribuzione della tipologia di Sorgente.



Riguardo la prima parte del form compilato da ciascuno dei diciannove *Partecipanti* (Figura 25), sono emerse le seguenti informazioni: la maggior parte dei *Partecipanti* utilizza dosimetri passivi di tipo TLD, indicato da 16 utenti (Figura 25); per quanto riguarda la riferibilità dei *Partecipanti*, la quasi totalità ha indicato un laboratorio accreditato (Figura 26); considerando la tipologia di sorgente (Figura 27), il più indicato è il ^{137}Cs , opzione selezionata da più della metà dei *Partecipanti*.

Considerando le letture dei dosimetri passivi effettuate dai *Partecipanti*, questi hanno potuto comunicare i loro dati nell'ultima sezione del modulo dedicato di cui sopra, indicando il valore dell'equivalente di dose personale, espresso in mSv, e l'incertezza associata alla misura, espressa in

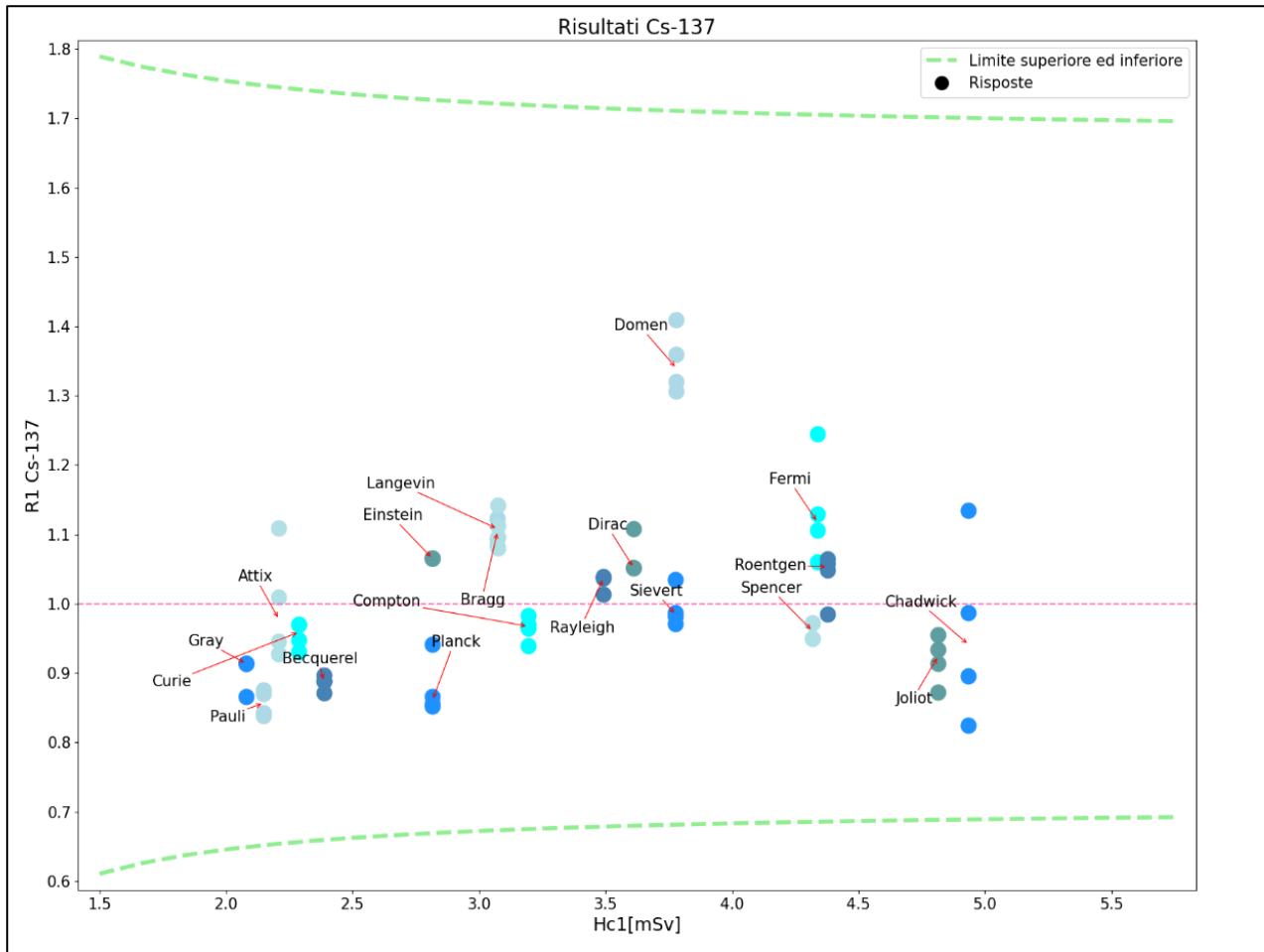
termini percentuali, con fattore di copertura $k=2$ (JCGM, 2008).

Per identificare in forma anonima i *Partecipanti*, a ciascun utente iscritto all'ILC 5 è stato associato un codice segreto corrispondente al nome di scienziati di rilievo: l'associazione tra *Partecipante* ed il codice segreto è nota soltanto al singolo *Partecipante* e all'ENEA-INMRI.

I risultati delle risposte R , calcolate come indicato dalla

Formula 5 sono stati utilizzati per costruire i grafici che verranno riportati nelle pagine seguenti. In particolare, sono stati realizzati tre grafici, uno per ciascun misurando

Figura 28 - Risultati dell'ILC per il fascio di radiazioni gamma emesso da sorgente di ^{137}Cs .



Il grafico su rappresentato (Figura 28) mostra i risultati dell'ILC impiegando il fascio di radiazione gamma emesso da ^{137}Cs , ottenuti applicando la formula suddetta (ISO 14146): sull'asse delle x sono stati posti i valori di riferimento degli equivalenti di dose per questo misurando, espressi in mSv; sull'asse delle y sono, invece rappresentate le risposte R ottenute per ciascun dosimetro irraggiato con il valore di H_C per ciascuno dei tre misurandi.

In una situazione di perfetta corrispondenza tra la misura determinata dal Laboratorio ed il valore di riferimento H_C , la risposta sarebbe pari a 1; in corrispondenza di questo valore è stata disegnata una linea tratteggiata nelle Figura 28, Figura 29, Figura 30: tanto più si è vicini a questa posizione tanto più le letture comunicate sono vicine al valore assegnato al misurando. Le due linee spesse rappresentano i limiti superiore ed inferiore della

Formula 6, al variare del valore di riferimento H_C . Queste curve, che assumono il nome di *trumpet curves* o *curve a tromba*, nome dovuto alla loro particolare forma, determinano le linee di demarcazione per il superamento o meno del confronto: le risposte dei *Partecipanti*, rappresentate dai marcatori circolari

nel grafico, devono essere nell'intervallo definito dalla coppia di curve a trombettina; per tutti i Partecipanti i cui valori eccedono tali limiti la prova è considerata non superata.

Figura 29 - Risultati dell'ILC per fasci di radiazioni X filtrate di medie energie, alla qualità W-80 (ISO 4037:1996), con angolo di incidenza $\alpha=0^\circ$.

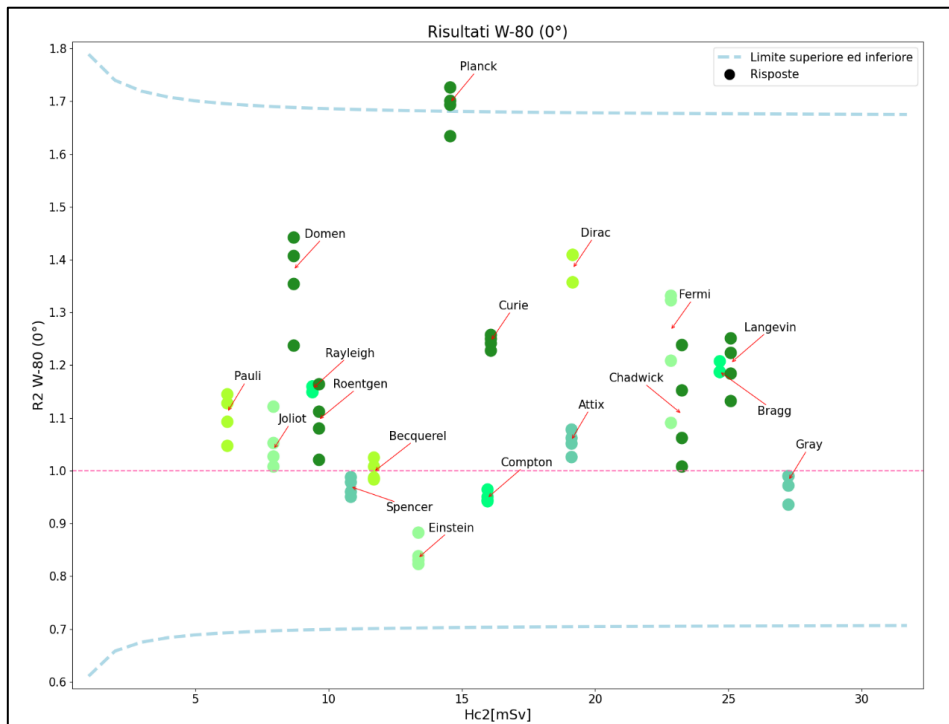
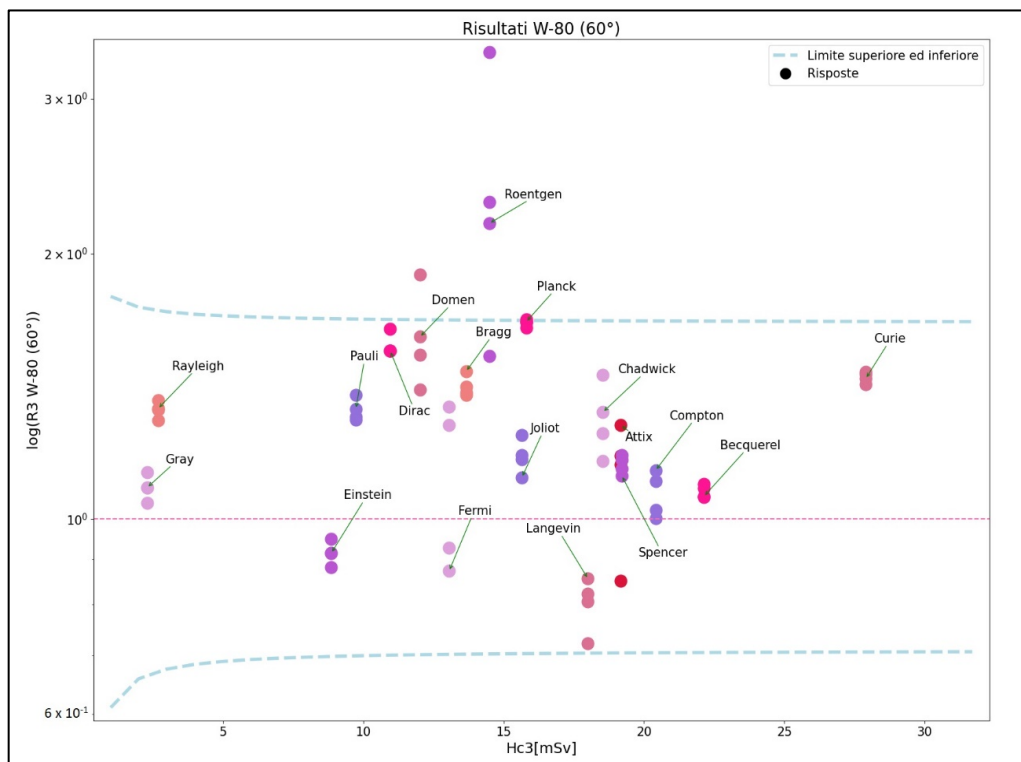


Figura 30 - Risultati dell'ILC per fasci di radiazioni X filtrate di medie energie, alla qualità W-80 (ISO 4037:1996), con angolo di incidenza $\alpha=60^\circ$.



I due grafici rappresentati (Figura 29, Figura 30) mostrano i risultati ottenuti per il fascio di radiazioni

X, qualità W-80: la Figura 29 fa riferimento agli irraggiamenti effettuati con angolo di incidenza pari a 0°, la Figura 30 si riferisce, invece, agli irraggiamenti eseguiti a 60°. Per questi due misurandi vengono mostrati i risultati di 18 centri, in quanto uno di essi ha scelto di partecipare all'ILC con il solo misurando 1.

I grafici presentano le stesse componenti già viste per le figure precedenti. Le curve a tromba, la cui forma è maggiormente visibile in questi grafici, rappresentano sempre i limiti superiore ed inferiore nella Formula 6.

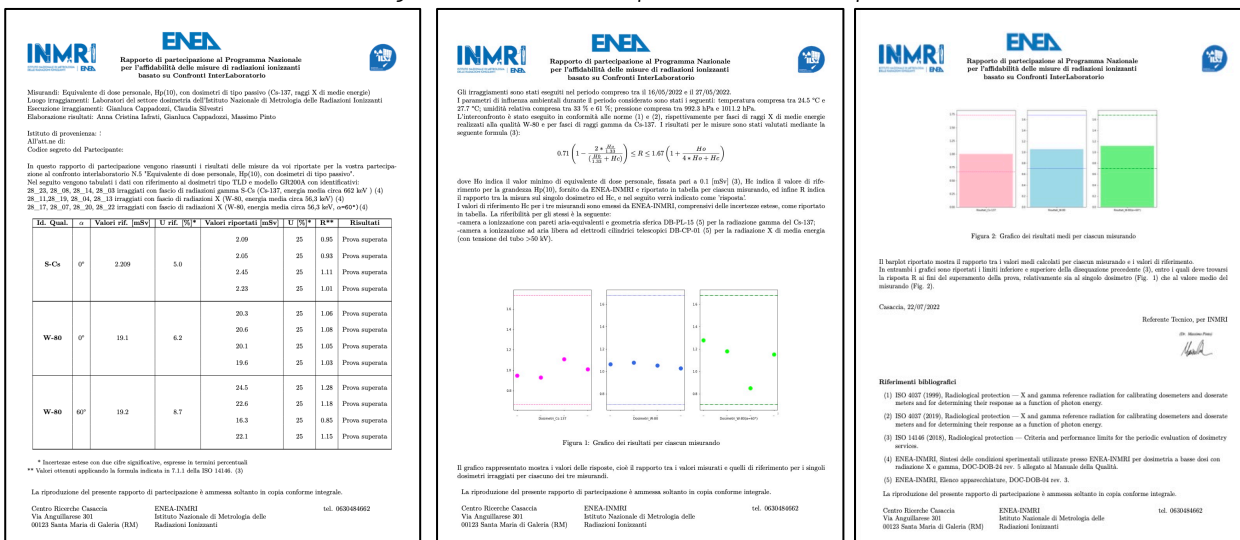
Terminata l'analisi dei dati per l'ILC 5, l'ENEA-INMRI si è impegnata a comunicare gli esiti dell'ILC ai singoli *Partecipanti*, attraverso un rapporto di partecipazione al Programma e al confronto in oggetto, che presentasse i risultati ottenuti per ciascun misurando.

Attraverso uno script in Python è stato strutturato un rapporto di partecipazione in cui sono state inserite le indicazioni sui dosimetri irraggiati, una tabella riassuntiva delle letture comunicate dai *Partecipanti* e i valori di riferimento, entrambi con le relative incertezze, e i risultati ottenuti nell'ILC, divisi per ciascuna delle quattro letture per i tre misurandi. Nel report sono stati poi inseriti due grafici, rappresentanti i risultati sia a livello medio sia per singolo dosimetro: in questo modo gli utenti hanno potuto valutare l'esito delle prove cui hanno partecipato con due punti di vista differenti. In alcuni casi, infatti, seppure una delle letture eccede i limiti, a livello medio la prova risulta superata.

I rapporti di partecipazione sono stati, infine, inviati via mail a tutti i *Partecipanti*, congiuntamente ad un questionario di soddisfazione riguardante il lavoro svolto per l'ILC 5.

Di seguito (Figura 31) viene mostrato un esempio di report inviato a ciascun *Partecipante*.

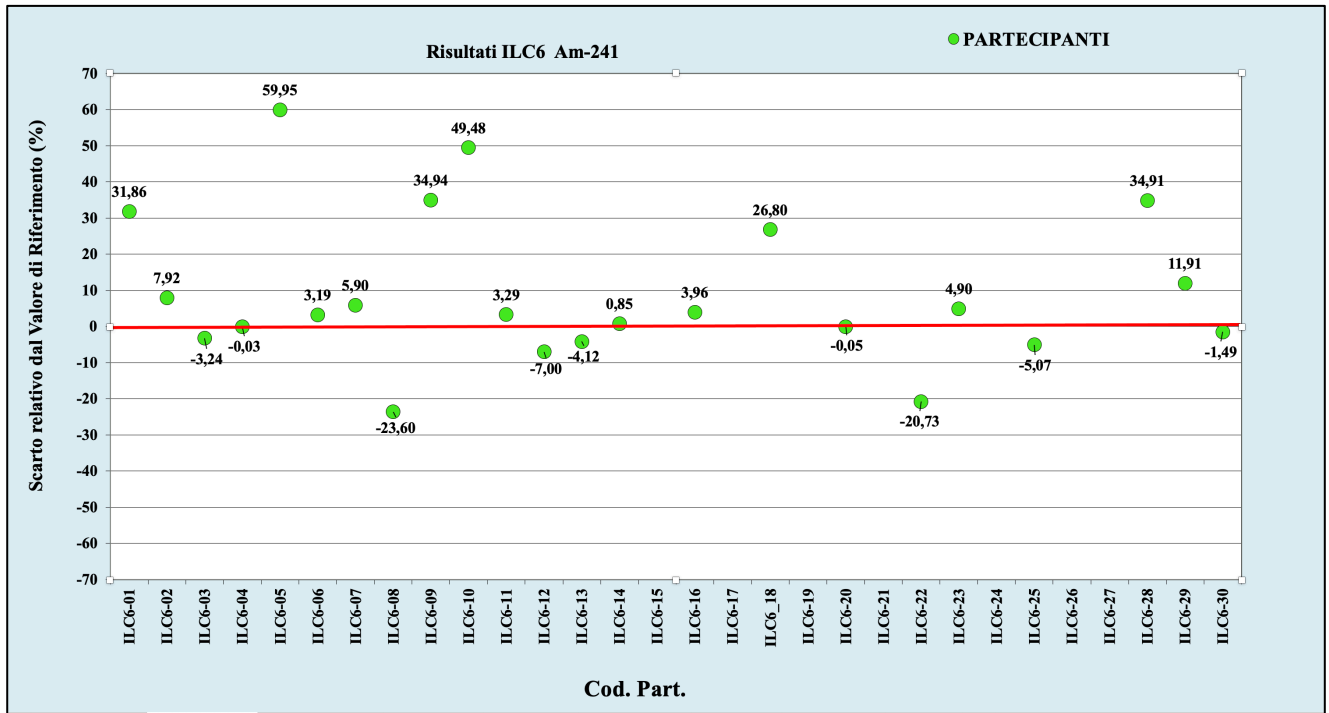
Figura 31 - Struttura del report inviato ai Partecipanti.



5.2.6 ILC 6 Contaminazione superficiale

- I valori di scarto relativo per ciascun radionuclide sono riportati nelle Figura 32 e
-
- *Figura 33*. Trenta laboratori si sono iscritti e cinque si sono ritirati. Solo ventitre *Partecipanti* su venticinque hanno inviato i risultati.

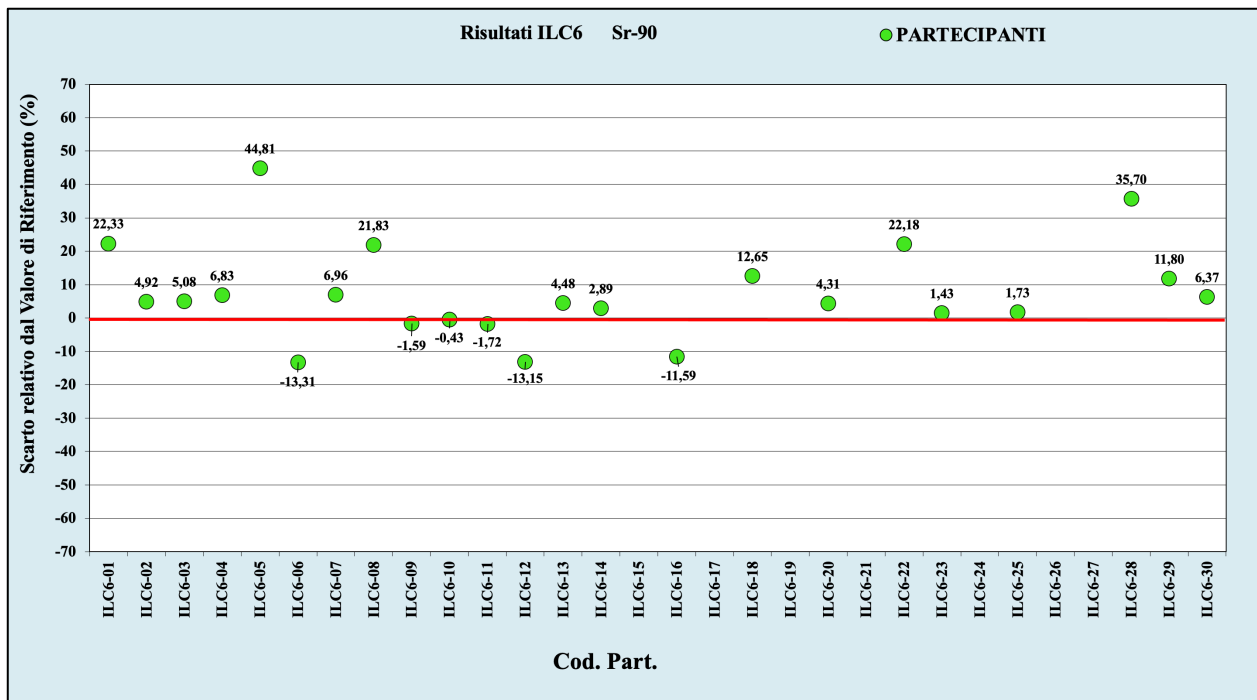
Figura 32 - Scarti relativi tra il valore di Rateo di Emissione Superficiale per ²⁴¹Am fornito dai Partecipanti e quello di riferimento dell'INMRI.



Per quanto riguarda i risultati ottenuti rispetto alla sorgente di ²⁴¹Am:

- 14 Partecipanti ottengono valori di scarto compresi nell'intervallo $\pm 10\%$,
- 1 Partecipante si colloca tra il $+10\%$ e il $+20\%$,
- 8 Partecipanti hanno uno scarto superiore al 20% .

Figura 33 - Scarti relativi tra il valore di Rateo di Emissione Superficiale per ⁹⁰Sr fornito dai Partecipanti e quello di riferimento dell'INMRI.

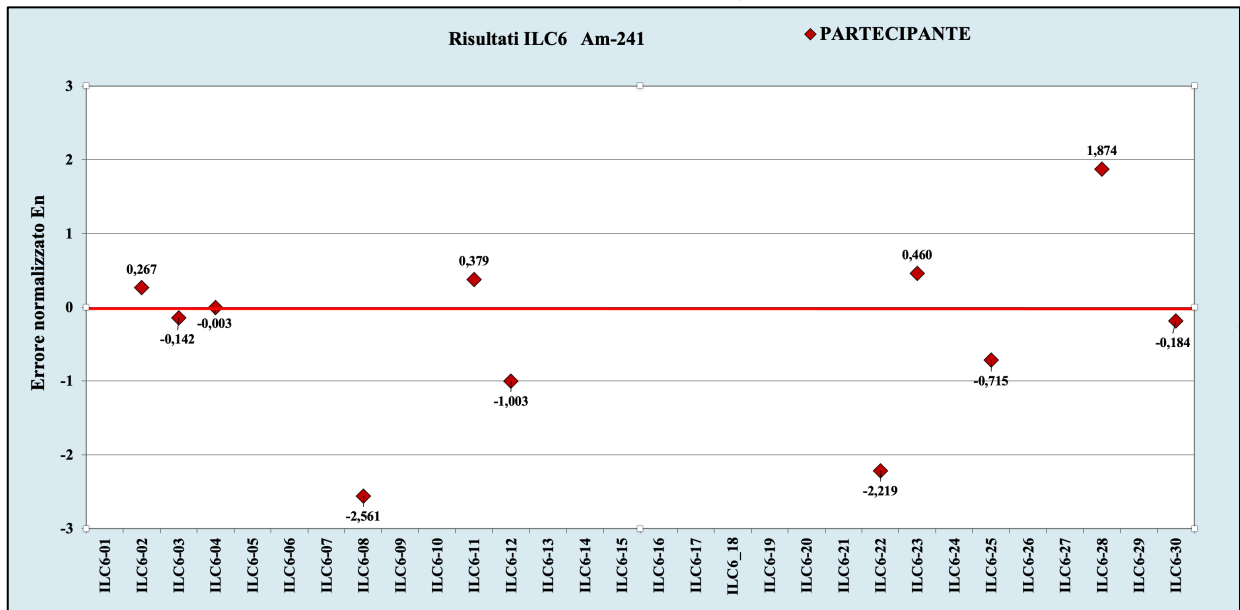


Per quanto riguarda i risultati ottenuti rispetto alla sorgente di ^{90}Sr :

- 13 Partecipanti, ottengono valori di scarto compresi nell'intervallo $\pm 10\%$,
- 3 Partecipanti tra il -10% e il -20% ,
- 2 Partecipanti tra il $+10\%$ e il $+20\%$ e
- 5 Partecipanti superano scarti del 20% .

I valori dell'errore normalizzato (E_n) per ciascun radionuclide sono riportati nelle Figura 34 e Figura 35. 12 Partecipanti hanno inviato i valori relativi all' ^{241}Am e 13 Partecipanti hanno inviato i valori per lo ^{90}Sr .

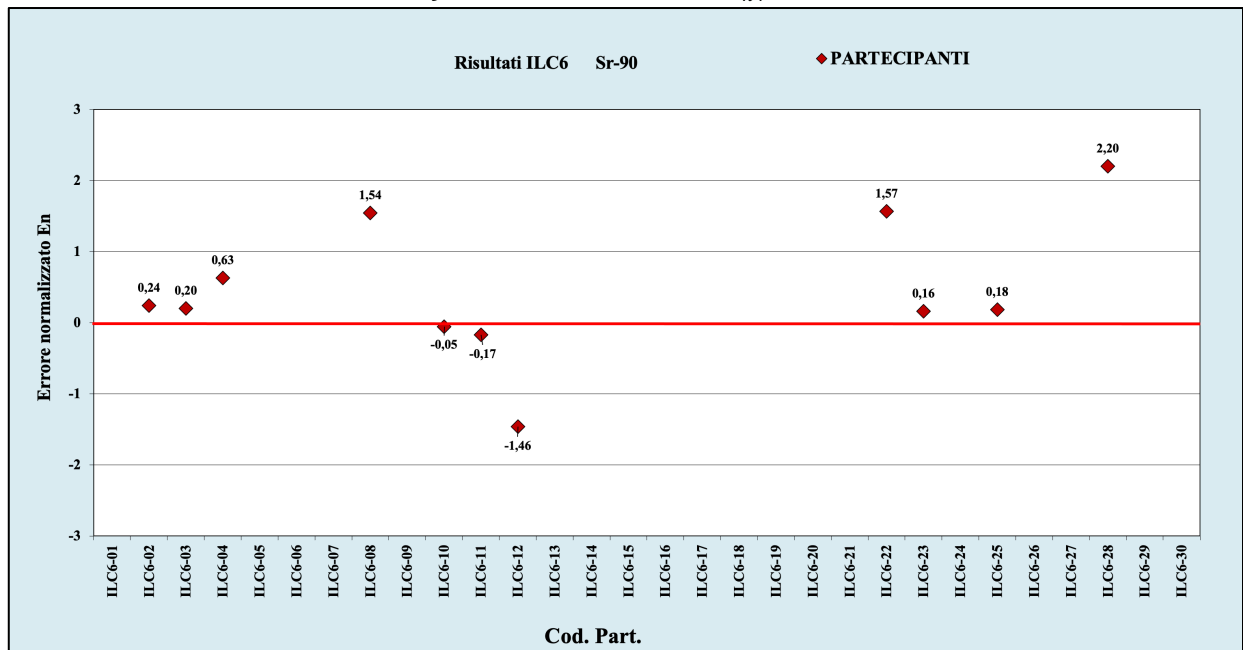
Figura 34 - Errore normalizzato E_n per ^{241}Am .



Nota: Il grafico riporta solo i valori compresi tra $\pm 3,0$

Per quanto riguarda i risultati ottenuti rispetto alla sorgente di ^{241}Am , 8 Partecipanti ottengono valori di E_n tra ± 1 .

Figura 35 - Errore normalizzato E_n per ^{90}Sr .



Nota: Il grafico riporta solo i valori compresi tra $\pm 3,0$

Per quanto riguarda i risultati ottenuti rispetto alla sorgente di ^{90}Sr , 7 Partecipanti ottengono valori di E_n tra ± 1 .

Ad ogni *Partecipante* al termine dell'ILC6 è stato rilasciato un attestato di partecipazione.

6 DISCUSSIONE DEI RISULTATI DI CIASCUN ILC

6.1 ILC 1 Attività di radionuclidi in una soluzione liquida acquosa

I *Partecipanti* che hanno effettivamente aderito al Programma ILC 1 e che hanno ricevuto il campione da misurare sono stati 34. Di questi 34 *Partecipanti* 33 hanno comunicato i risultati entro i tempi previsti. I risultati comunicati sono di seguito riassunti per tipologia di misurando.

Per quanto riguarda lo scarto percentuale si ha:

- *Misurando: ^{241}Am (totale valori comunicati: 31)*
21 *Partecipanti* ottengono valori di scarto compresi nell'intervallo $\pm 10\%$,
5 *Partecipanti* si collocano tra il $+10\%$ e il $+20\%$,
5 *Partecipanti* hanno uno scarto superiore al 20% .
- *Misurando: ^{137}Cs (totale valori comunicati: 33)*
24 *Partecipanti* ottengono valori di scarto compresi nell'intervallo $\pm 10\%$,
4 *Partecipanti* si collocano tra il $+10\%$ e il $+20\%$,
5 *Partecipanti* hanno uno scarto superiore al 20% .
- *Misurando: ^{90}Sr (totale valori comunicati: 14)*
4 *Partecipanti* ottengono valori di scarto compresi nell'intervallo $\pm 10\%$,
4 *Partecipante* si collocano tra il $+10\%$ e il $+20\%$,
6 *Partecipanti* hanno uno scarto superiore al 20% .
- *Misurando: α totale (totale valori comunicati: 14)*
5 *Partecipanti* ottengono valori di scarto compresi nell'intervallo $\pm 10\%$,
3 *Partecipanti* si collocano tra il $+10\%$ e il $+20\%$,
6 *Partecipanti* hanno uno scarto superiore al 20% .
- *Misurando: β totale (totale valori comunicati: 14)*
6 *Partecipanti* ottengono valori di scarto compresi nell'intervallo $\pm 10\%$,
2 *Partecipanti* si colloca tra il $+10\%$ e il $+20\%$,
6 *Partecipanti* hanno uno scarto superiore al 20% .

Per quanto riguarda l'errore normalizzato E_n si ha la seguente situazione:

- *Misurando: ^{241}Am*
23 *Partecipanti* su 31 valori comunicati ottengono valori di E_n tra -1 e $+1$.
- *Misurando: ^{137}Cs*
26 *Partecipanti* su 33 valori comunicati ottengono valori di E_n tra -1 e $+1$.
- *Misurando: ^{90}Sr*
6 *Partecipanti* su 14 valori comunicati ottengono valori di E_n tra -1 e $+1$.
- *Misurando: α totale*
8 *Partecipanti* su 14 valori comunicati ottengono valori di E_n tra -1 e $+1$.
- *Misurando: β totale*
7 *Partecipanti* su 14 valori comunicati ottengono valori di E_n tra -1 e $+1$.

Inoltre, su tutti i 33 *Partecipanti*, 8 hanno individuato la presenza di *Falsi Positivi*. Due di essi hanno rivelato la presenza di radionuclidi con Concentrazione di Attività considerevolmente elevata, non giustificabile dai ratei di conteggio dello spettro del campione. Per 4 laboratori si suggerisce la verifica

di una adeguata sottrazione del bianco. Nel caso di un solo *Partecipante*, l'incertezza riportata era dello stesso ordine di grandezza della Concentrazione di Attività misurata. La mancanza dei corrispondenti limiti MCR, non comunicati dal *Partecipante*, ha reso impossibile approfondire la natura del falso positivo.

Ai laboratori *Partecipanti* che hanno comunicato falsi positivi sono state fornite spiegazioni e/o suggerimenti nelle rispettive Schede Risultati.

6.2 ILC 2 Attività di radiofarmaci

Mentre nel caso in cui il valore di $|E_n|$ sia superiore o pari a 1.0 si consiglia di rivedere le stime di incertezza o di correggere un problema di misura

Con riferimento al ^{18}F si può dire che in base allo stimatore scarto percentuale, tutti i centri (22 centri su 22) hanno ottenuto un risultato soddisfacente con la totalità dei valori registrati inferiori al 10% in valore assoluto. Quando invece si effettua l'analisi dei dati utilizzando l' E_n , si può osservare che alcuni *Partecipanti* (17 centri su 22) ottengono valori elevati (> 1) oppure valori particolarmente bassi (< 0.5). Per i primi, osservando il valore dello scarto percentuale contenuto entro il 10 %, si può ipotizzare che l'incertezza comunicata sia stata sottostimata. Per i secondi, invece, tenuto conto del buon risultato basato sui valori dello scarto percentuale, si può ipotizzare che le incertezze comunicate siano state sovrastimate.

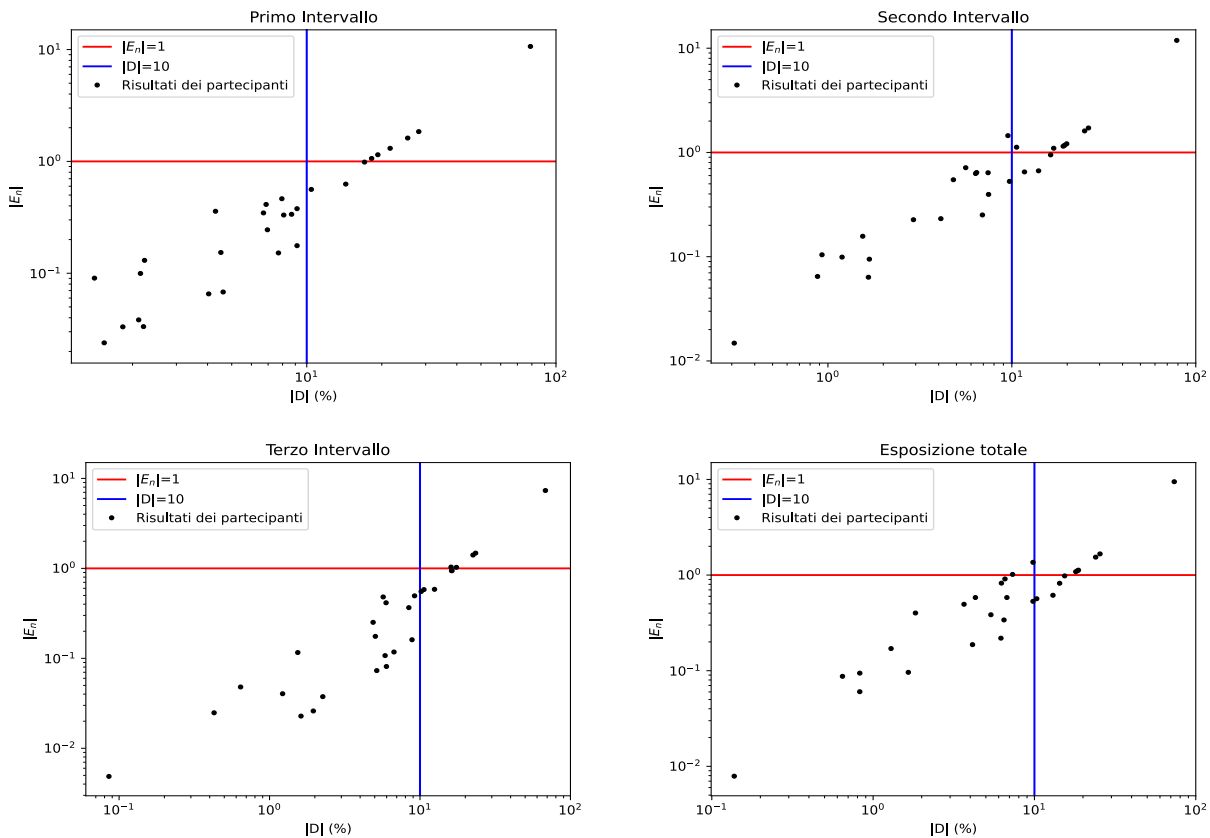
Con riferimento al ^{177}Lu si può dire che tutti i *Partecipanti* (8 centri su 8) hanno comunicato risultati delle loro misure soddisfacenti se analizzati con lo scarto percentuale. Un solo *Partecipante* su otto riporta un risultato insoddisfacente se si utilizza l' E_n , sebbene tale valore si scosti solo marginalmente dal limite di accettabilità (1.09).

Con riferimento al $^{99\text{m}}\text{Tc}$ si può dire che la maggior parte dei *Partecipanti* (22 centri su 24) comunica risultati delle proprie misure in modo soddisfacente, quando queste sono valutate attraverso lo scarto percentuale. Due *Partecipanti*, invece, rispettivamente sovrastimano e sottostimano il valore assegnato, oltre i limiti di tolleranza definiti. Gli stessi due *Partecipanti* avrebbero comunicato stime delle proprie incertezze inadeguate, se si considera che il loro valore di E_n si scosta in modo significativo da 1. Altri due partecipanti non avrebbero superato la prova, quando valutata attraverso E_n , nonostante l'avessero superata rispetto allo stimatore scarto percentuale. Ciò suggerisce che questi due *Partecipanti* abbiano sottostimato le loro incertezze.

6.3 ILC 3 Concentrazione di ^{222}Rn in aria

Avendo valutato le prove usando i due stimatori scarto percentuale ed errore normalizzato è interessante approfondire l'analisi mettendo in relazione i dati presentati nel Paragrafo 0, ottenendo così i grafici mostrati in Figura 36. I punti che cadono nella regione in alto a destra del grafico, circa il 25% (su un totale di 29 strumenti), sono quei monitori che superano entrambi i limiti degli indicatori valutativi e pertanto necessitano di una nuova taratura. I punti che cadono nella regione in alto a sinistra indicano che c'è stata una sottostima dell'incertezza della misura, mentre i punti che cadono nella regione in basso a destra indicano che c'è stata una sovrastima dell'incertezza della misura.

Figura 36 - Valore assoluto della differenza percentuale in funzione del valore assoluto dell'errore normalizzato.



Riguardo i nuovi dispositivi economici di ridotte dimensioni, una parte degli strumenti *Partecipanti* è stata precedentemente tarata da centri accreditati, mentre la restante parte ha usato come certificato di taratura quello emesso dalla casa produttrice. Analizzando i risultati ottenuti per questi nuovi dispositivi economici dalle ridotte dimensioni, si ricava che quelli tarati da centri accreditati hanno superato la prova con esito positivo. Si può concludere che questi nuovi strumenti sono validi, ma necessitano di accurate tarature individuali.

6.4 ILC 4 Misura di dose assorbita in acqua

L'ILC4 ha avuto una grande adesione come evidenziato dal numero di iscrizioni ricevute. Nonostante l'interruzione prematura di questo ILC, già citata nel paragrafo 5.2.4, è stato possibile portare a termine l'analisi dei risultati di 28 *Partecipanti*, mostrando per tutti un esito soddisfacente, rispetto a tutti i campi su cui l'ILC era stato offerto. Le stime delle incertezze di misura appaiono adeguate, come si può evincere dai valori di E_n ben distribuiti entro il limite di accettabilità pari ad 1.

Alcuni *Partecipanti* hanno richiesto di poter svolgere l'ILC anche per diversi acceleratori e TPS e queste richieste sono state accolte.

6.5 ILC 5 Equivalente di dose personale

Di seguito vengono commentati i grafici riportati nel paragrafo di presentazione dei risultati.

Relativamente al misurando 1, ossia gli irraggiamenti al ^{137}Cs , si nota che tutti i 19 *Partecipanti* hanno superato la prova; inoltre c'è un'alta concentrazione di valori di R intorno a 1, indicazione che le letture effettuate dai *Partecipanti* sono molto vicine agli equivalenti di dose effettivamente impartiti ai dosimetri. Se ne deduce che le procedure messe in atto dai *Partecipanti* per il misurando in esame

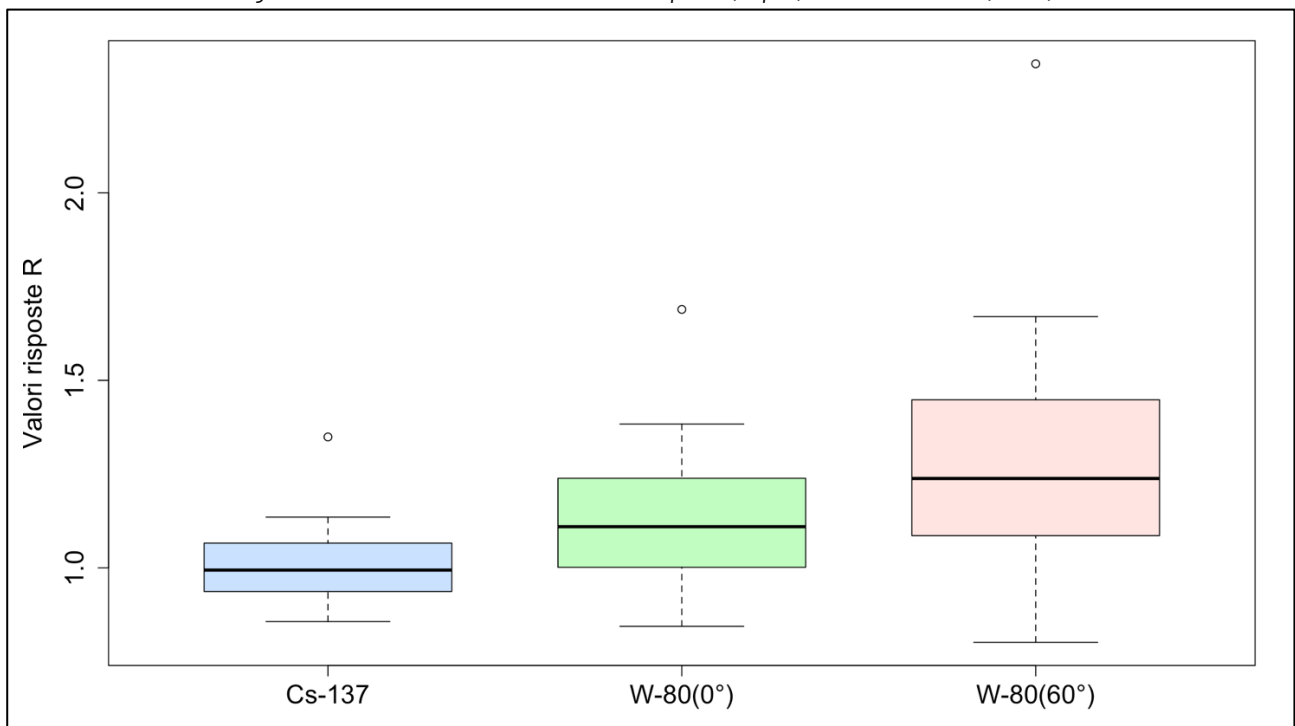
risultano molto efficienti.

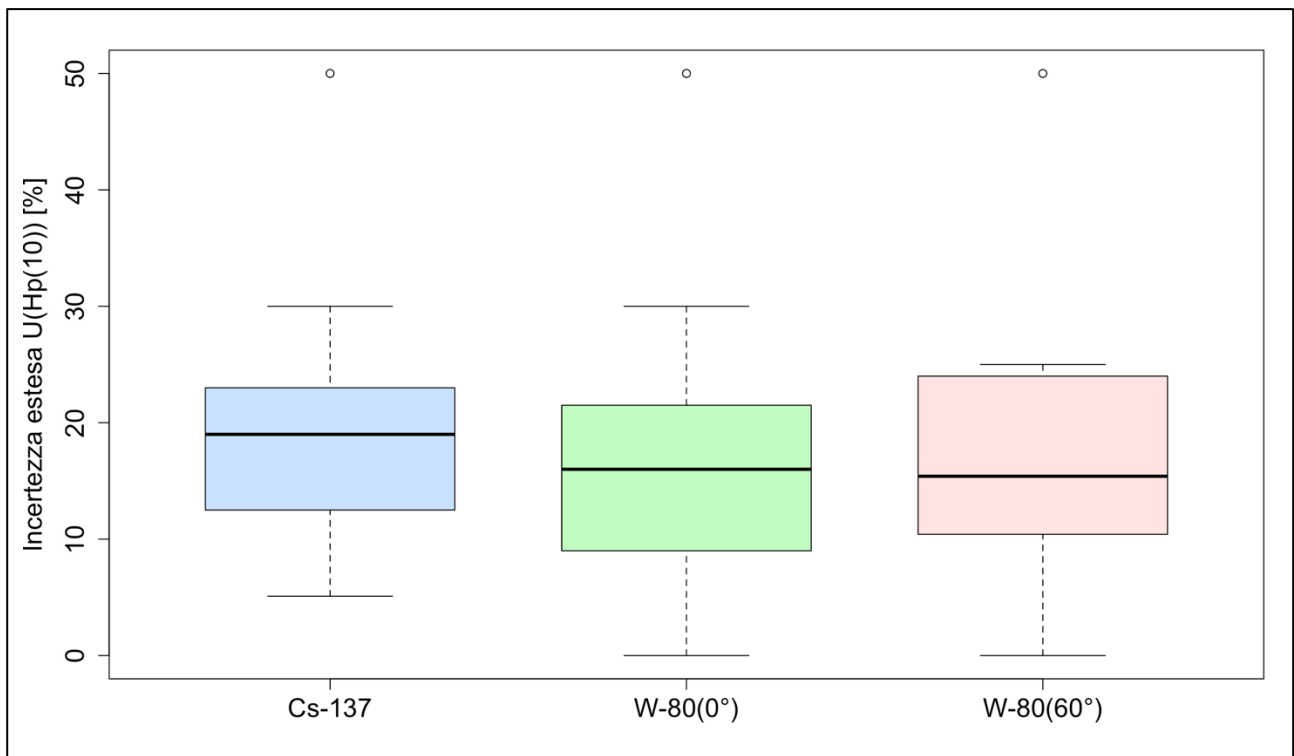
Analizzando poi i grafici relativi agli irraggiamenti ai raggi X, si può osservare che c'è molta più dispersione intorno al valore R pari ad 1 rispetto a quanto appena osservato per il ^{137}Cs : alcune risposte sono molto vicine al limite superiore definito dalle curve a tromba, alcune si posizionano anche oltre tale limite. Si nota una tendenza da parte degli utenti a leggere valori di equivalente di dose maggiori rispetto al valore assegnato (ISO 17043, 2010): la maggior parte dei *Partecipanti* si colloca infatti nella parte alta del grafico, oltre la linea di demarcazione indicata dal valore pari ad 1. Questa evidenza suggerisce che ci sia stata una tendenza, da parte dei centri che hanno partecipato, a sovrastimare il valore assegnato per questi due misurandi.

Si nota inoltre come le risposte ottenute per il misurando 3, ossia l'irraggiamento del dosimetro su fantoccio montato in posizione angolata, siano mediamente più disperse: le letture fornite in questo caso sono più distanti dai valori di equivalente di dose personale effettivamente impartiti, rispetto a quelle fornite per gli altri due misurandi. Basandosi su queste osservazioni, si può ipotizzare che gli irraggiamenti eseguiti ad un angolo diverso da zero pongono ai *Partecipanti* maggiori difficoltà nel determinare i valori del misurando.

Questi risultati possono essere visualizzati considerando una particolare tipologia di grafico, il diagramma "a scatola e baffi", che rappresenta proprio la dispersione dei valori di una variabile rispetto ad un valore centrale. In particolare, qui vengono mostrati i grafici relativi alla distribuzione statistica delle risposte per i tre misurandi e delle incertezze associate alle stesse, comunicate insieme alle letture dai *Partecipanti*.

Figura 37 - Distribuzione statistica delle Risposte (sopra) e delle incertezze (sotto).





Nei grafici mostrati in Figura 37 la “scatola” rappresenta il 50% dei valori, delimitata dal primo e terzo quartile, la linea nera rappresenta la mediana. Le linee verticali che partono dalla scatola sono i “baffi” e rappresentano la dispersione dei valori inferiori al primo quartile e superiori al terzo quartile; tutti i valori al di fuori sono anomali, “outliers”.

Nel grafico delle Risposte è ben visibile la tendenza alla sovrastima del valore assegnato e la maggiore dispersione, come già emerso nei grafici a tromba.

Nel grafico delle incertezze si nota che le mediane delle 3 distribuzioni sono abbastanza allineate, mentre la lunghezza della scatola è maggiore per le incertezze delle misure ai raggi X: ciò indica una maggiore variabilità nei valori di queste ultime.

Si può affermare che i 19 *Partecipanti* dell’ILC 5 hanno svolto un buon lavoro nella lettura dei dosimetri passivi, in quanto la quasi totalità dei risultati ottenuti è racchiusa nei limiti identificati dalla formula citata. Questo è segno di un alto livello di qualità per quanto riguarda i servizi dosimetrici in Italia, almeno per quanto concerne la natura dei misurandi oggetto di questo confronto. Per le misure su fantoccio angolato è auspicabile un miglioramento nella capacità di lettura dei dosimetri.

Inoltre, dall’analisi dei questionari di soddisfazione ricevuti dai *Partecipanti*, è emersa una valutazione in generale positiva dello svolgimento dell’ILC 5. In particolare, i *Partecipanti* si sono detti soddisfatti dei tempi di risposta dei risultati e della capacità e cortesia del personale.

6.6 ILC 6 Contaminazione superficiale

Molti *Partecipanti* allo ILC 6 (9 centri su 23) hanno riportato scarti percentuali superiori al limite massimo del 10% in valore assoluto. Un *Partecipante* ha riportato un valore dello scarto anche superiore al 50%, denotando una capacità di misura che può essere migliorata. Molti *Partecipanti* non comunicano un valore dell’incertezza di misura, e ciò è ritenuto un limite importante. Tra coloro i quali l’hanno comunicata, e grazie alla quale è stato possibile determinare il valore dello stimatore E_n , si può osservare che 3 *Partecipanti* su 11 (^{241}Am) e 4 *Partecipanti* su 11 (^{90}Sr) riportano un valore al di fuori dei limiti di accettabilità.

In particolare, per quanto riguarda i risultati delle misure effettuate sulla sorgente di ^{241}Am , è possibile ipotizzare che i tre Partecipanti il cui risultato è ritenuto non accettabile in base allo E_n abbiano effettuato una sottostima della propria incertezza, dal momento che i valori dello scarto percentuale degli stessi partecipanti è superiore al limite del 10 %. Simili considerazioni possono essere fatte per quanto riguarda i quattro Partecipanti che hanno riportato E_n maggiore di 1 in valore assoluto nelle prove relative alla sorgente piana ed estesa di ^{90}Sr .

7 CONCLUSIONI

Il Programma nazionale per l'affidabilità delle misure di radiazioni ionizzanti basato su Confronti InterLaboratorio (ILC) ha rappresentato, ad oggi, la più estesa campagna nazionale di confronti interlaboratorio mai effettuata nel nostro Paese. Con sei confronti interlaboratorio, ed oltre 150 partecipanti, è stato possibile raggiungere un'estesa comunità di utenti che effettuino misure di radiazioni ionizzanti in tutte le Regioni del nostro Paese ricevendo adesioni da ospedali, enti regionali, aziende sanitarie, università e privati. Due confronti interlaboratorio rappresentano un inedito, nelle misure di radioattività con radionuclidi di interesse medico (ILC 2) e nelle misure di contaminazione superficiale con sorgenti piane ed estese (ILC 6). Anche il confronto proposto nelle misure di concentrazione di Radon in aria (ILC 3), nonostante sia stato effettuato già in Italia in più occasioni, ha posto l'attenzione sulla nuova strumentazione "attiva", ed anche questo è un aspetto inedito.

Complessivamente, i *Partecipanti* hanno mostrato un apprezzabile grado di maturità nella capacità di misurare le grandezze fisiche collegate alle radiazioni ionizzanti che sono state proposte nei sei confronti.

In alcuni casi, i *Partecipanti* non hanno comunicato i valori delle incertezze del proprio sistema di misura, e ciò ha limitato l'estensione dei dati analizzabili con alcuni degli stimatori scelti per valutare la bontà del risultato delle prove.

Gli ILC nel settore Dosimetria (in dosimetria per radioterapia, ILC 4, ed in radioprotezione, ILC 5) hanno raccolto risultati molto soddisfacenti, e ciò è in linea con le attese rispetto ad una tipologia di confronti interlaboratori molto diffusi e frequenti nel nostro Paese. Nel settore radioattività, sia ambientale (ILC 1, 3, 6) sia di interesse medicale (ILC 2) si sono registrati alcuni casi di prove non superate e ciò sembra esser riconducibile ad una incorretta stima del misurando, una incorretta stima dell'incertezze, o di entrambe. Tuttavia, i casi di prove non superate sono stati una minoranza in tutti i confronti, e resta valida l'impressione di una esistente affidabilità, in Italia, nelle misure di radiazioni ionizzanti. È comunque importante notare che in tutte quelle circostanze in cui le prove non siano state superate, si è resa possibile un'analisi critica delle cause, anche con la collaborazione dell'INMRI che ha fornito chiarimenti ulteriori, e questo ha permesso ai Partecipanti di adottare azioni correttive rispetto alle loro procedure di misura.

Il Programma, e la sua rilevanza, sono stati ben recepiti nel Paese, come si evince non solo dalla numerosità dei *Partecipanti*, ma anche dalla relazione su invito al congresso nazionale del 2022 dell'Associazione Italiana di Radioprotezione (AIRP, patrocinante del Programma) ed anche dalla relazione su invito alla Scuola di Radioprotezione dell'Associazione Italiana di Fisica Medica (AIFM, anche questa patrocinante del Programma), nonché dalle numerose altre presentazioni offerte al congresso nazionale AIRP 2021, AIRP 2022 e quello AIFM 2023, oltre che internazionali ad ESTRO 2023 (Vienna) e RAD 2023 (Montenegro).

Nelle sedi in cui il Programma, ed i suoi risultati, sono stati presentati, è stato più volte espresso il desiderio di ripetere una simile iniziativa, sia apprezzandone il valore della sua vastità, sia anche in considerazione della gratuità della partecipazione, resa possibile grazie al finanziamento del Ministero

dello Sviluppo Economico al Programma. Tale finanziamento ha fornito l'opportunità, ai *Partecipanti*, di migliorare le proprie capacità di misura, e ciò non può non essere a beneficio dei cittadini che usufruiscono di tutti i servizi retti dalle strutture in cui operano i *Partecipanti* che hanno aderito al Programma. In considerazione di tutte le opportunità di miglioramento che questo Programma ha potuto procurare, si può sicuramente concludere che il finanziamento ministeriale è stato efficace.

8 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [DLGS, 2020] Decreto Legislativo 31 luglio 2020, n. 101, "Attuazione della direttiva 2013/59/Euratom, che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti, GU Serie Generale n.201 del 12-08-2020 - Suppl. Ordinario n. 29, 2020.
- [EURATOM, 2013] Direttiva 2013/59/EURATOM del Consiglio del 5 dicembre 2013, "Norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti", 2013.
- [GU, 2005] Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Parte Prima, Anno 146°, No. 168, 21 luglio 2005, D. Min. 30 marzo 2005, Approvazione e pubblicazione del I supplemento alla XI edizione della Farmacopea ufficiale della Repubblica italiana.
- [IAEA, 2006] International Atomic Energy Agency, "Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International code of Practice for Dosimetry based on Standards of Absorbed Dose to Water", Technical Report Series No. 398, IAEA, Vienna, 2006.
- [IAEA, 2017] International Atomic Energy Agency, "Dosimetry of Small Static Fields Used in External Beam Radiotherapy", Technical Reports Series No. 483, IAEA, Vienna, 2017.
- [ISO, 1996] International Organization for Standardization, ISO 4037-1:1996, "X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy. Part 1: Radiation characteristics and production methods", 1996.
- [ISO, 2010] International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission, ISO/IEC 17043:2010, "Conformity assessment - General requirements for proficiency testing", Online: <https://www.iso.org/standard/29366.html>.
- [ISO, 2016] International Organization for Standardization, ISO 13528:2016, "Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparison", 2016.
- [ISO, 2016a] International Organization for Standardization, ISO 7503-1:2016, "Measurement of radioactivity – Measurement and evaluation of surface contamination – Part 1: General principles", 2016.
- [ISO, 2016b] International Organization for Standardization, ISO 7503-3:2016, "Measurement of radioactivity – Measurement and evaluation of surface contamination – Part 3: Apparatus calibration", 2016.
- [ISO, 2020] International Organization for Standardization, ISO 8769:2020, "Measurement of radioactivity – Alpha-, beta- and photon emitting radionuclides – Reference measurement standard specifications for the calibration of surface contamination monitors", 2020.
- [McEwen, 2014] McEwen M R, DeWerd L A, Ibbott G S, Followill D S, Rogers D W O, Seltzer S M, Seuntjens J P., "Addendum to the AAPM's TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon beams", Med. Phys. 2014; 41: 041501(20pp).
- [UNI, 2010] UNI, Norma Europea UNI CEI EN ISO/IEC 17043, "Valutazione della conformità - Requisiti generali per prove valutative interlaboratorio", 2010.
- [UNI ISO, 2018] UNI ISO 14146:2018: Protezione dalle radiazioni - Criteri e curve limite di riferimento di prestazione per la verifica periodica di servizi di dosimetria, 2018

- [UNI ISO, 2021-1] UNI EN ISO 4037-1:2021 Radiazioni x e gamma di riferimento per la taratura dei dosimetri e dei rateometri e per la determinazione della loro risposta in funzione dell'energia dei fotoni - Parte 1: Caratteristiche e metodi di produzione della radiazione, 2021.
- [UNI ISO, 2021-3] UNI EN ISO 4037-3:2021 Radiazioni x e gamma di riferimento per la taratura dei dosimetri e dei rateometri e per la determinazione della loro risposta in funzione dell'energia dei fotoni - Parte 3: Taratura dei dosimetri ambientali e individuali e misurazione della loro risposta in funzione dell'energia e dell'angolo d'incidenza, 2021.
- [ISO, 2020a] International Organization for Standardization, ISO 12749-1:2020, Nuclear energy – Vocabulary – Part 1: General terminology, 2020.
- ENEA-INMRI, *Sintesi delle condizioni sperimentali utilizzate presso ENEA-INMRI per dosimetria a basse dosi con radiazione X e gamma, DOC-DOB-24 rev. 5 allegato al Manuale della Qualità*, 2017.
- ISO/IEC, *17043- Conformity assessment - General requirements for proficiency testing*, 2010.
- ISO, *4037- Radiological protection – X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy*, 2019.
- Joint Committee for Guides in Metrology. JCGM 100: *Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM 1995 with minor corrections - Evaluation of measurement data)*. 1-134 (2008).

ENEA
Servizio Promozione e Comunicazione
www.enea.it

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - Centro Ricerche Frascati
maggio 2025