Sorveglianza sulla salute della Popolazione nei pressi del Termovalorizzatore di Torino

Programma SPoTT
Report n° 22

Biomonitoraggio della popolazione residente nell'area limitrofa all'impianto di termovalorizzazione dei rifiuti di Torino

Risultati sui livelli di bioaccumulo di metalli dopo 11 anni dall'avvio dell'impianto

Novembre 2026

Rapporto a cura di

Beatrice Bocca[1]
Beatrice Battistini[1]
Flavia Ruggieri[1]
Cristiana Ivaldi[2]
Martina Gandini[2]
Marco Gilardetti[2]
Paola Pazienza[2]
Elena Farina[3]
Antonella Bena[3]
Cristiana Cauda[4]
Michele Ciminale[4]
Giuseppe Maria Greco[4]
Maura Millesimo[5]
Antonio De Caro[6]

[1] Istituto Superiore di Sanità - U.O. Esposizione Umana a Contaminanti Ambientali - Dipartimento Ambiente e Salute
[2] Struttura Semplice Epidemiologia e Salute Ambientale – Dipartimento Integrazione Servizi Ambiente e Salute - ARPA Piemonte
[3] Servizio Sovrazonale di Epidemiologia - ASL TO3
[4] Struttura Complessa Servizio Igiene e Sanità Pubblica - ASL TO3
[5] Struttura Complessa Laboratorio Unificato Rivoli Pinerolo - ASL TO3
[6] Dipartimento della Prevenzione, Struttura Complessa Igiene e Sanità Pubblica - ASL Città di Torino

Il rapporto è condiviso nella metodologia, nei risultati e nei commenti dal Comitato Tecnico Scientifico del programma SPoTT:

Francesco Forastiere
Fabrizio Minichilli
Roberto Pasetto

Hanno collaborato alle diverse fasi descritte all'interno del presente Report:

ASL TO3- S.C. Servizio Sovrazonale di Epidemiologia

Antonella Bena
Alessandra Casano
Elena Farina
Roberto Gnavi

ASL TO3- Dipartimento di Prevenzione – SS vigilanza

Giuseppe Maria Greco
Cristiana Cauda
Michele Ciminale

ASL TO3- S.C. Laboratorio Unificato Rivoli Pinerolo

Massimo Cena
Lidia Giraudo
Maura Millesimo
Eleonora Urbano

ASL Città di Torino - SSD SISP Epidemiologia, Screening ed Edilizia Urbana

Raffaele De Caro

ARPA Piemonte - Dipartimento Integrazione Servizi Ambiente e Salute – SS Epidemiologia Ambientale

Martina Gandini
Marco Gilardetti
Cristiana Ivaldi
Barbara Lo Russo
Paola Pazienza

Istituto Superiore di Sanità, Dipartimento Ambiente e Salute, Reparto Esposizione Umana a Contaminanti Ambientali

Beatrice Bocca
Beatrice Battistini
Flavia Ruggieri

Centro Polispecialistico privato per conto dell'ASL Città di Torino, Torino

Stefania Aguì

Stefania Castelletto
Alessandro Fazio
Lucia Gallo
Flavio Gissi
Valentina Guarino
Tiberiu Strugariu
Rosanna Valinotto

ASL TO3 – Poliambulatorio allestito appositamente per il progetto Spott2, Orbassano, *Laboratorio analisi dell'Ospedale di Rivoli* e *Laboratorio analisi dell'Ospedale Mauriziano*

Silvia Candela
Toni Cappelletti
Cristiana Cauda
Michele Ciminale
Rosanna D'Addetta
Simona De Pascalis
Giuseppe Maria Greco
Daniela Ibba
Maria Longo
Alessia Martinelli
Maura Millesimo
Anna Maddalena Robasto

Le spirometrie sono state effettuate da:

ASL Città di Torino - Centro Polispecialistico privato settore medicina del lavoro

Gianluigi Ghione

ASL TO3 – Ambulatorio di Orbassano

Giuseppe Maria Greco
Domenico Osella
Leandro Sgro

Si ringraziano i responsabili e il personale delle strutture che hanno collaborato alla realizzazione del programma:
Direzioni Generali, Sanitarie e Amministrative delle ASL Città di Torino e ASL TO3
Dipartimento Integrato della Prevenzione dell'ASL Città di Torino e il Dipartimento della Prevenzione dell'ASL TO3
Struttura Complessa Servizio Sovrazonale di Epidemiologia - ASL TO3
Laboratorio Analisi *del Centro Polispecialistico privato* di Torino
Ambulatorio dell'ASL TO3, Orbassano e il Laboratorio Analisi dell'Ospedale di Rivoli.

Indice

Sintesi del ventiduesimo rapporto di studio 5

1. Il contesto 9

1.1 L'impianto 9
1.2 Il programma SPoTT 10
1.3 Obiettivo della fase T3 11

2. Materiali e metodi 13

2.1 Disegno dello studio 13
2.2 Campionamento 14
2.3 Metalli in studio 17
2.4 Metodi di analisi chimica 18
2.5 Metodi statistici 19

3. Popolazione residente 21

3.1 Caratteristiche della popolazione al T3 21
3.1.1 Residenza 21
3.1.2 Sesso 22
3.1.3 Età 22
3.2 Concentrazione dei metalli dopo 11 anni (fase T3) 23
3.2.1 Distribuzione per residenza 25
3.2.2 Distribuzione per sesso 26
3.2.3 Distribuzione per età 27
3.2.4 Analisi dei valori limite (VL) 28
3.2.5 Confronto con i Valori di Riferimento (VR) 29
3.3 Confronto con valori guida basati sulla salute (HBM e BE) 31
3.4 Confronto tra i risultati ottenuti al T0, T1, T2 e T3 31
3.5 Confronto per abitudini di vita 35
3.5.1 Abitudine al fumo 35
3.5.2 Esposizione al traffico veicolare 36
3.5.3 Abitudine alimentare 39

4. Allevatori 43

4.1 Concentrazione dei metalli dopo 11 anni (al T3) 43
4.1.1 Confronto con i valori dei residenti maschi 44
4.2 Confronto con i risultati ottenuti al T0, T1, T2 e T3 45

5. Valutazione dei contaminanti ambientali 47

6. Discussione 51

7. Conclusioni 57

8. Bibliografia 58

Sintesi del ventiduesimo rapporto di studio

Nel 2013 ha avuto avvio il "Piano di sorveglianza sanitaria e di conoscenza della variazione dello stato di salute della popolazione residente relativo all'impianto di termovalorizzazione dei rifiuti della Provincia di Torino (Programma SPoTT)". Lo studio di biomonitoraggio condotto sulla popolazione generale ha come obiettivo la valutazione di eventuali variazioni di esposizione a sostanze tossiche (inclusi i metalli) nella popolazione residente in prossimità del termovalorizzatore dopo la sua entrata in funzione.

Nel 2013, prima dell'avvio dell'impianto, è stato reclutato un campione casuale di 394 residenti nell'area metropolitana di Torino, di età compresa tra i 35 e i 69 anni. Il campione comprendeva 198 persone residenti nell'area previsionale di maggiore ricaduta delle emissioni dell'impianto, definite "esposte", e 196 persone residenti in un'area esterna a quella di ricaduta, definite "non esposte" o gruppo di confronto. Sono stati inoltre inclusi nel programma 14 allevatori residenti e operanti in aziende prossime al termovalorizzatore. I partecipanti sono stati inclusi in un programma di biomonitoraggio umano condotto prima dell'avvio dell'impianto (2013, T0), dopo un anno di attività (2014, T1) e dopo tre anni di esercizio (2016, T2). I risultati delle precedenti campagne di biomonitoraggio umano sono stati descritti nei rapporti pubblicati nell'ambito del Programma SPoTT.

Il presente rapporto riporta i risultati della quarta campagna di biomonitoraggio umano, condotta nel 2024, undici anni dopo l'avvio dell'impianto (T3). Lo studio ha previsto la determinazione delle concentrazioni di 18 metalli nelle urine e del piombo nel sangue. I risultati ottenuti sono stati analizzati in funzione dell'area di residenza, del sesso e dell'età dei partecipanti e confrontati con quelli rilevati nelle precedenti campagne, nonché con i valori di riferimento disponibili per la popolazione generale e, ove presenti, con i valori guida sanitari.

Al T3 hanno partecipato 198 residenti, corrispondenti al 50,2% del campione iniziale, di cui 98 appartenenti all'area di maggiore ricaduta delle emissioni e 100 all'area di controllo. Hanno inoltre preso parte allo studio 9 allevatori.

Il confronto tra le due aree evidenzia concentrazioni significativamente più elevate di berillio nei residenti dell'area di maggiore ricaduta, mentre iridio, manganese, rodio e vanadio presentano valori più elevati nell'area di controllo. Per tutti gli altri metalli analizzati non emergono differenze statisticamente significative tra le aree. Nel complesso, il quadro osservato non evidenzia un gradiente territoriale coerente e univoco indicativo di una

maggiore esposizione ai metalli nell'area interessata dalle ricadute delle emissioni dell'impianto.

L'analisi longitudinale mostra che, per la maggior parte dei metalli, le concentrazioni rilevate nel 2024 (T3) risultano inferiori a quelle misurate prima dell'avvio del termovalorizzatore (T0). Tale andamento interessa sia i residenti dell'area di maggiore ricaduta sia quelli dell'area di controllo e non supporta l'ipotesi di un incremento temporale dell'esposizione associato all'entrata in esercizio dell'impianto.

Il platino rappresenta la principale eccezione a questo andamento, mostrando un incremento progressivo nel corso dell'intero periodo di osservazione. L'aumento interessa entrambi i gruppi di residenti ed è osservabile anche tra gli allevatori. In ogni caso, al T3 le concentrazioni di platino non differiscono significativamente tra le due aree di residenza, e pertanto l'incremento della concentrazione del platino non suggerisce un'associazione specifica con l'area di maggiore ricaduta del termovalorizzatore.

Il confronto con i valori di riferimento nazionali e internazionali mostra che i livelli di esposizione ai metalli nella popolazione SPoTT risultano generalmente sovrapponibili a quelli descritti nella popolazione generale non professionalmente esposta. Analogamente, il confronto con i valori guida sanitari disponibili delinea un quadro complessivamente rassicurante, senza evidenza di potenziali criticità sanitarie diffuse. Fanno eccezione alcuni casi isolati caratterizzati da concentrazioni urinarie di cadmio superiori ai valori guida sanitari, indicando l'opportunità di approfondimenti individuali finalizzati all'identificazione delle possibili fonti di esposizione.

Al T3, un numero limitato di residenti presenta concentrazioni superiori ai valori limite (VL) definiti nell'ambito del Programma SPoTT per arsenico, cadmio, platino e piombo. Tali VL non rappresentano valori limite tossicologici, diagnostici o basati sulla salute, ma corrispondono ai percentili più elevati della distribuzione delle concentrazioni osservate al T0. Esse sono state adottate come strumento per identificare i soggetti con livelli di esposizione relativamente più elevati rispetto alla distribuzione di riferimento prima dell'entrata in funzione del termovalorizzatore.

Nel complesso, a undici anni dall'entrata in funzione del termovalorizzatore, i risultati del biomonitoraggio umano non evidenziano un incremento persistente, diffuso e coerente dell'esposizione ai metalli nella popolazione residente nell'area di maggiore ricaduta delle emissioni. Le concentrazioni rilevate risultano infatti generalmente comparabili tra l'area di maggiore ricaduta e l'area di controllo e, per la maggior parte dei metalli analizzati, inferiori a quelle osservate nella fase precedente all'avvio dell'impianto. Nel loro insieme, questi risultati

non supportano l'ipotesi di un aumento dell'esposizione ai metalli attribuibile all'esercizio del termovalorizzatore.

Introduzione

ll presente rapporto costituisce il ventiduesimo prodotto del Programma SPoTT, avviato nel 2013 con l'obiettivo di sorvegliare lo stato di salute dei residenti e dei lavoratori coinvolti nelle attività del termovalorizzatore di Torino. Il programma è finalizzato al monitoraggio dell'esposizione a contaminanti ambientali e all'individuazione di eventuali effetti sulla salute, fornendo al contempo elementi conoscitivi utili alle attività di prevenzione e tutela della salute pubblica.

Il presente rapporto illustra i risultati della quarta campagna di biomonitoraggio umano, effettuata nel 2024 a undici anni dall'entrata in funzione del termovalorizzatore (T3), relativi alle concentrazioni dei metalli misurate nei residenti partecipanti allo studio. I risultati sono confrontati con quelli rilevati nelle precedenti campagne condotte prima dell'avvio dell'impianto (T0), dopo un anno (T1) e dopo tre anni di attività (T2).

Dopo una breve descrizione delle sostanze investigate e dei metodi analitici e statistici utilizzati (capitoli 1 e 2), i capitoli 3 e 4 presentano e discutono i risultati relativi alle concentrazioni dei metalli misurate nei residenti e negli allevatori coinvolti nello studio.

La redazione del rapporto è stata curata da un gruppo di autori, mentre nelle pagine introduttive è riportato l'elenco completo dei professionisti che hanno contribuito alla realizzazione delle diverse attività del Programma. A tutti loro va il riconoscimento per l'impegno, la competenza e la professionalità con cui hanno partecipato alla progettazione e all'attuazione delle varie fasi dello studio.

Tutti i materiali prodotti dal Programma SPoTT, condivisi e discussi nell'ambito del Comitato Tecnico Scientifico per quanto riguarda metodologia, procedure e risultati, sono disponibili sul sito web del Programma (Home - SPoTT). Nello stesso sito sono consultabili anche tutti i rapporti pubblicati nelle precedenti fasi del progetto.

Considerata la rilevanza e la complessità dei temi affrontati, il Programma SPoTT si è dotato fin dall'inizio di uno specifico piano di comunicazione, del quale il presente rapporto costituisce uno degli strumenti di informazione e restituzione dei risultati. Eventuali richieste di chiarimento o approfondimento possono essere inviate all'indirizzo e-mail: coordinamento.spott@arpa.piemonte.it.

1. Il contesto

1.1 L'impianto

Costruito tra il 2010 e il 2013 in località Gerbido, il termovalorizzatore di Torino è un impianto che incenerisce rifiuti urbani a valle della raccolta differenziata e rifiuti speciali assimilabili agli urbani, trasformando il calore prodotto dalla combustione in energia elettrica e termica. L'impianto è entrato formalmente in attività a pieno regime il 1° maggio 2014, dopo una fase di test e collaudo prestazionale durata circa un anno.

In data 21/12/2006, con Determinazione del Dirigente del Servizio Gestione Rifiuti e Bonifiche n. 309- 557341, è stata rilasciata, ai sensi dell'art. 5 del decreto legislativo 18 febbraio 2005, n. 59, l'autorizzazione integrata ambientale per l'impianto di incenerimento rifiuti di TRM S.p.A. situato in via Gorini 50, a Torino. Successivamente, in data 6/2/2012, con provvedimento n. 27-3956, l'Ente scrivente ha rinnovato ai sensi dell'art. 29-octies del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152 "Norme in materia ambientale", l'autorizzazione integrata ambientale rilasciata per l'impianto in oggetto. Tale provvedimento è stato successivamente aggiornato a seguito delle proposte di modifica presentate da TRM S.p.A.

Con determinazione dirigenziale n. 135-22762 del 16/7/2015 l'autorizzazione è stata revisionata ai sensi dell'art. 35 del decreto-legge 12 settembre 2014, n. 133, convertito nella legge 11 novembre 2014, n. 164, al fine di autorizzare l'impianto a saturazione del carico termico e di attribuire la qualifica di impianto di recupero energetico R1. Il provvedimento di rinnovo succitato è stato rilasciato all'impianto in base alle disposizioni previste dal decreto legislativo 11 maggio 2005, n. 133, recante "Attuazione della direttiva.2000/76/CE in materia di incenerimento dei rifiuti". Tale decreto è stato abrogato a decorrere dal primo gennaio 2016 dal comma 2 dell'art. 34 del decreto legislativo 4 marzo 2014, n. 46 che ha recepito la direttiva 2010/75/UE relativa alle emissioni industriali e che ha inserito nel corpo del D. Lgs. 152/2006 la disciplina sugli inceneritori, apportando numerose novità. In data 28/11/2018, con provvedimento n. 353-28635 l'Ente scrivente ha riesaminato, con valenza di rinnovo, ai sensi dell'art. 29 octies del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152 "Norme in materia ambientale", l'autorizzazione integrata ambientale rilasciata per l'impianto in oggetto. Contestualmente ha autorizzato alcune modifiche richieste da TRM S.p.A.

Infine, in data 04/12/2023 la Città Metropolitana di Torino, con provvedimento n. 7973 ha emesso un ulteriore PROVVEDIMENTO DI RIESAME CON VALENZA DI RINNOVO

DELL'AUTORIZZAZIONE INTEGRATA AMBIENTALE N. 353-28635 DEL 28/11/2018, dovuto a seguito dell'adozione di nuove conclusioni sulle Bat applicabili all'installazione, dopo la decisione di esecuzione (UE) n. 2019/2010 della Commissione Europea. Tutte le migliorie introdotte si possono trovare alla pagina 6 dell'autorizzazione.

L'impianto attualmente in uso si compone di un forno a griglia mobile a valle di tre linee gemelle ed indipendenti di conferimento rifiuti, con le uniche sezioni comuni relative allo stoccaggio/alimentazione ed alla conversione energetica (turbina e generatore). Esso dispone, inoltre, di un sistema di monitoraggio indipendente delle emissioni, costantemente sorvegliato da ARPA Piemonte in remoto. I report sono consultabili sul sito I dati del termovalorizzatore del Gerbido | Arpa Piemonte.

1.2 Il programma SPoTT

SPoTT (acronimo per *Sorveglianza sulla salute della Popolazione nei pressi del Termovalorizzatore di Torino*) è un sistema di sorveglianza con l'obiettivo generale di valutare potenziali effetti avversi sulla salute dell'inquinamento ambientale nelle aree circostanti il termovalorizzatore di Torino. Questo progetto di sorveglianza è attuato dalla Asl Città di Torino e Asl TO3 in collaborazione con Arpa Piemonte, Istituto Superiore di Sanità (ISS), SEPI (S.C. Servizio di Epidemiologia - ASL TO 3) e Istituto Zooprofilattico (IZS), su mandato specifico della Città Metropolitana. L'organismo tecnico che regola le attività di SPoTT è il Gruppo di Lavoro il cui coordinamento è in capo alla dott.ssa Cristiana Ivaldi della struttura Epidemiologia Ambientale di Arpa Piemonte.

Un Comitato tecnico scientifico (CTS) ha funzione sia di garante delle metodologie e della pianificazione delle varie linee progettuali, sia di validazione dei risultati.

Il programma è organizzato in 10 linee progettuali (Bena et al 2016) che riguardano la popolazione residente e i lavoratori dell'impianto di incenerimento. Ognuna di esse è affidata, per competenza, a gruppi di specialisti appartenenti ai diversi Enti che compongono il Gruppo di Lavoro. Le linee di attività sono:

- monitoraggio epidemiologico degli effetti a breve termine sulla salute della popolazione residente nell'area di ricaduta delle emissioni dell'impianto (ARPA Piemonte);
- sorveglianza epidemiologica degli effetti a lungo termine sulla salute della popolazione residente nell'area di ricaduta delle emissioni dell'impianto (ARPA Piemonte);
- monitoraggio biologico mediante misura di biomarcatori di esposizione (tema del presente rapporto) (ASL Città di Torino, ASLTO3, ISS);

- monitoraggio della salute dei lavoratori addetti all'impianto di termovalorizzazione del Gerbido (SEPI);
- monitoraggio di matrici alimentari (IZS);
- studio modellistico di dispersione degli inquinanti in atmosfera dell'inceneritore di Torino (ARPA Piemonte);
- ampliamento monitoraggio deposizioni mercurio (ARPA Piemonte);
- costituzione e gestione deposito campioni e data base (ASL TO3 - SEPI)
- coordinamento (ARPA Piemonte);
- comunicazione e divulgazione scientifica (SEPI).

Conformemente a quanto richiesto dalla normativa vigente in tema di studi epidemiologici, al fine di tutelare i diritti, la sicurezza e il benessere delle persone coinvolte e di fornire pubblica garanzia di tale tutela, SPoTT è stato valutato e approvato prima dell'avvio dal Comitato Etico dell'AOU San Luigi Gonzaga di Orbassano. Le successive modifiche sono state approvate dal Comitato Etico Territoriale interaziendale dell'AOU Città della Salute e della Scienza di Torino.

1.3 Obiettivo della fase T3

Lo studio di biomonitoraggio umano condotto sulla popolazione generale ha l'obiettivo di valutare l'eventuale presenza di esposizioni associabili alle emissioni del termovalorizzatore di Torino. A tale scopo sono stati misurati:

- metalli nelle urine e piombo nel sangue;
- policlorobifenili (PCB) totali, diossino-simili (DL-PCB) e non diossino-simili (NDL-PCB), nonché diossine (PCDD) e furani (PCDF) nel sangue;
- metaboliti idrossilati degli idrocarburi policiclici aromatici (IPA) nelle urine.

Le determinazioni sono state effettuate in un campione di residenti rappresentativo della popolazione dell'area metropolitana torinese e i risultati sono stati confrontati in funzione dell'area di residenza (area di maggiore ricaduta delle emissioni e area di controllo) e del periodo di osservazione: prima dell'entrata in funzione del termovalorizzatore (T0), dopo un anno di attività (T1) e dopo tre anni di attività (T2). La fase T3 rappresenta un ulteriore momento di valutazione dell'esposizione della popolazione e dello stato di salute dei partecipanti, a undici anni dall'avvio dell'impianto. Essa prevede la determinazione degli stessi parametri biologici considerati nelle precedenti campagne, consentendo una valutazione dell'evoluzione temporale dei livelli misurati. Originariamente programmata per il

2020, la campagna è stata rinviata a causa dell'emergenza pandemica da COVID-19, che ha comportato per circa due anni il prioritario coinvolgimento dei Dipartimenti di Prevenzione delle due ASL partecipanti nelle attività di gestione dell'emergenza sanitaria. Nel presente rapporto sono illustrati i risultati relativi alle concentrazioni dei metalli nelle urine e del piombo nel sangue rilevate a undici anni dall'entrata in funzione dell'impianto, nonché il confronto con i dati raccolti nelle precedenti campagne di biomonitoraggio. L'obiettivo specifico del Report 23 è valutare l'andamento nel tempo delle concentrazioni dei metalli e verificare l'eventuale presenza di differenze tra l'area di maggiore ricaduta delle emissioni e l'area di controllo. I risultati relativi ai PCB, alle diossine, ai furani, agli IPA e agli altri aspetti riguardanti lo stato di salute della popolazione sono presentati in altri rapporti del Programma SpoTT, tutti reperibili sul sito del programma.

2. Materiali e metodi

2.1 Disegno dello studio

Il disegno originario dello studio è di tipo longitudinale con confronti sia temporali sia geografici. Esso prevede il follow-up di un campione di 394 soggetti reclutati al T0 e valutati in corrispondenza di quattro momenti di osservazione: prima dell'entrata in funzione del termovalorizzatore (T0, 2013), dopo un anno di attività (T1, 2014), dopo tre anni di attività (T2, 2016) e, successivamente, dopo undici anni di attività (T3, 2024). Parallelamente, i risultati vengono confrontati tra due aree di residenza: l'area di maggiore ricaduta delle emissioni, definita sulla base delle stime previsionali delle deposizioni di metalli, e un'area di controllo.

In seguito a un approfondito confronto con il Comitato Tecnico Scientifico (CTS), è stato deciso di mantenere invariato il disegno dello studio anche nella fase T3. La campagna del 2024 è stata pertanto condotta sugli stessi soggetti reclutati nelle precedenti fasi, senza integrare il campione con nuovi partecipanti. Questa scelta metodologica consente di massimizzare la comparabilità dei risultati nel tempo e di valutare l'evoluzione delle concentrazioni dei contaminanti negli stessi individui lungo l'intero periodo di osservazione.

Nel suo complesso, lo studio costituisce una coorte di popolazione seguita longitudinalmente mediante misure ripetute dei parametri biologici di interesse, permettendo sia confronti temporali tra le diverse campagne sia confronti geografici tra le aree di residenza.

La coorte è stata suddivisa in due gruppi: residenti nell'area di maggiore ricaduta delle emissioni del termovalorizzatore (gruppo esposto, appartenente al territorio dell'ASL TO3) e residenti nell'area di controllo (gruppo non esposto, appartenente al territorio dell'ASL Città di Torino). Le aree individuate sulla base delle simulazioni previsionali effettuate prima dell'avvio dell'impianto sono state successivamente verificate e confrontate con i modelli di ricaduta elaborati negli anni successivi all'entrata in esercizio del termovalorizzatore.

Lo schema del disegno di studio utilizzato è riportato nella Figura 2.1.

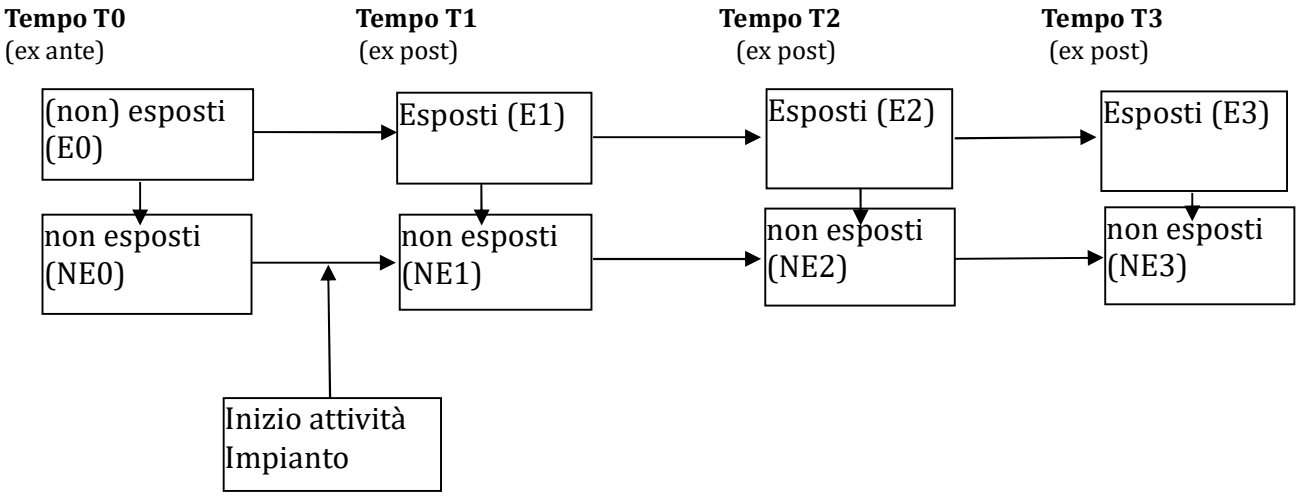
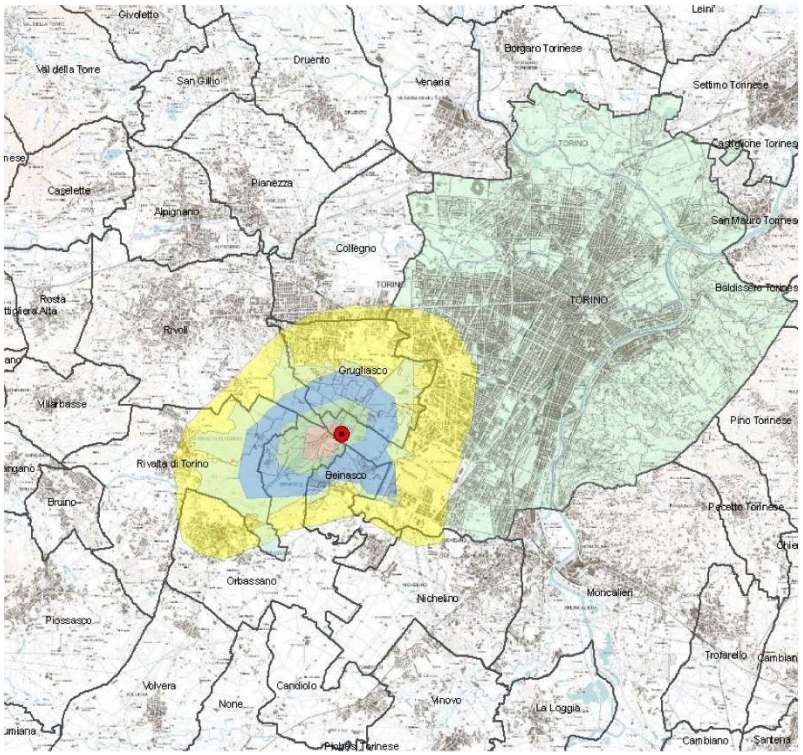


Fig. 2.1. Disegno dello studio per periodo di calendario ed esposizione

Al tempo T3, analogamente a quanto previsto nelle precedenti campagne, ciascun partecipante è stato sottoposto alla compilazione di un questionario relativo alle abitudini di vita, alimentari e comportamentali, all'esecuzione di misure antropometriche e di prove di funzionalità respiratoria, nonché al prelievo di campioni biologici per le analisi di laboratorio.

2.2 Campionamento

I soggetti di entrambi i gruppi sono stati campionati in modo casuale tra la popolazione residente nelle due aree di esposizione (Fig. 2.2). Si rimanda al protocollo dello studio campionario per la descrizione dettagliata del metodo utilizzato (https://www.spott.dors.it/wp-content/uploads/2025/06/all-4_protocollo-SPoTT-T3.DEF_.pdf).



Legenda (totale annuo previsionale delle deposizioni di metalli pesanti totali in mg/m^2/anno):

Area di colore bianco	( )	0,000-0,007 mg/m^2/anno
Area di colore verde chiaro	( )	0,000-0,007 mg/m^2/anno
Area di colore giallo:	( )	0,007-0,014 mg/m^2/anno
Area di colore blu:	( )	0,014-0,028 mg/m^2/anno
Area di colore verde scuro:	( )	0,028-0,055 mg/m^2/anno
Area di colore rosa :	( )	0,055-0,110 mg/m^2/anno

Fig. 2.2. Area previsionale di ricaduta delle emissioni utilizzata per la definizione dell'esposizione

Per lo studio di biomonitoraggio umano, i residenti sono stati classificati come esposti o non esposti sulla base delle stime previsionali delle deposizioni al suolo di metalli attribuibili alle emissioni del termovalorizzatore. Sono stati considerati esposti i residenti nelle aree caratterizzate da valori di deposizione superiori a 0,014 mg/m^2/anno, mentre sono stati classificati come non esposti i residenti nelle aree con valori inferiori a 0,007 mg/m^2/anno.
Tra queste due classi è stata definita un'area cuscinetto, corrispondente a valori compresi tra 0,007 e 0,014 mg/m^2/anno, nella quale l'incertezza delle stime previsionali era considerata maggiore. I residenti di tale area non sono stati inclusi nel campione in studio.
Il gruppo degli esposti è stato selezionato mediante campionamento casuale dalle anagrafi dei residenti dei comuni di Beinasco, Rivalta di Torino, Orbassano e Grugliasco (ASL TO3), mentre il gruppo non esposto è stato estratto tra i residenti della Circoscrizione 8 del Comune di Torino (Nizza Millefonti, Lingotto e Filadelfia; ASL Città di Torino). Al momento del

reclutamento iniziale (T0), in entrambi i gruppi sono stati inclusi esclusivamente soggetti residenti nell'area di appartenenza da almeno cinque anni.

Oltre ai residenti, il Programma SPoTT ha coinvolto un gruppo di allevatori operanti nell'area circostante il termovalorizzatore. Tale scelta deriva dal fatto che alcune delle sostanze investigate, in particolare quelle associate ai processi di combustione, sono persistenti, tendono ad accumularsi nella catena alimentare e possono raggiungere concentrazioni più elevate nei tessuti animali e umani. Gli allevatori, per il possibile consumo abituale di prodotti provenienti dalle proprie aziende, rappresentano pertanto un gruppo di interesse specifico ai fini della valutazione dell'esposizione.

Sono stati inclusi nel programma gli allevatori titolari di aziende situate entro un raggio di 5 km dall'impianto e residenti nei comuni di Beinasco, Grugliasco, Orbassano, Rivalta di Torino e Rivoli. Sono stati esclusi gli allevamenti di suini, equini, conigli e asini, nonché l'azienda della Facoltà di Agraria e Medicina Veterinaria dell'Università di Torino, in considerazione delle differenti modalità di utilizzo e consumo dei prodotti. Nel corso del tempo il numero di allevatori partecipanti si è progressivamente ridotto; al T3 le principali cause di mancata partecipazione sono state la cessazione dell'attività, l'età avanzata o l'irreperibilità dei soggetti originariamente reclutati.

La classificazione della coorte in area di maggiore ricaduta e area di controllo è stata effettuata utilizzando le mappe previsionali delle deposizioni al suolo, considerate particolarmente informative per la valutazione dell'esposizione della popolazione residente. Nel corso degli anni tali mappe sono state aggiornate sulla base dei dati emissivi effettivamente misurati presso l'impianto.

La Figura 2.3 riporta il confronto tra la mappa previsionale utilizzata per la definizione delle aree di studio e la mappa di ricaduta elaborata a partire dalle emissioni registrate nel 2022. Per una descrizione dettagliata dei modelli di ricaduta e dei relativi risultati si rimanda al Report 19 del Programma SPoTT, con particolare riferimento alla mappa A107 dell'allegato, relativa alle deposizioni totali medie annue. Le stime più recenti indicano deposizioni giornaliere di metalli inferiori a 0,2 $\mu g/m^2$/giorno.

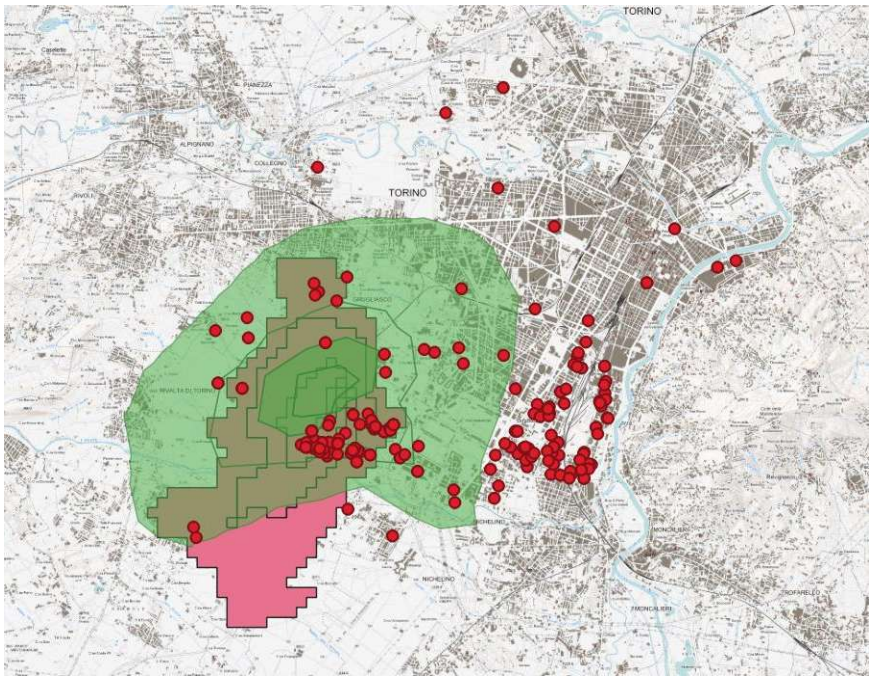


Fig. 2.3. Area di ricaduta delle emissioni calcolata da simulazioni con modello SPRAY nel 2022 (in rosa) confrontata con l'area di ricaduta previsionale (in verde). I pallini rossi rappresentano gli indirizzi di residenza dei soggetti campionati al T3

Come evidenziato dalla Figura 2.3, una quota rilevante dei soggetti inclusi nello studio ricade in un'area classificata in modo concordante sia dalla mappa previsionale originaria sia dalle successive mappe di ricaduta elaborate sulla base delle emissioni effettivamente rilevate. Al fine di migliorare l'accuratezza della classificazione dell'esposizione, nelle analisi presentate in questo rapporto i partecipanti sono stati attribuiti ai gruppi di esposizione utilizzando le più recenti mappe di ricaduta.

Va tuttavia ricordato che il biomonitoraggio al T0 è stato effettuato prima dell'entrata in esercizio del termovalorizzatore e, pertanto, in assenza di dati emissivi e di ricaduta derivati dal funzionamento dell'impianto. Per garantire la confrontabilità delle analisi longitudinali e valutare in modo più robusto l'evoluzione temporale delle concentrazioni misurate, la classificazione basata sulle mappe di ricaduta aggiornate è stata applicata retrospettivamente anche ai dati raccolti nelle campagne precedenti (T0, T1 e T2). In questo modo, i confronti tra i diversi periodi di osservazione sono stati effettuati utilizzando un criterio di classificazione dell'esposizione omogeneo sull'intero arco temporale dello studio.

2.3 Metalli in studio

Nell'ambito dello studio complessivo, la scelta dei metalli è stata definita sulla base delle evidenze disponibili in letteratura e delle caratteristiche delle emissioni investigate. Per

quanto riguarda i metalli, oggetto del presente rapporto, la selezione si è basata sull'elenco degli elementi per i quali il monitoraggio è previsto dall'Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA n. 309-557341/2006). A questi sono stati aggiunti l'iridio (Ir), il palladio (Pd), il platino (Pt) e il rodio (Rh), metalli associati principalmente alle emissioni da traffico veicolare in quanto presenti nei convertitori catalitici dei veicoli, nonché il berillio (Be), considerato tracciante di specifiche attività industriali. Il protocollo di biomonitoraggio ha pertanto previsto la determinazione nelle urine di 18 metalli: antimonio (Sb), arsenico (As), berillio (Be), cadmio (Cd), cobalto (Co), cromo (Cr), rame (Cu), manganese (Mn), mercurio (Hg), iridio (Ir), nichel (Ni), palladio (Pd), platino (Pt), rodio (Rh), stagno (Sn), tallio (Tl), vanadio (V) e zinco (Zn). Inoltre, è stata determinata la concentrazione di piombo (Pb) nel sangue.

2.4 Metodi di analisi chimica

Le procedure di raccolta, conservazione, preparazione e analisi dei campioni biologici sono state condotte secondo i protocolli già adottati nelle precedenti campagne di biomonitoraggio. Al fine di garantire la massima uniformità metodologica e la comparabilità dei risultati ottenuti nei diversi periodi di studio, sono state mantenute le stesse procedure analitiche e di controllo qualità descritte nei report precedenti.

Anche per la determinazione dei metalli, è stata mantenuto lo stesso metodo analitico adottato nelle precedenti campagne di biomonitoraggio. In particolare, la determinazione dei metalli nelle matrici biologiche è stata effettuata mediante spettrometria di massa con plasma accoppiato induttivamente ad alta risoluzione (HR-ICP-MS). Lo strumento è stato utilizzato in modalità a bassa (LR), media (MR) e alta risoluzione (HR) in funzione dell'analita da determinare, al fine di minimizzare le possibili interferenze spettrali e garantire l'accuratezza delle misure.

Per la quantificazione è stato impiegato il metodo delle aggiunte standard in matrice associato alla standardizzazione interna, al fine di correggere gli effetti di matrice e le eventuali derive strumentali. Il metodo analitico è stato validato mediante la valutazione dei principali parametri prestazionali, tra cui limiti di rilevabilità (LoD, *Limit of Detection*) e di quantificazione (LoQ, *Limit of Quantification*), linearità, specificità, sensibilità, ripetibilità, riproducibilità intra-laboratorio, esattezza, incertezza di misura e partecipazione a circuiti di valutazione interlaboratorio.

Le analisi sono state effettuate applicando il metodo interno "Determinazione degli elementi in matrici biologiche" (MI-05), accreditato secondo la norma UNI CEI EN ISO/IEC 17025

dall'Ente Italiano di Accreditamento ACCREDIA. I dettagli strumentali e i risultati della validazione del metodo sono stati descritti in precedenti pubblicazioni scientifiche (Pino et al., 2012; Bocca et al., 2010; Bocca et al., 2011a; Bocca et al., 2011b; Bocca et al., 2016).
Una linea guida completa del metodo di riferimento è reperibile in ISTISAN 15/30 (Pag., iii, 47; http://www.iss.it/publ/?lang=1&id=2903&tipo=5).
La determinazione della cotinina urinaria è stata effettuata su campioni di urina scongelati e centrifugati. Dopo addizione della N-etilnorcotinina utilizzata come standard interno, i campioni sono stati diluiti con una miscela acqua/metanolo/acetonitrile e sottoposti ad analisi quantitativa mediante LC-MS/MS. L'esattezza del metodo è stata valutata attraverso il recupero percentuale che è risultato compreso tra l'89 e 98%.

2.5 Metodi statistici

L'analisi statistica dei dati è stata effettuata con i programmi Microsoft Excel, SAS 9.4 (SAS 2024), R 4.3.3 (R core Team 2024) e IBM SPSS Statistics 30.0.0 (IBM Corp., 2024). Nella descrizione delle variabili analizzate sono state calcolate media, mediana, deviazione standard (DS), percentili, range interquartile (IQR) e range min-max per caratterizzare la distribuzione delle concentrazioni dei metalli analizzati. Le concentrazioni urinarie sono state normalizzate in base al peso specifico delle urine, al fine di ridurre la variabilità associata alle differenze di diluizione urinaria tra gli individui e nel tempo. Per i parametri con valori inferiori al LoD è stato utilizzato un valore pari alla metà del LOD (LoD/2). Le distribuzioni delle concentrazioni dei metalli sono state calcolate escludendo i valori limite (VL), definiti come valori superiori al 95° percentile (P95) della distribuzione osservata al T0. Le analisi riguardanti i confronti temporali sono state condotte sul totale della popolazione in studio, per non dover rischiare di escludere troppi soggetti: una singola misurazione sopra il VL in uno dei momenti in cui è stato effettuato il biomonitoraggio porterebbe all'esclusione di tutti dati relativi a quel soggetto per quel particolare metallo in studio. Ove pertinente, sono state stratificate per area di residenza, genere e classe di età. Sono state inoltre analizzate alcune variabili individuali potenzialmente associate all'esposizione, tra cui fumo di tabacco, traffico veicolare e abitudini alimentari.
Per quanto riguarda il gruppo degli allevatori, considerato il numero ridotto di soggetti, le analisi descrittive sono state effettuate esclusivamente sul totale del gruppo, mentre per le analisi comparative il gruppo degli allevatori è stato confrontato con i residenti di sesso maschile.

Per la classificazione dell'esposizione al fumo di tabacco sono state utilizzate le concentrazioni urinarie di cotinina. I soggetti con concentrazioni inferiori a 1 ng/mL sono stati classificati come 'non fumatori' quelli con concentrazioni comprese tra 1 e 50 ng/mL come esposti al fumo, mentre quelli con concentrazioni superiori a 50 ng/mL sono stati classificati come 'fumatori'. Inoltre, sono stati utilizzati anche i dati relativi all'abitudine al fumo raccolti mediante il questionario somministrato durante la fase di prelievo.

Per la valutazione dell'esposizione al traffico veicolare sono stati utilizzati i dati disponibili sul Geoportale della Regione Piemonte all'indirizzo Geoportale Piemonte - Regione Piemonte. Per ciascun soggetto è stato definito un buffer di 200 m intorno all'indirizzo di residenza e l'esposizione è stata classificata sulla base del volume di traffico giornaliero della viabilità presente nell'area considerata. I soggetti residenti in aree caratterizzate da un traffico giornaliero inferiore a 1.000 veicoli sono stati classificati come non esposti al traffico, quelli associati a un traffico compreso tra 1.001 e 5.000 veicoli/giorno come mediamente esposti al traffico, mentre quelli associati a un traffico superiore a 5.000 veicoli/giorno come fortemente esposti al traffico. Poiché i dati relativi ai volumi di traffico non erano disponibili per tutte le strade di Torino e dei comuni limitrofi, la classificazione non ha potuto essere applicata a tutti i soggetti. A integrazione di tali informazioni, sono stati utilizzati i dati relativi all'esposizione al traffico raccolti mediante il questionario somministrato durante la fase di prelievo.

Inoltre, le abitudini alimentari sono state valutate classificando i soggetti in funzione della tipologia di acqua consumata abitualmente (di rubinetto o in bottiglia), nonché della frequenza settimanale di consumo di prodotti ittici (pesci, crostacei e molluschi) e di riso.

Poiché i dati non presentavano una distribuzione normale, i confronti tra gruppi sono stati effettuati mediante test statistici non parametrici. In particolare:

- per il confronto tra gruppi indipendenti sono stati utilizzati il test di Wilcoxon-Mann-Whitney tra due gruppi e il test di Kruskal-Wallis tra più di due gruppi;
- per la valutazione delle variazioni nel tempo (T0, T1, T2 e T3) nelle misure ripetute sugli stessi soggetti è stato impiegato il test di Friedman.

Per tutti i test statistici è stata adottata una soglia di significatività del 5% e sono stati utilizzati test a due code. Sono state pertanto considerate statisticamente significative le differenze associate a $p<0,05$. Tuttavia, eventuali differenze caratterizzate da valori di p prossimi alla soglia di significatività sono state eventualmente discusse come tendenze, senza considerarle evidenze statisticamente significative.

3. Popolazione residente

3.1 Caratteristiche della popolazione al T3

3.1.1 Residenza

Al tempo T0 sono stati arruolati nello studio 394 soggetti di età compresa tra 35 e 69 anni, di cui 198 esposti (residenti nell'ASL TO3) e 196 non esposti (residenti nell'ASL Città di Torino). A tutti i partecipanti è stato richiesto il consenso per prendere parte alle successive fasi di follow-up. Dopo un anno dall'avvio dell'impianto (T1), hanno aderito allo studio 380 soggetti, pari al 96,4% della coorte iniziale: 194 esposti e 186 non esposti. A tre anni dall'avvio dell'impianto (T2), hanno partecipato 344 soggetti, corrispondenti all'87,3% del campione iniziale, di cui 172 esposti e 172 non esposti. Al tempo T3, undici anni dopo l'avvio dell'impianto, il campione si è ridotto a 198 soggetti residenti nell'area di studio, pari al 50,2% dei 394 partecipanti originariamente arruolati al T0. Di questi, 98 appartenevano al gruppo degli esposti e 100 al gruppo dei non esposti (Tabella 3.1.1). La progressiva riduzione della numerosità campionaria nel corso del follow-up è attribuibile a molteplici fattori, tra cui l'invecchiamento della coorte, i decessi, il trasferimento della residenza al di fuori dell'area di studio, l'irreperibilità dei partecipanti e una graduale diminuzione dell'interesse a proseguire la partecipazione allo studio.

Tab. 3.1.1. Distribuzione dei soggetti presenti al T0, T1, T2 e al T3 divisi per area di residenza

Fase	*Esposti*	*Non esposti*	*Totale*
T3	98 (49.5%)	100 (50.5%)	198
T2	172 (50.0%)	172 (50.0%)	344
T1	194 (51.1%)	186 (48.9%)	380
T0	198 (50.3%)	196 (49.7%)	394

Rispetto all'area previsionale di ricaduta adottata nei precedenti tempi di osservazione, la nuova mappa di ricaduta (Fig. 2.3) ha comportato la riclassificazione di 13 soggetti, che risultano ora esterni all'area di esposizione. Al fine di garantire l'uniformità dei confronti longitudinali, la nuova classificazione è stata applicata retrospettivamente anche a tutti i tempi di osservazione precedenti (paragrafo 2.2).

3.1.2 Sesso

La Tabella 3.1.2 riporta la distribuzione dei partecipanti per sesso nei diversi tempi di rilevazione. Analogamente a quanto osservato al T2, la perdita al follow-up è risultata più elevata tra i soggetti di sesso femminile: rispetto al T0, il tasso di abbandono è stato pari al 54%, mentre tra i soggetti di sesso maschile è risultato pari al 45%.

Tab. 3.1.2. Distribuzione dei soggetti presenti al T0, T1, T2 e al T3 divisi per sesso

Fase	*Femmine*	*Maschi*	*Totale*
T3	91 (46.0%)	107 (54.0%)	198
T2	170 (49.4%)	174 (50.6%)	344
T1	191 (50.3%)	189 (49.7%)	380
T0	199 (50.5%)	195 (49.5%)	394

3.1.3 Età

Considerando l'età dei soggetti all'inizio dello studio (2013), non si registrano variazioni percentuali nella distribuzione per fascia di età (31-40, 41-50, 51-60, 61-70 anni) dei soggetti, nonostante la riduzione del campione nel tempo (Tab. 3.13).

Tab. 3.1.3. Distribuzione dei soggetti presenti al T0, T1, T2 e al T3 divisi per classe di età al T0 (nel 2013)

Fase	*31-40*	*41-50*	*51-60*	*61-70*	*Totale*
T3	28 (14.1%)	64 (32.3%)	57 (28.8%)	49 (24.7%)	198
T2	51 (14.8%)	104 (30.2%)	102 (29.7%)	87 (25.3%)	344
T1	55 (14.5%)	116 (30.5%)	113 (29.7%)	96 (25.3%)	380
T0	56 (14.2%)	120 (30.5%)	116 (29.4%)	102 (25.9%)	394

Tuttavia, in considerazione del marcato incremento dell'età dei partecipanti nel corso del follow-up (2013-2024), la distribuzione dei soggetti non risulta più adeguatamente rappresentata dalle classi di età inizialmente considerate, come mostrato nella Tabella 3.1.4. In particolare, le fasce di età più giovani risultano progressivamente sottorappresentate, mentre 53 soggetti hanno superato i 70 anni di età e rientrano pertanto in una classe anagrafica non prevista nella categorizzazione originaria.

Tab. 3.1.4. Distribuzione dei soggetti presenti al T3 divisi per classi di età riferite al 2024

Fase	*31-40*	*41-50*	*51-60*	*61-70+*	*Totale*
T3	0 (0%)	20 (10.1%)	67 (33.8%)	111 (56.1%)	198

Per tale motivo, è stato necessario riclassificare le fasce di età al fine di ottenere categorie maggiormente rappresentative della popolazione in studio e più adeguate per le analisi comparative. Sono state quindi definite tre classi di età: 47-60 anni, 61-70 anni e 71-81 anni. Alla luce di questa nuova categorizzazione, la distribuzione dei partecipanti risulta quella riportata nella Tabella 3.1.5.

Tab. 3.1.5. Nuova distribuzione dei soggetti presenti al T3 divisi per classi di età riferite al 2024

Fase	*47-60*	*61-70*	*71-81*	*Totale*
T3	87 (43.9%)	58 (29.3%)	53 (26.8%)	198

3.2 Concentrazione dei metalli dopo 11 anni (fase T3)

La Tabella 3.2.1 presenta le statistiche descrittive dei 18 metalli determinati nelle urine e del Pb misurato nel sangue nell'insieme dei soggetti residenti. Come descritto nel paragrafo 2.5, le elaborazioni statistiche sono state effettuate escludendo i VL; tale approccio, già adottato per l'analisi dei dati al T0, è coerente con le pratiche metodologiche comunemente impiegate negli studi di biomonitoraggio umano.

Tab 3.2.1. Distribuzione delle concentrazioni dei metalli al T3[1,2,3]

Metallo	*N>LoD*	*Media*	*DS*	*P5*	*P25*	*P50*	*P75*	*P95*	*IQR*	*Min-Max*
As µg/L	195	15.0	19.9	1.69	3.92	8.64	17.5	48.5	13.5	0.46-130
Be µg/L	198	0.11	0.03	0.06	0.09	0.11	0.13	0.16	0.04	0.05-0.20
Cd µg/L	197	0.61	0.38	0.17	0.32	0.53	0.81	1.32	0.48	0.11-2.34
Co µg/L	198	0.18	0.15	0.04	0.08	0.13	0.20	0.53	0.11	0.02-0.79
Cr µg/L	198	0.18	0.13	0.04	0.08	0.14	0.23	0.45	0.15	0.02-0.73
Cu µg/L	198	9.59	5.05	3.42	5.90	8.38	12.2	19.8	6.29	1.35-35.1
Hg µg/L	197	0.79	0.59	0.28	0.42	0.61	1.04	1.62	0.62	0.12-6.34
Ir ng/L	163	0.90	0.55	0.25	0.56	0.82	1.12	1.91	0.55	0.24-3.23
Mn µg/L	196	0.11	0.08	0.03	0.06	0.09	0.15	0.29	0.09	0.01-0.40
Ni µg/L	194	0.96	0.70	0.19	0.51	0.78	1.17	2.30	0.66	0.05-3.81
Pd ng/L	190	17.5	9.91	7.77	10.7	15.4	20.5	38.7	9.78	3.73-57.1
Pt ng/L	191	5.09	2.65	1.69	3.00	4.63	6.85	9.80	3.85	0.65-14.3

Rh ng/L	185	13.1	6.39	3.35	8.95	11.3	16.2	23.8	7.27	3.32-36.3
Sb µg/L	196	0.07	0.05	0.02	0.04	0.05	0.08	0.18	0.05	0.01-0.25
Sn µg/L	198	0.32	0.26	0.10	0.17	0.24	0.38	0.81	0.21	0.07-2.25
Tl µg/L	197	0.19	0.14	0.05	0.11	0.16	0.24	0.45	0.14	0.02-0.93
V µg/L	197	0.03	0.03	0.01	0.02	0.03	0.04	0.08	0.02	0.005-0.15
Zn µg/L	198	391	253	116	221	337	480	909	259	45.4-1603
Pb# µg/L	197	17.2	10.4	6.40	9.88	14.6	22.2	35.5	12.3	3.62-67.7

[1] Valori estremi statistici esclusi;
[2] Valori sotto il LoD posti uguali alla metà del LoD
[3] Valori corretti per peso specifico
#misurato nel sangue

3.2.1 Distribuzione per residenza

La Tabella 3.2.2 riporta le statistiche descrittive dei residenti stratificate per zona di esposizione. Il confronto tra i due gruppi ha evidenziato concentrazioni di Be significativamente più elevate nei soggetti esposti rispetto ai non esposti. Al contrario, nei soggetti esposti sono state osservate concentrazioni significativamente inferiori di Ir, Mn, Rh e V.

Tab. 3.2.2. Distribuzione delle concentrazioni dei metalli al T3 per zona di residenza[1,2,3]

	Esposti						*Non esposti*						*Esposti vs. Non esposti*
Metallo	*N>LoD*	*Media*	*DS*	*P50*	*P95*	*IQR*	*N>LoD*	*Media*	*DS*	*P50*	*P95*	*IQR*	*Valore p**
As µg/L	97	14.2	18.5	7.51	16.8	13.3	98	15.9	21.3	10.4	48.5	12.6	0.129
Be µg/L	98	0.12	0.03	0.12	0.14	0.03	100	0.09	0.03	0.09	0.14	0.03	**<0.001**
Cd µg/L	98	0.61	0.38	0.53	0.80	0.48	99	0.61	0.39	0.52	1.41	0.48	0.863
Co µg/L	98	0.17	0.14	0.13	0.19	0.12	100	0.18	0.16	0.13	0.56	0.13	0.744
Cr µg/L	98	0.18	0.14	0.14	0.27	0.18	100	0.17	0.13	0.13	0.45	0.13	0.456
Cu µg/L	98	9.61	4.53	8.25	12.2	6.19	100	9.57	5.53	9.06	21.28	6.36	0.623
Hg µg/L	98	0.82	0.72	0.58	1.04	0.62	99	0.76	0.44	0.65	1.61	0.62	0.802
Ir ng/L	71	0.73	0.45	0.64	0.92	0.67	95	1.08	0.59	0.94	2.41	0.58	**<0.001**
Mn µg/L	97	0.09	0.07	0.07	0.12	0.08	99	0.13	0.08	0.11	0.31	0.08	**<0.001**
Ni µg/L	94	0.95	0.71	0.80	1.15	0.58	100	0.96	0.70	0.73	2.21	0.76	0.717
Pd ng/L	94	19.4	11.7	15.9	21.8	10.9	96	15.7	7.40	14.2	30.5	9.06	0.069
Pt ng/L	92	5.26	2.82	5.08	7.25	4.49	99	4.92	2.47	4.38	9.61	2.92	0.497
Rh ng/L	90	11.8	5.67	10.7	13.6	5.07	95	14.3	6.84	12.6	28.2	7.57	**0.005**
Sb µg/L	98	0.07	0.06	0.05	0.07	0.05	98	0.07	0.05	0.06	0.17	0.04	0.163
Sn µg/L	98	0.30	0.19	0.24	0.37	0.20	100	0.34	0.31	0.25	0.89	0.22	0.476
Tl µg/L	98	0.19	0.11	0.17	0.24	0.14	99	0.20	0.16	0.16	0.51	0.12	0.873
V µg/L	97	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	100	0.04	0.03	0.03	0.08	0.02	**<0.001**
Zn µg/L	98	377	259	324	449	231	100	405	247	350	773	288	0.211
Pb# µg/L	97	17.4	9.15	15.3	34.3	12.4	100	17.1	11.6	14.4	35.8	11.4	0.292

[1] Valori estremi esclusi
[2] Valori sotto il LoD posti uguali alla metà del LoD
[3] Valori corretti per peso specifico
*Test di Mann-Whitney
#misurato nel sangue

3.2.2 Distribuzione per sesso

La Tabella 3.2.3 riporta la distribuzione delle concentrazioni dei metalli stratificata per sesso. L'analisi statistica ha evidenziato concentrazioni urinarie di Sb, Ir, Cu, Tl, V e Zn, nonché concentrazioni ematiche di Pb, significativamente più elevate negli uomini rispetto alle donne.

Tab. 3.2.3. Distribuzione delle concentrazioni dei metalli al T3 per sesso[1,2,3]

Metallo		*N>LoD*	*Media*	*DS*	*P50*	*P95*	*IQR*	*Valore p**
As µg/L	*maschi*	105	15.1	19.7	8.94	48.0	11.1	0.421
	femmine	90	15.0	20.3	8.48	48.6	14.3	
Be µg/L	*maschi*	107	0.11	0.03	0.11	0.17	0.05	0.060
	femmine	91	0.10	0.03	0.11	0.14	0.03	
Cd µg/L	*maschi*	107	0.59	0.38	0.54	1.23	0.42	0.410
	femmine	90	0.64	0.39	0.52	1.34	0.53	
Co µg/L	*maschi*	107	0.16	0.14	0.12	0.48	0.11	0.339
	femmine	91	0.19	0.16	0.13	0.54	0.12	
Cr µg/L	*maschi*	107	0.18	0.13	0.15	0.43	0.15	0.497
	femmine	91	0.17	0.14	0.13	0.43	0.15	
Cu µg/L	*maschi*	107	10.4	4.92	9.53	20.5	6.28	**0.002**
	femmine	91	8.59	5.04	7.62	18.3	4.98	
Hg µg/L	*maschi*	107	0.80	0.45	0.70	1.65	0.62	0.126
	femmine	90	0.77	0.73	0.58	1.57	0.54	
Ir ng/L	*maschi*	95	0.96	0.52	0.89	1.98	0.51	**0.011**
	femmine	71	0.84	0.59	0.68	1.85	0.53	
Mn µg/L	*maschi*	106	0.10	0.07	0.09	0.22	0.08	0.390
	femmine	90	0.12	0.09	0.09	0.31	0.09	
Ni µg/L	*maschi*	104	0.94	0.68	0.75	2.24	0.66	0.971
	femmine	90	0.98	0.73	0.79	2.27	0.65	
Pd ng/L	*maschi*	102	17.4	11.0	13.8	38.8	9.46	0.252
	femmine	88	17.6	8.54	15.6	36.0	9.85	
Pt ng/L	*maschi*	102	5.16	2.48	4.83	9.36	3.89	0.450
	femmine	89	5.01	2.83	4.29	10.5	3.67	
Rh ng/L	*maschi*	98	12.7	6.38	11.0	23.4	6.54	0.390
	femmine	87	13.5	6.42	12.0	25.0	7.56	
Sb µg/L	*maschi*	105	0.08	0.06	0.06	0.22	0.05	**0.003**
	femmine	91	0.06	0.04	0.05	0.16	0.04	
Sn µg/L	*maschi*	107	0.30	0.19	0.25	0.65	0.20	0.756
	femmine	91	0.34	0.32	0.23	0.92	0.22	
Tl µg/L	*maschi*	106	0.22	0.16	0.17	0.59	0.16	**0.017**
	femmine	91	0.17	0.10	0.14	0.35	0.12	
V µg/L	*maschi*	107	0.04	0.03	0.03	0.09	0.03	**<0.001**
	femmine	90	0.03	0.02	0.02	0.06	0.02	
Zn µg/L	*maschi*	107	451	278	403	980	294	**<0.001**
	femmine	91	321	199	284	595	232	
Pb# µg/L	*maschi*	106	20.1	12.0	17.0	45.6	15.1	**<0.001**
	femmine	91	13.9	6.97	12.7	27.5	9.54	

[1] Valori estremi esclusi
[2] Valori sotto il LoD posti uguali alla metà del LoD
[3] Valori corretti per peso specifico

*Test di Mann-Whitney
#misurato nel sangue

3.2.3 Distribuzione per età

La Tabella 3.2.4 riporta la distribuzione delle concentrazioni dei metalli nei residenti stratificati secondo le nuove classi di età (47-60 anni, 61-70 anni e 71-81 anni). L'analisi statistica ha evidenziato differenze significative in relazione all'età per Sb, As, Co, Hg, Ni, Pt, Cu, Rh, Tl, Zn nelle urine e per il Pb nel sangue. In particolare, le concentrazioni urinarie di Sb, Co, Hg, Ni, Cu, Rh e Zn mostrano una tendenza alla diminuzione con l'aumentare dell'età, con valori più elevati nella classe 47-60 anni e progressivamente inferiori nelle classi di età successive. Al contrario, As, Pt e Tl presentano le concentrazioni urinarie più elevate nella classe 61-70 anni. Per quanto riguarda il Pb ematico, è stato osservato un andamento crescente all'aumentare dell'età, con concentrazioni progressivamente più elevate nelle classi anagrafiche superiori.

Tab. 3.2.4. Distribuzione della concentrazione dei metalli al T3 per classi di età[1,2,3]

Metallo		*N>LoD*	*Media*	*DS*	*P50*	*P95*	*IQR*	*Valore p**
***As** µg/L*	47-60	86	16.5	23.4	9.19	48.1	12.7	**0.007**
	61-70	58	17.4	19.4	11.8	50.3	17.6	
	71-81	51	10.0	12.1	6.07	36.7	8.76	
Be µg/L	47-60	87	0.11	0.03	0.11	0.15	0.04	0.184
	61-70	58	0.11	0.03	0.12	0.17	0.05	
	71-81	53	0.11	0.03	0.11	0.16	0.04	
Cd µg/L	47-60	87	0.64	0.39	0.59	1.34	0.55	0.104
	61-70	57	0.65	0.38	0.57	1.19	0.50	
	71-81	53	0.53	0.37	0.47	1.22	0.29	
***Co** µg/L*	47-60	87	0.21	0.19	0.15	0.63	0.17	**0.018**
	61-70	58	0.16	0.11	0.12	0.40	0.09	
	71-81	53	0.14	0.11	0.09	0.36	0.11	
Cu µg/L	47-60	87	0.19	0.15	0.15	0.51	0.17	0.327
	61-70	58	0.18	0.12	0.15	0.37	0.14	
	71-81	53	0.15	0.10	0.13	0.35	0.09	
***Cu** µg/L*	47-60	87	10.7	5.76	9.45	21.7	6.94	**0.006**
	61-70	58	9.49	4.42	8.88	17.6	6.09	
	71-81	53	7.81	3.85	6.89	14.9	4.98	
***Hg** µg/L*	47-60	86	0.88	0.48	0.75	1.74	0.67	**<0.001**
	61-70	58	0.78	0.40	0.70	1.39	0.59	
	71-81	53	0.65	0.87	0.44	1.06	0.29	
Ir ng/L	47-60	76	0.94	0.50	0.90	1.77	0.52	0.084
	61-70	49	0.97	0.69	0.82	2.41	0.54	
	71-81	41	0.77	0.46	0.77	1.62	0.40	
Mn µg/L	47-60	86	0.11	0.08	0.09	0.29	0.09	0.689
	61-70	57	0.11	0.07	0.10	0.22	0.07	
	71-81	53	0.11	0.08	0.08	0.30	0.09	
***Ni** µg/L*	47-60	87	1.01	0.71	0.85	2.58	0.63	**0.012**
	61-70	57	1.11	0.83	0.82	2.57	1.03	

	71-81	50	0.70	0.43	0.64	1.33	0.45	
Pd ng/L	47-60	82	16.8	8.96	15.2	36.8	9.21	0.749
	61-70	56	18.6	11.4	16.7	40.3	10.2	
	71-81	52	17.6	9.72	14.9	39.5	9.80	
***Pt** ng/L*	47-60	85	5.07	2.38	4.81	9.34	3.71	**0.037**
	61-70	57	5.74	2.94	5.36	10.61	4.45	
	71-81	49	4.41	2.60	3.87	9.52	2.84	
***Rh** ng/L*	47-60	86	14.0	6.84	12.3	26.3	8.09	**0.047**
	61-70	55	13.3	6.72	11.5	24.2	5.37	
	71-81	49	11.2	4.78	10.4	18.3	4.85	
***Sb** µg/L*	47-60	87	0.08	0.05	0.06	0.17	0.05	**0.029**
	61-70	57	0.07	0.05	0.05	0.20	0.03	
	71-81	52	0.06	0.05	0.04	0.15	0.04	
Sn µg/L	47-60	87	0.34	0.30	0.25	0.83	0.22	0.290
	61-70	58	0.31	0.17	0.26	0.61	0.20	
	71-81	53	0.30	0.27	0.21	0.94	0.22	
***Tl** µg/L*	47-60	86	0.20	0.14	0.15	0.44	0.14	**0.007**
	61-70	58	0.23	0.16	0.20	0.66	0.15	
	71-81	53	0.15	0.11	0.13	0.34	0.10	
V µg/L	47-60	87	0.04	0.03	0.03	0.08	0.03	0.361
	61-70	58	0.03	0.03	0.03	0.06	0.02	
	71-81	52	0.03	0.02	0.02	0.06	0.02	
***Zn** µg/L*	47-60	87	422	260	364	907	288	**0.029**
	61-70	58	411	272	353	973	266	
	71-81	53	320	206	276	646	215	
***Pb**[#] µg/L*	47-60	86	13.3	7.36	10.9	27.7	8.81	**<0.001**
	61-70	58	19.2	11.8	16.2	37.8	12.8	
	71-81	53	21.4	11.0	19.2	40.3	13.4	

[1] Valori estremi esclusi
[2] Valori sotto sotto il LoD posti uguali alla metà del LoD
[3] Valori corretti per peso specifico
*Test di Kruskal-Wallis
[#]misurato nel sangue

3.2.4 Analisi dei valori limite (VL)

Al T3, un numero limitato di soggetti (n = 7) ha presentato concentrazioni di specifici metalli (As, Cd, Pt e Pb) superiori ai rispettivi VL, come riportato nella Tabella 3.2.5.

Tra i 40 soggetti che al T0 mostravano il superamento del VL per uno o più metalli (As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pt, Sb, Sn, Tl e Zn), tali superamenti non sono stati generalmente confermati nelle successive fasi di follow-up. Fanno eccezione due soggetti, che hanno mantenuto nel tempo concentrazioni persistentemente superiori al VL per Pt e Pb, rispettivamente, in tutte le campagne di biomonitoraggio.

Tab. 3.2.5. Numero di soggetti residenti con valori superiori al valore limite (VL)* SPoTT

Metallo	*VL**	*N soggetti*	*Concentrazione*
As µg/L	138	2	280 578

Be µg/L	0.55	-	-
Cd µg/L	3.22	1	5.84
Co µg/L	0.82	-	-
Cr µg/L	0.74	-	-
Cu µg/L	41.9	-	-
Ir ng/L	6.00	-	-
Hg µg/L	7.65	-	-
Mn µg/L	0.41	-	-
Ni µg/L	4.33	-	-
Pd ng/L	90.0	-	-
Pt ng/L	15.0	3	2762 8417 92.6
Rh ng/L	70.0	-	-
Sb µg/L	0.27	-	-
Sn µg/L	3.01	-	-
Tl µg/L	1.09	-	-
V µg/L	0.16	-	-
Zn µg/L	1930	-	-
Pb[#] µg/L	76.4	1	111

*valori superiori al 95° percentile (P95) della distribuzione osservata al T0
[#]misurato nel sangue

3.2.5 Confronto con i Valori di Riferimento (VR)

La Tabella 3.2.6 riporta, per ciascun metallo, i risultati ottenuti nello studio SPoTT al T3, espressi come mediana e 95° percentile (P95), e il relativo confronto con i VR derivati da studi e programmi di biomonitoraggio condotti sulla popolazione generale non professionalmente esposta, in Italia e a livello internazionale.

Nel complesso, le concentrazioni osservate al T3 risultano generalmente comprese nell'intervallo dei valori riportati nelle principali indagini di biomonitoraggio. Per la maggior parte degli elementi analizzati, sia le mediane sia i P95 sono inferiori o sostanzialmente sovrapponibili ai corrispondenti valori di riferimento disponibili. Alcune differenze rispetto a specifici studi sono state osservate per singoli elementi, senza tuttavia evidenziare un andamento uniforme.

Tab. 3.2.6. Confronto dei risultati SPOTT T3 con i valori di riferimento (VR) dei metalli in urina e del Pb nel sangue espressi come mediana (P95)

Metallo	*SPOTT T3*	*Spagna*	*Italia*	*Germania*	*Regno Unito*	*Italia*	*Belgio*	*Svizzera*	*Francia*	*German*
	2024	*2021*	*2024*	*2020 **	*2014*	*2018***	*2010–2011 ****	*2009–2013*	*2008–2010*	*1997-1999*
	n. 198	*n. 484*	*n. 360*	*n. 102*	*n. 132*	*n. 200*	*n. 1001*	*n. 903*	*n. 1992*	*n. 4822*
	questo studio	*Sáez et al., 2026*	*Forte et al., 2025*	*Heitland and Koster, 2021*	*Morton et al., 2014*	*Aprea et al., 2018*	*Rooney ey al., 2022*	*Perrais et al., 2024*	*Nisse et al., 2017*	*Becker et al., 2003*
As µg/L	8.64 (48.5)	45.0 (244)	35.1 (244)	10.3 (44.0)	10.5 (152)		14.1 (228)	11.8 (144)	16.0 (131)	4.1 (18.9)
Be µg/L	0.11 (0.16)	<0.19 (0.37)	<0.04 (<0.04)	<0.02 (<0.02)	0.005 (0.012)	<0.01 (0.034)	<0.007 (<0.007)	<0.002 (0.004)	0.01 (0.15)	
Cd µg/L	0.53 (1.32)	0.23 (0.85)	0.11 (0.56)	0.23 (0.58)	0.13 (0.52)	0.255 (0.900)	0.276 (1.362)	0.186 (0.634)	0.42 (1.33)	0.22 (0.96)
Co µg/L	0.13 (0.53)	0.30 (1.50)	0.17 (1.11)	0.34 (1.3)	0.22 (1.04)	0.432 (2.24)	0.184 (1.281)	0.181 (0.972)	0.60 (1.89)	
Cr µg/L	0.14 (0.45)		0.13 (0.87)	0.17 (0.35)	0.35 (0.79)	0.221 (0.600)	0.134 (0.524)	1.23 (2.48)	0.56 (1.60)	
Cu µg/L	8.38 (19.8)	9.77 (19.64)	5.96 (22.5)	6.7 (15)	8.75 (9.30)		8.18 (23.9)	8.63 (21.7)		
Hg µg/L	0.61 (1.62)		0.53 (2.09)	0.25 (0.63)	0.43 (2.81)	11.6 (24.0)	0.382 (2.15)	0.249 (1.04)	1.08 (6.60)	<0.2 (1.1)
Ir ng/L	0.82 (1.91)			<9.0 (<9.0)	<7.0 (10.0)					0.3 (1.1)
Mn µg/L	0.09 (0.29)	0.45 (2.41)	0.080 (0.47)	0.060 (0.12)	<0.092 (0.46)	0.29 (1.53)	<0.043 (0.560)	<0.568 (<0.568)	0.38 (1.07)	(3.0)
Ni µg/L	0.78 (2.30)	2.40 (6.68)	0.80 (3.68)	1.35 (4.0)	1.99 (6.35)	1.47 (4.44)	2.05 (5.64)	1.45 (6.27)	2.18 (5.99)	
Pd ng/L	15.4 (38.7)			<20.0 (<20.0)	<588 (910)			141 (391)		
Pt ng/L	4.63 (9.80)	<50.0 (<50.0)		<15.0 (<15.0)	<5.0 (10.0)	<10.0 (22.0)		30.0 (92.0)		1.5 (8.9)
Rh ng/L	11.3 (23.8)			<13.0 (<13.0)	4.0 (13.0)					
Sb µg/L	0.05 (0.18)	<0.30 (<0.30)	0.028 (0.11)	0.030 (0.08)	<0.092 (0.26)	0.029 (0.095)	0.040 (0.314)	0.046 (0.265)	0.09 (0.41)	
Sn µg/L	0.24 (0.81)		0.083 (0.45)	0.43 (1.2)	0.33 (2.44)		0.373 (3.565)	0.320 (1.50)		
Tl µg/L	0.16 (0.45)	0.24 (0.58)	0.27 (0.73)	0.34 (0.66)	0.17 (0.44)	0.203 (0.759)	0.211 (0.598)	0.158 (0.372)	0.25 (0.50)	(0.5)
V µg/L	0.03 (0.08)	0.27 (0.58)	0.20 (1.15)	0.055 (0.13)	1.58 (3.79)	0.096 (0.855)	0.248 (1.265)	0.479 (0.966)	0.42 (1.21)	
Zn µg/L	337 (909)	304 (823)	185 (992)	247 (685)	180 (730)		256 (1432)	216 (598)	348 (1039)	
Metallo	*SPOTT T3*	*Italia*	*Germania*	*Belgio*	*Francia*	*Stati Uniti*	*Canada*	*Brasile*	*Cina*	*German*
	2024	*2011*	*2020 **	*2010–2011 ***	*2008–2010*	*2015-2016*	*2016-2017*	*2017*	*2021*	*1997-1999*
	n. 198	*n. 1423*	*n. 102*	*n. 1001*	*n. 1992*	*n. 2610*	*n. 4517*	*n. 374*	*n. 5884*	*n. 4822*
	questo studio	*Heitland and Koster, 2021*	*Alimonti et al., 2011*	*Nisse et al., 2017*	*Cañas et al., 2014*	*CDC, 2017*	*Health Canada, 2019*	*Takeda et al., 2017*	*Cao et al., 2021*	*Becker et al., 2003*
Pb# µg/L	14.6 (35.5)	20.2 (51.7)	13 (26.3)	18.4 (49.3)	18.4 (49.3)	8.80 (28.9)	9.20 (25.0)	24.7 (65.8)	19.9 (38.8)	31 (71)

* media; **media geometrica; *** 97.5° percentile
#misurato nel sangue

3.3 Confronto con valori guida basati sulla salute (HBM e BE)

La Tabella 3.3.1 riporta il confronto tra i risultati ottenuti nel programma SPoTT al T3 e i principali valori guida basati sulla salute disponibili in letteratura. In particolare, sono stati considerati gli Human Biomonitoring Values (HBM-I e HBM-II) e i Biomonitoring Equivalents (BE). I valori HBM rappresentano concentrazioni di sostanze nei fluidi biologici associate a differenti livelli di attenzione sanitaria, mentre i BE sono valori derivati da riferimenti tossicologici e utilizzati come strumento di screening per l'interpretazione dei dati di biomonitoraggio. Le concentrazioni di Hg, Sn e Tl rilevate nella popolazione in studio risultano inferiori ai corrispondenti valori guida e nessun partecipante presenta concentrazioni superiori alle relative soglie. Per il Cd urinario, la mediana risulta inferiore al valore HBM-I. Tuttavia, n. 31 soggetti (16%) presenta concentrazioni superiori a tale valore e un solo soggetto (0,5%) supera anche il valore HBM-II. Inoltre, n. 6 soggetti (3,0%) presentano concentrazioni superiori al corrispondente BE. Per quanto riguarda l'As, il 61% dei partecipanti presenta concentrazioni superiori al BE disponibile (6,4 µg/L). Occorre tuttavia considerare che tale valore guida è riferito alla somma delle specie associate all'arsenico inorganico (arsenico inorganico, acido monometilarsonico [MMA] e acido dimetilarsinico [DMA]), mentre nello studio SPoTT è stato determinato l'As urinario totale, comprensivo anche delle forme organiche derivanti principalmente dal consumo di pesce e altri prodotti ittici. Nel complesso, le concentrazioni rilevate nella popolazione SPoTT risultano prevalentemente inferiori ai valori guida disponibili.

Tab. 3.3.1. Confronto dei risultati mediani ottenuti al T3 con i valori guida basti sulla salute (% di soggetti in studio con valore superiore)

Metallo	*SPOTT T3*	*HBM I*	*HBM II*	*BE*	*Riferimenti*
Arsenico µg/L	8.64			6.4* (61%)	Hays et al., 2010
Cadmio µg/L	0.53	1.0 (16%)	4.0 (0.5%)	1.5 (3.0%)	Schulz et al., 2012; Hays et al., 2008
Mercurio µg/L	0.61	7.0 (0%)	25.0 (0%)		Schulz et al., 2012
Stagno µg/L	0.24			20 (0%)	Poddalgoda et al., 2016
Tallio µg/L	0.16	5.0 (0%)			Schulz et al., 2012

*riferito alla somma di As inorganico, MMA e DMA

3.4 Confronto tra i risultati ottenuti al T0, T1, T2 e T3

La Tabella 3.4.1 riporta le mediane delle concentrazioni urinarie dei 198 soggetti per i quali sono disponibili le determinazioni effettuate al basale (T0) e nei successivi follow-up (T1, T2 e

T3), nonché i risultati del test di Friedman utilizzato per valutare le variazioni nel tempo. Nel complesso, per la maggior parte dei metalli analizzati si osserva una riduzione delle concentrazioni rispetto al T0. Il test di Friedman ha evidenziato differenze statisticamente significative tra i diversi tempi di monitoraggio per tutti i parametri considerati ($p < 0,05$), indicando una variazione temporale delle concentrazioni nel corso del follow-up. In particolare, Sb, As, Be, Co, Mn, Pd, Tl e V mostrano una marcata diminuzione tra T0 e T1, seguita da una sostanziale stabilizzazione nei successivi tempi di rilevazione, con variazioni relativamente contenute tra T1, T2 e T3. Inoltre, Cd e Zn evidenziano una riduzione iniziale al T1, seguita da un parziale incremento ai tempi successivi, pur mantenendo al T3 concentrazioni inferiori rispetto a quelle osservate al T0. Il Cr presenta un andamento differente, caratterizzato da un incremento tra T0 e T1 e da una successiva diminuzione fino al T3, con concentrazioni finali comunque inferiori a quelle rilevate al basale. Per Ir, Hg, Sn e Pb si osserva invece una progressiva riduzione delle concentrazioni lungo l'intero periodo di monitoraggio. Un andamento complessivamente decrescente, seppur con alcune fluttuazioni intermedie, si riscontra anche per Ni e Rh, che al T3 presentano concentrazioni inferiori rispetto a quelle misurate al T0. Diversamente dagli altri elementi, il Pt mostra un incremento progressivo nel corso del follow-up. La mediana aumenta infatti da 3,07 ng/L al T0 (2013) a 4,69 ng/L al T3 (2024), configurando un andamento in controtendenza rispetto a quello osservato per gli altri metalli analizzati.

Tab. 3.4.1. Confronto tra le concentrazioni dei metalli al T0, T1, T2 e T3[1,2,3]

	T0	*T1*	*T2*	*T3*	*Test per il trend*
Metallo	*Mediana*	*Mediana*	*Mediana*	*Mediana*	*Valore p**
As µg/L	21.4	9.56	11.0	8.71	**<0.001**
Be µg/L	0.17	0.10	0.10	0.11	**<0.001**
Cd µg/L	0.71	0.40	0.48	0.53	**<0.001**
Co µg/L	0.18	0.15	0.15	0.13	**<0.001**
Cr µg/L	0.16	0.20	0.15	0.14	**<0.001**
Cu µg/L	11.0	7.75	8.25	8.38	**<0.001**
Hg µg/L	1.36	0.94	0.93	0.61	**<0.001**
Ir ng/L	1.75	1.11	1.01	0.82	**<0.001**
Mn µg/L	0.13	0.10	0.08	0.09	**<0.001**
Ni µg/L	0.91	0.86	0.71	0.78	**0.002**
Pd ng/L	24.4	13.8	14.0	15.4	**<0.001**
Pt ng/L	3.07	3.27	3.80	4.69	**<0.001**
Rh ng/L	17.5	13.4	15.8	11.3	**<0.001**
Sb µg/L	0.07	0.05	0.04	0.05	**<0.001**
Sn µg/L	0.66	0.33	0.30	0.24	**<0.001**
Tl µg/L	0.26	0.16	0.18	0.16	**<0.001**
V µg/L	0.03	0.02	0.02	0.03	**<0.001**
Zn µg/L	380	270	341	337	**<0.001**

Pb*[#] *µg/L	20.7	nd	16.9	14.7	**<0.001**

[1] Valori estremi inclusi
[2] Valori sotto il LoD posti uguali alla metà del LoD
[3] Valori corretti per peso specifico
* Test di Friedman
[#]misurato nel sangue

Il test di Friedman è stato applicato anche dopo la stratificazione dei partecipanti in base alla zona di residenza, distinguendo tra soggetti esposti (n = 98) e non esposti (n = 100). I risultati sono riportati nella Tabella 3.4.2, che presenta per ciascun gruppo i metalli che mostrano differenze statisticamente significative tra i quattro tempi di monitoraggio ($p < 0,05$).

Nel gruppo degli esposti, la maggior parte dei metalli evidenzia una riduzione significativa delle concentrazioni urinarie nel corso del follow-up, particolarmente marcata tra il T0 e il T1. Per numerosi elementi (Sb, As, Be, Cd, Co, Mn, Hg, Pd, Cu, Rh, Sn, Tl, V, Zn e Pb) il decremento osservato al T1 è seguito da variazioni più contenute nei tempi successivi, con valori che tendono a stabilizzarsi tra T1, T2 e T3. Alcuni metalli, tra cui Hg, Ir, Mn e Sn, mostrano invece una diminuzione progressiva lungo l'intero periodo di osservazione. Diversamente dagli altri elementi, il Pt presenta un incremento significativo e continuo nel tempo, con le concentrazioni più elevate osservate al T3. Anche nel gruppo dei non esposti si osserva una riduzione delle concentrazioni per la maggior parte dei metalli analizzati, con differenze particolarmente evidenti tra il T0 e i successivi tempi di monitoraggio. A differenza di quanto rilevato negli esposti, per Cr e Ni il test di Friedman non evidenzia variazioni statisticamente significative nel tempo, indicando una sostanziale stabilità delle concentrazioni durante il periodo di follow-up. Analogamente a quanto osservato nel gruppo degli esposti, il Pt mostra un incremento progressivo e statisticamente significativo nel corso dello studio, rappresentando l'unico metallo caratterizzato da un andamento costantemente crescente nei due gruppi di popolazione.

Tab. 3.4.2. Confronto tra le concentrazioni dei metalli al T0, T1, T2 e T3 per zona di residenza[1,2,3]

	Esposti (n=98)					***Non Esposti (n=100)***				
	T0 Mediana	*T1 Mediana*	*T2 Mediana*	*T3 Mediana*	*Valore p**	*T0 Mediana*	*T1 Mediana*	*T2 Mediana*	*T3 Mediana*	*Valore p**
As µg/L	20.7	7.78	9.75	7.56	**<0.001**	21.8	12.3	12.1	10.5	**<0.001**
Be µg/L	0.18	0.10	0.11	0.12	**<0.001**	0.16	0.09	0.09	0.09	**<0.001**
Cd µg/L	0.72	0.38	0.46	0.53	**<0.001**	0.65	0.42	0.51	0.53	**<0.001**
Co µg/L	0.18	0.14	0.13	0.13	**0.011**	0.18	0.16	0.16	0.13	**0.039**
Cr µg/L	0.19	0.24	0.18	0.14	**<0.001**	0.14	0.16	0.12	0.13	0.053
Cu µg/L	11.2	7.37	8.04	8.25	**<0.001**	10.7	8.07	8.33	9.06	**<0.001**
Hg µg/L	1.40	0.98	0.89	0.58	**<0.001**	1.24	0.84	0.97	0.65	**<0.001**
Ir ng/L	2.00	1.14	1.04	0.64	**<0.001**	1.48	1.05	0.99	0.94	**0.001**
Mn µg/L	0.14	0.10	0.09	0.07	**<0.001**	0.12	0.11	0.07	0.11	**<0.001**
Ni µg/L	0.93	0.84	0.71	0.80	**0.019**	0.90	0.89	0.72	0.73	0.100
Pd ng/L	25.0	13.6	12.6	15.9	**<0.001**	23.5	14.0	15.0	14.2	**<0.001**
Pt ng/L	3.98	3.38	3.28	5.23	**0.002**	2.54	3.16	4.90	4.38	**<0.001**
Rh ng/L	18.6	12.6	13.6	10.7	**<0.001**	16.9	15.0	17.4	12.6	**<0.001**
Sb µg/L	0.08	0.05	0.04	0.05	**<0.001**	0.06	0.04	0.05	0.06	**<0.001**
Sn µg/L	0.66	0.31	0.28	0.24	**<0.001**	0.67	0.35	0.32	0.25	**<0.001**
Tl µg/L	0.25	0.16	0.17	0.17	**<0.001**	0.28	0.16	0.18	0.16	**<0.001**
V µg/L	0.04	0.03	0.02	0.02	**<0.001**	0.03	0.02	0.02	0.03	**<0.001**
Zn µg/L	408	257	334	324	**0.003**	370	273	350	350	**0.013**
Pb[#] µg/L	23.7	nd	18.8	15.4	**0.002**	19.3	nd	15.3	14.4	**0.002**

[1] Valori estremi inclusi
[2] Valori sotto il LoD posti uguali alla metà del LoD
[3] Valori corretti per peso specifico
* Test di Friedman
[#]misurato nel sangue

3.5 Confronto per abitudini di vita

Al fine di valutare il possibile contributo di fattori individuali ai livelli biologici dei metalli monitorati, sono state effettuate analisi stratificate in base ad alcune principali variabili legate alle abitudini di vita e alle potenziali sorgenti di esposizione ambientale. In particolare, sono stati considerati l'abitudine al fumo, l'esposizione al traffico veicolare e le abitudini alimentari. Tali fattori possono infatti influenzare l'assorbimento di diversi metalli e rappresentare potenziali determinanti della variabilità osservata nelle concentrazioni urinarie.

3.5.1 Abitudine al fumo

L'esposizione al fumo di tabacco è stata valutata attraverso la classificazione basata sulle concentrazioni urinarie di cotinina e sulle informazioni raccolte mediante questionario. Il confronto dei livelli urinari dei metalli tra fumatori, soggetti esposti al fumo e non fumatori è stato effettuato al fine di verificare l'eventuale associazione tra consumo di tabacco e biomarcatori di esposizione.

Utilizzando la classificazione basata sui livelli urinari di cotinina (Tab. 3.5.1), sono state osservate concentrazioni significativamente più elevate di Cd e Tl nei fumatori rispetto ai non fumatori e ai soggetti esposti al fumo passivo (p=0,024 e p=0,039, rispettivamente). Per il Pb è stata inoltre rilevata una differenza al limite della significatività statistica (p=0,073), con valori più elevati nei fumatori. Per tutti gli altri metalli analizzati non sono emerse differenze significative tra i gruppi.

Tab. 3.5.1. Confronto tra le concentrazioni dei metalli nei non esposti al fumo, gli esposti al fumo passivo e i fumatori, sulla base dei valori di cotinina urinaria[1,2,3]

Metallo	*Non esposti al fumo*			*Esposti al fumo passivo*			*Fumatori*			*Valore p**
	N>LoD	*Mediana*	*P95*	*N>LoD*	*Mediana*	*P95*	*N>LoD*	*Mediana*	*P95*	
As µg/L	120	8.31	67.2	48	8.34	35.9	29	11.8	88.7	0.271
Be µg/L	120	0.11	0.17	49	0.09	0.17	29	0.12	0.16	0.118
Cd µg/L	120	0.54	1.36	49	0.42	1.20	29	0.66	3.52	**0.024**
Co µg/L	120	0.12	0.56	49	0.15	0.56	29	0.16	0.43	0.315
Cr µg/L	120	0.13	0.45	49	0.14	0.51	29	0.15	0.47	0.726
Cu µg/L	120	8.25	19.7	49	8.16	19.5	29	11.0	23.4	0.197
Hg µg/L	120	0.59	1.70	49	0.60	1.74	28	0.76	1.50	0.949
Ir ng/L	98	0.81	2.05	43	0.84	2.22	24	0.87	1.94	0.817
Mn µg/L	120	0.09	0.29	49	0.08	0.31	28	0.10	0.24	0.597
Ni µg/L	117	0.80	2.20	49	0.83	2.32	29	0.54	3.63	0.304
Pd ng/L	117	14.0	40.4	47	15.8	38.8	26	15.3	39.7	0.675
Pt ng/L	119	5.09	11.60	47	3.77	9.88	28	5.05	9.98	0.062
Rh ng/L	112	10.9	23.4	46	12.4	32.3	27	12.7	26.8	0.159

Sb µg/L	119	0.05	0.22	48	0.06	0.17	29	0.05	0.19	0.853
Sn µg/L	120	0.24	0.83	49	0.25	0.91	29	0.31	0.78	0.364
Tl µg/L	119	0.15	0.36	49	0.16	0.62	29	0.22	0.65	**0.039**
V µg/L	119	0.02	0.07	49	0.03	0.09	29	0.03	0.14	0.077
Zn µg/L	120	326	893	49	358	1059	29	351	1186	0.490
Pb# µg/L	120	14.0	35.2	49	15.1	34.8	29	21.3	61.9	0.073

[1] Valori estremi inclusi
[2] Valori sotto il LoD posti uguali alla metà del LoD
[3] Valori corretti per peso specifico
* Test di Kruskal-Wallis
#misurato nel sangue

Risultati analoghi sono emersi considerando la classificazione derivata dal questionario (Tab. 3.5.2). In questo caso, i fumatori presentavano concentrazioni significativamente superiori di Cd (p=0,043), Tl (p=0,007) e Pb (p=0,044) rispetto ai non fumatori. Per gli altri metalli monitorati non sono state osservate differenze statisticamente significative tra i gruppi.

Tab. 3.5.2. Confronto tra le concentrazioni dei metalli nei non fumatori e nei fumatori, sulla base del questionario[1,2,3]

Metallo	*Non fumatori*			*Fumatori*			*Valore p**
	N>LoD	*Mediana*	*P95*	*N>LoD*	*Mediana*	*P95*	
As µg/L	164	8.48	47.88	30	11.3	314	0.061
Be µg/L	165	0.11	0.16	30	0.11	0.16	0.829
Cd µg/L	165	0.51	1.30	30	0.57	1.52	**0.043**
Co µg/L	165	0.13	0.56	30	0.16	0.43	0.364
Cr µg/L	165	0.14	0.45	30	0.14	0.46	0.931
Cu µg/L	165	8.30	19.7	30	10.0	23.3	0.158
Hg µg/L	165	0.58	1.65	29	0.85	1.78	0.291
Ir ng/L	139	0.81	2.06	25	0.85	1.91	0.820
Mn µg/L	164	0.09	0.29	30	0.11	0.24	0.126
Ni µg/L	161	0.79	2.20	30	0.66	3.62	0.344
Pd ng/L	160	15.4	38.6	27	15.77	39.6	0.497
Pt ng/L	162	4.65	11.4	29	4.95	8.96	0.969
Rh ng/L	153	11.1	25.7	29	12.9	26.7	0.104
Sb µg/L	163	0.05	0.17	30	0.05	0.23	0.142
Sn µg/L	165	0.24	0.83	30	0.31	1.17	0.151
Tl µg/L	164	0.15	0.45	30	0.22	0.64	**0.007**
V µg/L	165	0.03	0.08	30	0.03	0.14	0.107
Zn µg/L	165	331	950	30	369	1162	0.260
Pb# µg/L	165	14.1	35.4	30	18.7	59.1	**0.044**

[1] Valori estremi inclusi
[2] Valori sotto il LoD posti uguali alla metà del LoD
[3] Valori corretti per peso specifico
* Test di Mann-Whitney
#misurato nel sangue

3.5.2 Esposizione al traffico veicolare

Per valutare l'esposizione a traffico sono stati utilizzati i dati reperibili sul geoportale della Regione Piemonte all'indirizzo Geoportale Piemonte - Regione Piemonte

Per ogni soggetto è stata definita un'area circolare di raggio 100 m intorno all'indirizzo di residenza. I soggetti residenti in una strada con un transito giornaliero di veicoli inferiore a 1000 sono stati classificati come '*non esposti a traffico'*, quelli residenti in una strada con transito giornaliero di veicoli compreso tra 1001 e 5000 sono stati classificati come '*mediamente esposti a traffico'*, mentre quelli residenti in una strada con un numero giornaliero di veicoli superiore a 5001 sono stati classificati come '*fortemente esposti a traffico'*. Dal momento che il dato sul traffico non è disponibile per tutte le strade di Torino e dei comuni limitrofi, non tutti i soggetti rientrano in questa classificazione. Ad integrazione, si sono quindi utilizzati i dati raccolti dal questionario (esposizione autoriferita) proposto ai campionati in fase di prelievo.

Il confronto delle concentrazioni urinarie dei metalli non ha evidenziato differenze statisticamente significative tra i soggetti classificati come residenti in aree a basso, medio o alto traffico sulla base dei dati georeferenziati disponibili (Tabella 3.5.2) per la maggior parte dei metalli analizzati. Fanno eccezione il Be e l'Ir, per i quali sono state osservate differenze statisticamente significative. In particolare, le concentrazioni di Be tendono a diminuire all'aumentare della classe di traffico, mentre per l'Ir si osserva un andamento opposto, con valori progressivamente più elevati passando dalle aree a basso traffico a quelle a maggiore intensità di traffico.

Tab. 3.5.2. Confronto tra le concentrazioni dei metalli secondo la classificazione del traffico entro un raggio di 200 metri dall'abitazione[1,2,3]

Metallo	*Basso traffico*			*Medio traffico*			*Alto traffico*			*Valore p**
	N>LoD	*Mediana*	*P95*	*N>LoD*	*Mediana*	*P95*	*N>LoD*	*Mediana*	*P95*	
As µg/L	16	11.1	206	64	9.19	76.6	64	9.72	34.5	0.944
Be µg/L	16	0.12	0.16	64	0.11	0.17	65	0.09	0.15	**0.003**
Cd µg/L	16	0.62	1.09	64	0.50	1.39	65	0.57	1.13	0.830
Co µg/L	16	0.14	0.43	64	0.15	0.48	65	0.12	0.52	0.594
Cr µg/L	16	0.15	0.35	64	0.15	0.41	65	0.15	0.46	0.880
Cu µg/L	16	9.72	15.2	64	8.76	21.0	65	8.72	19.7	0.612
Hg µg/L	16	0.72	2.41	63	0.59	1.68	65	0.61	1.46	0.870
Ir ng/L	12	0.62	1.76	55	0.83	1.77	63	0.97	2.36	**0.007**
Mn µg/L	16	0.08	0.13	64	0.09	0.31	65	0.11	0.28	0.118
Ni µg/L	16	0.77	2.33	64	0.79	2.28	65	0.80	2.30	0.898
Pd ng/L	15	16.4	35.4	62	15.1	36.9	63	14.2	25.1	0.533
Pt ng/L	16	5.58	26.9	62	4.97	9.62	65	4.25	9.95	0.330
Rh ng/L	14	10.5	17.7	62	12.0	26.5	64	12.7	28.0	0.148
Sb µg/L	16	0.08	0.25	64	0.05	0.16	63	0.06	0.15	0.088
Sn µg/L	16	0.23	1.09	64	0.25	0.89	65	0.22	0.53	0.387

Tl µg/L	15	0.19	0.33	64	0.16	0.48	65	0.15	0.50	0.728
V µg/L	16	0.03	0.13	63	0.03	0.07	65	0.03	0.09	0.949
Zn µg/L	16	390	915	64	356	912	65	354	792	0.656
Pb# µg/L	16	14.2	44.1	64	15.9	34.1	65	15.8	35.7	0.953

[1] Valori estremi inclusi
[2] Valori sotto il LoD posti uguali alla metà del LoD
[3] Valori corretti per peso specifico
* Test di Kruskal-Wallis
#misurato nel sangue

Il confronto basato sulle dichiarazioni dei partecipanti relative alla presenza di traffico nell'area di residenza (Tabella 3.5.3) ha evidenziato differenze statisticamente significative esclusivamente per il Rh. In particolare, i soggetti che hanno riferito la presenza di traffico presentano concentrazioni mediane di Rh superiori rispetto a coloro che non hanno segnalato tale esposizione (12,5 vs 11,0 ng/L; p=0,023). Per il Pb si osserva inoltre una tendenza a concentrazioni più elevate nei soggetti esposti al traffico (16,4 vs 13,9 µg/L), pur in assenza di significatività statistica (p=0,093). Per tutti gli altri metalli monitorati, inclusi Be e Ir, non sono emerse differenze statisticamente significative tra i gruppi.

Tab. 3.5.3. Confronto tra le concentrazioni dei metalli secondo le dichiarazioni di traffico nell'area abitativa sulla base del questionario[1,2,3]

Metallo	*Traffico No*			*Traffico Si*			*Valore p**
	N>LoD	*Mediana*	*P95*	*N>LoD*	*Mediana*	*P95*	
As µg/L	109	10.3	88.7	86	7.90	46.2	0.404
Be µg/L	109	0.11	0.16	87	0.11	0.17	0.744
Cd µg/L	109	0.54	1.51	87	0.50	1.25	0.119
Co µg/L	109	0.13	0.47	87	0.14	0.58	0.735
Cr µg/L	109	0.13	0.45	87	0.15	0.49	0.707
Cu µg/L	109	9.09	18.64	87	8.12	20.99	0.449
Hg µg/L	108	0.66	1.73	87	0.60	1.56	0.221
Ir ng/L	91	0.83	2.05	74	0.81	2.06	0.802
Mn µg/L	107	0.09	0.28	87	0.09	0.30	0.436
Ni µg/L	106	0.84	3.10	86	0.73	2.00	0.084
Pd ng/L	101	15.9	41.5	87	13.8	35.9	0.707
Pt ng/L	105	5.09	10.5	87	4.10	11.6	0.163
Rh ng/L	109	11.0	22.8	83	12.5	32.9	**0.023**
Sb µg/L	100	0.06	0.20	85	0.05	0.19	0.142
Sn µg/L	109	0.25	0.90	87	0.24	0.75	0.419
Tl µg/L	109	0.17	0.54	86	0.16	0.46	0.701
V µg/L	109	0.03	0.08	87	0.03	0.09	0.913
Zn µg/L	109	318	962	87	364	941	0.210
Pb# µg/L	109	13.9	30.5	87	16.4	52.4	0.093

[1] Valori estremi inclusi
[2] Valori sotto il LoD posti uguali alla metà del LoD
[3] Valori corretti per peso specifico
* Test di Mann-Whitney
#misurato nel sangue

3.5.3 Abitudine alimentare

Per valutare l'associazione tra alcune abitudini alimentari e le concentrazioni dei metalli misurate nei campioni biologici i soggetti sono stati suddivisi in base all'abitudine di consumare acqua di rubinetto o in bottiglie, alla frequenza settimanale di consumo di prodotti ittici (pesce o crostacei e molluschi) e di riso.

La concentrazione dei metalli nei soggetti che consumavano prevalentemente acqua di rubinetto rispetto a quella dei soggetti che consumavano prevalentemente acqua in bottiglia erano comparabili per la maggior parte degli elementi analizzati. L'unica differenza statisticamente significativa è stata osservata per il Cr, che presentava valori più elevati nei consumatori di acqua di rubinetto rispetto ai consumatori di acqua in bottiglia (0,17 vs 0,11 µg/L; p = 0,008).

Tab. 3.5.4. Confronto tra le concentrazioni dei metalli e l'abitudine a consumare acqua di rubinetto o in bottiglia[1,2,3]

Metallo	*Acqua di rubinetto*			*Acqua in bottiglia*			*Valore p**
	N>LoD	*Mediana*	*P95*	*N>LoD*	*Mediana*	*P95*	
As µg/L	70	8.55	55.9	120	9.31	56.8	0.218
Be µg/L	70	0.11	0.17	120	0.11	0.16	0.275
Cd µg/L	70	0.54	1.20	120	0.54	1.56	0.807
Co µg/L	70	0.14	0.58	120	0.13	0.52	0.862
Cr µg/L	70	0.17	0.56	120	0.11	0.41	**0.008**
Cu µg/L	70	8.51	21.0	120	8.45	19.7	0.956
Hg µg/L	69	0.57	1.72	120	0.68	1.58	0.925
Ir ng/L	58	0.81	1.96	101	0.85	2.23	0.884
Mn µg/L	70	0.10	0.32	118	0.09	0.28	0.992
Ni µg/L	67	0.89	2.81	119	0.71	2.19	0.068
Pd ng/L	70	16.2	41.4	113	15.1	38.7	0.063
Pt ng/L	69	4.75	11.9	117	4.86	10.6	0.814
Rh ng/L	64	12.0	23.3	113	11.1	28.0	0.638
Sb µg/L	70	0.05	0.17	118	0.06	0.21	0.412
Sn µg/L	70	0.25	0.70	120	0.24	0.93	0.499
Tl µg/L	70	0.17	0.54	119	0.16	0.47	0.855
V µg/L	70	0.03	0.09	119	0.03	0.08	0.954
Zn µg/L	70	320	859	120	349	983	0.328
Pb# µg/L	70	16.3	36.0	120	13.9	46.6	0.177

[1] Valori estremi inclusi
[2] Valori sotto il LoD posti uguali alla metà del LoD
[3] Valori corretti per peso specifico
* Test di Mann-Whitney
#misurato nel sangue

Le concentrazioni dei metalli sono state confrontate in base alla frequenza di consumo di pesce, distinguendo i partecipanti in tre gruppi: soggetti che non consumavano mai pesce,

soggetti che lo consumavano meno di una volta a settimana e soggetti che lo consumavano almeno una volta a settimana. Sono emerse differenze statisticamente significative per As, Hg e Rh. In particolare, i livelli di As aumentavano con la frequenza di consumo, passando da 5,99 µg/L nei soggetti che non consumavano mai pesce, a 12,8 µg/L nei consumatori occasionali e a 9,18 µg/L nei consumatori abituali (p = 0,001). Analogamente, le concentrazioni di Hg risultavano significativamente più elevate nei consumatori di pesce rispetto ai non consumatori, con mediane pari a 0,44 µg/L , 0,87 µg/L e 0,70 µg/L, nei tre gruppi rispettivamente (p < 0,001). Anche per il Rh è stata osservata un'associazione significativa, con valori mediani pari a 10,4 ng/L nei non consumatori, 11,4 ng/L nei consumatori occasionale e 12,2 ng/L nei consumatori abituali (p = 0,023).

Tab. 3.5.5. Confronto tra le concentrazioni dei metalli e il consumo di pesce[1,2,3]

Metallo	*Mai*			*<1 volta a settimana*			*≥1 volta a settimana*			*Valore p**
	N>LoD	*Median a*	*P95*	*N>LoD*	*Median a*	*P95*	*N>LoD*	*Median a*	*P95*	
As µg/L	53	5.99	69.4	52	12.8	64.7	87	9.18	49.0	**0.001**
Be µg/L	53	0.11	0.17	52	0.11	0.17	87	0.11	0.16	0.757
Cd µg/L	53	0.50	1.35	52	0.54	1.40	87	0.52	1.39	0.889
Co µg/L	53	0.15	0.61	52	0.13	0.38	87	0.12	0.56	0.986
Cr µg/L	53	0.14	0.49	52	0.15	0.54	87	0.13	0.45	0.858
Cu µg/L	53	7.93	16.7	52	9.06	22.2	87	8.83	20.1	0.227
Hg µg/L	53	0.44	1.35	52	0.87	1.88	87	0.70	1.78	**<0.001**
Ir ng/L	43	0.73	2.42	43	0.84	2.01	74	0.89	1.76	0.354
Mn µg/L	53	0.09	0.36	51	0.08	0.25	86	0.10	0.29	0.500
Ni µg/L	53	0.70	2.37	51	0.73	2.44	84	0.85	2.84	0.255
Pd ng/L	51	15.6	36.4	50	15.7	40.6	83	13.8	46.9	0.823
Pt ng/L	51	4.10	11.6	51	4.88	11.1	86	4.89	11.2	0.124
Rh ng/L	46	10.4	26.1	52	11.4	24.2	81	12.2	28.9	**0.023**
Sb µg/L	53	0.04	0.23	52	0.05	0.16	85	0.06	0.21	0.109
Sn µg/L	53	0.22	0.72	52	0.23	0.96	87	0.26	0.71	0.111
Tl µg/L	53	0.14	0.72	52	0.16	0.49	86	0.17	0.44	0.513
V µg/L	52	0.03	0.14	52	0.03	0.09	87	0.03	0.06	0.679
Zn µg/L	53	348	1059	52	345	755	87	335	941	0.990
Pb# µg/L	53	15.2	50.0	52	12.5	37.7	87	15.2	35.6	0.450

[1] Valori estremi inclusi
[2] Valori sotto il LoD posti uguali alla metà del LoD
[3] Valori corretti per peso specifico
* Test di Kruskal-Wallis
#misurato nel sangue

Analogamente, le concentrazioni dei metalli sono state confrontate in relazione alla frequenza di consumo di crostacei e molluschi. Anche in questo caso sono emerse differenze statisticamente significative per As e Hg. Le concentrazioni mediane di As aumentavano progressivamente all'aumentare della frequenza di consumo, passando da 7,61 µg/L nei

soggetti che non consumavano mai crostacei e molluschi a 11,9 µg/L nei consumatori occasionali e a 28,5 µg/L nei consumatori abituali (p < 0,001). Un andamento analogo è stato osservato per Hg, le cui concentrazioni mediane risultavano pari a 0,58 µg/L nei non consumatori, 0,71 µg/L nei consumatori occasionali e 1,10 µg/L nei consumatori abituali (p = 0,010).

Tab. 3.5.6. Confronto tra le concentrazioni dei metalli e il consumo di crostacei e molluschi[1,2,3]

Metallo	*Mai*			*<1 volta a settimana*			*≥1 volta a settimana*			*Valore p**
	N>LoD	*Median a*	*P95*	*N>LoD*	*Median a*	*P95*	*N>LoD*	*Median a*	*P95*	
As µg/L	115	7.61	33.1	67	11.9	122	6	28.5	48.1	**<0.001**
Be µg/L	115	0.11	0.16	67	0.11	0.17	6	0.11	0.16	0.802
Cd µg/L	115	0.51	1.26	67	0.57	1.59	6	0.57	1.34	0.281
Co µg/L	115	0.13	0.53	67	0.13	0.56	6	0.17	0.50	0.479
Cr µg/L	115	0.13	0.47	67	0.15	0.38	6	0.12	0.55	0.846
Cu µg/L	115	8.06	20.0	67	9.53	21.9	6	7.72	15.6	0.057
Hg µg/L	115	0.58	1.40	67	0.71	2.20	6	1.10	1.70	**0.010**
Ir ng/L	95	0.81	2.27	57	0.84	1.81	4	0.95	1.55	0.729
Mn µg/L	114	0.09	0.31	66	0.09	0.24	6	0.13	0.17	0.510
Ni µg/L	112	0.75	2.23	66	0.85	2.60	6	0.76	2.83	0.445
Pd ng/L	111	15.8	42.6	64	14.1	37.0	5	12.8	26.6	0.342
Pt ng/L	112	4.45	11.6	66	5.14	10.6	6	5.86	8.66	0.528
Rh ng/L	109	11.0	29.9	60	11.6	22.4	6	14.6	30.1	0.309
Sb µg/L	113	0.05	0.17	67	0.06	0.24	6	0.07	0.15	0.209
Sn µg/L	115	0.24	0.77	67	0.25	0.95	6	0.28	0.53	0.347
Tl µg/L	115	0.16	0.52	66	0.17	0.47	6	0.19	0.34	0.496
V µg/L	114	0.03	0.13	67	0.03	0.07	6	0.03	0.03	0.909
Zn µg/L	115	326	739	67	359	1103	6	429	554	0.344
Pb# µg/L	115	15.9	43.6	67	14.3	37.7	6	11.6	23.1	0.412

[1] Valori estremi inclusi
[2] Valori sotto il LoD posti uguali alla metà del LoD
[3] Valori corretti per peso specifico
* Test di Kruskal-Wallis
#misurato nel sangue

Inoltre, sebbene la maggior parte dei partecipanti avesse rispettato l'indicazione di astenersi dal consumo di prodotti ittici nei giorni immediatamente precedenti il campionamento urinario, sono state comunque osservate associazioni statisticamente significative tra il consumo recente di tali alimenti (negli ultimi 7 giorni e negli ultimi 3 giorni) e le concentrazioni di alcuni metalli, confermando il potenziale contributo della dieta all'esposizione. In particolare, differenze statisticamente significative sono emerse per As, Hg e Sn. Il valore mediano di As era pari a 7,13 µg/L nei soggetti che non avevano consumato pesce recentemente, aumentava a 9,19 µg/L nei soggetti che ne avevano consumato negli ultimi 7 giorni e raggiungeva 14,6 µg/L nei soggetti che ne avevano consumato negli ultimi 3

giorni. (p < 0,001). Analogamente, le concentrazioni mediane di Hg aumentavano da 0,57 µg/L nei soggetti che non avevano consumato prodotti ittici recentemente a 0,67 µg/L nei consumatori degli ultimi 7 giorni e a 1,39 µg/L nei consumatori degli ultimi 3 giorni (p < 0,001). Al contrario, per lo Sn le concentrazioni mediane risultavano più basse nei soggetti che avevano consumato prodotti ittici negli ultimi 3 giorni (0,19 µg/L) rispetto sia ai non consumatori recenti (0,24 µg/L) sia ai soggetti che ne avevano consumato negli ultimi 7 giorni (0,25 µg/L) (p = 0,004).

Tab. 3.5.7. Confronto tra le concentrazioni dei metalli e il consumo recente di prodotti ittici[1,2,3]

Metallo	*Mai*			*negli ultimi 7 giorni*			*negli ultimi 3 giorni*			*Valore p**
	N>LoD	*Mediana*	*P95*	*N>LoD*	*Mediana*	*P95*	*N>LoD*	*Mediana*	*P95*	
As µg/L	126	7.13	38.2	46	9.19	116	5	14.6	233	**<0.001**
Be µg/L	126	0.11	0.17	46	0.11	0.15	5	0.09	0.11	0.246
Cd µg/L	126	0.52	1.24	46	0.55	1.52	5	0.50	0.80	0.683
Co µg/L	126	0.13	0.52	46	0.13	0.56	5	0.12	0.16	0.857
Cr µg/L	126	0.14	0.46	46	0.14	0.40	5	0.08	0.25	0.175
Cu µg/L	126	8.78	19.4	46	9.04	20.1	5	7.00	8.02	0.313
Hg µg/L	126	0.57	1.42	46	0.67	2.09	5	1.39	1.79	**<0.001**
Ir ng/L	103	0.80	1.98	39	0.86	2.15	3	0.63	1.30	0.133
Mn µg/L	125	0.09	0.29	45	0.09	0.17	5	0.12	0.23	0.415
Ni µg/L	122	0.81	2.11	46	0.78	2.61	5	0.81	2.15	0.752
Pd ng/L	122	15.3	38.8	44	15.8	35.7	4	11.2	16.3	0.303
Pt ng/L	124	4.90	10.5	45	4.65	10.3	5	3.09	8.14	0.542
Rh ng/L	117	11.0	23.5	43	12.2	23.3	5	10.4	21.3	0.504
Sb µg/L	124	0.05	0.20	46	0.05	0.6	5	0.05	0.15	0.531
Sn µg/L	126	0.24	0.68	46	0.25	0.90	5	0.19	0.20	**0.004**
Tl µg/L	126	0.15	0.41	46	0.17	0.45	5	0.15	0.24	0.440
V µg/L	125	0.03	0.08	46	0.03	0.06	5	0.03	0.05	0.547
Zn µg/L	126	348	770	46	360	1031	5	266	431	0.511
Pb# µg/L	126	14.2	34.9	46	15.3	49.6	5	15.2	27.3	0.835

[1] Valori estremi inclusi
[2] Valori sotto il LoD posti uguali alla metà del LoD
[3] Valori corretti per peso specifico
* Test di Kruskal-Wallis
#misurato nel sangue

Infine, le concentrazioni dei metalli sono state valutate in relazione alla frequenza di consumo di riso. Sono emerse differenze statisticamente significative per Cd e Sb. In particolare, le concentrazioni mediane di Cd risultavano più elevate nei soggetti che consumavano riso almeno una volta a settimana (0,60 µg/L) rispetto ai soggetti che non lo consumavano mai (0,48 µg/L) e ai consumatori occasionali (0,47 µg/L) (p = 0,043). Anche per Sb è stata osservata una differenza significativa tra i gruppi (p = 0,047), con concentrazioni mediane pari a 0,06 µg/L nei non consumatori, 0,04 µg/L nei consumatori occasionali e 0,05 µg/L nei consumatori abituali.

Tab. 3.5.8. Confronto tra le concentrazioni dei metalli e il consumo di riso[1,2,3]

Metallo	*Mai*			*<1 volta a settimana*			*≥1 volta a settimana*			*Valore p**
	N>LoD	*Mediana*	*P95*	*N>LoD*	*Mediana*	*P95*	*N>LoD*	*Mediana*	*P95*	
As µg/L	18	13.8	85.2	60	8.55	56.7	103	8.77	49.9	0.555
Be µg/L	18	0.12	0.16	60	0.11	0.17	103	0.11	0.16	0.214
Cd µg/L	18	0.48	0.93	60	0.47	1.36	103	0.60	1.39	**0.043**
Co µg/L	18	0.13	0.27	60	0.12	0.56	103	0.15	0.56	0.067
Cr µg/L	18	0.13	0.30	60	0.12	0.40	103	0.15	0.47	0.345
Cu µg/L	18	8.06	15.7	60	8.10	17.5	103	9.53	21.3	0.166
Hg µg/L	18	1.01	1.72	60	0.52	2.25	103	0.61	1.52	0.098
Ir ng/L	18	0.86	1.23	60	0.83	1.68	103	0.78	2.40	0.944
Mn µg/L	18	0.10	0.27	60	0.09	0.22	103	0.08	0.32	0.919
Ni µg/L	18	0.79	1.49	60	0.71	3.35	103	0.84	2.33	0.185
Pd ng/L	18	14.7	25.5	60	13.8	35.9	103	15.7	38.7	0.198
Pt ng/L	18	5.19	9.54	60	4.18	12.3	103	5.09	10.6	0.285
Rh ng/L	18	14.3	23.8	60	11.3	22.5	103	11.1	30.6	0.159
Sb µg/L	18	0.06	0.09	60	0.04	0.21	103	0.05	0.20	**0.047**
Sn µg/L	18	0.30	0.60	60	0.21	0.60	103	0.25	0.83	0.070
Tl µg/L	18	0.15	0.38	60	0.13	0.65	103	0.18	0.50	0.211
V µg/L	18	0.03	0.06	60	0.02	0.07	103	0.03	0.09	0.341
Zn µg/L	18	338	842	60	287	794	103	383	943	0.174
Pb# µg/L	18	14.2	36.7	60	14.8	32.3	103	13.6	41.3	0.915

[1] Valori estremi inclusi
[2] Valori sotto il LoD posti uguali alla metà del LoD
[3] Valori corretti per peso specifico
* Test di Kruskal-Wallis
#misurato nel sangue

4. Allevatori

I 13 allevatori partecipanti alla fase T0 hanno aderito sia alla seconda fase di prelievi (T1) che alla terza fase (T2); mentre solamente 9 allevatori sono stati campionati nell'ultima fase (T3), con un'aderenza del 69% allo studio. Analogamente ai soggetti residenti, anche gli allevatori hanno consegnato il questionario auto compilato e i campioni di urina richiesti, seguendo le procedure descritte al paragrafo 2.2.

4.1 Concentrazione dei metalli dopo 11 anni (al T3)

La Tabella 4.1.1 riporta le statistiche descrittive relative alle concentrazioni urinarie dei 18 metalli analizzati e del Pb nel sangue nei 9 allevatori campionati al T3. In analogia con quanto effettuato per la popolazione residente, le statistiche sono state calcolate dopo l'esclusione dei

valori estremi identificati secondo i criteri descritti nel paragrafo 2.5. Per Hg, Pd e Rh è stata rilevata, in un singolo campione per ciascun metallo, una concentrazione inferiore al limite di rilevabilità (LoD). Tali valori sono stati sostituiti con LoD/2 nelle successive elaborazioni statistiche, in accordo con la metodologia adottata nel progetto. Nessuna concentrazione misurata ha superato i limiti definiti per l'identificazione dei valori estremi; pertanto, tutti i campioni sono stati inclusi nelle analisi statistiche successive.

Tab. 4.1.1. Concentrazione dei metalli negli allevatori nella fase T3[1,2,3]

Parametro	*N>LoD*	*Media*	*DS*	*Mediana*	*Min-Max*
As µg/L	9	8.20	5.77	6.35	1.56-18.5
Be µg/L	9	0.10	0.03	0.09	0.08-0.18
Cd µg/L	9	0.60	0.52	0.47	0.10-1.48
Co µg/L	9	0.09	0.03	0.09	0.03-0.13
Cr µg/L	9	0.19	0.14	0.14	0.06-0.50
Cu µg/L	9	12.9	7.98	11.1	5.99-29.9
Hg µg/L	8	1.02	0.73	0.79	0.12-2.30
Ir ng/L	9	1.01	0.49	0.82	0.51-1.84
Mn µg/L	9	0.13	0.11	0.11	0.03-0.38
Ni µg/L	9	0.93	0.24	0.99	0.45-1.23
Pd ng/L	8	25.3	11.8	28.3	3.83-38.2
Pt ng/L	9	9.29	3.23	10.5	4.75-14.3
Rh ng/L	8	9.71	3.70	9.67	3.32-15.8
Sb µg/L	9	0.10	0.04	0.11	0.03-0.18
Sn µg/L	9	0.54	0.85	0.21	0.15-2.76
Tl µg/L	9	0.16	0.16	0.11	0.07-0.56
V µg/L	9	0.04	0.02	0.04	0.01-0.07
Zn µg/L	9	475	257	450	117-1064
Pb# µg/L	9	27.9	14.1	27.9	11.5-55.4

[1] Valori estremi inclusi
[2] Valori sotto il LoD posti uguali alla metà del LoD
[3] Valori corretti per peso specifico
#misurato nel sangue

4.1.1 Confronto con i valori dei residenti maschi

La Tabella 4.1.2 mostra il confronto tra i valori mediani delle concentrazioni dei metalli negli allevatori al T3 e nei residenti maschi allo stesso tempo di osservazione.

Nel complesso, non si riscontrano differenze statisticamente significative tra i due gruppi per la maggior parte dei metalli analizzati, indicando livelli di esposizione sostanzialmente sovrapponibili. Fanno eccezione Sb, Pd e Pt, per i quali negli allevatori si osservano valori mediani significativamente più elevati rispetto ai residenti maschi ($p < 0,05$).

Tab. 4.1.2. Confronto tra allevatori e nei residenti maschi nella fase T3[1,2,3]

Parametro	*Allevatori*	*Residenti maschi*	*Valore p**

	N>LoD	*Mediana*	*N>LoD*	*Mediana*	
As µg/L	9	6.35	108	9.07	0.283
Be µg/L	9	0.09	108	0.11	0.285
Cd µg/L	9	0.47	108	0.53	0.539
Co µg/L	9	0.09	108	0.12	0.063
Cr µg/L	9	0.14	108	0.15	0.874
Cu µg/L	9	11.1	108	9.49	0.509
Hg µg/L	8	0.79	108	0.70	0.446
Ir ng/L	9	0.82	95	0.89	0.882
Mn µg/L	9	0.11	107	0.09	0.406
Ni µg/L	9	0.99	105	0.76	0.376
Pd ng/L	8	28.3	103	14.3	**0.036**
Pt ng/L	9	10.5	106	4.87	**0.001**
Rh ng/L	8	9.67	99	11.0	0.157
Sb µg/L	9	0.11	106	0.06	**0.044**
Sn µg/L	9	0.21	108	0.25	0.854
Tl µg/L	9	0.11	107	0.17	0.091
V µg/L	9	0.04	108	0.03	0.765
Zn µg/L	9	450	108	400	0.567
Pb# µg/L	9	27.9	108	17.0	0.061

[1] Valori estremi inclusi

[2] Valori sotto il LoD posti uguali alla metà del LoD

[3] Valori corretti per peso specifico

*Test di Mann-Whitney

#misurato nel sangue

4.2 Confronto con i risultati ottenuti al T0, T1, T2 e T3

La Tabella 4.2.1 riporta le concentrazioni mediane dei metalli analizzati negli allevatori ai diversi tempi di campionamento (T0, T1, T2 e T3), insieme ai valori di p ottenuti mediante il test di Friedman, utilizzato per valutare le variazioni longitudinali all'interno dello stesso gruppo di soggetti. Nel complesso, per la maggior parte dei metalli non si osservano variazioni statisticamente significative nel corso del follow-up, indicando una sostanziale stabilità delle concentrazioni misurate nel periodo di osservazione. Differenze significative nel tempo emergono invece per Sb, Cr, Ir e Pt ($p < 0,05$). Per il Cr si rileva un incremento delle concentrazioni al T1 rispetto al T0, seguito da una diminuzione nei successivi tempi di campionamento. Il Pt mostra invece un andamento progressivamente crescente, con i valori più elevati osservati al T3. Anche Sb e Ir presentano variazioni significative tra i diversi tempi di prelievo. In ogni caso, la limitata numerosità del campione disponibile al T3 (n = 9) deve essere tenuta in considerazione nella valutazione dei risultati dell'analisi longitudinale.

Tab. 4.2.1. Confronto tra le concentrazioni dei metalli negli allevatori al T0, T1, T3 e T3[1,2,3]

Parametro	*Mediana T0*	*Mediana T1*	*Mediana T2*	*Mediana T3*	*Valore del p**
As µg/L	17.8	7.67	6.84	6.35	0.115
Be µg/L	0.14	0.10	0.12	0.09	0.538
Cd µg/L	0.73	0.47	0.25	0.47	0.162
Co µg/L	0.15	0.15	0.14	0.09	0.081
Cr µg/L	0.11	0.41	0.22	0.14	**0.044**
Cu µg/L	11.0	8.33	8.26	11.1	0.352
Hg µg/L	1.56	1.50	0.92	0.79	0.115
Ir ng/L	1.62	0.75	1.01	0.82	**0.035**
Mn µg/L	0.15	0.18	0.19	0.11	0.161
Ni µg/L	0.79	0.74	0.88	0.99	0.998
Pd ng/L	17.5	8.14	17.5	28.3	0.208
Pt ng/L	2.64	1.92	2.99	10.5	**0.005**
Rh ng/L	17.5	16.6	13.1	9.67	0.059
Sb µg/L	0.07	0.10	0.06	0.11	**0.043**
Sn µg/L	0.44	0.62	0.20	0.21	0.108
Tl µg/L	0.22	0.18	0.15	0.11	0.162
V µg/L	0.03	0.06	0.03	0.04	0.083
Zn µg/L	668	522	451	450	0.506
Pb[#] µg/L	33.0	nd	19.3	27.9	0.062

[1] Valori estremi inclusi
[2] Valori sotto il LoD posti uguali alla metà del LoD
[3] Valori corretti per peso specifico
* Test di Friedman
[#] misurato nel sangue

5. Valutazione dei contaminanti ambientali

Per la valutazione della qualità dell'aria nell'area metropolitana di Torino sono stati utilizzati i dati delle stazioni del Sistema Regionale di Rilevamento della Qualità dell'Aria (SRRQA) gestito da ARPA Piemonte. In particolare, per il particolato atmosferico (PM10 e PM2.5) sono state considerate le centraline di Aldo Mei a Beinasco e Lingotto a Torino, mentre per il biossido di azoto (NO_2) sono state utilizzate le stazioni di Aldo Mei (Beinasco), Gozzano (Orbassano) e Lingotto (Torino) (Fig. 5.1)

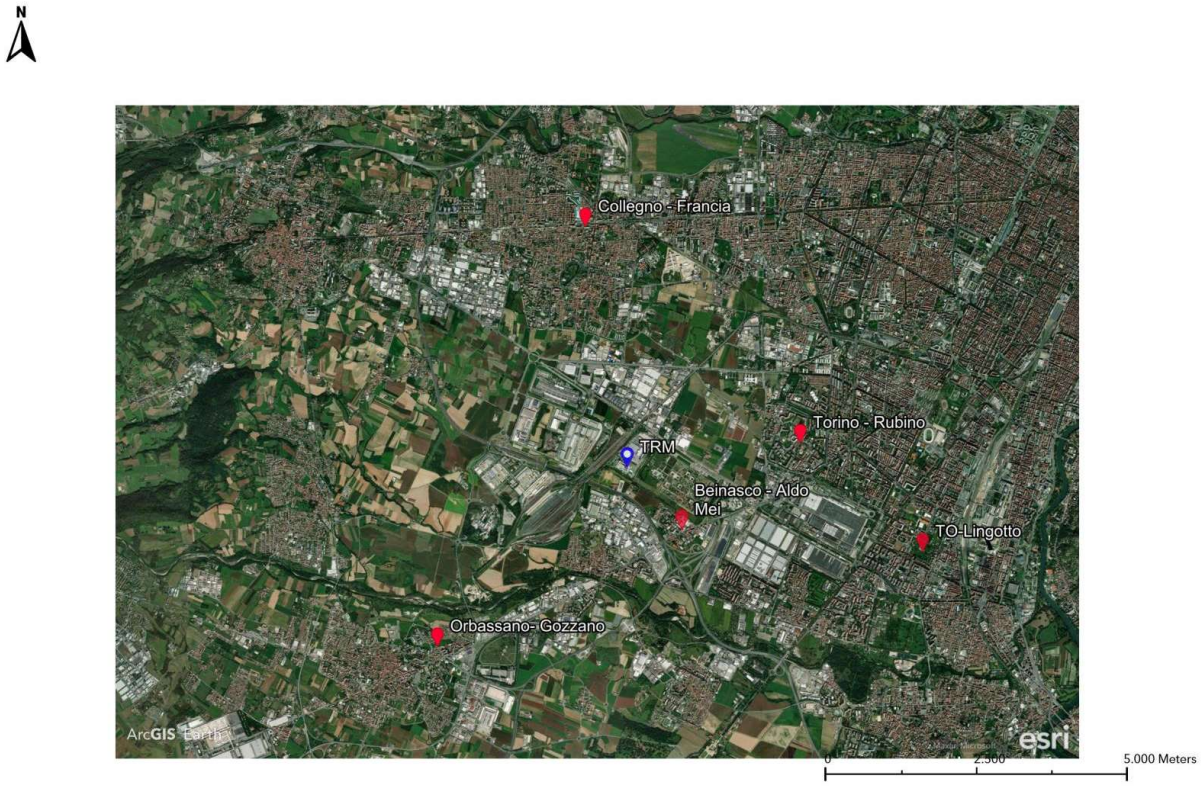


Fig. 5.1. Mappa con le centraline per il monitoraggio della qualità dell'aria nell'area in studio

Nelle Figure 5.2 e 5.3 sono riportati gli andamenti delle concentrazioni medie di PM10, PM2.5 e NO_2 nel mese di giugno del periodo 2013-2025. I valori mostrano una generale variabilità tra i diversi anni comune a tutte le stazioni considerate.

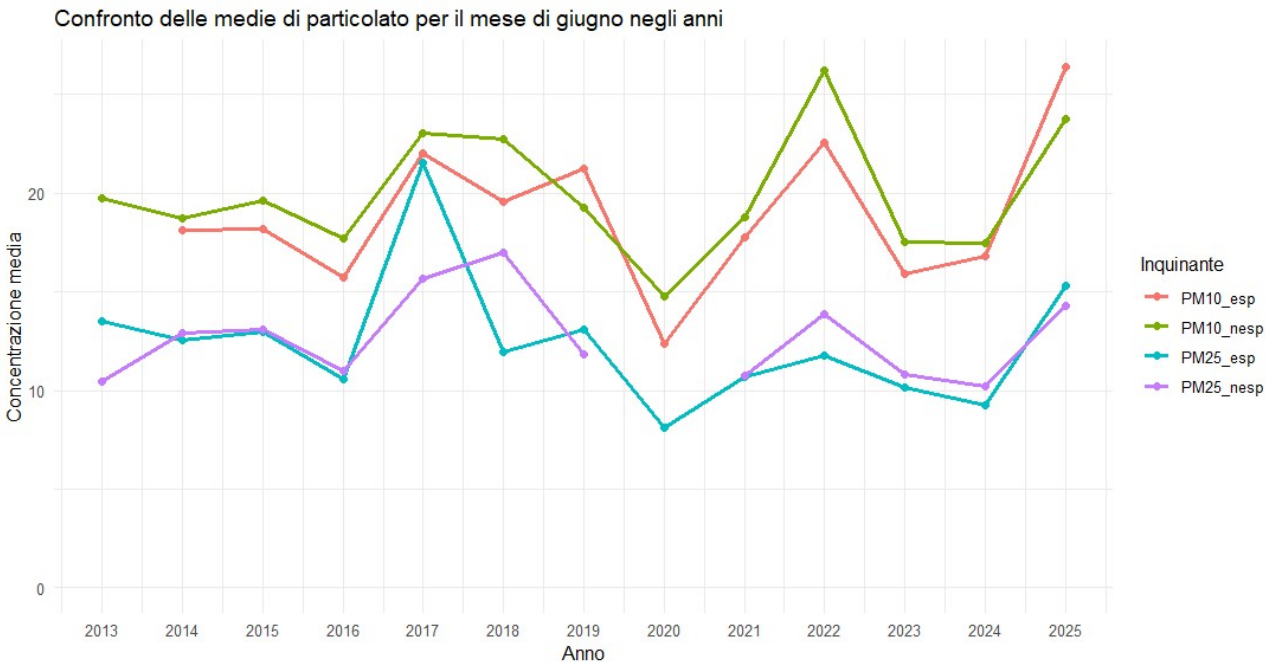


Fig. 5.2. Confronto delle medie di particolato atmosferico (PM10 e PM2.5) nei mesi di giugno dal 2013 al 2024 considerando le centraline di Beinasco-Aldo Mei (PM10_esp e PM25_esp) e la media delle centraline di Torino-Lingotto e Torino-Rubino (PM10_nesp e PM25_nesp)

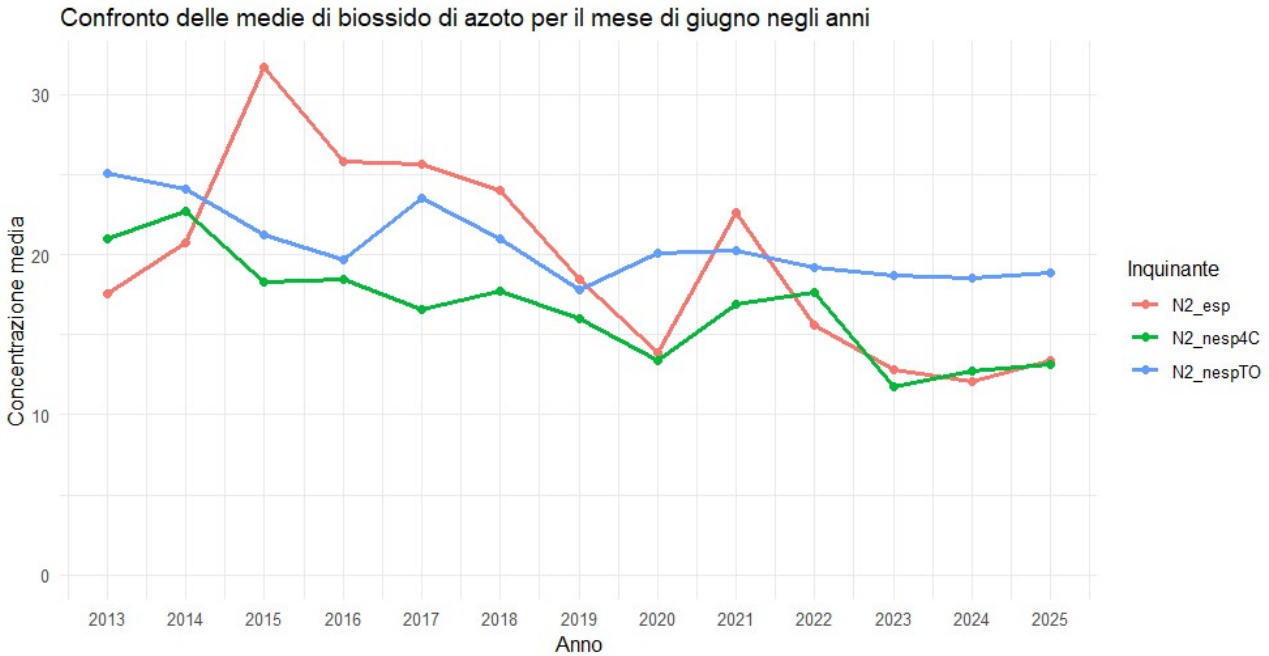


Fig. 5.3. Confronto delle medie di biossido di azoto (NO2) nel mese di giugno dal 2013 al 2024 considerando le centraline di Beinasco-Aldo Mei (N2_esp), Orbassano–Gozzano (N2_nesp4C) e la media delle centraline di Torino-Lingotto e Torino-Rubino (N2_nesp_TO)

Nel 2024 le concentrazioni di PM10 e PM2.5 registrate presso la stazione di Beinasco-Aldo Mei risultano confrontabili con quelle misurate nelle stazioni di riferimento delle aree non

esposte. Analogamente, per il NO_2 si osserva un andamento simile tra le diverse centraline nel periodo analizzato, con una progressiva diminuzione delle concentrazioni nel tempo.
I valori osservati nel mese di giugno risultano generalmente inferiori rispetto a quelli tipici del periodo invernale. Le concentrazioni medie annuali di PM10 si sono mantenute al di sotto del limite normativo di 40 μg/m^3 per tutto il periodo considerato, mentre il limite di 35 sforamenti all'anno di 50 μg/m^3 sul valore medio giornaliero di PM10 viene sistematicamente superato solo nel periodo invernale. Dal 2016 anche le concentrazioni medie annuali di NO_2 sono risultate stabilmente inferiori al valore limite previsto dalla normativa.

La Tabella 5.1 riporta i risultati delle campagne di monitoraggio delle emissioni convogliate effettuate presso il camino della Linea 1 del termovalorizzatore TRM nel corso del 2024.

Tab. 5.1. Emissioni a camino misurate presso il termovalorizzatore TRM nel 2024

Misurazione	*Parametro*	*U.d.M.*	*Concentrazione*	*Limite*
Linea 1 22/01/2024	Cd+Tl	mg/Nm^3	<0.004	0.02
	Metalli (Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn)	mg/Nm^3	0.033	0.3
	Zn	mg/Nm^3	0.148	0.5
	IPA	ng/Nm^3	<180	5000
	PBDD/F	ng/Nm^3	<0.0025	
	PCB-DL	ng/Nm^3	0.00068	0.05
	PCDD/F	ng/Nm^3	<0.0036	0.05
Linea 1 03/06/2024	Cd+Tl	mg/Nm^3	<0.004	0.02
	Metalli (Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn)	mg/Nm^3	0.02	0.3
	Zn	mg/Nm^3	0.17	0.5
	IPA	ng/Nm^3	1.32	5000
	PBDD/F	ng/Nm^3	<0.0026	
	PCB-DL	ng/Nm^3	0.00069	0.05
	PCDD/F	ng/Nm^3	<0.0036	0.05
Linea 1 09/10/2024	Cd+Tl	mg/Nm^3	<00004	0.02
	Metalli (Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn)	mg/Nm^3	0.023	0.3
	Zn	mg/Nm^3	0.032	0.5
	IPA	ng/Nm^3	<0.44	5000
	PBDD/F	ng/Nm^3	<0.0028	
	PCB-DL	ng/Nm^3	0.00073	0.05
	PCDD/F	ng/Nm^3	<0.0039	0.05

Fonte: https://trm.to.it/it/monitoraggio-ambientale/emissioni.html

Le misure effettuate nei mesi di gennaio, giugno e ottobre hanno riguardato metalli, IPA, PCB e diossine/furani (PCDD/F). Tutti i parametri analizzati hanno mostrato concentrazioni inferiori ai limiti emissivi stabiliti dall'Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA).
In particolare, i valori di Cd+Tl sono risultati sempre inferiori al limite di quantificazione (<0,004 mg/Nm^3), mentre la somma degli altri metalli è risultata compresa tra 0,020 e 0,033 mg/Nm^3, circa 10 volte inferiore al limite autorizzato di 0,3 mg/Nm^3. Lo Zn ha registrato

valori compresi tra 0,032 e 0,170 mg/Nm^3, anch'essi inferiori al limite di 0,5 mg/Nm^3. Analogamente, gli IPA, i PCB e le diossine/furani hanno mostrato concentrazioni molto contenute e sostanzialmente costanti nelle tre campagne di monitoraggio.

6. Discussione

Il presente studio rappresenta una delle più lunghe esperienze di biomonitoraggio umano condotte in Italia nell'ambito della sorveglianza sanitaria associata a un impianto di termovalorizzazione. La disponibilità di misurazioni ripetute sugli stessi soggetti prima dell'avvio dell'impianto (T0) e dopo uno, tre e undici anni di attività (T1, T2 e T3) consente di valutare l'evoluzione nel tempo dei livelli di esposizione ai metalli e di verificare l'eventuale presenza di differenze persistenti tra le aree a diversa ricaduta emissiva.

Il confronto tra residenti nell'area esposta e nell'area di riferimento evidenzia differenze statisticamente significative solo per un numero limitato di metalli. In particolare, i soggetti esposti presentano concentrazioni di Be superiori rispetto ai non esposti, mentre per Ir, Mn, Rh e V si osservano concentrazioni significativamente inferiori. Il Be rappresenta l'unico metallo che continua a mostrare una differenza statisticamente significativa associata all'area di esposizione già osservata nelle precedenti campagne di biomonitoraggio. Tuttavia, l'entità assoluta della differenza appare modesta e singolarmente non è sufficiente a sostenere un impatto sanitario attribuibile all'impianto. Inoltre, l'assenza di analoghe differenze per la maggior parte degli altri metalli monitorati, compresi quelli tradizionalmente associati all'emissione da processi di combustione, non supporta l'ipotesi di un impatto rilevante e generalizzato delle emissioni del termovalorizzatore sui livelli di esposizione della popolazione residente.

L'analisi longitudinale delle concentrazioni dei metalli evidenzia una diminuzione generalizzata dei livelli biologici nel corso del follow-up (2013-2024). Per la maggior parte dei metalli, il calo più marcato si osserva tra T0 e T1, seguito da una fase di sostanziale stabilizzazione nei tempi successivi. Questo andamento suggerisce che i livelli rilevati al T0 fossero influenzati da fattori che si sono successivamente ridotti o stabilizzati nel tempo. Mentre, metalli, tra cui Hg, Ir, Mn, Sn e Pb, mostrano una riduzione più graduale e continua lungo l'intero periodo di osservazione (T0, T1, T2 e T3), compatibile con una progressiva diminuzione dell'esposizione o con cambiamenti cumulativi nei determinanti ambientali e comportamentali che hanno agito in modo costante durante il follow-up.

Un aspetto particolarmente rilevante è la concordanza dei trend osservati nei soggetti esposti e non esposti. La riduzione delle concentrazioni interessa infatti la maggior parte dei metalli in entrambi i gruppi, con profili temporali ampiamente sovrapponibili. Tale evidenza non supporta l'ipotesi di un incremento progressivo dell'esposizione ambientale tra i residenti dell'area esposta durante il periodo di osservazione. Al contrario, i risultati suggeriscono che i principali cambiamenti abbiano interessato l'intera popolazione studiata, indipendentemente

dalla zona di residenza. La diminuzione osservata potrebbe riflettere la progressiva riduzione delle emissioni ambientali conseguente all'introduzione di normative più restrittive, al miglioramento delle tecnologie industriali e dei sistemi di abbattimento delle emissioni, nonché a modifiche degli stili di vita e delle abitudini alimentari della popolazione. Un andamento analogo è stato descritto in altri programmi di biomonitoraggio europei, che hanno documentato una generale riduzione dell'esposizione della popolazione a diversi contaminanti metallici (Schoeters et al., 2017; Göen et al., 2018).

L'unica eccezione a questo quadro generale è rappresentata dal Pt, che evidenzia un incremento progressivo e statisticamente significativo delle concentrazioni in entrambi i gruppi di popolazione. Poiché tale andamento interessa sia gli esposti sia i non esposti, ed è riscontrabile anche nel gruppo degli allevatori, appare improbabile un legame diretto con le emissioni del termovalorizzatore. Una spiegazione plausibile è rappresentata dal crescente contributo delle emissioni da traffico veicolare, in particolare dall'usura delle marmitte catalitiche, riconosciute come un'importante sorgente ambientale dei metalli del gruppo del platino (Bocca et al., 2003). Il contemporaneo aumento del Pt, in assenza di analoghi incrementi per gli altri metalli monitorati, suggerisce pertanto il coinvolgimento di determinanti ambientali diversi da quelli associati all'impianto.

L’analisi per sesso ed età conferma il ruolo dei fattori individuali nella determinazione dei livelli biologici dei metalli. Negli uomini sono state osservate concentrazioni più elevate di Sb, Ir, Tl, V, Cu, Zn e Pb. Per i primi elementi, tali differenze potrebbero riflettere una maggiore probabilità di esposizioni occupazionali pregresse, mentre per Cu e Zn potrebbero contribuire anche fattori fisiologici e metabolici. Le maggiori concentrazioni di Pb sono coerenti con una maggiore esposizione cumulativa nel corso della vita e con esposizioni storiche avvenute quando l’utilizzo del piombo era più diffuso.

Anche l’età è risultata associata a differenze nelle concentrazioni di diversi metalli. In particolare, con l’aumentare dell’età si osserva una diminuzione dei livelli di Co, Cu, Zn, Sb, Hg, Ni e Rh, verosimilmente legata a cambiamenti fisiologici, metabolici o nei profili di esposizione. Al contrario, le concentrazioni di As, Pt e Tl sono risultate più elevate nella classe 61-70 anni, suggerendo il possibile contributo di specifiche esposizioni ambientali, occupazionali o legate agli stili di vita. Infine, l’incremento del Pb con l’età è coerente con il noto fenomeno del bioaccumulo e con la mobilizzazione del metallo dai depositi ossei. Nel complesso, questi risultati evidenziano come sesso, età e storia espositiva individuale contribuiscano in modo rilevante alla variabilità osservata nelle concentrazioni biologiche dei metalli.

L'analisi dei superamenti dei VL evidenzia che, sebbene al T0 n. 40 soggetti presentassero concentrazioni superiori ai VL per uno o più metalli, tali superamenti non sono stati generalmente confermati nelle successive campagne di biomonitoraggio. Questo risultato suggerisce che, nella maggior parte dei casi, i valori elevati osservati al T0 fossero riconducibili a esposizioni temporanee, variabilità biologica individuale o circostanze contingenti, piuttosto che a condizioni di esposizione cronica e persistente. Al T3, solo sette soggetti presentavano concentrazioni superiori ai rispettivi VL per As, Cd, Pt o Pb, confermando la limitata frequenza di superamenti nella popolazione studiata. L'assenza di una persistenza sistematica dei valori elevati osservati al T0 depone inoltre per una sostanziale stabilità del quadro espositivo nel lungo periodo e non suggerisce la presenza di una fonte ambientale diffusa in grado di determinare incrementi persistenti delle concentrazioni biologiche. Fanno eccezione due soggetti che hanno mostrato valori superiori al VL per Pt e Pb, rispettivamente, in tutte le campagne di biomonitoraggio. Considerata l'esiguità dei casi osservati, tale evidenza potrebbe riflettere caratteristiche espositive individuali non necessariamente rappresentative della popolazione studiata. Nel complesso, l'evoluzione dei superamenti dei VL nel corso degli undici anni di follow-up supporta l'ipotesi che le elevate concentrazioni rilevate in alcuni individui al T0 rappresentassero prevalentemente eventi sporadici o condizioni individuali specifiche, piuttosto che l'espressione di un'esposizione ambientale costante e diffusa nella popolazione residente.

In aggiunta, le concentrazioni rilevate nella campagna T3 si collocano prevalentemente nell’intervallo dei VR descritti dalle campagne italiane ed europee. Per la maggior parte dei metalli, sia le mediane sia i P95 risultano inferiori o sostanzialmente sovrapponibili ai dati disponibili, delineando un quadro di esposizione generalmente contenuto e compatibile con i livelli di fondo osservati nella popolazione generale. Gli eventuali scostamenti riscontrati per singoli elementi rispetto a specifici studi non appaiono sistematici e devono essere valutati tenendo conto dell’insieme dei dati di confronto disponibili. È tuttavia opportuno considerare che le eventuali differenze osservate tra il presente studio e i VR ottenuti in altri Paesi possono essere attribuibili a diversità dei metodi di campionamento e analisi utilizzati e delle popolazioni campionate in termini di abitudini alimentari, stili di vita, fattori socio-demografici e contesti ambientali, e non necessariamente a differenze nelle sole fonti di esposizione ambientale. Occorre inoltre ricordare che i VR sono strumenti descrittivi della distribuzione nella popolazione generale e non costituiscono soglie tossicologiche, limiti sanitari o valori di intervento.

Il confronto con i valori guida basati sulla salute (HBM e BE) non evidenzia elementi indicativi di una criticità sanitaria diffusa nella popolazione studiata. In particolare, non sono stati riscontrati superamenti dei valori guida per Hg, Sn e Tl, mentre per il Cd la mediana si colloca al di sotto del valore HBM-I. Per quanto riguarda il Cd, la mediana è inferiore a HBM-I, ma una quota non trascurabile supera questo primo livello (16%), mentre sono decisamente più rari i superamenti di HBM-II (0,5%) e del BE (3%), suggerendo situazioni individuali verosimilmente influenzate da fattori quali fumo, età o abitudini alimentari. Un discorso a parte riguarda l'As, per il quale il 61% dei partecipanti presenta concentrazioni superiori al BE disponibile. Tale risultato deve però non è direttamente interpretabile, poiché il valore guida si riferisce alle specie correlate all'As inorganico, mentre nello studio è stato determinato l'As urinario totale. Quest'ultimo include anche forme organiche a bassa tossicità, tipicamente associate al consumo di prodotti ittici, che possono contribuire in modo rilevante alla concentrazione urinaria complessiva e portare a una forte sovrastima della quota di soggetti apparentemente oltre il valore guida.

L'analisi dei fattori individuali e comportamentali conferma che una parte della variabilità dei livelli biologici dei metalli è attribuibile a determinanti diversi dalla residenza in prossimità dell'impianto. In particolare, il fumo è risultato associato a concentrazioni urinarie più elevate di Cd, Tl e Pb, in accordo con il noto contributo del tabacco all'esposizione a questi metalli (Pappas et al., 2006; Adams e Newcomb, 2014). Anche il traffico veicolare ha mostrato alcune associazioni con gli elementi del gruppo del platino (PGE: Pt, Pd, Ir e Rh), riconosciuti come traccianti delle emissioni derivanti dall'usura dei convertitori catalitici (Rauch e Morrison, 2012). Ciò suggerisce un contributo specifico del traffico all'esposizione a questi elementi. I dati sembrano escludere un'associazione specifica con l'impianto, mentre resta plausibile l'ipotesi di un contributo del traffico e dell'usura dei catalizzatori come possibile interpretazione. Riguardo a questo, occorre sottolineare il limite rappresentato dalla copertura non completa delle informazioni sul grafo stradale di Torino e dei comuni limitrofi; alcuni soggetti restano completamente esclusi dall'attribuzione di una categoria di traffico all'indirizzo di residenza (in quanto nel raggio di 100 m non vi sono strade monitorate), mentre ad altri può non essere attribuito correttamente tutto il volume di traffico presente nel raggio di 100 m dall'abitazione.

Per quanto riguarda l'acqua potabile, l'unica differenza significativa ha riguardato il Cr, con concentrazioni più elevate nei consumatori di acqua di rubinetto, probabilmente in relazione al rilascio di tracce di questo elemento dalle reti di distribuzione idrica (Georgaki e Charalambous, 2023).

Tra i fattori alimentari, il consumo di prodotti ittici è risultato associato a concentrazioni più elevate di As e Hg. I prodotti ittici rappresentano infatti una fonte rilevante di As totale, prevalentemente in forme organiche come l'arsenobetaina (Luvonga et al., 2021), e costituiscono la principale via di esposizione alimentare al metilmercurio nella popolazione generale (Zhuzzhassarova et al., 2024). Risultati analoghi sono stati osservati anche per il consumo di crostacei e molluschi (Liao et al., 2020), confermando il ruolo della dieta come importante determinante dell'esposizione ad As e Hg. Per il consumo di riso vi è la tendenza ad un'associazione con concentrazioni più elevate di Cd, in accordo con la capacità di questa coltura di accumulare il metallo dai terreni sommersi (Shi et al., 2020; Pastorelli et al., 2018). Al contrario, né il consumo di riso né quello di acqua hanno mostrato associazioni con l'As, suggerendo che i livelli osservati siano attribuibili principalmente all'assunzione di prodotti ittici piuttosto che all'esposizione ad As inorganico, le cui principali fonti alimentari sono appunto il riso e l'acqua potabile. Occorre sottolineare che le analisi riportate confrontando per stili di vita comportano confronti statistici multipli e quindi vanno valutate in modo prevalentemente esplorativo, senza attribuire troppa importanza a p-value che si trovano leggermente sotto il valore soglia di 0.05. Discorso diverso invece per le relazioni in cui emerge una forte evidenza di significatività statistica dai dati, come ad esempio As e Hg legati al consumo di pesce (con p-value<0.0001)

Per quanto riguarda gli allevatori, il confronto al T3 con i residenti maschi ha evidenziato una sostanziale sovrapponibilità dei livelli misurati per la maggior parte dei metalli. Tuttavia, gli allevatori hanno mostrato concentrazioni significativamente più elevate di Pd, Pt e Sb, differenze che potrebbero riflettere specifiche esposizioni legate alle attività lavorative, all'ambiente rurale o ad altre sorgenti ambientali. L'analisi degli allevatori non evidenzia un incremento progressivo dell'esposizione ai metalli nel corso degli undici anni di follow-up. Analogamente a quanto osservato nei residenti, per la maggior parte dei metalli le concentrazioni sono rimaste stabili o hanno mostrato una tendenza alla diminuzione. Le variazioni significative osservate per Sb, Cr, e Ir sono risultate generalmente di difficile interpretazione, anche in considerazione della limitata numerosità del campione. Fa eccezione il Pt, che ha mostrato un incremento progressivo nel tempo, coerente con quanto osservato anche nei residenti. Poiché tale aumento interessa l'intera popolazione studiata e non esclusivamente gli allevatori, è plausibile che sia legato a sorgenti diffuse presenti sul territorio, come le emissioni associate al traffico veicolare e all'usura delle marmitte catalitiche.

L'analisi dei dati provenienti dalle centraline ARPA e delle campagne di misura effettuate al camino dell'impianto consente infatti di valutare l'andamento degli inquinanti atmosferici nell'area di studio e di verificare l'eventuale presenza di differenze tra le zone maggiormente esposte alle ricadute delle emissioni e le aree di non esposizione. Il confronto tra la stazione di Beinasco-Aldo Mei, ubicata nell'area potenzialmente interessata dalle ricadute del termovalorizzatore, e le stazioni di riferimento non esposte non evidenzia differenze significative nelle concentrazioni di PM10, PM2.5 e NO_2. Gli andamenti temporali risultano infatti sostanzialmente sovrapponibili, suggerendo che i livelli osservati siano influenzati principalmente da fattori meteorologici e dalle sorgenti emissive diffuse presenti nell'area metropolitana torinese.

Infatti, il 2024 è stato caratterizzato da precipitazioni particolarmente abbondanti (al decimo posto negli ultimi settant'anni tra i mesi di giugno più piovosi secondo quanto registrato da Arpa), che hanno favorito la rimozione degli inquinanti atmosferici e determinato valori relativamente bassi di particolato. Anche il 2023 è stato caratterizzato da livelli di piovosità superiori alle medie climatiche 1991-2020. Inoltre, fatto noto è che nel 2020 la Pandemia ha impattato sul traffico. Al contrario, nel 2022, caratterizzato da temperature elevate e condizioni di siccità, sono state registrate concentrazioni più elevate di PM10 e PM2.5. Per maggiori approfondimenti si rimandano alle pagine dedicate sul sito di Arpa Piemonte (Home page | Arpa Piemonte e Home page | Arpa Piemonte).

I risultati delle misure in aria delle stazioni SRRQA risultano coerenti con quelli ottenuti dal monitoraggio delle emissioni del termovalorizzatore. Le concentrazioni misurate al camino si mantengono ampiamente inferiori ai limiti autorizzativi per tutti gli inquinanti considerati, indicando una buona efficienza dei sistemi di abbattimento e l'assenza di criticità emissive nel periodo esaminato. Nel complesso, l'assenza di differenze sostanziali tra le stazioni esposte e quelle non esposte, associata al rispetto dei limiti emissivi da parte dell'impianto, non evidenzia un impatto significativo del termovalorizzatore sulla qualità dell'aria nell'area di studio per gli inquinanti considerati.

7. Conclusioni

Il presente studio di biomonitoraggio ha consentito di valutare l'evoluzione delle concentrazioni di numerosi metalli nella popolazione residente e negli allevatori negli undici anni successivi all'entrata in funzione del termovalorizzatore. Tra i principali punti di forza dello studio vi sono il disegno prospettico, la disponibilità di dati pre-operativi, la continuità del monitoraggio nel tempo, l'elevata qualità analitica delle determinazioni e la presenza di un gruppo di confronto. Tra le limitazioni dello studio va considerata la progressiva riduzione della numerosità campionaria nel corso del follow-up, particolarmente evidente al T3, conseguenza prevedibile di un periodo di osservazione superiore a dieci anni. Nell'interpretazione dei risultati è inoltre necessario considerare il possibile contributo di fattori individuali, ambientali, occupazionali e comportamentali, che possono influenzare i livelli biologici dei metalli indipendentemente dall'esposizione oggetto di studio.

Nel complesso, i risultati non evidenziano un incremento persistente e generalizzato dell'esposizione ai metalli nella popolazione studiata. Per la maggior parte degli elementi analizzati si osserva infatti una sostanziale stabilità o una riduzione delle concentrazioni nel tempo, con andamenti ampiamente sovrapponibili tra i gruppi a differente livello di esposizione. Analogamente, anche negli allevatori non emerge un profilo compatibile con un progressivo accumulo di metalli nel corso del periodo di osservazione.

Pur essendo emerse alcune differenze e variazioni temporali meritevoli di ulteriori approfondimenti, i dati disponibili non supportano l'esistenza di un'associazione coerente e sistematica tra l'attività dell'impianto e i livelli biologici osservati nella popolazione. Nel loro insieme, i risultati indicano che, nel periodo 2013-2024, non è emerso un quadro di esposizione attribuibile in modo univoco alle ricadute emissive del termovalorizzatore. I livelli rilevati risultano inoltre generalmente comparabili a quelli attesi nella popolazione generale e non evidenziano situazioni di criticità sanitaria diffusa.

Le future attività di sorveglianza, integrate con le informazioni ambientali e individuali disponibili, potranno contribuire a migliorare la comprensione dei diversi determinanti di esposizione e a consolidare ulteriormente le evidenze emerse dallo studio.

8. Bibliografia

Adams S, Newcomb P. *Cadmium blood and urine concentrations as measures of exposure: NHANES 1999–2010*. J Expo Sci Environ Epidemiol 2014; 24:163–170

Alimonti A, Bocca B, Mattei D, Pino A. *Programme for biomonitoring the Italian population exposure (PROBE): internal dose of metals.* Roma: Istituto Superiore di Sanità2011 (Rapporti ISTISAN 11/9)

Aprea MC, Apostoli P, Bettinelli M, Lovreglio P, Negri S, Perbellini L, Perico A, Ricossa MC, Salamon F, Scapellato ML, et al. *Urinary levels of metal elements in the non-smoking general population in Italy: SIVR study 2012–2015*. Toxicol Lett 2018;298:177–185

Bocca B, Bena A, Pino A, D'Aversa J, Orengia M, Farina E, Salamina G, Procopio E, Chiusolo M, Gandini M, Cadum E, Musumeci L, Alimonti A. *Human biomonitoring of metals in adults living near a waste-to energy incinerator in ante-operam phase: Focus on reference values and health-based assessments*. Environ Res 2016; 148:338–350

Bocca B, D Mattei D, A Pino A, Alimonti A. *Monitoring of environmental metals in human blood: the need for data validation*. Curr anal chem 2011a;7(4):269-276

Bocca B, Mattei D, Pino A, Alimonti A. *Uncertainty evaluation in the analysis of biological samples by sector field inductively coupled plasma mass spectrometry. Part B: measurements of As, Co, Cr, Mn, Mo, Ni, Sn and V in human serum*. Rapid comm mass spectr 2011b;25(3):453-458

Bocca B, Mattei D, Pino A, Alimonti A. *Uncertainty evaluation in the analysis of biological samples by sector field inductively coupled plasma mass spectrometry. Part A: measurements of Be, Cd, Hg, Ir, Pb, Pd, Pt, Rodio, Sb, U, Tl and W in human serum.* Rapid comm mass spectr 2010;24(16):2363-2369

Bocca B, Petrucci F, Alimonti A, Caroli S. *Traffic-related platinum and rhodium concentrations in the atmosphere of Rome.* J Environ Monit 2003;5(4):563-568

Cañas AI, Cervantes-Amat M, Esteban M, Ruiz-Moraga M, Pérez-Gómez B, Mayor J, Castaño A. *Blood lead levels in a representative sample of the Spanish adult population: the BIOAMBIENT.ES project.* Int J Hyg Environ Health 2014217(4-5):452-9

Cao Z, Lin S, Zhao F, Lv Y, Qu Y, Hu X, Yu S, Song S, Lu Y, Yan H, et al. *Cohort profile: China National Human Biomonitoring (CNHBM)-A nationally representative, prospective cohort in Chinese population*. Environ Int 2021;146:106252

CDC (Centers for Disease Control and Prevention). *Fourth National Report on Human Exposure to Environmental Chemicals, Updated Tables*, March 2021 (Fourth National Report on Human Exposure to Environmental Chemicals Update (cdc.gov)

Forte G, Rapisarda V, Ruggieri F, Battistini B, Bauleo L, Filetti V, Grignani E, Lovreglio P, Matera S, Senia P, Vella F, Vitale E, Bocca B, Iavicoli I. *Human Exposure to Metals and Potential Human Health Risk in a Volcanic Environment in Italy*. Toxics. 2025;13(12):1080

Georgaki MN, Charalambous M. *Toxic chromium in water and the effects on the human body: a systematic review*. J Water Health 2023; 21(2): 205–223

Göen T, Lermen D, Hildebrand J, Bartel-Steinbach M, Weber T, Kolossa-Gehring M. *Discovering time-trends of the German population's exposure to contaminants by analysis of human samples of the German Environmental Specimen Bank (ESB)*. Toxicol Lett 2018;298:194-200

Hays SM, Aylward LL, Gagné M, Andy Nong A, Krishnan K. *Biomonitoring Equivalents for inorganic arsenic.* Regul Toxicol Pharmacol 2010;58(1):1-9

Hays SM, Nordberg M, Yager JW, Aylward LL. *Biomonitoring Equivalents (BE) dossier for cadmium (Cd) (CAS No. 7440-43-9).* Regul Toxicol Pharmacol 2008;51:S49–S56

Health Canada. *Fifth report on human biomonitoring of environmental chemicals in Canada.* Results of the Canadian Health Measures Survey Cycle 5 (2016–2017) 2019

Heitland P, Koster HD*. Human biomonitoring of 73 elements in blood, serum, erythrocytes and urine*. J Trace Elem Med Biol 2021; 64:126706

Liao W, Zhao W, Wu Y, Rong N, Liu X, Li K, Wang G. *Multiple metal(loid)s bioaccessibility from cooked seafood and health risk assessment*. Environ Geochem Health 2020; 42:4037–4050 (

Shi, Z., Carey, M., Meharg, C. et al. Rice Grain Cadmium Concentrations in the Global Supply-Chain. Expo Health 12, 869–876 (2020). https://doi.org/10.1007/s12403-020-00349-6

DOI: 10.1016/j.jfca.2018.02.005

Luvonga C, Rimmer CA, Yu LL, Lee SB. *Organoarsenicals in Seafood: Occurrence, Dietary Exposure, Toxicity, and Risk Assessment Considerations - A Review*. J Agric Food Chem 2020; 68(4):943-960

Morton J, Tan E, Leese E, Cocker J. *Determination of 61 elements in urine samples collected from a non-occupationally exposed UK adult population*. Toxicol Lett 2014;231:179–193

Nisse C, Tagne-Fotso R, Howsam M, Richeval C, Labat L, Leroyer A. *Blood and urinary levels of metals and metalloids in the general adult population of Northern France: The IMEPOGE study, 2008–2010*. Int J Hyg Environ Health 2017;220:341–363

Pappas RS, Polzin GM, Zhang L, Watson CH, Paschal DC, Ashley DL. *Cadmium, lead, and thallium in mainstream tobacco smoke particulate*. Food Chem. Toxicol 2006; 44(5):714-723

Perrais M, Trächsel B, Lenglet S, Pruijm M, Ponte B, Vogt V, Augsburger M, Rousson V, Bochud M, Thomas A. *Reference values for plasma and urine trace elements in a Swiss population-based cohort*. Clin Chem Lab Med 2024;62:2242–2255

Pino A, Amato A, Alimonti A, Mattei D, Bocca B. Human biomonitoring for metals in Italian urban adolescents: data from Latium Region. Int j of hyg environl health 2012;215(2):185-190

Poddalgoda D, Macey K, Jayawardene I, Krishnan K. *Derivation of biomonitoring equivalent for inorganic tin for interpreting population-level urinary biomonitoring data.* Regul Toxicol Pharmacol 2016;81:430–436

Rauch S, Morrison GM. *Platinum group elements as tracers of traffic emissions*. Elements 2008; 4(84):259-263

Rooney JPK, Michalke B, Geoghegan G, Heverin M, Bose-O'Reilly S, Hardiman O, Rakete S. *Urine concentrations of selected trace metals in a cohort of Irish adults*. Environ Sci Pollut Res Int 2022;29:75356–75364

Sáez C, Sánchez A, Yusà V, Dualde P, Fernández SF, López A, Corpas-Burgos F, Aguirre MÁ, Coscollà C. *Health Risk Assessment of Exposure to 15 Essential and Toxic Elements in Spanish Women of Reproductive Age: A Case Study*. Int J Environ Res Public Health 2021;18(24):13012

Schoeters G, Govarts E, Bruckers L, Den Hond E, Nelen V, De Henauw S, Sioen I, Nawrot TS, Plusquin M, Vriens A, et al. *Three cycles of human biomonitoring in Flanders - Time trends observed in the Flemish Environment and Health Study*. Int J Hyg Environ Health 2017;220(2 Pt A):36-45

Schulz C, Wilhelm M, Heudorf U, Kolossa- Gehring M. *Reprint of Update of the reference and HBM values derived by the German Human Biomonitoring Commission*. Int J Hyg Environ Health,2012;215:150–158

Takeda SHK, Kuno R, Barbosa F Jr, Gouveia N. *Trace element levels in blood and associated factors in adults living in the metropolitan area of São Paulo, Brazil.* J Trace Elem Med Biol 2017;44:307-314

Zhuzzhassarova G, Azarbayjani F, Zamaratskaia G. *Fish and Seafood Safety: Human Exposure to Toxic Metals from the Aquatic Environment and Fish in Central Asia*. Int J Mol Sci 2024; 25(3):1590