



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

FACOLTA' DI INGEGNERIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E ARCHITETTURA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL
TERRITORIO

MONITORAGGIO DELLE SOSTANZE PER- E POLIFLUORORALCHILICHE (PFAS)
NEI CORPI IDRICI DELLA REGIONE PIEMONTE DAL 2021 AL 2025

Candidato: Martino Gladiali

Relatori: Proff. Ingg. Maria Cristina Collivignarelli e Prof. Alessandro Abbà
Correlatori: Dott. Ing. Laura Maria Rita Calabria e Stefano Bellazzi

A.A. 2024/2025

Sommario

Introduzione	6
1 Inquadramento, aspetti normativi e tecnologie di trattamento	9
1.1 Inquadramento.....	9
1.2 Definizione e classificazione PFAS	11
1.3 Aspetti normativi: Regione Piemonte	14
1.4 Tecnologie di trattamento.....	18
1.5 Tecnologie chimico-fisiche	20
2 Metodiche per l'elaborazione dei dati e metodo di acquisizione	26
2.1 Il caso della regione Piemonte	27
2.2 Criteri di scelta dei corpi idrici.....	29
2.3 Modalità di elaborazione dei dati	32
2.3.1 Fingerprinting.....	32
2.3.2 Boxplot.....	33
3 Risultati e discussione	34
3.1 Elaborazione statistica: Torrente Agogna	38
3.2 Elaborazione statistica: Fiume Bormida	47
3.3 Elaborazione statistica: Fiume Dora Baltea	59
3.4 Elaborazione statistica: Fiume Dora Riparia.....	67
3.5 Elaborazione statistica: Fiume Maira	75
3.6 Elaborazione statistica: Fiume Po	82
3.7 Elaborazione statistica: Fiume Scrivia	94
3.8 Elaborazione statistica: Fiume Sesia	104
3.9 Elaborazione statistica: Fiume Stura di Demonte	111
3.10 Elaborazione statistica: Fiume Tanaro	118
3.11 Elaborazione statistica: Fiume Ticino	126
3.12 Confronti di qualità fra corpi idrici superficiali	134
Considerazioni finali	142
Bibliografia.....	144

Indice delle figure

Figura 3-1 Mappa dei fiumi analizzati e delle stazioni di misurazione	34
Figura 3-2 - Scala di criticità.....	36
Figura 3-3 - Grafico fingerprinting del torrente Agogna	39
Figura 3-4 – Torrente Agogna: Misurazioni medie 2021-2025	42
Figura 3-10 - Boxplot parametro PFBS nel torrente Agogna	43
Figura 3-11 - Boxplot parametro PFOS nel torrente Agogna	44
Figura 3-12 - Boxplot parametro cC6O4 nel torrente Agogna	45
Figura 3-13 - Grafico fingerprinting del fiume Bormida	48
Figura 3-14 - Fiume Bormida: Misurazioni medie 2021-2025	51
Figura 3-19 - Boxplot parametro PFBA nel fiume Bormida	52
Figura 3-20 - Boxplot parametro PFOA nel fiume Bormida	53
Figura 3-21 - Boxplot parametro PFOS nel fiume Bormida.....	54
Figura 3-22 - Boxplot parametro PFPeA nel fiume Bormida	55
Figura 3-23 - Boxplot parametro ADV N2 nel fiume Bormida.....	56
Figura 3-24 - Boxplot parametro cC6O4 nel fiume Bormida	57
Figura 3-25 - Grafico fingerprinting del fiume Dora Baltea	60
Figura 3-27 - Fiume Dora Baltea: Misurazioni medie 2021-2025.....	63
Figura 3-31 - Boxplot parametro PFOA nel fiume Dora Baltea	64
Figura 3-32 - - Boxplot parametro PFOS nel fiume Dora Baltea	65
Figura 3-33 - Grafico fingerprinting del fiume Dora Riparia	68
Figura 3-34 - Fiume Dora Riparia: Misurazioni medie 2021-2025	71
Figura 3-39 - Boxplot parametro PFOS nel fiume Dora Riparia	73
Figura 3-40 - Boxplot parametro cC6O4 nel fiume Dora Riparia	73
Figura 3-41 - Grafico fingerprinting del fiume Maira.....	76
Figura 3-42 - Fiume Maira: Misurazioni medie 2021-2025	79
Figura 3-47 - Boxplot parametro PFOS nel fiume Maira	80
Figura 3-48 - Grafico fingerprinting del fiume Po	84
Figura 3-53 - Fiume Po: Misurazioni medie 2021-2025.....	87
Figura 3-54 - Boxplot parametro PFOS nel fiume Po: Località 1-3	89
Figura 3-55 - Boxplot parametro PFOS nel fiume Po: Località 4-6	90
Figura 3-56 - Boxplot parametro PFOS nel fiume Po: Località 7-9	91
Figura 3-57 - Boxplot parametro PFOS nel fiume Po: Località 10	92
Figura 3-58 - Grafico fingerprinting del torrente Scrivia.....	95
Figura 3-59 - Torrente Scrivia: Misurazioni medie 2021-2025	98
Figura 3-64 - Boxplot parametro PFOA nel torrente Scrivia, località 1-2.....	99
Figura 3-65 - Boxplot parametro PFOA nel torrente Scrivia, località 3-4.....	100
Figura 3-66 - Boxplot parametro PFOS nel torrente Scrivia, località 1-2	101
Figura 3-67 - Boxplot parametro PFOS nel torrente Scrivia, località 3-4	102
Figura 3-68 - Grafico fingerprinting del fiume Sesia.....	105
Figura 3-69 - Fiume Sesia: Misurazioni medie 2021-2025.....	108
Figura 3-74 - Boxplot parametro PFOS nel fiume Sesia	109
Figura 3-75 - Grafico fingerprinting del fiume Stura di Demonte	112
Figura 3-76 - Fiume Stura di Demonte: Misurazioni medie 2021-2025.....	115
Figura 3-81 - Boxplot parametro PFOS nel fiume Stura di Demonte.....	116
Figura 3-82 - Grafico fingerprinting del fiume Tanaro.....	119
Figura 3-83 - Fiume Tanaro: Misurazioni medie 2021-2025.....	122
Figura 3-88 - Boxplot parametro PFOS nel fiume Tanaro.....	123
Figura 3-89 - Boxplot parametro cC6O4 nel fiume Tanaro.....	124
Figura 3-90 - Grafico fingerprinting del fiume Ticino.....	127

Figura 3-91 - Fiume Ticino: Misurazioni medie 2021-2025.....	130
Figura 3-96 - Boxplot parametro PFOS nel fiume Ticino nelle località 1 e 2	131
Figura 3-97 - Boxplot parametro PFOS nel fiume Ticino nelle località 3 e 4	132
Figura 3-98 - Scala di criticità.....	134

Indice delle tabelle

Tabella 1-1 - Valori limite di emissione PFAS negli scarichi in acque superficiali (Allegato A)	15
Tabella 2-1 - Tabella riepilogativa dei processi di degradazione chimico-fisica presentati	25
Tabella 3-1 – Corpi idrici selezionati per l'analisi, con indicazione del numero di stazioni di monitoraggio, dei campioni disponibili e del periodo di copertura temporale	30
Tabella 4-1 - Fiumi analizzati con relative stazioni di monitoraggio e coordinate.....	35
Tabella 4-2 - Misurazioni del torrente Agogna e % oltre il limite di rilevabilità	38
Tabella 4-3 - Misurazioni del fiume Bormida e % oltre il limite di rilevabilità	47
Tabella 4-4 - Misurazioni del fiume Dora Baltea e % oltre il limite di rilevabilità.....	59
Tabella 4-5 - Misurazioni del fiume Dora Riparia e % oltre il limite di rilevabilità	67
Tabella 4-6 - Misurazioni del fiume Maira e % oltre il limite di rilevabilità.....	75
Tabella 4-7 - Misurazioni del fiume Po e % oltre il limite di rilevabilità.....	83
Tabella 4-8 - Misurazioni del torrente Scrivia e % oltre il limite di rilevabilità.....	94
Tabella 4-9 - Misurazioni del fiume Sesia e % oltre il limite di rilevabilità.....	104
Tabella 4-10 - Misurazioni del fiume Stura di Demonte e % oltre il limite di rilevabilità....	111
Tabella 4-11 - Misurazioni del fiume Tanaro e % oltre il limite di rilevabilità.....	118
Tabella 4-12 - Misurazioni del fiume Ticino e % oltre il limite di rilevabilità.....	126
Tabella 4-13 - Parametri critici individuati nei fiumi monitorati nel 2021	135
Tabella 4-14 - Parametri critici individuati nei fiumi monitorati nel 2022.....	136
Tabella 4-15 - Parametri critici individuati nei fiumi monitorati nel 2023	137
Tabella 4-16 - Parametri critici individuati nei fiumi monitorati nel 2024.....	138
Tabella 4-17 - Parametri critici individuati nei fiumi monitorati nel 2025.....	139

Introduzione

Le sostanze perfluoroalchiliche e polifluoroalchiliche, note con l'acronimo PFAS (Per- and Polyfluoroalkyl Substances), rappresentano un gruppo eterogeneo di composti sintetici che trovano ampia applicazione come tensioattivi, rivestimenti protettivi, schiume antincendio e nella produzione di alcuni componenti elettronici (Quan et al., 2025) (Zhou et al., 2025)

La loro sintesi su scala industriale ha avuto inizio negli anni Cinquanta del Novecento e da allora questi composti si sono diffusi capillarmente in numerosi settori produttivi, dalla chimica tessile all'industria alimentare, dall'aeronautica ai dispositivi medici, diventando parte integrante di molteplici processi tecnologici moderni. Si stima che la famiglia dei PFAS comprenda oggi migliaia di sostanze distinte, caratterizzate da strutture molecolari molto variabili ma accomunate dalla presenza di uno o più legami carbonio-fluoro (C–F) nella loro catena alchilica. (Zhou et al., 2025)

Proprio i legami C–F, tra i più forti presenti in chimica organica con un'energia di dissociazione di circa 544 kJ/mol, conferiscono a questi composti proprietà straordinarie di idrofobicità, stabilità termica e resistenza ai processi di ossidazione chimica e biologica. Tali proprietà si traducono in una persistenza eccezionale negli ambienti naturali, rendendo i PFAS sostanzialmente inattaccabili dai normali processi di degradazione abiotica e biotica. Per questo motivo, i PFAS sono universalmente definiti nella letteratura scientifica come "forever chemicals", sostanze chimiche eterne, a sottolineare la loro capacità di permanere nell'ambiente per decenni o addirittura secoli senza subire una degradazione significativa. (Zhou et al., 2025)

I PFAS sono tipicamente categorizzati in due gruppi principali: composti non polimerici e polimerici. Alcuni composti polimerici, come il politetrafluoroetilene (PTFE), comunemente noto con il nome commerciale Teflon, sono classificati come "polimeri a basso rischio" a causa del loro elevato peso molecolare e della loro eccezionale stabilità chimica, che ne limita la biodisponibilità e la mobilità ambientale. Al contrario, i PFAS non polimerici comprendono una gamma molto più ampia di specie chimiche, tra cui l'acido perfluorooottanoico (PFOA) e l'acido perfluorooottansolfonico (PFOS), che generalmente mostrano una tossicità più elevata, una maggiore solubilità in acqua e pongono pertanto rischi ambientali e sanitari più significativi. (Zhou et al., 2025)

Durante le fasi di produzione, utilizzo e smaltimento, questi composti possono essere rilasciati nell'ambiente attraverso molteplici vie: effluenti industriali, acque reflue domestiche e urbane, percolati provenienti da discariche, deflussi agricoli e dispersione atmosferica dei precursori volatili, che possono successivamente depositarsi e trasformarsi in PFAS nelle matrici ambientali. Attualmente, i PFAS sono stati ampiamente rilevati in diverse matrici ambientali, tra cui acque superficiali e sotterranee, sedimenti, suolo e atmosfera, suscitando particolare interesse e allarme a livello scientifico e regolatorio. (Zhou et al., 2025) (Quan et al., 2025)

Una volta introdotti nell'ambiente, i PFAS mostrano un elevato potenziale bioaccumulativo e di amplificazione trofica: possono essere trasferiti lungo la catena alimentare, accumulandosi progressivamente negli organismi ai livelli trofici superiori, inclusi gli esseri umani. Studi recenti hanno dimostrato che l'esposizione ai PFAS può indurre molteplici effetti tossici sul biota, tra cui alterazioni del sistema endocrino, inibizione della riproduzione e dello sviluppo embrionale, nonché tossicità epatica, immunologica e potenziali effetti cancerogeni. Nell'uomo, il PFOS presenta un tempo di emivita biologica superiore a cinque anni, mentre il PFOA persiste nell'organismo per circa 3,5 anni, accumulandosi prevalentemente nel sangue, nel fegato e nei tessuti adiposi. (Leung et al., 2022) (Zhou et al., 2025)

Fiumi e laghi fungono da compartimenti importanti per l'accumulo, il trasporto e il destino ambientale dei PFAS. I sistemi fluviali, con la loro elevata connettività idrologica e le intense interazioni con gli usi del suolo delle aree circostanti, agricoltura intensiva, insediamenti urbani, siti industriali, agiscono come vettori primari di diffusione dei PFAS verso i corpi idrici ricettori. Viceversa, i laghi, per le loro caratteristiche morfologiche e idrologiche, tra cui la minore turbolenza e i lunghi tempi di residenza idraulica, tendono ad accumulare tali sostanze nei sedimenti e nella colonna d'acqua, fungendo di fatto da serbatoi di contaminazione a lungo termine. Negli ultimi anni, con i continui progressi nelle tecnologie analitiche e di rilevamento, incluse la spettrometria di massa ad alta risoluzione e la cromatografia liquida accoppiata a triplo quadrupolo, e con la crescente consapevolezza dei rischi per la salute pubblica, i meccanismi di trasporto e gli effetti ecologici dei PFAS nei sistemi acquatici hanno ricevuto attenzione crescente da parte della comunità scientifica internazionale. (Zhou et al., 2025)

Analizzare e definire il comportamento dei PFAS nei sistemi idrici, dalla loro distribuzione nelle acque superficiali e sotterranee alla loro presenza nelle acque destinate al consumo umano, è fondamentale per valutare i rischi per la salute dell'uomo e sviluppare strategie efficaci di gestione, controllo e bonifica. I PFAS, originati prevalentemente da attività antropiche, sono altamente persistenti e bioaccumulabili, e possono porre rischi a lungo termine per gli ecosistemi acquatici e per la salute umana attraverso l'esposizione diretta all'acqua potabile e indiretta attraverso la catena alimentare. Studi su larga scala e multi-parametro sui PFAS forniscono dati essenziali per supportare lo sviluppo normativo, come il recente aggiornamento della Direttiva Europea sulle Acque Potabili (2020/2184/UE) che ha introdotto per la prima volta limiti specifici per i PFAS, aumentare la consapevolezza pubblica e informare le autorità competenti al fine di garantire la sicurezza dell'acqua e la protezione della salute ambientale. (Quan et al., 2025)

Alla luce della problematica emergente e sempre più urgente rappresentata dai PFAS, risulta di fondamentale importanza approfondire la conoscenza sulle proprietà chimiche di questi composti, sui meccanismi di dispersione ambientale, sulle fonti di esposizione umana e sugli effetti sulla salute, nonché sulle tecnologie disponibili per la loro rimozione dalle matrici acquose, per la bonifica dei siti contaminati e per il trattamento efficace delle acque reflue e potabili.

La presente trattazione verterà sulla problematica dei PFAS, presentando innanzitutto una caratterizzazione di queste sostanze e delle loro categorie. Verrà successivamente esaminato il quadro normativo vigente nella regione del Piemonte, la quale ha avviato una campagna di monitoraggio e controllo in risposta alla contaminazione ambientale da PFAS e a carattere preventivo a seguito di quanto emerso dalle analisi e le campagne svolte nella regione Veneto dal 2013. Verranno poi presentate a livello generale le tecnologie biologiche, chimico-fisiche e termiche per la rimozione di queste sostanze ed in seguito approfondite le tecnologie chimico-fisiche. Infine, verrà presentata un'analisi approfondita della campagna di monitoraggio condotta nella regione Piemonte per la rilevazione dei PFAS nelle acque superficiali. Questa analisi permetterà di analizzare la distribuzione spaziale e temporale delle sostanze perfluoroalchiliche nei principali corpi idrici superficiali della regione Piemonte dal 2021 al 2025, di identificare le aree maggiormente esposte o sollecitate e di individuare le potenziali sorgenti di contaminazione.

Tra gli aspetti che caratterizzano il presente lavoro vi è l'ampiezza del set di composti considerati: i 19 composti appartenenti alla classe PFAS analizzati, comprendenti sia composti a catena lunga che a catena corta, consentono una caratterizzazione più articolata ed approfondita che permetta di definire un quadro di contaminazione molto esteso rispetto agli studi che si concentrano tipicamente su un numero ristretto di sostanze prioritarie. L'approccio metodologico adottato, basato sulla combinazione di analisi statistiche descrittive a partire dai dati grezzi quali misurazioni e selezione, boxplot per ogni stazione di monitoraggio e fingerprinting composizionali per corpo idrico, consente di affiancare alla lettura quantitativa delle concentrazioni una lettura qualitativa della firma chimica di ciascun sito. Questa analisi porta a identificare delle zone di alta probabilità di presenza di immissari contaminati da PFAS nella regione Piemonte ed evidenzia il corpo idrico superficiale maggiormente esposto a contaminazione.

1 Inquadramento, aspetti normativi e tecnologie di trattamento

1.1 Inquadramento

Le sostanze per- e polifluoroalchiliche (PFAS) costituiscono una classe estremamente ampia di composti chimici di origine antropica, la cui crescente rilevanza scientifica e normativa è legata principalmente alla loro diffusione globale, alla persistenza ambientale e ai potenziali effetti avversi sulla salute umana e sugli ecosistemi. Tali sostanze sono caratterizzate dalla presenza di legami carbonio-fluoro, tra i più stabili e forti conosciuti in chimica organica, che conferisce loro un'eccezionale resistenza alla degradazione chimica, termica e biologica. Questa stabilità intrinseca è alla base delle proprietà che ne hanno reso attrattivo l'impiego industriale, quali la repellenza all'acqua e agli oli, la resistenza alle alte temperature e le proprietà tensioattive, ma costituisce al tempo stesso la causa principale della loro persistenza nell'ambiente e negli organismi viventi. I PFAS sono stati prodotti su larga scala a partire dalla seconda metà del XX secolo e non si trovano naturalmente in ambiente, essendo il risultato esclusivo di processi industriali quali la fluorurazione elettrochimica e la telomerizzazione. Nel corso dei decenni, la produzione e l'utilizzo di queste sostanze si è estesa a un numero sempre maggiore di settori applicativi, tra cui l'industria tessile, alimentare, elettronica, aeronautica e quella degli agenti estinguenti, determinando una dispersione capillare nell'ambiente globale. (Brunn et al., 2023)

L'interesse scientifico e regolatorio nei confronti dei PFAS si è intensificato a partire dagli anni 2000, in seguito alla scoperta della presenza diffusa di alcuni composti, in particolare l'acido perfluorooottanoico (PFOA) e l'acido perfluorooottansolfonico (PFOS), in diversi comparti ambientali, tra cui acque superficiali e sotterranee, suoli, aria e biota, nonché in numerose matrici biologiche umane come sangue, siero e latte materno. Questa ubiquità ha sollevato preoccupazioni crescenti riguardo all'esposizione cronica delle popolazioni, anche in aree geograficamente distanti dai principali siti di produzione o utilizzo, a testimonianza della capacità di trasporto a lunga distanza di alcune di queste sostanze. PFOA e PFOS sono stati successivamente inclusi tra gli inquinanti organici persistenti (POP) nell'ambito della Convenzione di Stoccolma, rispettivamente nel 2009 e nel 2019, sancendo a livello internazionale il riconoscimento della loro pericolosità e la necessità di misure di controllo e riduzione dell'esposizione su scala globale. (Wang et al., 2021)

Parallelamente all'eliminazione progressiva dei composti a catena lunga come PFOA e PFOS, l'industria ha introdotto sul mercato sostanze sostitutive, spesso a catena più corta o con strutture chimiche alternative, nella speranza di ridurre la persistenza ambientale e la tossicità. Tuttavia, evidenze scientifiche crescenti indicano che molti di questi composti di nuova generazione presentano profili di rischio non trascurabili e che la loro diffusione sta replicando, almeno in parte, le problematiche associate ai predecessori. La classe dei PFAS comprende oggi migliaia di sostanze distinte, con stime che variano tra le 4.700 e oltre 10.000 strutture chimiche identificate, rendendo estremamente complessa

sia la valutazione dell'esposizione complessiva sia la definizione di strategie regolamentari efficaci. In questo contesto, la comunità scientifica e le agenzie regolatorie internazionali si stanno orientando verso un approccio di classe, che preveda la gestione e la regolamentazione dei PFAS come gruppo unitario piuttosto che composto per composto, al fine di evitare la sostituzione sistematica di una sostanza problematica con un'altra strutturalmente analoga. (Ackerman Grunfeld et al., 2024)

La complessità della problematica PFAS risiede dunque non soltanto nella vastità della classe chimica considerata, ma anche nella molteplicità delle vie di esposizione umana, che includono l'ingestione di acqua e alimenti contaminati, il contatto con materiali di consumo e l'inalazione di polveri e aerosol, e nella varietà degli effetti tossicologici documentati o sospettati, tra cui alterazioni del sistema immunitario ed endocrino, effetti avversi sulla riproduzione e sullo sviluppo, dislipidemia e aumentato rischio di alcune neoplasie. La valutazione del rischio risulta ulteriormente complicata dall'esposizione simultanea a miscele di PFAS, i cui effetti combinati sono ancora oggetto di ricerca attiva. (Brunn et al., 2023) (Wang et al., 2021)

1.2 Definizione e classificazione PFAS

Dal punto di vista della definizione, i PFAS rappresentano una categoria chimica particolarmente complessa. La definizione attualmente più condivisa a livello internazionale è quella proposta dall'OECD nel 2021, secondo cui i PFAS sono sostanze fluorurate contenenti almeno un atomo di carbonio completamente fluorurato, generalmente sotto forma di gruppo metilico perfluorurato ($-\text{CF}_3$) o metilenico perfluorurato ($-\text{CF}_2-$). (Wang et al., 2021)

Questa definizione ha rappresentato un importante avanzamento rispetto alle precedenti, in quanto ha ampliato il perimetro della classe includendo numerosi composti precedentemente esclusi. L'adozione di una definizione ampia ha portato a una significativa espansione del numero di sostanze riconducibili ai PFAS. Studi recenti evidenziano come il numero di composti potenzialmente classificabili come PFAS possa raggiungere diverse migliaia, fino a milioni di strutture chimiche nei database globali, a seconda dei criteri adottati. Questo dato mette in evidenza la straordinaria eterogeneità della classe e le difficoltà associate alla sua gestione. (Schymanski et al., 2023)

Dal punto di vista chimico, i PFAS sono caratterizzati dalla presenza del legame carbonio-fluoro, uno dei più forti in chimica organica. Tale legame conferisce alle molecole grande stabilità, rendendole resistenti alla degradazione termica, chimica e biologica. Questa caratteristica è alla base del comportamento ambientale dei PFAS, che tendono a persistere per lunghi periodi nei diversi comparti ambientali, motivo per cui sono spesso definiti "forever chemicals". (Ackerman Grunfeld et al., 2024)

Le proprietà chimico-fisiche dei PFAS sono ulteriormente caratterizzate da una combinazione unica di idrofobicità e lipofobicità, che li rende particolarmente efficaci come tensioattivi. Questa peculiarità ha favorito il loro utilizzo in numerose applicazioni industriali e commerciali, tra cui rivestimenti antiaderenti, materiali impermeabili, prodotti tessili e schiume antincendio. Tuttavia, la stessa stabilità che ne determina l'utilità tecnologica contribuisce anche alla loro diffusione ambientale e alla difficoltà di rimozione (Buck et al., 2011) (OECD, 2021)

La classificazione dei PFAS rappresenta un ulteriore elemento di complessità. Un primo criterio distingue tra composti perfluorurati e polifluorurati. I primi presentano una catena carboniosa completamente fluorurata, mentre i secondi contengono atomi di carbonio parzialmente fluorurati. Questa distinzione è rilevante in quanto i composti polifluorurati possono trasformarsi in PFAS più stabili, contribuendo alla formazione di contaminanti persistenti nell'ambiente. (Brunn et al., 2023)

Un secondo criterio classificatorio si basa sulla struttura chimica e sui gruppi funzionali. In questo contesto, un ruolo centrale è svolto dagli acidi perfluoroalchilici (PFAAs), che comprendono gli acidi carbossilici (PFCAs) e gli acidi solfonici (PFSAs). Tali composti sono considerati prodotti finali di degradazione e risultano particolarmente persistenti e bioaccumulabili. Accanto a questi, esistono

numerosi precursori, tra cui i fluoro-telomeri, che possono trasformarsi in PFAs attraverso processi ambientali complessi. (OECD, 2021) (Wang et al., 2021)

Particolarmente rilevante è il ruolo dei precursori nella dinamica ambientale dei PFAs. Molte sostanze immesse nell'ambiente non sono direttamente persistenti, ma possono subire trasformazioni chimiche e biologiche che portano alla formazione di composti terminali altamente stabili. Questo fenomeno rende estremamente complessa la valutazione del destino ambientale e dell'esposizione umana, in quanto implica la necessità di considerare non solo le sostanze originarie, ma anche i loro prodotti di degradazione. (OECD, 2021)

Un ulteriore criterio di classificazione riguarda la lunghezza della catena carboniosa. I PFAs vengono comunemente distinti in composti a catena lunga e a catena corta. I primi sono generalmente associati a una maggiore accumulazione biologica e a una maggiore tossicità, mentre i secondi, pur essendo meno bioaccumulabili, risultano più mobili nell'ambiente e quindi potenzialmente più diffusi nei sistemi idrici. (Brunn et al., 2023)

Negli ultimi anni, la progressiva restrizione dei PFAs a catena lunga ha portato alla loro sostituzione con composti a catena corta o con nuovi PFAs di tipo eterico, i cui effetti a lungo termine sono ancora oggetto di studio.

La complessità dei PFAs si riflette anche nelle difficoltà analitiche associate alla loro identificazione e quantificazione. Le tecniche tradizionali risultano spesso insufficienti per rilevare l'intera gamma di sostanze presenti, rendendo necessario l'impiego di metodologie avanzate, come la spettrometria di massa ad alta risoluzione. Tali strumenti hanno consentito di ampliare significativamente il numero di composti identificabili, ma hanno anche evidenziato la presenza di numerose sostanze non ancora completamente caratterizzate. (Schymanski et al., 2023)

Dal punto di vista ambientale, i PFAs sono caratterizzati da una distribuzione globale. Essi sono stati rilevati in acque superficiali e sotterranee, suoli, aria e biota, inclusi organismi umani. La loro presenza è attribuibile sia a emissioni dirette durante la produzione e l'uso, sia a processi di trasporto a lunga distanza, che ne favoriscono la diffusione su scala planetaria. Inoltre, numerosi studi evidenziano come i PFAs possano accumularsi negli organismi viventi e aumentare lungo le catene alimentari, con possibili effetti tossici a carico di diversi organi e sistemi, tra cui fegato, reni, sistema endocrino e sistema immunitario. Tali evidenze hanno contribuito a rafforzare la percezione dei PFAs come una delle principali problematiche emergenti nel campo dell'inquinamento chimico. (Brunn et al., 2023)

Alla luce di quanto esposto, risulta evidente come la gestione dei PFAs rappresenti una sfida complessa, che richiede un approccio integrato e multidisciplinare. La definizione e classificazione di queste sostanze costituiscono un passaggio fondamentale per lo sviluppo di strategie efficaci di monitoraggio,

valutazione del rischio e regolamentazione. Tuttavia, la continua evoluzione delle conoscenze scientifiche e l'ampliamento dell'universo PFAS rendono necessario un costante aggiornamento dei criteri adottati, nonché l'adozione di approcci flessibili e adattivi.

1.3 Aspetti normativi: Regione Piemonte

La crescente rilevanza ambientale delle sostanze per- e polifluoroalchiliche (PFAS), dovuta alla loro elevata persistenza, mobilità e potenziale tossicità, ha portato all'introduzione di specifiche misure normative anche a livello regionale. In questo contesto, la Regione Piemonte ha adottato un approccio particolarmente avanzato nel panorama italiano, disciplinando in modo puntuale gli scarichi contenenti PFAS attraverso la Legge Regionale 19 ottobre 2021, n. 25. Tale intervento normativo si inserisce nel quadro del D.lgs. 152/2006, che consente alle Regioni di definire limiti più restrittivi rispetto a quelli nazionali in funzione delle caratteristiche ambientali del territorio e della necessità di prevenire rischi emergenti.

L'elemento centrale della disciplina piemontese è rappresentato dall'articolo 74 della legge regionale, che introduce per la prima volta limiti specifici per le sostanze perfluoroalchiliche negli scarichi in acque superficiali. Tale disposizione si caratterizza per un'impostazione fortemente preventiva, che mira a contenere alla fonte l'immissione di questi contaminanti nell'ambiente. In particolare, la norma stabilisce che gli scarichi devono rispettare valori limite di emissione definiti in un apposito Allegato A, che costituisce parte integrante della legge e rappresenta uno degli strumenti più rilevanti per la gestione del rischio associato ai PFAS. (Regione Piemonte, 2021)

L'Allegato A assume un ruolo fondamentale, in quanto definisce in modo dettagliato i limiti di concentrazione ammissibili per una serie di sostanze appartenenti alla classe dei PFAS negli scarichi in acque superficiali. Tali limiti sono espressi in microgrammi per litro e risultano differenziati in funzione della specifica sostanza, riflettendo le diverse caratteristiche chimico-fisiche, la persistenza ambientale e il potenziale di bioaccumulo. Tra i composti regolamentati si trovano, in particolare, il PFOS (acido perfluorooottansolfonico) e il PFOA (acido perfluorooottanoico), che sono tra i più studiati e riconosciuti per la loro pericolosità. Per il PFOS, la normativa prevede un valore limite estremamente restrittivo, pari a 0,02 µg/L nei primi 36 mesi, ulteriormente ridotto a 0,00065 µg/L in una fase successiva, evidenziando una chiara volontà di progressiva riduzione delle emissioni. Analogamente, per il PFOA è previsto un limite iniziale di 0,30 µg/L, successivamente ridotto a 0,10 µg/L dopo 36 mesi. Accanto a questi composti, l'Allegato A include anche altri PFAS a catena corta, quali PFBA, PFPeA, PFHxA e PFBS, per i quali sono stabiliti limiti specifici, generalmente meno restrittivi ma comunque significativi in termini di controllo delle emissioni (Regione Piemonte, 2021)

Un elemento di particolare interesse tecnico riguarda la struttura dell'Allegato A, che non si limita a fornire valori numerici, ma introduce implicitamente un approccio regolatorio basato sulla priorità delle sostanze più critiche. I limiti più stringenti sono infatti assegnati ai composti a maggiore persistenza e bioaccumulo, come PFOS e PFOA, mentre per i PFAS a catena corta si adottano valori più elevati, coerenti con il loro diverso comportamento ambientale. Inoltre, la presenza di una doppia soglia temporale per alcune sostanze rappresenta un meccanismo di riduzione dei limiti, che consente una

transizione graduale verso standard più severi. Questo approccio risulta particolarmente rilevante in ambito industriale, dove l'adeguamento tecnologico dei sistemi di trattamento richiede tempi e investimenti significativi.

Dal punto di vista applicativo, l'Allegato A svolge quindi una funzione duplice: da un lato costituisce uno strumento di controllo ambientale, dall'altro rappresenta una guida operativa per la progettazione e l'adeguamento degli impianti di trattamento delle acque reflue. I limiti imposti implicano infatti l'adozione di tecnologie avanzate, quali adsorbimento su carboni attivi o processi a membrana, che risultano tra le poche soluzioni efficaci per la rimozione dei PFAS.

A fini di chiarezza e sintesi, si riporta di seguito la Tabella 1-1 riassuntiva dei principali valori limite di emissione previsti dall'Allegato A.

Sostanza o gruppi di sostanze	N° CAS	Valore-limite di emissione (VLE) allo scarico ($\mu\text{g/L}$) ¹ e termini temporali per il loro conseguimento dalla data di entrata in vigore del presente provvedimento
Acido perfluorottansolfonico e suoi sali (PFOS)	1763-23-1	0,02 nei primi 36 mesi dalla data di entrata in vigore 0,00065 dopo 36 mesi dalla data di entrata in vigore
Acido perfluorottanoico (PFOA)	335-67-1	0,30 nei primi 36 mesi dalla data di entrata in vigore 0,10 dopo 36 mesi dalla data di entrata in vigore
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	375-22-4	7,0 alla data di entrata in vigore
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	2706-90-3	3,0 alla data di entrata in vigore
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	307-24-4	1,0 alla data di entrata in vigore
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	375-73-5	3,0 alla data di entrata in vigore
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHpA)	375-85-9	1,0 alla data di entrata in vigore
Acido perfluoroesansolfonico (PFHxS)	355-46-4	1,0 alla data di entrata in vigore
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	375-95-1	1,0 alla data di entrata in vigore
Acido perfluorodecanoico (PFDeA)	335-76-2	1,0 alla data di entrata in vigore
Acido perfluoroundecanoico (PFUnA)	2058-94-8	1,0 alla data di entrata in vigore
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	307-55-1	1,0 alla data di entrata in vigore
Perfluoro {acetic acid, 2-[[5-methoxy-1,3-dioxolan-4-yl]oxy]}, ammonium salt (cC6O4)	1190931-27-1	7,0 a partire dal 13° mese e fino al 24° mese dalla data di entrata in vigore 3,5 dal 25° mese al 36° mese dalla data di entrata in vigore 0,5 dal 37° mese dalla data di entrata in vigore in poi
1-Propene, 1,1,2,3,3,3-hexafluoro-, telomer with chlorotrifluoroethene, oxidized, reduced, hydrolyzed (ADV)	329238-24-6	2,0 a partire dal 13° mese e fino al 24° mese dalla data di entrata in vigore 0,5 dal 25° mese dalla data di entrata in vigore in poi
altri PFAS (molecole con catena a 3-6 atomi di Carbonio, anche di nuova generazione)	-	3,0 (per ogni singolo composto) alla data di entrata in vigore
altri PFAS (molecole con catena a 7 atomi di Carbonio o più, anche di nuova generazione)	-	1,0 (per ogni singolo composto) alla data di entrata in vigore

¹ Da riferire a campioni medio compositi su 24 ore per ogni tipologia di scarico in acqua superficiale

Tabella 1-1 - Valori limite di emissione PFAS negli scarichi in acque superficiali (Allegato A)

La normativa stabilisce inoltre che i valori limite debbano essere verificati mediante campionamenti rappresentativi, in particolare attraverso campioni medi composti su un arco temporale di 24 ore. Questa scelta metodologica è finalizzata a garantire una valutazione più accurata delle concentrazioni effettivamente scaricate, evitando possibili distorsioni legate a campionamenti puntuali e assicurando una maggiore affidabilità dei controlli. (Regione Piemonte, 2022)

Oltre alla definizione dei limiti, la legge introduce specifiche disposizioni in merito alla gestione degli scarichi. In particolare, viene stabilito il divieto di scarico sul suolo e negli strati superficiali del sottosuolo per reflui contenenti PFAS, ad eccezione di situazioni particolari legate alla gestione degli scaricatori di piena. Tale misura assume un'importanza fondamentale alla luce della capacità di queste sostanze di infiltrarsi nel terreno e contaminare le falde acquifere, con conseguenze potenzialmente rilevanti per l'approvvigionamento idrico e per la salute pubblica. (Regione Piemonte, 2021)

Per quanto riguarda gli scarichi industriali recapitanti in pubblica fognatura, la normativa prevede un sistema di controllo articolato, in cui gli enti di governo dell'ambito territoriale e i gestori del servizio idrico integrato sono chiamati a definire limiti intermedi e prescrizioni tecniche coerenti con i valori finali stabiliti per gli scarichi in acque superficiali. Questo approccio consente di intervenire lungo tutta la filiera degli scarichi, riducendo il carico inquinante già nelle fasi iniziali e prevenendo il trasferimento di PFAS agli impianti di depurazione, che spesso non sono progettati per rimuovere efficacemente tali sostanze. (Regione Piemonte, 2022)

L'attuazione operativa della normativa è stata ulteriormente definita attraverso la Deliberazione della Giunta Regionale n. 60-5220 del 14 giugno 2022, che fornisce indicazioni tecniche e procedurali per l'applicazione dell'articolo 74. Tale deliberazione individua criteri per l'attività di controllo, supporta le autorità competenti nel rilascio delle autorizzazioni e contribuisce a garantire un'applicazione uniforme delle disposizioni su tutto il territorio regionale. In particolare, vengono individuati i settori produttivi a maggiore rischio di utilizzo di PFAS e vengono fornite indicazioni per il monitoraggio e la gestione degli scarichi. (Regione Piemonte, 2022)

La normativa regionale si inserisce inoltre in un più ampio sistema di monitoraggio ambientale, che coinvolge ARPA Piemonte e altri enti competenti. Le attività di monitoraggio delle acque superficiali, sotterranee e potabili consentono di valutare la diffusione dei PFAS nel territorio, di individuare le principali fonti di contaminazione e di verificare l'efficacia delle misure adottate. Questo approccio integrato, che combina regolamentazione e monitoraggio, rappresenta uno degli elementi di maggiore innovatività della strategia piemontese.

Nel complesso, la disciplina introdotta dalla Regione Piemonte si configura come un modello avanzato di gestione del rischio ambientale associato ai PFAS, caratterizzato da un approccio preventivo, da limiti specifici e progressivamente più restrittivi e da un sistema di controllo articolato lungo tutta la filiera

degli scarichi. L'attenzione rivolta all'Allegato A, con la definizione puntuale dei valori limite per le diverse sostanze, rappresenta un elemento chiave di tale sistema, consentendo di tradurre in termini operativi gli obiettivi di tutela ambientale. In un contesto in cui la normativa nazionale ed europea è ancora in fase di evoluzione, l'esperienza piemontese costituisce un importante riferimento per lo sviluppo di politiche future in materia di PFAS.

1.4 Tecnologie di trattamento

La crescente attenzione nei confronti delle sostanze per- e polifluoroalchiliche (PFAS) è strettamente legata alla loro diffusione estesa nell'ambiente e alla loro elevata persistenza. Queste sostanze, caratterizzate da proprietà peculiari quali l'idrofobicità, sono state largamente impiegate in numerosi settori industriali e commerciali. Tuttavia, proprio le caratteristiche chimiche che ne hanno determinato il successo applicativo rappresentano oggi una delle principali criticità in termini ambientali e sanitari. In particolare, la presenza del legame carbonio-fluoro conferisce ai PFAS una stabilità eccezionale, che li rende estremamente resistenti ai processi naturali di degradazione e ai trattamenti convenzionali delle acque. (Wanninayake, 2021)

Nel contesto della gestione delle acque contaminate, la rimozione dei PFAS rappresenta una sfida complessa che richiede l'impiego di tecnologie avanzate e, spesso, l'integrazione di più processi. Le tecnologie disponibili possono essere classificate in tre macrocategorie: biologiche, chimico-fisiche e termiche. Tale classificazione riflette non solo i meccanismi di rimozione, ma anche il livello di trasformazione dei contaminanti.

I trattamenti biologici, largamente utilizzati negli impianti di depurazione per la rimozione della sostanza organica biodegradabile, risultano generalmente inefficaci nei confronti dei PFAS. La loro struttura altamente fluorurata impedisce infatti l'attacco da parte degli enzimi microbici, limitando fortemente i processi di biodegradazione. Studi recenti evidenziano come, in alcuni casi, i processi biologici possano addirittura favorire la trasformazione di precursori PFAS in composti più persistenti e mobili, come PFOA e PFOS, aggravando il problema ambientale. (Marín-Marín et al., 2023)

Sebbene siano in corso ricerche su consorzi microbici specializzati e condizioni operative estreme, tali approcci risultano ancora lontani da una reale applicazione su scala industriale.

Le tecnologie chimico-fisiche rappresentano attualmente l'approccio più consolidato e diffuso per la rimozione dei PFAS dalle acque. Esse comprendono processi di separazione, come adsorbimento e filtrazione a membrana, e processi di trasformazione, come ossidazione avanzata, riduzione avanzata ed elettrochimica. I processi di separazione consentono di rimuovere efficacemente i PFAS dalla fase acquosa, ma non ne determinano la distruzione, comportando la formazione di flussi concentrati che devono essere ulteriormente trattati. Questo aspetto rappresenta una delle principali criticità nella gestione complessiva del trattamento, in quanto implica la necessità di tecnologie aggiuntive per la gestione dei rifiuti secondari. (Wanninayake, 2021)

L'adsorbimento su carbone attivo rappresenta una delle tecnologie più utilizzate a livello industriale. La sua diffusione è dovuta alla relativa semplicità di applicazione, all'affidabilità e alla buona efficienza nei confronti dei PFAS a catena lunga. Tuttavia, la sua efficacia diminuisce significativamente per i composti a catena corta, che risultano più mobili e meno inclini a interazioni con il materiale adsorbente.

Le resine a scambio ionico rappresentano un'alternativa valida, in particolare per la rimozione di PFAS anionici, ma presentano anch'esse criticità legate alla rigenerazione e alla gestione dei rifiuti. (Marín-Marín et al., 2023)

Le tecnologie a membrana, come la nanofiltrazione e l'osmosi inversa, consentono di ottenere elevate efficienze di rimozione per un ampio spettro di PFAS, inclusi quelli a catena corta. Tuttavia, tali sistemi richiedono elevate pressioni operative e sono soggetti a fenomeni di fouling, che ne riducono l'efficienza nel tempo. Inoltre, producono un concentrato contenente elevate concentrazioni di PFAS, che deve essere ulteriormente trattato. (Wanninayake, 2021)

Un ruolo sempre più rilevante è assunto dai processi di ossidazione avanzata, che mirano alla degradazione chimica dei PFAS. Tuttavia, la loro efficacia è limitata dalla resistenza del legame carbonio-fluoro, e spesso si osserva una trasformazione parziale dei composti piuttosto che una completa mineralizzazione. Analogamente, i processi di riduzione avanzata stanno emergendo come alternative promettenti, in quanto basati su meccanismi più efficaci per la rottura del legame C-F. (Marín-Marín et al., 2023)

Le tecnologie termiche, come l'incenerimento ad alte temperature, rappresentano una soluzione efficace per la distruzione dei PFAS concentrati in matrici solide o liquide. Tuttavia, esse sono caratterizzate da elevati costi energetici e dalla necessità di un attento controllo delle emissioni, al fine di evitare la formazione di sottoprodotti tossici. (Wanninayake, 2021)

Nel complesso, la gestione dei PFAS richiede un approccio integrato, che tenga conto delle caratteristiche specifiche dei contaminanti e delle matrici da trattare. Nessuna tecnologia singola è attualmente in grado di garantire una rimozione completa ed efficiente in tutte le condizioni operative, rendendo necessario lo sviluppo di sistemi ibridi e strategie combinate.

Nel seguente capitolo verranno approfondite le tecnologie che risultano più promettenti del gruppo dei trattamenti chimico-fisici con particolare attenzione ai già sopra menzionati trattamenti: adsorbimento, ossidazione chimica e processi a membrana.

1.5 Tecnologie chimico-fisiche

Le tecnologie chimico-fisiche costituiscono il nucleo principale delle strategie attualmente adottate per la rimozione dei PFAS dalle acque contaminate. La loro ampia diffusione è legata alla capacità di trattare efficacemente questi composti anche a basse concentrazioni, nonostante le difficoltà associate alla loro elevata stabilità chimica. Tuttavia, tali tecnologie presentano una notevole eterogeneità in termini di meccanismi di funzionamento, prestazioni e limiti applicativi, rendendo necessaria un'analisi approfondita delle singole soluzioni.

Un primo gruppo di tecnologie è rappresentato dai processi di separazione, tra cui l'adsorbimento e la filtrazione a membrana. Questi processi non determinano la distruzione dei PFAS, ma ne consentono la rimozione dalla fase acquosa e il loro trasferimento in una fase concentrata. Tale approccio, sebbene efficace nel breve termine, richiede una gestione attenta dei flussi concentrati, che rappresentano una fonte secondaria di contaminazione. (Wanninayake, 2021)

L'adsorbimento rappresenta una delle tecnologie più consolidate e utilizzate. Il processo si basa sull'interazione tra le molecole di PFAS e la superficie di materiali adsorbenti, quali carbone attivo granulare, carbone attivo in polvere e resine a scambio ionico. Il meccanismo di adsorbimento è governato da una combinazione di interazioni idrofobiche, forze di van der Waals e, nel caso delle resine, interazioni elettrostatiche. L'efficacia del processo dipende fortemente dalle caratteristiche dei PFAS, in particolare dalla lunghezza della catena fluorurata e dalla natura del gruppo funzionale terminale. I PFAS a catena lunga mostrano una maggiore affinità per i materiali adsorbenti, grazie alla loro maggiore idrofobicità e alla maggiore superficie molecolare. Al contrario, i PFAS a catena corta risultano più difficili da rimuovere, in quanto più solubili e meno inclini a interazioni con il materiale adsorbente. Questo aspetto rappresenta una delle principali limitazioni dell'adsorbimento, soprattutto in considerazione del progressivo aumento dell'utilizzo di PFAS a catena corta come alternative ai composti tradizionali. (Marín-Marín et al., 2023)

Oltre alle caratteristiche dei PFAS, l'efficienza dell'adsorbimento è influenzata da diversi fattori operativi, tra cui il pH, la presenza di sostanze organiche naturali e la concentrazione di altri contaminanti. La sostanza organica naturale, in particolare, può competere con i PFAS per i siti attivi del materiale adsorbente, riducendo significativamente la capacità di rimozione. Inoltre, la presenza di ioni inorganici può influenzare le interazioni elettrostatiche, modificando il comportamento del sistema. Dal punto di vista impiantistico, i sistemi di adsorbimento possono essere configurati come colonne a letto fisso o sistemi a contatto continuo. Le colonne a letto fisso rappresentano la soluzione più diffusa, in quanto consentono un controllo relativamente semplice del processo e garantiscono elevate efficienze di rimozione. Tuttavia, esse sono soggette a fenomeni di breakthrough, ovvero alla progressiva saturazione del materiale adsorbente, che comporta una riduzione dell'efficienza nel tempo. La gestione

del materiale esausto rappresenta una delle principali criticità, in quanto richiede operazioni di rigenerazione o smaltimento, con conseguenti costi economici e impatti ambientali.

Le resine a scambio ionico rappresentano un'alternativa interessante al carbone attivo (GAC), in particolare per la rimozione di PFAS anionici. Esse offrono una maggiore selettività e capacità di adsorbimento, ma presentano anch'esse criticità legate alla rigenerazione e alla produzione di soluzioni concentrate contenenti PFAS. (Marín-Marín et al., 2023)

In termini generali, tutti i processi di adsorbimento condividono una limitazione strutturale fondamentale: non determinano la distruzione dei PFAS, ma ne consentono esclusivamente il trasferimento dalla fase acquosa a una fase solida o liquida concentrata. Questa caratteristica richiede la gestione di un flusso secondario ad elevata concentrazione di PFAS, spostando il problema della contaminazione verso ulteriori trattamenti, tipicamente l'incenerimento ad alta temperatura del materiale saturo. (Wanninayake, 2021) (Leung et al., 2022)

Le tecnologie a membrana rappresentano un'ulteriore categoria di processi di separazione. Esse si basano sull'utilizzo di membrane semipermeabili che consentono il passaggio dell'acqua trattenendo i contaminanti attraverso una combinazione di meccanismi quali l'esclusione dimensionale e le interazioni elettrostatiche. I processi più comunemente impiegati per la rimozione dei PFAS sono la nanofiltrazione (NF) e l'osmosi inversa (RO), che differiscono principalmente per le dimensioni dei pori e le pressioni operative richieste. (Wanninayake, 2021)

Rispetto all'adsorbimento, i processi a membrana presentano il vantaggio di essere efficaci anche nei confronti dei PFAS a catena corta, in quanto la rimozione avviene principalmente per esclusione dimensionale e non dipende dall'idrofobicità del composto. Questo li rende tra i pochi metodi in grado di trattare con efficacia l'intero spettro dei PFAS. (Marín-Marín et al., 2023) Tuttavia, tali tecnologie presentano alcune criticità significative. In primo luogo, richiedono elevate pressioni operative, con conseguente elevato consumo energetico. In secondo luogo, sono soggette a fenomeni di fouling, ovvero all'accumulo progressivo di sostanze sulla superficie della membrana, che ne riduce l'efficienza e aumenta i costi di manutenzione. In terzo luogo, e analogamente a quanto osservato per i processi di adsorbimento, producono un flusso concentrato contenente PFAS che richiede trattamenti successivi. (Wanninayake, 2021)

In conclusione, i processi di separazione, adsorbimento e filtrazione a membrana, pur rappresentando tecnologie mature e ampiamente validate, non risolvono in via definitiva il problema della contaminazione da PFAS: essi concentrano e trasferiscono i contaminanti in un flusso secondario, la cui gestione e trattamento definitivo restano ancora un problema sul piano tecnico, economico e ambientale.

Tra le tecnologie emergenti per la degradazione dei PFAS, i processi di ossidazione e riduzione chimica occupano una posizione di rilievo, in quanto rappresentano approcci relativamente accessibili dal punto

di vista tecnologico, capaci di operare in condizioni moderate senza necessità di attrezzature complesse. È tuttavia fondamentale distinguere tali processi dai metodi di ossidazione e riduzione avanzata (Advanced Oxidation/Reduction Processes, AOP/ARP), nei quali la degradazione è guidata dalla generazione controllata di specie radicaliche altamente reattive prodotte da sorgenti energetiche esterne. Nei processi chimici convenzionali, invece, la degradazione è prevalentemente determinata dal potere ossidante o riducente intrinseco dei reagenti aggiunti al sistema. (Leung et al., 2022)

La peculiare struttura chimica dei PFAS, caratterizzata da una catena perfluoroalchilica avvolta in configurazione elicoidale attorno allo scheletro carbonioso, costituisce una barriera fisica ed elettronica nei confronti degli agenti ossidanti. Gli atomi di fluoro, altamente elettronegativi, riducono la densità elettronica dei gruppi funzionali terminali (SO_3^- per il PFOS, COO^- per il PFOA), ostacolando l'attacco ossidativo diretto e rendendo questi composti recalcitranti all'ossidazione convenzionale. (Leung et al., 2022)

Il persolfato ($S_2O_8^{2-}$) è tra i reagenti chimici più efficaci nella degradazione ossidativa dei PFAS. Mediante attivazione termica, esso genera radicali solfato ($SO_4 \bullet^-$), specie più reattive dell'ossidrilile ($HO \bullet$) nei confronti dei PFAS, in grado di attaccare preferenzialmente il legame C – C in posizione alfa rispetto al gruppo carbossilico del PFOA. (Park et al., 2016) hanno dimostrato che l'ossidazione con persolfato attivato termicamente a temperature comprese tra 20 e 60 °C degrada efficacemente il PFOA e il 6:2 fluorotelomero sulfonato (6:2 FTSA), mentre il PFOS risulta resistente anche a temperature prossime a 90 °C. Il meccanismo proposto per il PFOA segue una via di decarboxilazione sequenziale ("unzipping"), con rilascio di CO_2 e formazione progressiva di composti perfluoroalchilici a catena più corta (PFHpA, PFHxA, PFPeA, PFBA, PFPrA e TFA). (Leung et al., 2022)

(Yin et al., 2016) hanno confermato questi risultati su acque sotterranee in condizioni acide, riportando una degradazione dell'89,9% del PFOA dopo 100 ore a pH 2,0 e 50 °C, e sottolineando il ruolo preponderante del radicale solfato rispetto all'ossidrilile in condizioni di basso pH. (Y. C. Lee et al., 2010) hanno ottenuto risultati analoghi con un sistema a persolfato attivato con microonde, evidenziando come la presenza di ioni cloruro e condizioni di pH elevato compromettano le prestazioni per effetto dello scavenging dei radicali. La sola evidenza di degradazione ossidativa del PFOS è riportata da (Yang et al., 2013), che hanno ottenuto una defluorurazione del 22,5% dopo 12 ore, confermando la scarsa reattività del PFOS verso gli agenti a base di persolfato.

Un approccio innovativo al trattamento ossidativo è stato proposto da (F. Liu et al., 2020), che hanno sviluppato un sistema integrato di filtrazione su membrana ceramica di $BiFeO_3$ e irraggiamento a microonde in presenza di H_2O_2 . In questo processo il PFOA viene prima adsorbito sulla membrana e poi sottoposto a reazioni di tipo Fenton con generazione di radicali $\bullet HO$ e $\bullet HO_2$. Con una densità di irraggiamento di $7,2 \frac{W}{cm^2}$ e un tempo di ritenzione idraulica di soli 2 minuti, è stata ottenuta una

degradazione di circa il 65,9% del PFOA, con formazione di intermedi a catena più corta. La scalabilità del processo è stata confermata attraverso il modello di Carman-Kozeny, sebbene l'integrazione di un sistema a microonde in impianti industriali di filtrazione rimanga una sfida tecnologica significativa (F. Liu et al., 2020), (Leung et al., 2022)

Sul versante riduttivo, il ferro zerovalente (ZVI) è uno dei riducenti più studiati per il trattamento in situ dei PFAS, per via della sua efficacia, della facilità di separazione magnetica al termine del processo e dei costi contenuti. (Arvaniti et al., 2015) hanno riportato una rimozione del 70% del PFOS mediante nano-ZVI rivestito di Mg-aminoargilla, con formazione di F_2 come unico sottoprodotto e assenza di PFCA a catena corta. Il meccanismo proposto prevede la formazione di un complesso degradabile $[C_7F_{15}COO - Fe]^{2+}$, che, sotto irradiazione UVC (254 nm), subisce eliminazione di HF e idrolisi ciclica con progressiva riduzione della catena carboniosa. (Leung et al., 2022)

Il reagente di Fenton tradizionale (H_2O_2 / Fe^{2+}) risulta generalmente inefficace nei confronti dei PFAS in condizioni blande, poiché i radicali ossidrilici dominanti in tale contesto mostrano scarsa affinità per la struttura perfluoroalchilica. (Mitchell et al., 2013) hanno tuttavia sviluppato un reagente di Fenton modificato basato sulla propagazione catalitica di H_2O_2 (CHP, Catalyzed H_2O_2 Propagation), nel quale le specie reattive predominanti sono i radicali superossido anionico ($O_2^- \bullet$) e il perossidrilanione (HO_2^-), che agiscono da riducenti nei confronti del PFOA, ottenendo una rimozione del 94% in 150 minuti. (Rackov et al., 2016) hanno sviluppato un approccio analogo con diatomite modificata con ferro, ottenendo una degradazione dell'83% del PFOA in condizioni ambiente. (Leung et al., 2022)

(yu-C. Lee et al., 2017) hanno proposto un sistema biomimetico basato su citrato di titanio (III) come riducente, vitamina B_{12} come mediatore elettronico e nanorame (Cu^0) come catalizzatore per la degradazione del PFOA. In questo sistema la vitamina B_{12} media il trasferimento di elettroni verso il PFOA formando intermedi cobalto-carbonio, mentre il precursore $B_{12} - C_7F_{14}COOH$ adsorbito sulla superficie del Cu^0 subisce idrogenolisi con formazione di prodotti meno fluorurati. A pH 9,0 e 70 °C è stata ottenuta una rimozione del 65% del PFOA senza generazione di intermedi a catena corta, un risultato particolarmente significativo poiché la produzione di PFCA a catena corta è uno dei principali problemi dei processi riduttivi convenzionali. (Leung et al., 2022)

L'approccio più promettente nell'ambito dei trattamenti chimici per i PFAS è rappresentato dalla combinazione sequenziale di fasi ossidative e riduttive. (Z. Liu et al., 2021) hanno proposto un metodo di ossidazione-riduzione-ossidazione ripetuta (ORO), ottenendo una defluorurazione superiore al 90% sia per il PFOS che per il PFOA. Il razionale di questo approccio risiede nella complementarità delle due vie degradative: i radicali $\bullet HO$ favoriscono la decarbossilazione e la riduzione sequenziale della catena carboniosa, mentre gli elettroni idratati (e^-_{aq}) convertono i legami $C - F$ in legami $C - H$, eliminando la resistenza residua dei legami $C - F$ alle successive ossidazioni. Studi meccanicistici

hanno dimostrato che ottimizzando il rapporto $SO_4 \cdot^- / \cdot HO$ è possibile migliorare significativamente l'efficienza di defluorurazione. Il limite principale di questo processo è la necessità di operare a pH 12, condizione che ne riduce l'applicabilità su scala industriale. (Leung et al., 2022)

In sintesi, i processi di ossidazione e riduzione chimica per la degradazione di PFOS e PFOA offrono il vantaggio di operare con attrezzature relativamente semplici, a basso consumo energetico rispetto ai metodi AOP/ARP, e di essere potenzialmente applicabili in situ. Tuttavia, la maggior parte di questi metodi mostra efficienze di defluorurazione limitate, generando spesso PFCA a catena più corta la cui tossicità rimane in gran parte inesplorata. Il persolfato attivato si conferma il reattivo più efficace sul versante ossidativo nei confronti del PFOA, ma con scarsa attività verso il PFOS. L'approccio combinato ORO di (Z. Liu et al., 2021) rappresenta allo stato dell'arte la strategia chimica più efficace, aprendo prospettive per l'ottimizzazione di processi ibridi elettrochimici, fotocatalitici e al plasma. (Leung et al., 2022), (Marín-Marín et al., 2023)

Nella seguente Tabella 1-2 sono riassunti i processi presentati in precedenza con rispettivi pregi e difetti nonché rese di rimozione e specie di PFAS affini.

Processo	Specie di PFAS coinvolta	Resa di rimozione ¹	Vantaggi	Svantaggi
Adsorbimento su GAC/PAC <i>(Wanninayake, 2021)</i>	PFAS a catena lunga (PFOA, PFOS, PFNA, PFDA); scarsa efficacia su catena corta	Elevata per PFAS C _≥ 6 Ridotta per C _{<} 6 (catena corta)	Tecnologia matura Semplicità operativa Costi contenuti	Non distrugge i PFAS Soggetto a breakthrough Competizione con NOM
Resine a scambio ionico (AIX) <i>(Marin-Marín et al., 2023)</i>	PFAS anionici a catena lunga e media	Alta selettività	Alta selettività e capacità di adsorbimento Efficace anche su catena media	Non distrugge i PFAS Rigenerazione con solventi Concentrato da smaltire Costi elevati
Nanofiltrazione (NF) e Osmosi inversa (RO) <i>(Wanninayake, 2021)</i>	Efficace sull'intero spettro PFAS	>90% per PFOA e PFOS Buona per PFAS C ₄ -C ₆	Efficace su catena corta Non dipende dall'idrofobicità	Non distrugge i PFAS Concentrato da trattare Elevato consumo energetico Fouling della membrana
Ossidazione con persolfato attivato (termico / microonde) <i>(Park et al., 2016)</i>	PFOA e 6:2 FTSA; scarsa efficacia su PFOS	PFOA: fino a 89,9% PFOS: fino a 22,5%	Applicabile in situ Relativamente semplice Basso consumo energetico	Scarsa efficacia su PFOS Genera intermedi a catena corta Richiede pH acido (≤5) e temperature elevate Scavenging da cloruri
Membrana + microonde + H₂O₂ (sistema tipo Fenton) <i>(F. Liu et al., 2020)</i>	PFOA	PFOA: fino a 65,9% Tempi brevi (HRT 2 min)	Tempi di contatto ridotti Scalabilità	Complessità impiantistica Integrazione microonde in scala industriale difficoltosa Genera intermedi a catena corta
Ferro zerovalente (nZVI) ± UVC <i>(Arvaniti et al., 2015)</i>	PFOS (con nZVI/MgAC) PFOA (con nZVI + UVC)	PFOS: circa 70% PFOA: circa 60% Circa 17% defluorurazione	Basso costo Separabile magneticamente Assenza di intermedi a catena corta (nZVI/MgAC)	Bassa velocità di reazione Bassa efficienza di defluorurazione Richiede irradiazione UVC
Fenton modificato – CHP (H₂O₂/Fe³⁺) <i>(Mitchell et al., 2013)</i>	PFOA	PFOA: circa 94% rimozione in 150 min	Alta efficienza su PFOA Specie reattive riduttive (O ₂ ^{-•} , HO ₂ ⁻) non convenzionali A condizioni ambiente	Inefficace su PFOS Genera sottoprodotti fluorurati Richiede H ₂ O ₂ ad alta concentrazione (>0,3 mol/L)
Sistema biomimetico (Ti(III)/vitamina B₁₂/Cu⁰) <i>(yu-C. Lee et al., 2017)</i>	PFOA	PFOA: circa 65% rimozione a pH 9 e 70 °C Assenza di intermedi a catena corta	Nessuna generazione di PFCA a catena corta Approccio selettivo e controllato	Limitata scalabilità Condizioni operative specifiche (pH 9, 70 °C) Costi dei reagenti Limitata efficacia su PFOS
Ossidazione-Riduzione-Ossidazione sequenziale (ORO) <i>(Z. Liu et al., 2021)</i>	PFOA e PFOS	>90% defluorurazione	Massima efficienza di defluorurazione tra i metodi chimici Sinergia tra SO ₄ ^{•-} e e ⁻ _{aq} Nessun intermedio persistente a fine ciclo	Richiede pH 12 Complessità operativa Difficile applicazione industriale diretta Consumo di reagenti

Tabella 1-2 - Tabella riepilogativa dei processi di degradazione chimico-fisica presentati

¹ Le rese riportate si riferiscono alle condizioni ottimali di laboratorio. I valori possono variare significativamente in presenza di matrici ambientali reali (acque sotterranee, percolato di discarica) per effetto della competizione con sostanza organica naturale, ioni inorganici e altri contaminanti co-presenti. (Leung et al., 2022)

2 Metodiche per l'elaborazione dei dati e metodo di acquisizione

Il presente capitolo introduce alle motivazioni che hanno condotto all'eseguire la campagna di monitoraggio, a seguire descrive la struttura del dataset di monitoraggio utilizzato, illustra le elaborazioni statistiche condotte e introduce gli strumenti grafici adottati per la visualizzazione e l'interpretazione dei risultati.

I dati impiegati nell'analisi provengono dalla campagna di monitoraggio PFAS condotta da ARPA Piemonte sulle acque superficiali regionali nel periodo 2021-2025, resa disponibile attraverso il Geoportale ARPA. Il dataset grezzo, fornito in formato di tabella, contiene complessivamente 73.898 misurazioni relative a 4.564 campioni prelevati in 660 stazioni di monitoraggio distribuite sull'intero territorio piemontese, e include corpi idrici superficiali di diversa tipologia, fiumi principali, affluenti e torrenti. Per ogni misurazione sono disponibili le seguenti informazioni: codice univoco del campione, data di campionamento, anno, laboratorio esecutore, tipo di matrice, codice della stazione, parametro analizzato, unità di misura, metodo analitico, valore misurato, limite di rilevabilità e stato del parametro. Le analisi sono state condotte interamente con il metodo U.RP.MA136, basato su cromatografia liquida accoppiata a spettrometria di massa in tandem (LC-MS/MS) in modalità MRM, che rappresenta il metodo di riferimento a livello internazionale per la determinazione di PFAS nelle matrici acquose. (ARPA Piemonte, 2025a)

2.1 Il caso della regione Piemonte

Il monitoraggio sistematico delle sostanze per- e polifluoroalchiliche (PFAS) nelle acque superficiali e sotterranee piemontesi non nasce in modo spontaneo, ma è il diretto riflesso di quanto accaduto in Italia a partire dal 2013, quando fu scoperto quello che viene oggi considerato il più grande episodio di contaminazione da PFAS mai documentato al mondo. Nel 2013, nell'ambito di indagini commissionate dal Ministero dell'Ambiente all'Istituto di Ricerca sulle Acque del CNR (IRSA-CNR), fu rilevata una contaminazione diffusa di acque superficiali, sotterranee e destinate al consumo umano in tre province del Veneto: Vicenza, Padova e Verona. La contaminazione, di portata senza precedenti nel contesto europeo, riguardava un'area densamente popolata e con un'intensa attività agricola e industriale, rendendo particolarmente grave il rischio di esposizione della popolazione residente attraverso le acque potabili. (Giglioli et al., 2023)

Le analisi chimiche condotte nel 2013 sulle acque potabili rivelarono la presenza di PFOA a concentrazioni mediane di 319 ng/L, PFBA a 123 ng/L, PFBS a 91 ng/L e PFOS a 18 ng/L, in un'area interessata da circa 125.000–350.000 residenti. Tali valori risultavano di ordini di grandezza superiori rispetto ai limiti che sarebbero stati successivamente introdotti dalla normativa europea, evidenziando come la popolazione fosse stata esposta per anni, probabilmente decenni, a concentrazioni di PFAS nelle acque di consumo nettamente al di sopra di qualsiasi soglia precauzionale. La varietà delle sostanze rinvenute, che includevano sia PFAS a catena lunga come PFOA e PFOS, sia composti a catena corta come PFBA e PFBS, suggeriva una contaminazione prolungata nel tempo e proveniente da sorgenti industriali con profili emissivi diversificati. (Giglioli et al., 2023)

L'evento veneto ebbe conseguenze immediate sul piano normativo e dell'attenzione pubblica a livello nazionale. La scoperta mise in evidenza come per decenni la produzione industriale di PFAS avesse contaminato falde acquifere profonde e corsi d'acqua superficiali senza che esistessero né adeguati strumenti normativi per regolarne le emissioni, né programmi di monitoraggio ambientale specificamente dedicati a questi composti. L'assenza di limiti di legge per i PFAS nelle acque superficiali e sotterranee aveva reso impossibile, fino a quel momento, sia il controllo delle emissioni industriali sia la tutela delle popolazioni esposte. ARPAV, l'agenzia regionale per la protezione ambientale del Veneto, avviò a partire da luglio 2013 una campagna di monitoraggio sistematico che coinvolse centinaia di punti di misura e portò alla produzione di oltre 50.000 campioni analitici nel corso del decennio successivo. Questo imponente sforzo analitico permise di ricostruire con elevato dettaglio spaziale e temporale la distribuzione della contaminazione, identificando i principali percorsi di migrazione dei contaminanti dal suolo alle falde e dalle falde alle reti idriche di distribuzione.

Il caso veneto ebbe una ricaduta diretta sul comportamento delle agenzie ambientali regionali di tutto il Paese. In Piemonte i primi dati di analisi PFAS da campagne di campionamento e monitoraggio condotte da ARPA Piemonte sui corpi idrici regionali risalgono al 2010, limitati a tre punti della rete di

monitoraggio e a soli due parametri (PFOA e PFOS). Questi dati iniziali, pur circoscritti, costituirono la base di partenza di una progressiva estensione del programma analitico. Sulla scia dell'esperienza veneta, il programma di monitoraggio fu progressivamente ampliato fino a includere, nel sessennio 2020–2025, la determinazione di sei sostanze PFAS in circa 900 punti di monitoraggio, 350 stazioni sui corsi d'acqua superficiali, 360 sul sistema acquifero sotterraneo superficiale e 190 su quello profondo, con i campioni analizzati nei laboratori specialistici di ARPA Piemonte attraverso il metodo U.RP.MA136 basato su LC-MS/MS. La scelta di adottare la cromatografia liquida abbinata alla spettrometria di massa tandem (LC-MS/MS) come tecnica analitica di riferimento garantisce elevata sensibilità e specificità nella determinazione quantitativa dei PFAS anche a concentrazioni molto basse, allineando il programma piemontese agli standard metodologici internazionali più avanzati. (ARPA Piemonte, 2025b)

La motivazione che ha spinto alla costruzione di un programma di monitoraggio così capillare non è soltanto precauzionale, ma risponde a due pressioni convergenti: da un lato la conoscenza acquisita dopo il 2013 sulla capacità dei PFAS di percolare dalle falde verso i corsi d'acqua superficiali e da questi verso le acque destinate al consumo umano, rendendo indispensabile un presidio dell'intero sistema idrografico; dall'altro, la presenza sul territorio piemontese di probabili immissari che utilizzano PFAS in settori come il trattamento di tessuti, la galvanica e la produzione di imballaggi. La complessità del reticolo idrografico piemontese, che include numerosi bacini tributari del Po con caratteristiche idrogeologiche molto eterogenee, ha reso necessario differenziare le strategie di monitoraggio tra acque superficiali e acquiferi profondi, tenendo conto dei diversi tempi di risposta dei sistemi idrogeologici agli apporti contaminanti. Questi fattori fanno del Piemonte il contesto più avanzato in Italia sul piano normativo, con la Legge Regionale n. 25/2021 che ha introdotto i primi valori limite di emissione per PFAS negli scarichi in acque superficiali, e uno dei più strutturati sul piano del monitoraggio ambientale. La Legge Regionale n. 25/2021 rappresenta un unicum nel panorama legislativo italiano, anticipando di fatto le indicazioni che a livello europeo sarebbero emerse negli anni successivi nell'ambito della revisione della Direttiva Quadro sulle Acque, e costituisce un riferimento normativo la cui efficacia applicativa potrà essere valutata proprio grazie all'esteso sistema di monitoraggio costruito da ARPA Piemonte nel corso dell'ultimo decennio. (ARPA Piemonte, 2025b)

2.2 Criteri di scelta dei corpi idrici

Ai fini della presente tesi, l'analisi è stata circoscritta a undici corpi idrici superficiali, selezionati secondo criteri che combinano rilevanza idrografica, disponibilità e continuità dei dati e rappresentatività del reticolo fluviale regionale.

I criteri adottati per la selezione sono stati i seguenti. In primo luogo, la rilevanza territoriale e idrografica: sono stati inclusi i corpi idrici principali del reticolo piemontese, ovvero quelli con i bacini idrografici più estesi o con un ruolo di collettore di rilievo nel sistema padano, come il Po, il Tanaro, la Dora Baltea e il Ticino, garantendo la copertura geografica delle principali aree idrologiche della regione. In secondo luogo, la presenza di pressioni antropiche documentate: corpi idrici come la Bormida, lo Scrivia e l'Agogna sono stati inclusi in ragione della presenza di sorgenti industriali note o sospette di emissione PFAS nei rispettivi bacini, in linea con i criteri di monitoraggio operativo adottati da ARPA Piemonte per i corpi idrici identificati come "a rischio". Infine, la rappresentatività dei diversi tipi di regime idrologico presenti in Piemonte: sono stati inclusi sia fiumi alpini a regime nivo-glaciale (Dora Baltea, Dora Riparia), sia corsi d'acqua a regime torrentizio appenninico (Scrivia, Bormida), sia fiumi di pianura a regime composito (Po, Agogna), garantendo una lettura trasversale dell'esposizione ai PFAS in contesti idrologici differenti.

Il dataset con tutte le misurazioni della campagna di monitoraggio prevede l'analisi di 19 specie appartenenti al gruppo PFAS. I 19 parametri PFAS analizzati comprendono: PFBS, PFPeS, PFHxS, PFHpS, PFOS, PFDS, PFNS, PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUDA, PFDOA e i composti di nuova generazione cC6O4, HFPO-DA e ADV N2.

La tabella seguente riepiloga i corpi idrici selezionati con le principali caratteristiche del monitoraggio disponibile:

Corpo idrico	Stazioni di monitoraggio	Campioni	Anni di monitoraggio
Agogna	3	2199	2021-2025
Bormida	2	585	2021-2025
Dora Baltea	2	1055	2021-2025
Dora Riparia	1	596	2021-2024
Maira	2	827	2021-2025
Po	10	7117	2021-2025
Scrivia	4	1584	2021-2025
Sesia	1	216	2021-2025
Stura di Demonte	2	424	2023
Tanaro	3	668	2021-2025
Ticino	4	3097	2021-2025

Tabella 2-1 – Corpi idrici selezionati per l'analisi, con indicazione del numero di stazioni di monitoraggio, dei campioni disponibili e del periodo di copertura temporale

Come si evince dalla precedente Tabella 2-1, la copertura del monitoraggio non è omogenea tra i diversi corpi idrici: il Po, Scrivia e Ticino, in quanto corpi idrici principali del reticolo piemontese analizzato, dispongono del maggior numero di stazioni (rispettivamente 10 e gli altri 4) e di campioni, in ragione della loro maggiore estensione, della rilevanza strategica come corpi idrici recettori finali del bacino padano e della presenza di pressioni antropiche più diffuse e documentate lungo la loro asta. Fiumi come la Bormida e la Stura di Demonte presentano invece una rete di monitoraggio più limitata, sia per la minore lunghezza del tratto ricadente in territorio piemontese soggetto a monitoraggio, sia perché il programma di campionamento ARPA concentra le risorse nelle aree a maggiore rischio noto di contaminazione, privilegiando i corpi idrici con presenza di composti PFAS già accertata o con un numero elevato di potenziali immissari. Questa disomogeneità va tenuta in considerazione nell'interpretazione comparativa dei risultati: un minor numero di campioni riduce la rappresentatività statistica delle stime e può portare a sottostimare sia i valori medi che la variabilità delle concentrazioni nei corpi idrici meno monitorati.

Un aspetto metodologico fondamentale per l'interpretazione corretta dei dati riguarda la definizione e il trattamento del limite di quantificazione (LOQ). Il LOQ o *Limit of Quantification* è la concentrazione minima di un'osservazione che può essere quantificata con accuratezza e precisione accettabili attraverso una determinata procedura analitica; al di sotto di questo valore, la presenza del composto non può essere esclusa, ma la sua concentrazione non è determinabile con sufficiente affidabilità. (Helsel, 2012)

Nel dataset ARPA Piemonte, le misurazioni inferiori al LOQ vengono archiviate con un valore pari al LOQ stesso, convenzione adottata diffusamente nei programmi di monitoraggio ambientale in conformità con le indicazioni della Direttiva Quadro Acque (2000/60/CE) e con le linee guida analitiche di riferimento (Usepa et al., 2024)

Nel presente lavoro i valori riportati al LOQ sono stati trattati come pari alla metà del LOQ stesso. Questa scelta, convenzionalmente indicata come metodo " $\frac{1}{2}$ LOQ" o "metodo di sostituzione", è ampiamente adottata nella letteratura scientifica sul monitoraggio dei contaminanti in traccia nelle acque superficiali (Helsel, 2012)

L'approccio è conservativo a favore della sicurezza: consente di includere nel calcolo le misurazioni sottosoglia, che potrebbero corrispondere a una contaminazione reale seppur non quantificabile con certezza, anziché escluderle del tutto. Questa scelta, pur introducendo una sovrastima controllata per i composti con LOQ elevato, è preferibile al rischio opposto di ignorare concentrazioni che potrebbero essere effettivamente presenti nel corpo idrico.

I LOQ adottati nel programma di monitoraggio ARPA differiscono significativamente tra i diversi composti PFAS, con implicazioni dirette sulla comparabilità dei dati. Il PFOS presenta un LOQ di 0,0002 µg/L (0,2 ng/L), cinquanta volte più sensibile rispetto al LOQ di 0,01 µg/L della maggior parte degli altri composti e duecento volte più sensibile rispetto al LOQ di 0,04 µg/L di cC6O4, HFPO-DA e ADV N2. Questa asimmetria va tenuta presente nell'interpretazione della frequenza di rilevamento: i composti con LOQ più elevato potrebbero essere presenti a concentrazioni analoghe a quelle del PFOS, ma risultare non rilevabili con il metodo analitico adottato. Analogamente, i valori "sotto soglia" convenzionalmente riportati al LOQ appaiono numericamente più alti per i composti meno sensibili, non perché le concentrazioni reali siano maggiori, ma esclusivamente per effetto del limite strumentale più elevato.

A partire dal dataset grezzo, le elaborazioni sono state condotte con Microsoft Excel e hanno preso in considerazione gli undici fiume selezionati. Inizialmente è stata effettuata una selezione e riorganizzazione dei dati: i dati relativi ai corpi idrici non oggetto di studio sono stati esclusi, i valori inferiori al limite di rilevabilità, riportati nel dataset come uguali alla metà valore del limite stesso, sono stati conservati e trattati come misurazioni corrispondenti alla metà dalla soglia minima strumentale, e i dati sono stati organizzati per corpo idrico, stazione di monitoraggio, parametro e anno.

2.3 Modalità di elaborazione dei dati

A partire dal dataset grezzo, le elaborazioni sono state condotte interamente con Microsoft Excel e hanno seguito un percorso strutturato in più fasi. In una prima fase è stata effettuata la selezione e la riorganizzazione dei dati: le misurazioni relative ai corpi idrici non oggetto di studio sono state escluse, i valori inferiori al LOQ sono stati sostituiti con la metà del LOQ come descritto nella sezione precedente, ed infine i dati sono stati organizzati per corpo idrico. Per ogni corpo idrico poi sono state suddivise le misurazioni per parametro e successivamente per stazione di monitoraggio e anno.

Nella seconda fase sono state calcolate delle statistiche descrittive fondamentali per ogni combinazione di corpo idrico, stazione e parametro e costruita la rappresentazione grafica fingerprinting per l'intero corpo idrico e boxplot per ogni parametro. Le rappresentazioni grafiche verranno presentate e descritte nei paragrafi seguenti.

2.3.1 Fingerprinting

Il fingerprinting è una tecnica di analisi della composizione relativa dei PFAS in un corpo idrico, ampiamente utilizzata nella letteratura scientifica per caratterizzare la "firma chimica" di una sorgente di contaminazione o di un sito di monitoraggio. Il principio fondamentale del fingerprinting consiste nel rappresentare non i valori assoluti di concentrazione dei singoli composti, bensì la loro distribuzione percentuale rispetto alla concentrazione totale di PFAS misurata (Σ PFAS) in ciascun punto di campionamento. È stato dimostrato che la composizione relativa dei PFAS in un corso d'acqua, il cosiddetto "profilo" o "impronta", è caratteristica del tipo di sorgente di contaminazione: le emissioni industriali da fluoropolimeri presentano un profilo dominato da composti come cC6O4 o HFPO-DA, mentre le contaminazioni da uso di schiume antincendio AFFF sono tipicamente caratterizzate da PFOS e PFBS; la contaminazione da processi diffusi e urbani mostra invece un profilo più misto. Questa proprietà rende il fingerprinting uno strumento diagnostico efficace per distinguere l'impronta di sorgenti puntuali da quella di una contaminazione diffusa di fondo. (Joerss et al., 2020) Nella presente analisi il fingerprinting è stato costruito come grafico a barre in pila (stacked bar chart), in cui ogni colonna rappresenta una stazione di monitoraggio e ogni segmento colorato corrisponde a una delle 19 specie PFAS analizzate, con altezza proporzionale alla sua quota percentuale sul Σ PFAS. Per ogni fiume è stato prodotto un grafico separato, con le stazioni ordinate da monte a valle lungo l'asta fluviale, in modo da rendere visibile l'eventuale variazione del profilo di contaminazione lungo il corso d'acqua. Questo approccio consente di confrontare direttamente stazioni con livelli di concentrazione assoluta molto diversi, e di identificare quali composti dominano il profilo in ciascun punto di misura: la presenza costante di un determinato composto in quota elevata su tutte le stazioni suggerisce una sorgente a monte del tratto monitorato, mentre profili variabili lungo il corso indicano apporti multipli o distribuiti. (Joerss et al., 2020)

2.3.2 Boxplot

Il boxplot, o diagramma a scatola e baffi, è uno strumento grafico statistico che rappresenta sinteticamente la distribuzione di un insieme di valori attraverso cinque statistiche: il valore minimo, il primo quartile (Q1, 25° percentile), la mediana (50° percentile), il terzo quartile (Q3, 75° percentile) e il valore massimo. La "scatola" (box) racchiude il 50% centrale dei dati, compreso tra Q1 e Q3, il cosiddetto intervallo interquartile (IQR), mentre i "baffi" (whiskers) si estendono fino ai valori estremi non considerati outlier. I valori anomali, ovvero quelli che si discostano dal bordo della scatola di più di 1,5 volte l'IQR, vengono rappresentati come punti individuali al di fuori dei baffi. (Cox & Jones, s.d.)

Il boxplot consente di rendere evidente la variabilità dei dati in modo robusto rispetto agli outlier, a differenza di un semplice grafico delle medie: i valori anomali vengono rappresentati esplicitamente come punti individuali, rendendoli visibili e interpretabili senza che la loro presenza influenzi la posizione della mediana o dei quartili. Questo rappresenta un vantaggio rilevante nell'analisi dei dati di monitoraggio ambientale, dove i picchi di concentrazione legati a eventi di contaminazione puntuale costituiscono informazioni preziose da non nascondere, ma che non devono distorcere la lettura della tendenza centrale.

Nell'analisi condotta, per ogni fiume e per ogni parametro critico identificato è stata preparata una scheda dedicata in Microsoft Excel contenente tutte le misurazioni disponibili per quel composto nel periodo 2021-2025, organizzate per stazione di monitoraggio. Su questa base sono stati costruiti i boxplot, con una scatola per ciascuna stazione, in modo da visualizzare simultaneamente la distribuzione delle concentrazioni in ogni punto di misura e confrontare la variabilità tra le diverse stazioni lungo l'asta fluviale. Ciascuna scatola incorpora tutte le misurazioni disponibili per quella stazione nell'intero arco temporale 2021-2025 consentendo di apprezzare la variabilità complessiva del parametro in quel punto di misura. Questo tipo di rappresentazione è particolarmente adatto al dataset in esame, in cui la frequenza di campionamento è relativamente ridotta, tipicamente due campionamenti annui per stazione, e i dati presentano frequentemente distribuzioni asimmetriche con valori anomali elevati legati a eventi di contaminazione puntuale, caratteristica comune nei programmi di monitoraggio di inquinanti emergenti. (Helsel, 2012)

3 Risultati e discussione

Le analisi statistiche condotte sui dati di monitoraggio riferiti al periodo 2021–2025, presentati nel capitolo precedente, hanno permesso di identificare una presenza diffusa di sostanze per- e polifluoroalchiliche nelle acque superficiali piemontesi ed in particolare nei tratti a valle dei fiumi analizzati.

I 19 parametri di PFAS analizzati comprendono sia composti a catena lunga che a catena corta con presenza maggiore dei parametri a catena corta. Per ciascun fiume esaminato vengono di seguito presentati i relativi grafici di fingerprinting e boxplot, questi ultimi suddivisi per punto di misurazione come illustrato nella mappa sottostante (Figura 3-1)

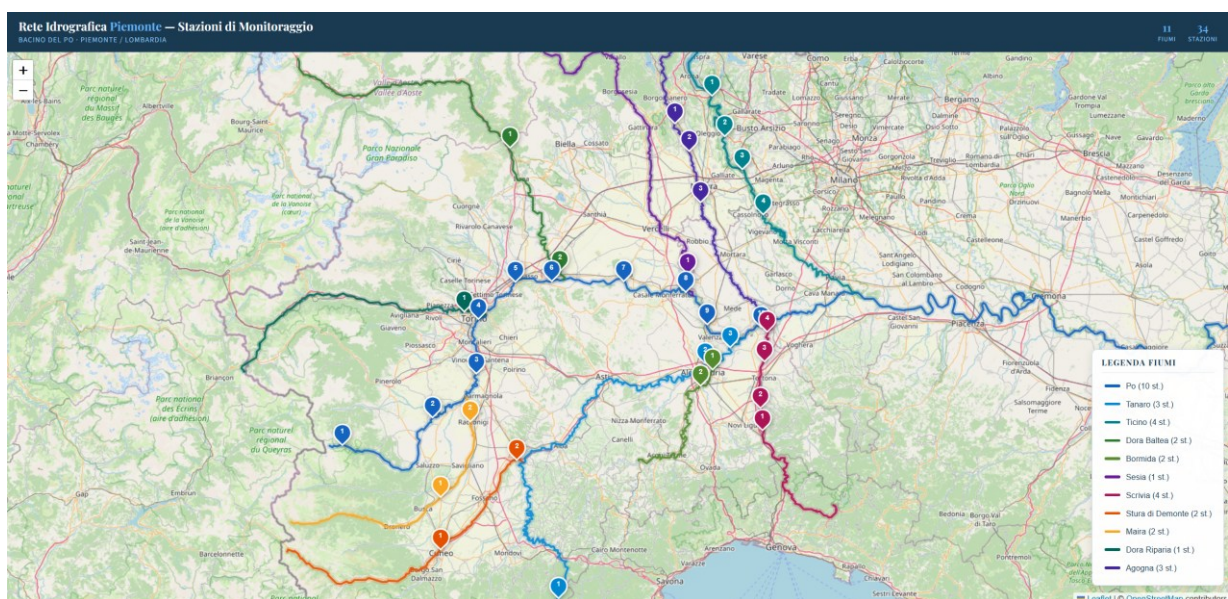


Figura 3-1 Mappa dei fiumi analizzati e delle stazioni di misurazione

Nella Tabella 3-1 sono riportati i dettagli delle stazioni di monitoraggio suddivise per fiume e le relative coordinate geografiche espresse secondo lo standard “Gradi Minuti Secondi (WGS84)”.

Fiume	Stazioni di monitoraggio	Coordinate geografiche
Agogna	Fontaneto d'Agogna (1)	45°37'32.9"N 8°30'03.6"E
	Caltignaga (2)	45°32'45.7"N 8°33'27.1"E
	Novara (3)	45°24'03.0"N 8°36'15.2"E
Bormida	Alessandria monte (1)	44°55'11.6"N 8°39'14.0"E
	Alessandria valle (2)	44°52'21.6"N 8°36'13.9"E
Dora Baltea	Settimo Vittone (1)	45°33'25.0"N 7°49'35.0"E
	Saluggia (2)	45°12'15.1"N 8°01'49.0"E
Dora Riparia	Torino (1)	45°05'16.8"N 7°38'28.0"E
Maira	Villafalletto (1)	44°33'05.4"N 7°32'41.9"E
	Racconigi (2)	44°46'11.0"N 7°39'59.0"E
Po	Crissolo (1)	44°42'06.2"N 7°08'33.2"E
	Villafranca Piemonte (2)	44°46'51.1"N 7°30'47.1"E
	Carignano (3)	44°54'31.3"N 7°41'26.8"E
	Torino (4)	45°03'54.3"N 7°41'59.8"E
	Brandizzo (5)	45°10'21.3"N 7°50'56.4"E
	Lauriano (6)	45°10'29.6"N 7°59'50.7"E
	Trino (7)	45°10'30.7"N 8°17'32.3"E
	Frassineto Po (8)	45°08'39.0"N 8°32'45.5"E
	Valenza (9)	45°03'03.8"N 8°37'55.4"E
	Isola Sant'Antonio (10)	45°02'35.1"N 8°51'05.1"E
Scrivia	Serravalle Scrivia (1)	44°44'38.0"N 8°51'29.6"E
	Villalvernia (2)	44°48'33.2"N 8°50'58.1"E
	Castelnuovo Scrivia (3)	44°56'38.5"N 8°51'53.8"E
	Guazzora (4)	45°01'42.9"N 8°52'35.2"E
Sesia	Motta de' Conti (1)	45°11'42.0"N 8°33'07.3"E
Stura di Demonte	Cuneo (1)	44°23'55.3"N 7°32'43.8"E
	Cherasco (2)	44°39'32.4"N 7°51'19.6"E
Tanaro	Priola (1)	44°15'27.4"N 8°01'31.8"E
	Alessandria (2)	44°56'12.2"N 8°37'27.0"E
	Bassignana (3)	44°59'03.0"N 8°43'38.1"E
Ticino	Golasecca (1)	45°42'15.7"N 8°39'05.0"E
	Oleggio (2)	45°35'22.4"N 8°42'13.9"E
	Cuggiono (3)	45°29'38.9"N 8°46'28.6"E
	Abbiategrasso (4)	45°21'54.7"N 8°51'37.0"E

Tabella 3-1 - Fiumi analizzati con relative stazioni di monitoraggio e coordinate

Dopo aver analizzato ogni corpo idrico e le rispettive stazioni di misurazione, è stata effettuata la selezione dei parametri critici per ogni corpo idrico, intendendo per "critici" quei composti per i quali le concentrazioni rilevate si discostano significativamente dal limite di quantificazione strumentale, indicando una presenza misurabile e ricorrente nel corpo idrico. I risultati sono stati poi sintetizzati nelle tabelle riepilogative presentate nei capitoli successivi, che raccolgono per ogni fiume e per ogni anno i parametri critici identificati e i valori medi registrati nelle diverse stazioni.

Il confronto tra i corpi idrici ai fini dell'identificazione di quelli più critici è stato effettuato attraverso una lettura integrata di più elementi, in assenza di un unico indicatore sintetico standardizzato. In primo luogo, è stato considerato il numero di parametri PFAS critici rilevati per ciascun fiume nel corso del quinquennio: un corpo idrico che presenta più composti in concentrazioni rilevabili e superiori al solo valore del limite di quantificazione è stato considerato soggetto a una pressione di contaminazione più ampia e diversificata. In secondo luogo, è stata valutata l'entità delle concentrazioni massime registrate. In terzo luogo, è stata considerata la persistenza temporale della contaminazione: parametri rilevati in modo continuativo per tutti e cinque gli anni di monitoraggio sono stati giudicati più critici rispetto a quelli presenti in modo sporadico. Infine, la distribuzione spaziale dei valori tra le diverse stazioni di uno stesso fiume, visualizzata attraverso i boxplot, ha permesso di identificare variazioni longitudinali significative, riconducibili probabilmente alla presenza di sorgenti puntuali lungo il corso d'acqua.

La sintesi di questi elementi ha portato alla classificazione dei corpi idrici in tre livelli di criticità, elevata (evidenziato in rosso) corrispondente ad una concentrazione misurata superiore al limite previsto dalla Legge Regionale n. 25/2021, media (evidenziato in giallo) rappresentante una concentrazione superiore al limite di rilevabilità dello strumento ma inferiore al limite emissivo e non critico (in verde) concentrazione non rilevata mediante la strumentazione utilizzata, presentata nel capitolo conclusivo. Nella seguente Figura 3-2 è riportata la legenda con il significato dei colori utilizzati per identificare tre livelli di criticità: Verde per un parametro non critico e quindi con concentrazione inferiore al LOQ, giallo per un parametro di media criticità cioè con concentrazione poco superiore al LOQ e rosso per un parametro a criticità elevata con concentrazione molto superiore rispetto al LOQ. Per valori non misurati in certi anni o in certa stazioni di monitoraggio, verrà assegnato alla posizione "n.a." corrispondente a *Not Available*.

Non critico	
Criticità media	
Criticità elevata	

Figura 3-2 - Scala di criticità

Questa tabella di classificazione verrà utilizzata nei capitoli seguenti nell'analisi dei singoli fiumi e nelle tabelle comparative finali.

Nei capitoli seguenti verranno presentati i risultati delle analisi condotte e messi a confronto tra loro al fine di identificare i corpi idrici superficiali più critici e i parametri più significativi su cui concentrare la maggiore attenzione. Le elaborazioni sono state condotte attraverso due strumenti principali. Il primo è il grafico fingerprinting, ovvero la rappresentazione della composizione percentuale relativa delle diverse specie PFAS rispetto alla concentrazione totale rilevata in ciascuna stazione di monitoraggio: questo approccio consente di caratterizzare la "firma chimica" di ciascun corpo idrico, evidenziando quali composti dominano il profilo di contaminazione e permettendo confronti qualitativi tra le stazioni di monitoraggio. Il secondo strumento è il boxplot, un diagramma statistico che rappresenta sinteticamente la distribuzione delle concentrazioni misurate per ciascun parametro, articolato per stazione di monitoraggio e per anno: questa rappresentazione permette di apprezzare tanto la variabilità spaziale lungo l'asta fluviale quanto l'evoluzione temporale delle concentrazioni nel periodo 2021–2025, rendendo immediatamente visibili i valori anomali e le stazioni soggette a pressioni di contaminazione più elevate. I risultati di queste elaborazioni verranno infine integrati in un confronto complessivo tra tutti i corpi idrici analizzati, con l'obiettivo di classificarli per livello di criticità.

3.1 Elaborazione statistica: Torrente Agogna

L'Agogna è un torrente dell'Italia settentrionale affluente di sinistra del fiume Po, con un bacino idrografico di circa 995 km² che interessa le province di Novara, Verbano-Cusio-Ossola, Vercelli e Pavia. Nasce nel gruppo montuoso del Mergozzolo a circa 1.120 m s.l.m. e percorre complessivamente circa 140 km con direzione prevalente nord-sud, sfociando nel Po in prossimità di Mezzana Bigli. Il corso si articola in tre tratti morfologicamente distinti: uno montano con alveo roccioso e valle stretta fino a Bolzano Novarese, uno collinare-alta pianura fino a Novara, e uno pianeggiante con andamento meandriforme attraverso un territorio prevalentemente risicolo fino alla confluenza in Po. (Autorità di Bacino del fiume Po, 2010).

Nella Figura 3-3 è riportato il grafico di fingerprinting del torrente Agogna con le tre località di monitoraggio: Fontaneto d'Agogna, Caltignaga e Novara. Dal grafico è evidente che procedendo da monte a valle, la concentrazione di sostanze inquinanti rimane pressoché identica nelle località 1 e 2 corrispondenti a Fontaneto d'Agogna e Caltignaga, ma nel terzo punto di monitoraggio la composizione varia notevolmente.

Questi cambiamenti possono essere dovuti a possibili immissari nella sezione di torrente compresa tra la stazione di monitoraggio 2 e 3 cioè tra la zona di Caltignaga e Novara.

Il numero di misure e la relativa percentuale sopra tale limite sono riportati nella seguente Tabella 3-2:

Località	N misur.	% ≤ LOQ	% > LOQ
Fontaneto d'Agogna (1)	840	93.93%	6.07%
Caltignaga (2)	762	93.96%	6.04%
Novara (3)	597	85.93%	14.07%

Tabella 3-2 - Misurazioni del torrente Agogna e % oltre il limite di rilevanza

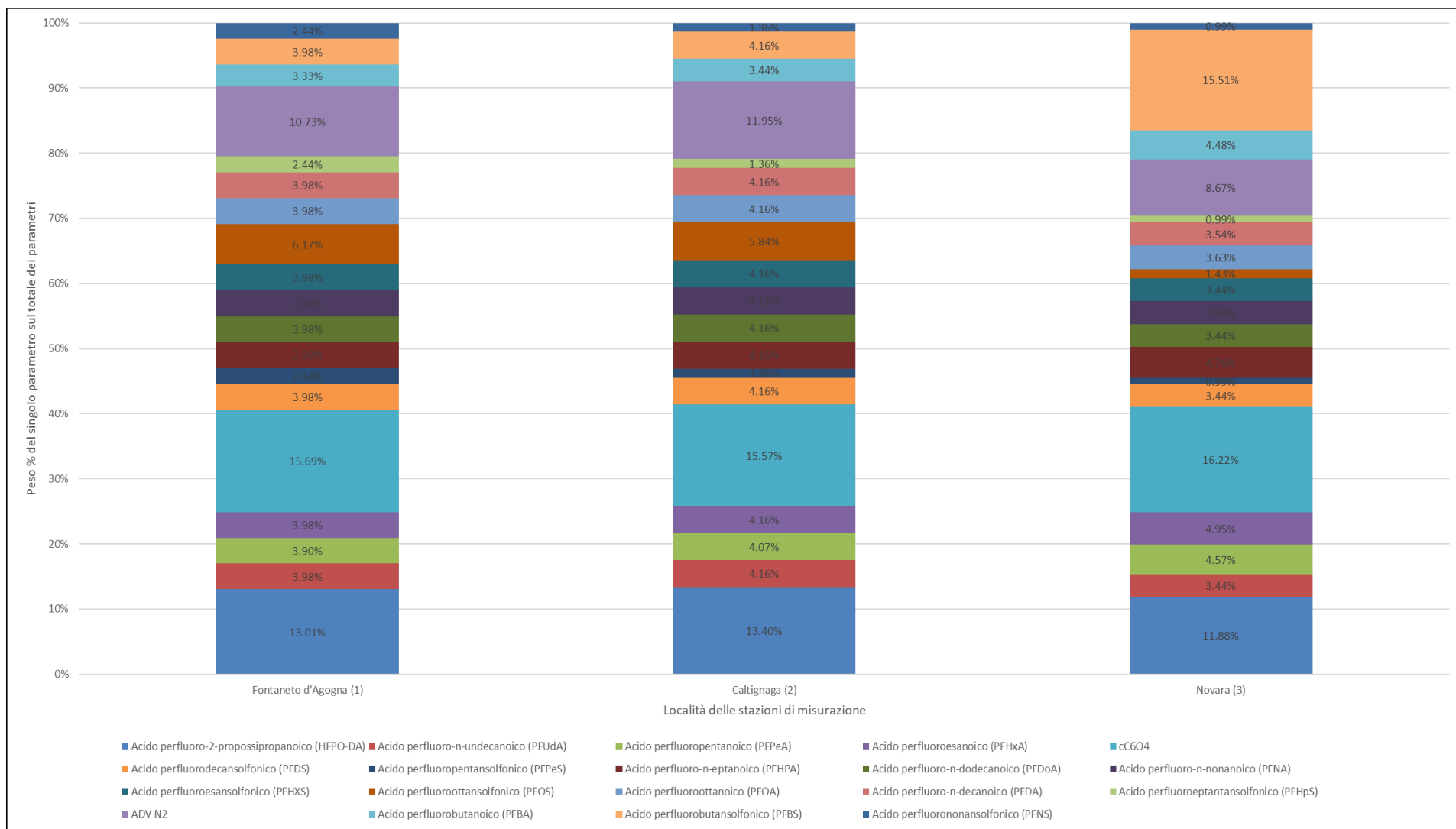


Figura 3-3 - Grafico fingerprinting del torrente Agogna

Dall'analisi di fingerprinting precedente è opportuno evidenziare, per ciascuna località, quali misurazioni hanno superato il limite di rilevabilità e possono pertanto essere considerate statisticamente significative. Le misure inferiori al limite di rilevabilità sono costruite artificialmente ipotizzando che sia la metà del limite e quindi non rappresentano una vera prova di rilevazione dei parametri nel fiume.

In aggiunta alle informazioni rappresentate nel grafico di fingerprinting, nelle tabelle successive sono rappresentati i valori medi misurati lungo le stazioni di misurazione suddivise per anno. Nelle tabelle sono evidenziati i parametri critici (evidenziati in giallo) e parametri molto critici (evidenziati in rosso) in termini di concentrazione media misurata.

Torrente Agogna - 2021				
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Fontaneto d'Agogna (1)	Caltignaga (2)	Novara (3)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	0.020	0.020	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	0.005	0.005	0.025
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	0.015	0.021	0.002
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
ADV N2	0.04	0.020	0.020	0.020
cC6O4	0.04	0.032	0.020	0.046
Torrente Agogna - 2022				
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Fontaneto d'Agogna (1)	Caltignaga (2)	Novara (3)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	0.020	0.020	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	0.005	0.005	0.017
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	0.005	0.005	0.088
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	0.005	0.005	0.019
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	0.005	0.005	0.007
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	0.005	0.005	0.012
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	0.005	0.005	0.008
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	0.005	0.005	0.007
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	0.016	0.013	0.004
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	0.005	0.005	0.014
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
ADV N2	0.04	0.020	0.020	0.020
cC6O4	0.04	0.020	0.020	0.028
Torrente Agogna - 2023				
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Fontaneto d'Agogna (1)	Caltignaga (2)	Novara (3)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	0.020	0.020	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	0.005	0.005	0.012
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	0.005	0.005	0.037
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	0.005	0.005	0.009
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	0.005	0.005	0.013
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	0.018	0.012	0.005
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	0.005	0.005	0.009
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	0.005	0.005	0.005
ADV N2	0.04	0.020	0.020	0.020
cC6O4	0.04	0.020	0.020	0.036

Torrente Agogna - 2024				
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Fontaneto d'Agogna (1)	Caltignaga (2)	Novara (3)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	0.020	0.020	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	0.005	0.005	0.009
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	0.005	0.005	0.026
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	0.005	0.005	0.007
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	0.005	0.005	0.007
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	0.005	0.005	0.007
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	0.012	0.011	0.006
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	0.005	0.005	0.009
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	0.005	0.005	0.005
ADV N2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
cC6O4	0.04	0.020	0.020	0.031
Torrente Agogna - 2025				
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Fontaneto d'Agogna (1)	Caltignaga (2)	Novara (3)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	0.020	0.020	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	0.008	0.008	0.004
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	0.005	0.005	0.005
ADV N2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
cC6O4	0.04	0.020	0.020	0.020

Figura 3-4 – Torrente Agogna: Misurazioni medie 2021-2025

Dalle figure precedenti si evince che i parametri critici per il torrente Agogna negli anni sono stati principalmente:

- Acido perfluorobutansolfonico (PFBS);
- Acido perfluoroottansolfonico (PFOS);
- cC6O4.

Nelle pagine seguenti vengono riportati i boxplot dei composti risultati più critici lungo il torrente Agogna, rappresentando le misurazioni effettuate tra il 2021 e il 2025 nelle tre stazioni di monitoraggio.

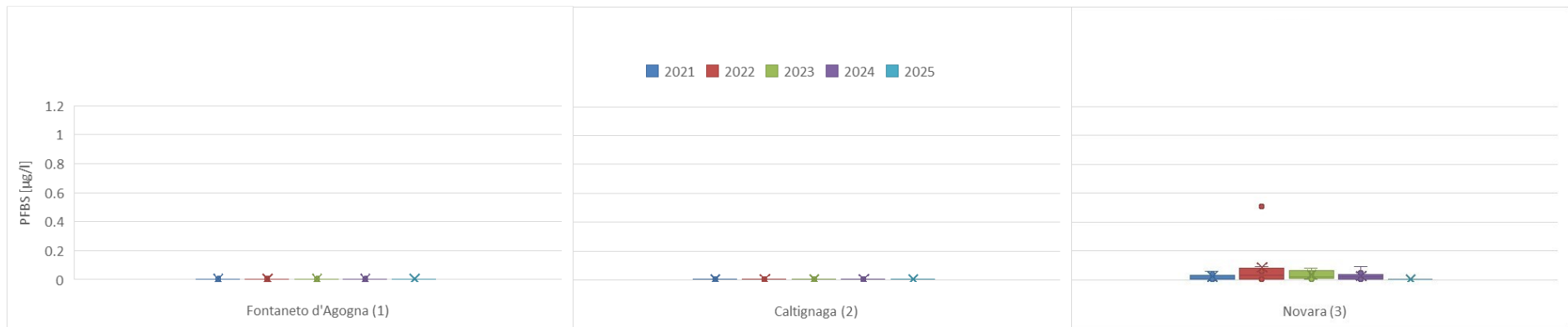


Figura 3-5 - Boxplot parametro PFBS nel torrente Agogna

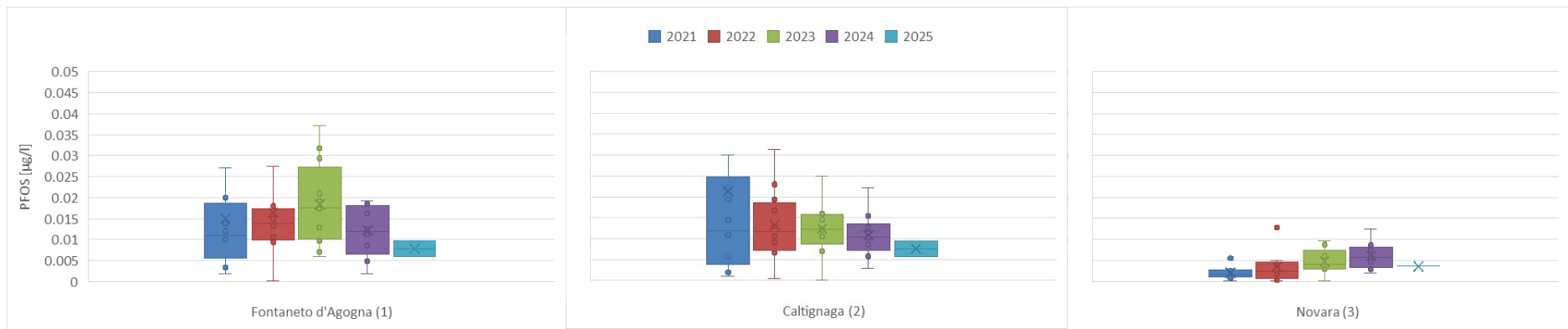


Figura 3-6 - Boxplot parametro PFOS nel torrente Agogna

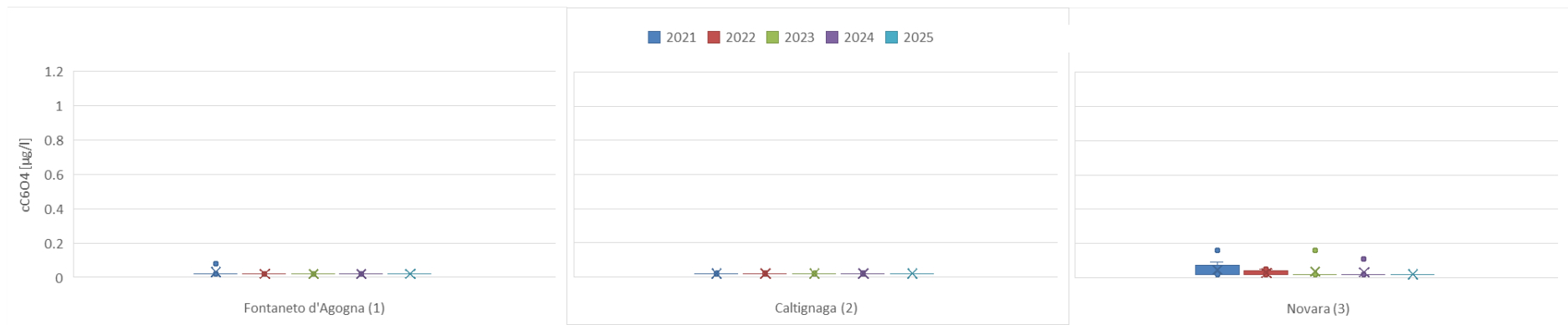


Figura 3-7 - Boxplot parametro cC6O4 nel torrente Agogna

I boxplot precedenti rappresentano una situazione chiara: tra le stazioni di monitoraggio delle località di Caltignaga e Novara, è presente uno o più immissari che determinano un aumento considerevole delle concentrazioni di PFBS e cC6O4. Inoltre, a monte della stazione di monitoraggio 1 e fino alla seconda stazione di monitoraggio quindi nell'area verosimilmente compresa tra Borgomanero e Caltignaga è molto probabilmente presente un immissario contenente PFOS.

Analizzando l'evoluzione temporale delle concentrazioni medie annue di PFOS sul torrente Agogna nel periodo 2021-2025, si osserva una tendenza incoraggiante alla riduzione progressiva: la media sulle tre località passa da 0,013 µg/L nel 2021 a 0,012 µg/L nel 2022 e 2023, per poi scendere a 0,010 µg/L nel 2024 e a 0,007 µg/L nel 2025. Particolarmente significativa è la contrazione dei valori massimi registrati nelle singole stazioni: il picco assoluto passa da 0,021 µg/L nel 2021 a 0,016 µg/L nel 2022, 0,018 µg/L nel 2023 e 0,012 µg/L nel 2024, con una riduzione di oltre il 50% rispetto al valore iniziale. Questa tendenza alla diminuzione, pur non consentendo ancora conclusioni definitive, potrebbe essere messa in relazione con l'entrata in vigore dei valori limite di emissione (VLE) previsti dalla L.R. Piemonte n. 25/2021 e con il progressivo adeguamento degli scarichi industriali presenti nel bacino

In conclusione, il parametro critico per questo corpo superficiale è sicuramente il PFOS che è rilevato lungo tutto il percorso in concentrazioni apprezzabili. In merito alle concentrazioni è importante sottolineare che il parametro PFOS è misurato tramite strumenti con una sensibilità superiore rispetto agli altri parametri. In particolare, la sensibilità dello strumento o limite di rilevabilità, è dell'ordine di 0,0002 µg/l in confronto agli altri parametri che hanno un limite di rilevabilità variabile tra 0,01 e 0,04 µg/l.

3.2 Elaborazione statistica: Fiume Bormida

Bormida è un fiume affluente di destra del Tanaro, lungo complessivamente circa 154 km con un bacino idrografico di circa 2.663 km², distribuito tra le Alpi Marittime nel tratto dell'alto corso e l'Appennino Ligure nel tratto degli affluenti Erro e Orba. Il fiume si origina dalla confluenza di due rami distinti, la Bormida di Millesimo e la Bormida di Spigno, che si uniscono in prossimità di Bistagno, in provincia di Alessandria; da questo punto il corso assume le tipiche caratteristiche di fondovalle e di pianura con alveo meandriforme, attraversando Acqui Terme e Castellazzo Bormida fino alla confluenza nel Tanaro a est della città di Alessandria. Il regime idrologico è di tipo pluviale, con portata media annua alla foce di circa 33 m³/s dopo la confluenza con l'Orba, suo principale affluente di destra. (A.D.B.PO, 2001b)

Nella successiva Figura 3-8 è riportato il grafico di fingerprinting del fiume Bormida con le due località di monitoraggio: Alessandria monte, cioè la stazione di monitoraggio che si trova prima della città di Alessandria nella direzione del flusso del fiume e Alessandria valle che monitora le acque a valle della città.

Dal grafico è evidente che procedendo da monte a valle, la concentrazione di sostanze inquinanti rimane pressoché invariata salvo per alcuni parametri che aumentano il loro peso percentuale all'interno della composizione totale.

Questi cambiamenti possono essere dovuti a immissari industriali o civili nella sezione di fiume che giace tra le due stazioni di monitoraggio della città di Alessandria.

Il numero di misure e la relativa percentuale sopra tale limite sono riportati nella seguente Tabella 3-3:

Località	N misur.	% ≤ LOQ	% > LOQ
Alessandria monte (1)	569	75.75%	24.25%
Alessandria valle (2)	16	93.75%	6.25%

Tabella 3-3 - Misurazioni del fiume Bormida e % oltre il limite di rilevabilità

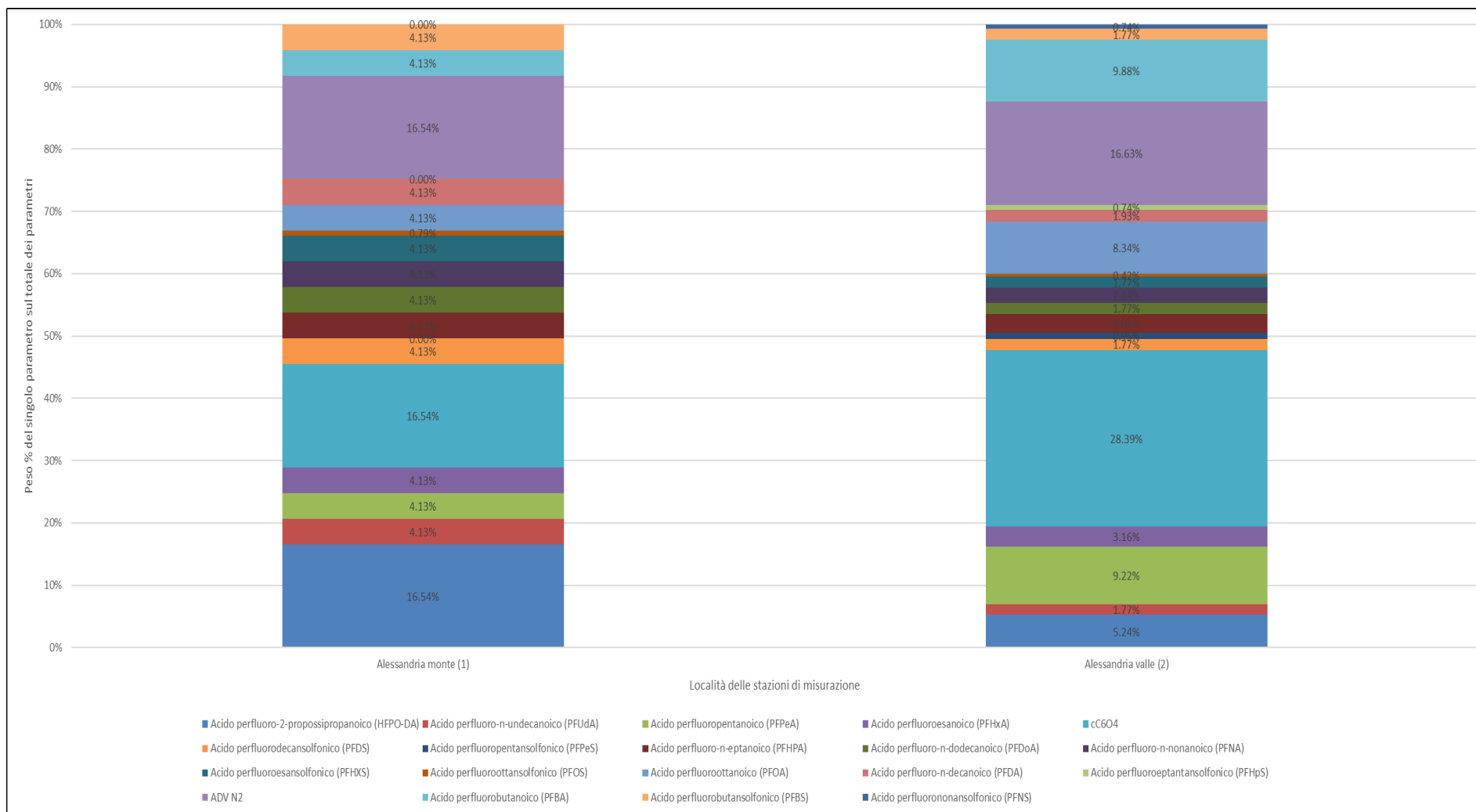


Figura 3-8 - Grafico fingerprinting del fiume Bormida

Dall'analisi di fingerprinting precedente è opportuno evidenziare, per ciascuna località, quali misurazioni hanno superato il limite di rilevabilità e possono pertanto essere considerate statisticamente significative. Le misure inferiori al limite di rilevabilità sono costruite artificialmente ipotizzando che sia la metà del limite e quindi non rappresentano una vera prova di rilevazione dei parametri nel fiume.

In aggiunta alle informazioni rappresentate nel grafico di fingerprinting, nelle tabelle successive sono rappresentati i valori medi misurati lungo le stazioni di misurazione suddivise per anno. Nelle tabelle sono evidenziati i parametri critici (evidenziati in giallo) e parametri molto critici (evidenziati in rosso) in termini di concentrazione media misurata.

Fiume Bormida - 2021			
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Alessandria monte (1)	Alessandria valle (2)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	n.a.	0.018
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	n.a.	0.014
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	n.a.	0.006
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	n.a.	0.012
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	n.a.	0.009
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	n.a.	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorooctanoico (PFOA)	0.01	n.a.	0.051
Acido perfluorooctansolfonico (PFOS)	0.0002	n.a.	0.001
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	n.a.	0.076
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	n.a.	n.a.	n.a.
ADV N2	0.04	n.a.	0.122
cC6O4	0.04	n.a.	0.213
Fiume Bormida - 2022			
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Alessandria monte (1)	Alessandria valle (2)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	0.020	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	0.005	0.191
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	0.005	0.020
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	0.005	0.006
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	0.005	0.022
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	0.005	0.015
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	n.a.	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluorooctanoico (PFOA)	0.01	0.005	0.072
Acido perfluorooctansolfonico (PFOS)	0.0002	0.002	0.004
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	0.005	0.069
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	n.a.	n.a.	n.a.
ADV N2	0.04	0.020	0.135
cC6O4	0.04	0.020	0.260

Fiume Bormida - 2023			
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Alessandria monte (1)	Alessandria valle (2)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	n.a.	0.039
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	n.a.	0.012
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	n.a.	0.009
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	n.a.	0.008
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	n.a.	0.030
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	n.a.	0.002
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	n.a.	0.010
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	n.a.	0.015
ADV N2	0.04	n.a.	0.058
cC6O4	0.04	n.a.	0.063
Fiume Bormida - 2024			
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Alessandria monte (1)	Alessandria valle (2)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	n.a.	0.008
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	n.a.	0.001
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	n.a.	0.005
ADV N2	n.a.	n.a.	n.a.
cC6O4	0.04	n.a.	0.020
Fiume Bormida - 2025			
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Alessandria monte (1)	Alessandria valle (2)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	n.a.	0.002
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	n.a.	0.005
ADV N2	n.a.	n.a.	n.a.
cC6O4	0.04	n.a.	0.020

Figura 3-9 - Fiume Bormida: Misurazioni medie 2021-2025

Dalle figure precedenti si evince che i parametri critici per il fiume Bormida negli anni sono stati principalmente:

- Acido perfluorobutanoico (PFBA);
- Acido perfluorooottanoico (PFOA);
- Acido perfluorooottansolfonico (PFOS);
- Acido perfluoropentanoico (PFPeA);
- ADV N2;
- cC6O4.

Nelle pagine seguenti vengono riportati i boxplot dei composti risultati più critici lungo il fiume Bormida, rappresentando le misurazioni effettuate tra il 2021 e il 2025 nelle due stazioni di monitoraggio.

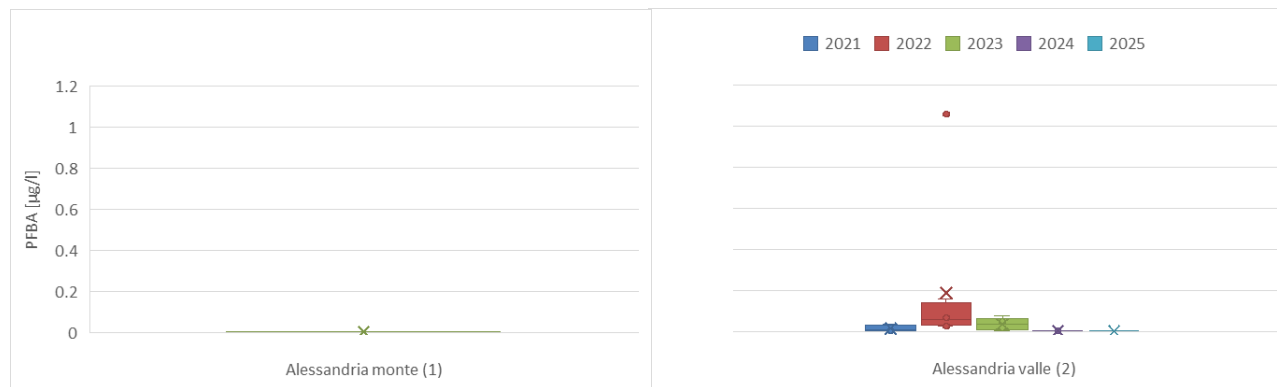


Figura 3-10 - Boxplot parametro PFBA nel fiume Bormida



Figura 3-11 - Boxplot parametro PFOA nel fiume Bormida



Figura 3-12 - Boxplot parametro PFOS nel fiume Bormida

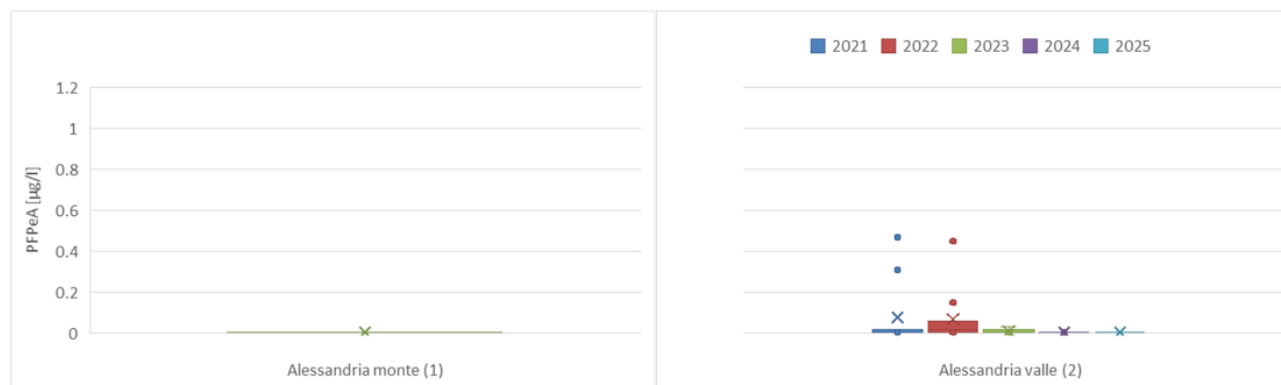


Figura 3-13 - Boxplot parametro PFPeA nel fiume Bormida



Figura 3-14 - Boxplot parametro ADV N2 nel fiume Bormida

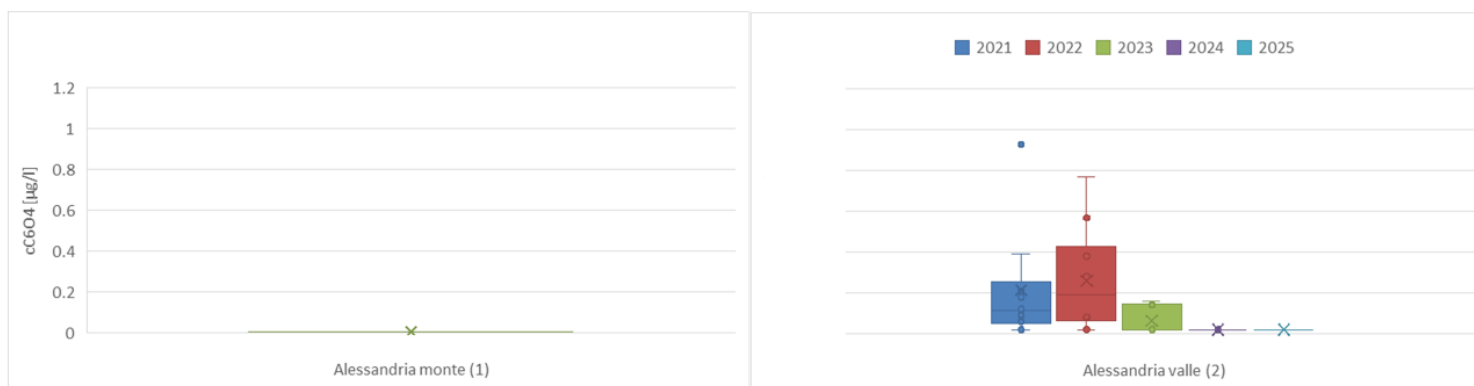


Figura 3-15 - Boxplot parametro cC6O4 nel fiume Bormida

I boxplot precedenti rappresentano una situazione chiara: tra le stazioni di monitoraggio presenti a monte e a valle della città di Alessandria è presente uno o più punti di immissione che determinano un aumento considerevole delle concentrazioni di PFBA, PFOA, PFOS ADV N2 e cC6O4.

In conclusione, i parametri critici per questo corpo superficiale sono sicuramente diversi e sono rilevati lungo tutto il percorso in concentrazioni apprezzabili. In merito alle concentrazioni è importante sottolineare che il parametro PFOS è misurato tramite strumenti con una sensibilità superiore rispetto agli altri parametri. In particolare, la sensibilità dello strumento o limite di rilevabilità, è dell'ordine di 0,0002 µg/l in confronto agli altri parametri che hanno un limite di rilevabilità variabile tra 0,01 e 0,04 µg/l.

3.3 Elaborazione statistica: Fiume Dora Baltea

La Dora Baltea è un fiume affluente di sinistra del Po lungo circa 160 km, con un bacino idrografico di circa 4.322 km², e con una portata media alla confluenza in Po di circa 110 m³/s. Nasce in Valle d'Aosta dalla confluenza, presso Entrèves, della Dora di Ferret e della Dora di Vény, entrambe provenienti dal massiccio del Monte Bianco, e percorre l'intera Valle d'Aosta prima di entrare in territorio piemontese a Pont-Saint-Martin, attraversando l'anfiteatro morenico di Ivrea e confluendo nel Po a valle di Chivasso. La presenza dei ghiacciai nel bacino montano condiziona notevolmente il regime di deflusso, con minimi accentuati invernali e massimi estivi in accordo con il periodo di scioglimento nivale e glaciale. Nel tratto piemontese, da Mazzè fino alla confluenza in Po, l'alveo assume andamento tendenzialmente meandriforme con anse accentuate e irregolari in un fondovalle piuttosto ampio con vaste aree allagabili. (A.D.B.PO, 2001a)

Nella successiva Figura 3-8 è riportato il grafico di fingerprinting del fiume Dora Baltea con le due località di monitoraggio: la prima, a Settimo Vittone e la seconda a Saluggia.

Dal grafico è evidente che procedendo da monte a valle, la concentrazione di sostanze inquinanti rimane pressochè invariata salvo per alcune piccole variazioni in alcuni parametri.

Il numero di misure e la relativa percentuale sopra tale limite sono riportati nella seguente Tabella 3-4:

Località	N misur.	% ≤ LOQ	% > LOQ
Settimo Vittone (1)	225	99.56%	0.44%
Saluggia (2)	830	98.92%	1.08%

Tabella 3-4 - Misurazioni del fiume Dora Baltea e % oltre il limite di rilevabilità

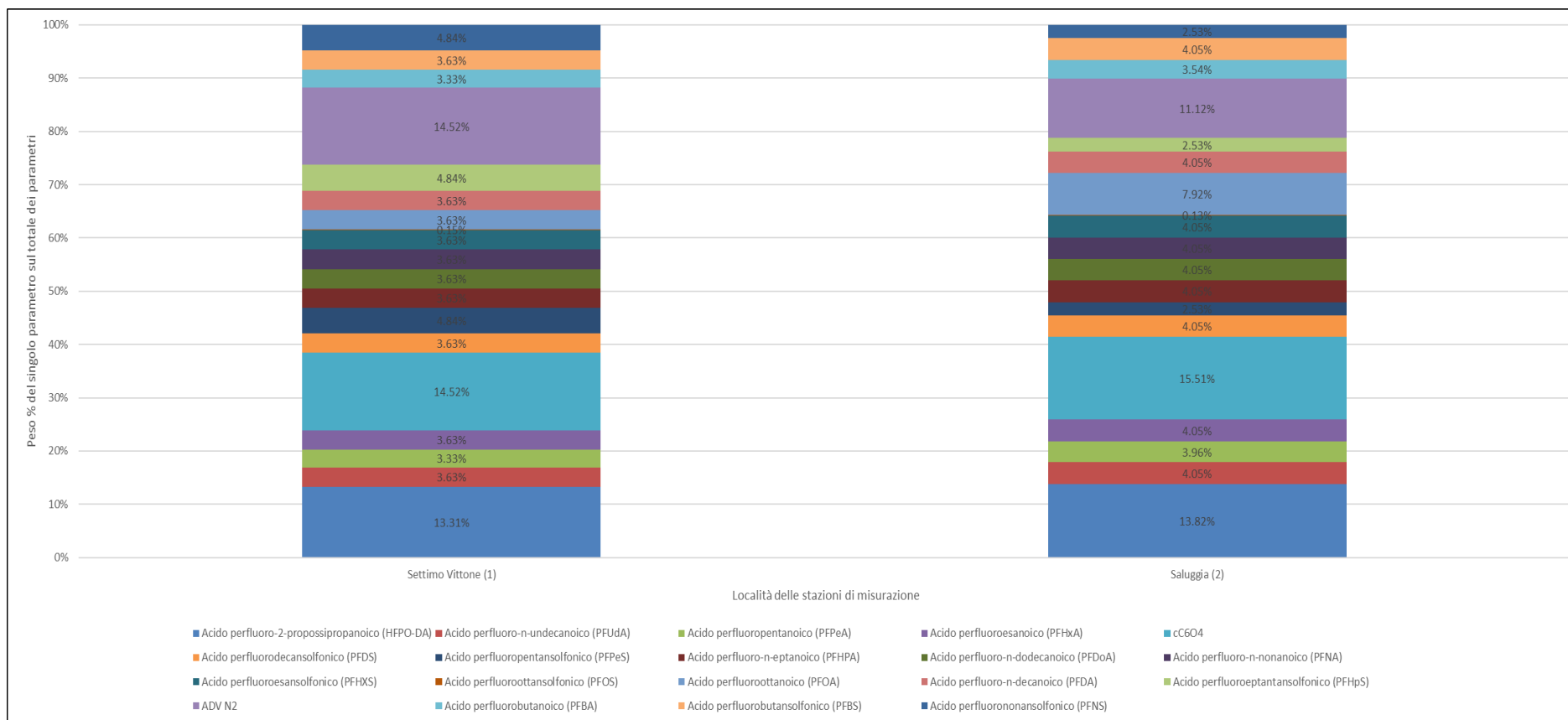


Figura 3-16 - Grafico fingerprinting del fiume Dora Baltea

Dall'analisi di fingerprinting precedente è opportuno evidenziare, per ciascuna località, quali misurazioni hanno superato il limite di rilevabilità e possono pertanto essere considerate statisticamente significative. Le misure inferiori al limite di rilevabilità sono costruite artificialmente ipotizzando che sia la metà del limite e quindi non rappresentano una vera prova di rilevazione dei parametri nel fiume.

In aggiunta alle informazioni rappresentate nel grafico di fingerprinting, nelle tabelle successive sono rappresentati i valori medi misurati lungo le stazioni di misurazione suddivise per anno. Nelle tabelle sono evidenziati i parametri critici (evidenziati in giallo) e parametri molto critici (evidenziati in rosso) in termini di concentrazione media misurata.

Fiume Dora Baltea - 2021			
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Settimo Vittone (1)	Saluggia (2)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	n.a.	n.a.	n.a.
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	n.a.	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	n.a.	0.0003
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	n.a.	n.a.	n.a.
ADV N2	0.04	n.a.	0.020
cC6O4	0.04	n.a.	0.020
Fiume Dora Baltea - 2022			
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Settimo Vittone (1)	Saluggia (2)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	n.a.	n.a.	n.a.
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	n.a.	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	n.a.	0.044
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	n.a.	0.0004
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	n.a.	n.a.	n.a.
ADV N2	0.04	n.a.	0.020
cC6O4	0.04	n.a.	0.020
Fiume Dora Baltea - 2023			
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Settimo Vittone (1)	Saluggia (2)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	0.020	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	0.0003	0.0002
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	0.005	0.005
ADV N2	0.04	0.020	0.020
cC6O4	0.04	0.020	0.020

Fiume Dora Baltea - 2024			
	Limite di rilevabilità [$\mu\text{g/l}$]	Settimo Vittone (1)	Saluggia (2)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorooottanoico (PFOA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.0002	n.a.	0.0002
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	n.a.	0.005
ADV N2	n.a.	n.a.	n.a.
cC6O4	0.04	n.a.	0.020
Fiume Dora Baltea - 2025			
	Limite di rilevabilità [$\mu\text{g/l}$]	Settimo Vittone (1)	Saluggia (2)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorooottanoico (PFOA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.0002	n.a.	0.0002
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	n.a.	0.005
ADV N2	n.a.	n.a.	n.a.
cC6O4	0.04	n.a.	0.020

Figura 3-17 - Fiume Dora Baltea: Misurazioni medie 2021-2025

Dalle figure precedenti si evince che non sono presenti particolari parametri critici per il fiume Dora Baltea ma solo alcune tracce dei seguenti parametri:

- Acido perfluorooottanoico (PFOA);
- Acido perfluorooottansolfonico (PFOS).

Nelle pagine seguenti vengono riportati i boxplot dei composti che sono risultati in tracce per verificarne la distribuzione lungo le stazioni di misurazione e negli anni 2021 e il 2025.



Figura 3-18 - Boxplot parametro PFOA nel fiume Dora Baltea

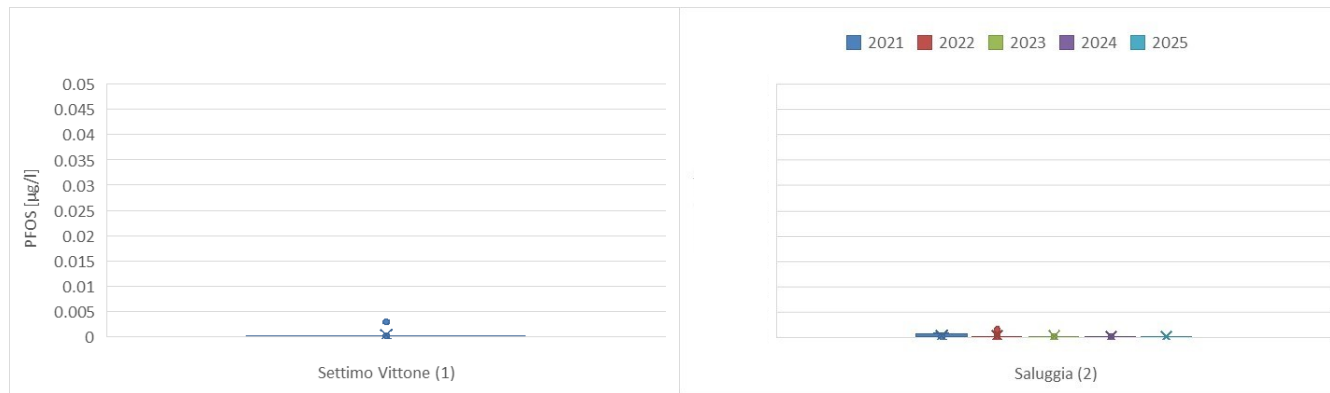


Figura 3-19 - - Boxplot parametro PFOS nel fiume Dora Baltea

I boxplot precedenti chiariscono una situazione in linea generale positiva, il fiume Dora Baltea risulta essere in larga misura privo di sostanze riconducibili a PFAS se non in tracce per quanto riguarda i parametri PFOA e PFOS che possono essere riconducibili a reflui di origine civile alla luce delle concentrazioni basse misurate.

In merito alle concentrazioni è importante sottolineare che il parametro PFOS è misurato tramite strumenti con una sensibilità superiore rispetto agli altri parametri. In particolare, la sensibilità dello strumento o limite di rilevabilità, è dell'ordine di $0,0002 \mu\text{g/l}$ in confronto agli altri parametri che hanno un limite di rilevabilità variabile tra $0,01$ e $0,04 \mu\text{g/l}$.

3.4 Elaborazione statistica: Fiume Dora Riparia

La Dora Riparia è un fiume del Piemonte affluente di sinistra del Po, lungo circa 125 km con un bacino idrografico di circa 1.230 km². Si origina sulle Alpi Cozie presso Cesana Torinese dalla confluenza della Piccola Dora, che nasce in territorio francese presso il Colle del Monginevro, con il torrente Ripa, da cui deriva l'appellativo; riceve poi la Dora di Bardonecchia presso Oulx e il Cenischia presso Susa, attraversa la Valle di Susa e confluisce nel Po all'interno dell'area metropolitana di Torino.

Il bacino è classificabile tra i bacini alpini interni, con un regime idrologico di tipo nivo-pluviale caratterizzato da piene tardo primaverili-estive e autunnali e magre invernali, con una portata media alla confluenza di circa 26 m³/s. Le portate risultano tuttavia sempre decisamente inferiori a quelle naturali teoriche: il livello di compromissione quantitativa nei tratti montani è riconducibile agli impianti idroelettrici in cascata, mentre le condizioni di depauperamento sull'asta di valle sono prodotte dai numerosi prelievi irrigui fino all'attraversamento dell'area metropolitana di Torino (A.D.B.PO, 2001c)

Nella successiva Figura 3-8 è riportato il grafico di fingerprinting del fiume Dora Riparia con la stazione di monitoraggio della città di Torino.

Il numero di misure e la relativa percentuale sopra tale limite sono riportati nella seguente Tabella 3-5:

Località	N misur.	% ≤ LOQ	% > LOQ
Torino (1)	596	98.66%	1.34%

Tabella 3-5 - Misurazioni del fiume Dora Riparia e % oltre il limite di rilevabilità

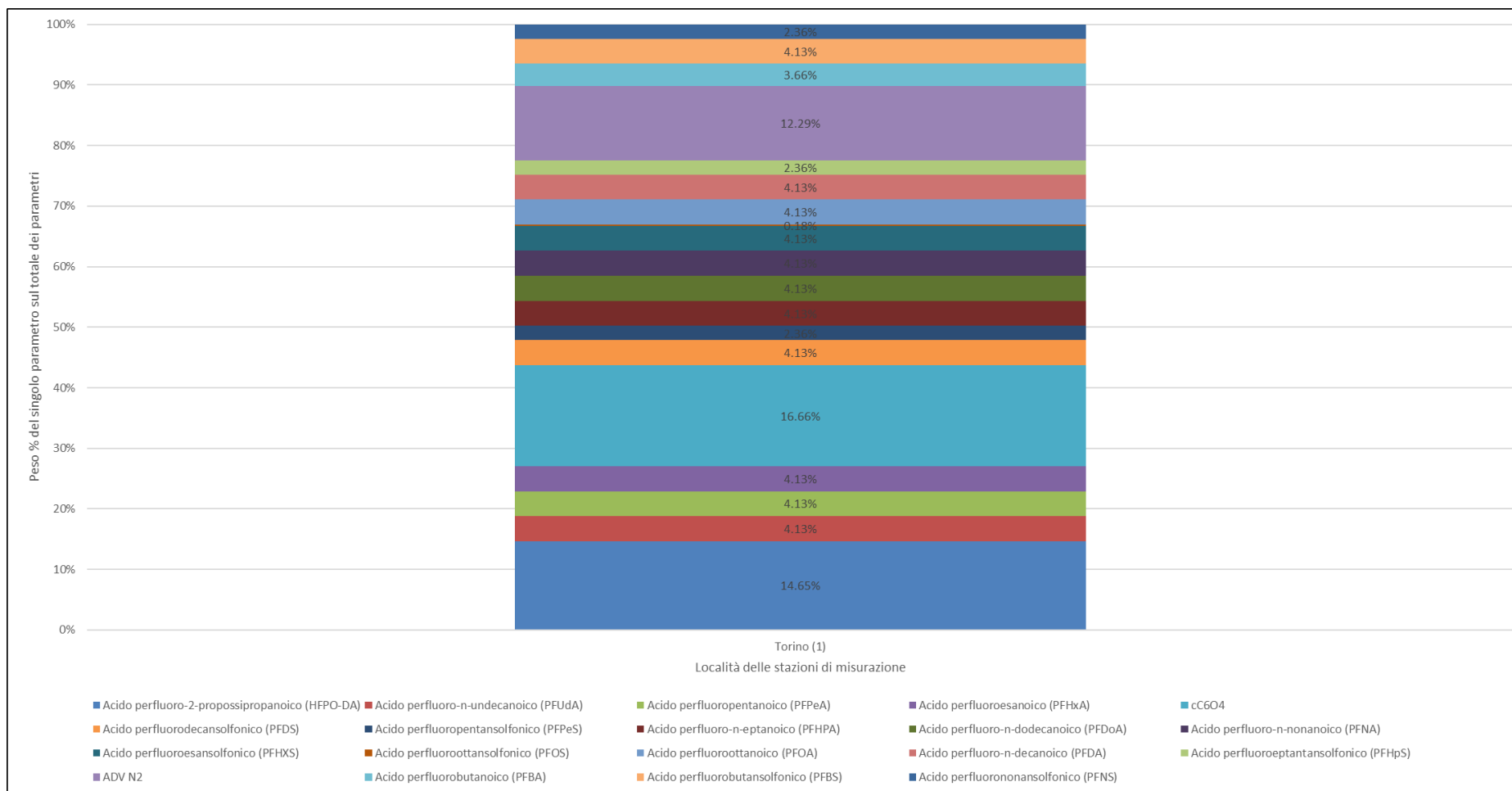


Figura 3-20 - Grafico fingerprinting del fiume Dora Riparia

Dall'analisi di fingerprinting precedente è opportuno evidenziare, per ciascuna località, quali misurazioni hanno superato il limite di rilevabilità e possono pertanto essere considerate statisticamente significative. Le misure inferiori al limite di rilevabilità sono costruite artificialmente ipotizzando che sia la metà del limite e quindi non rappresentano una vera prova di rilevazione dei parametri nel fiume.

In aggiunta alle informazioni rappresentate nel grafico di fingerprinting, nelle tabelle successive sono rappresentati i valori medi misurati nella stazione di misurazione suddivise per anno. Nelle tabelle sono evidenziati i parametri critici (evidenziati in giallo) e parametri molto critici (evidenziati in rosso) in termini di concentrazione media misurata.

Fiume Dora Riparia - 2021		
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Torino (1)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	0.005
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	0.0004
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	n.a.	n.a.
ADV N2	0.04	n.a.
cC6O4	0.04	0.020
Fiume Dora Riparia - 2022		
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Torino (1)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	0.005
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	0.0008
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	n.a.	n.a.
ADV N2	0.04	0.020
cC6O4	0.04	0.051
Fiume Dora Riparia - 2023		
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Torino (1)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	0.005
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	0.005
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	0.005
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	0.0002
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	0.005
ADV N2	0.04	0.020
cC6O4	0.04	0.020

Fiume Dora Riparia - 2024		
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Torino (1)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	0.005
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	0.005
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	0.005
Acido perfluorooctanoico (PFOA)	0.01	0.005
Acido perfluorooctansolfonico (PFOS)	0.0002	0.0002
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	0.005
ADV N2	n.a.	0.020
cC6O4	0.04	0.020
Fiume Dora Riparia - 2025		
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Torino (1)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	n.a.
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	n.a.
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	n.a.
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	n.a.
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	n.a.
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	n.a.
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	n.a.
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	n.a.
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	n.a.
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	n.a.
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	n.a.
Acido perfluorooctanoico (PFOA)	0.01	n.a.
Acido perfluorooctansolfonico (PFOS)	0.0002	n.a.
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	n.a.
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	n.a.
ADV N2	n.a.	n.a.
cC6O4	0.04	n.a.

Figura 3-21 - Fiume Dora Riparia: Misurazioni medie 2021-2025

Dalle figure precedenti si evince che non sono presenti particolari parametri critici per il fiume Dora Riparia ma solo alcune tracce dei seguenti parametri:

- Acido perfluorooottansolfonico (PFOS);
- cC6O4.

Nelle pagine seguenti vengono riportati i boxplot dei composti che sono risultati in tracce per verificarne la distribuzione lungo le stazioni di misurazione e negli anni 2021 e il 2025.

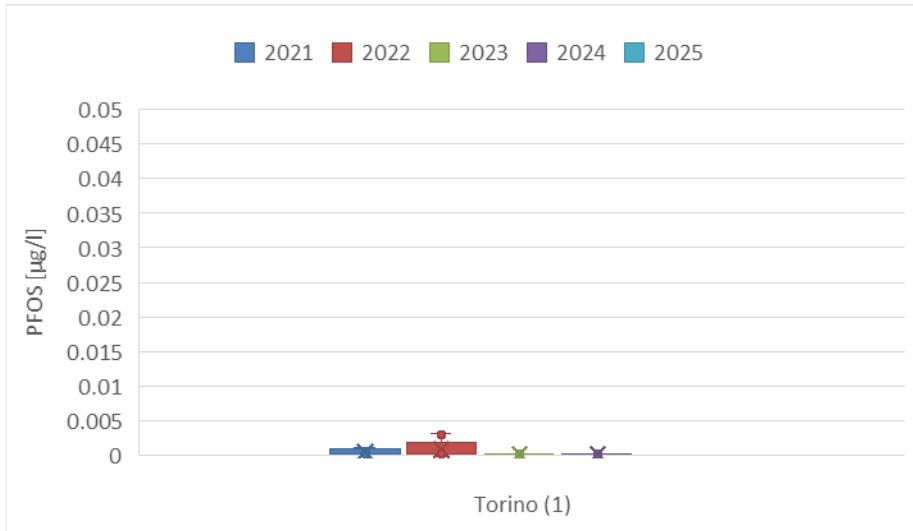


Figura 3-22 - Boxplot parametro PFOS nel fiume Dora Riparia

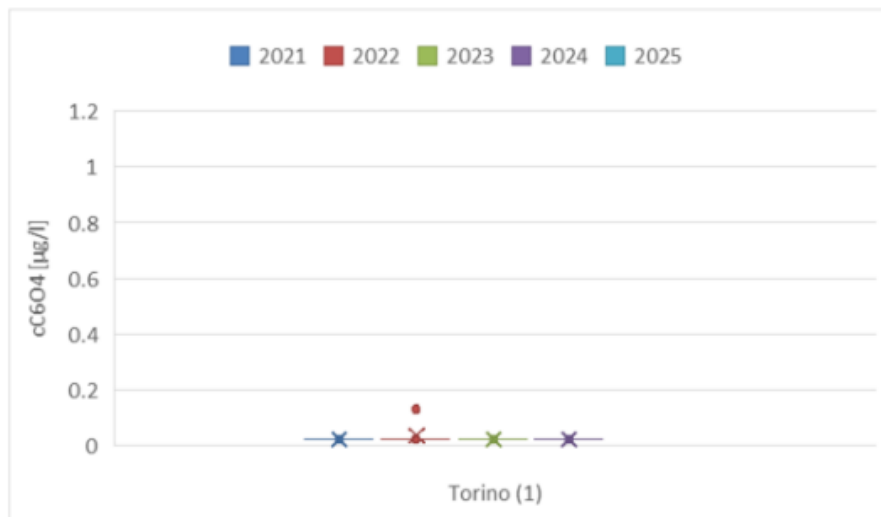


Figura 3-23 - Boxplot parametro cC6O4 nel fiume Dora Riparia

I boxplot precedenti chiariscono una situazione in linea generale positiva, il fiume Dora Riparia risulta essere in larga misura privo di sostanze riconducibili a PFAS se non in tracce per quanto riguarda i parametri PFOS e cC6O4 che possono essere riconducibili a reflui di origine civile alla luce delle concentrazioni basse misurate.

In merito alle concentrazioni è importante sottolineare che il parametro PFOS è misurato tramite strumenti con una sensibilità superiore rispetto agli altri parametri. In particolare, la sensibilità dello strumento o limite di rilevabilità, è dell'ordine di 0,0002 µg/l in confronto agli altri parametri che hanno un limite di rilevabilità variabile tra 0,01 e 0,04 µg/l.

3.5 Elaborazione statistica: Fiume Maira

Il Maira è un fiume affluente di destra del Po, lungo circa 111 km con un bacino idrografico di circa 995 km², nel quale confluisce presso Lombriasco. Nasce sulle Alpi Cozie in prossimità della borgata Saretto, scorre con andamento torrentizio nella valle omonima bagnando Acceglio, Prazzo e Dronero, per poi entrare in pianura passando per Busca, Villafalletto, Vottignasco e la zona ovest di Savigliano. Nel tratto pianeggiante da Cavallermaggiore, dove riceve da sinistra il torrente Mellea, fino alla confluenza in Po, l'alveo è sinuoso con qualche ansa accentuata e sporadiche opere di difesa spondale. Il regime idrologico è di tipo torrentizio alpino, con una portata media di circa 19,5 m³/s alla confluenza con il Po (Autorità di bacino del fiume Po, 2001)

Nella successiva Figura 3-24 è riportato il grafico di fingerprinting del fiume Maira con le due località di monitoraggio: la prima, a Villafalletto e la seconda a Racconigi.

Dal grafico è evidente che procedendo da monte a valle, la concentrazione di sostanze inquinanti rimane pressochè invariata. Nelle seguenti tabelle verranno approfonditi i singoli parametri misurati nelle stazioni di monitoraggio in modo da verificarne l'effettiva presenza.

Il numero di misure e la relativa percentuale sopra tale limite sono riportati nella seguente Tabella 3-6:

Località	N misur.	% ≤ LOQ	% > LOQ
Villafalletto (1)	215	99.53%	0.47%
Racconigi (2)	612	97.22%	2.78%

Tabella 3-6 - Misurazioni del fiume Maira e % oltre il limite di rilevabilità

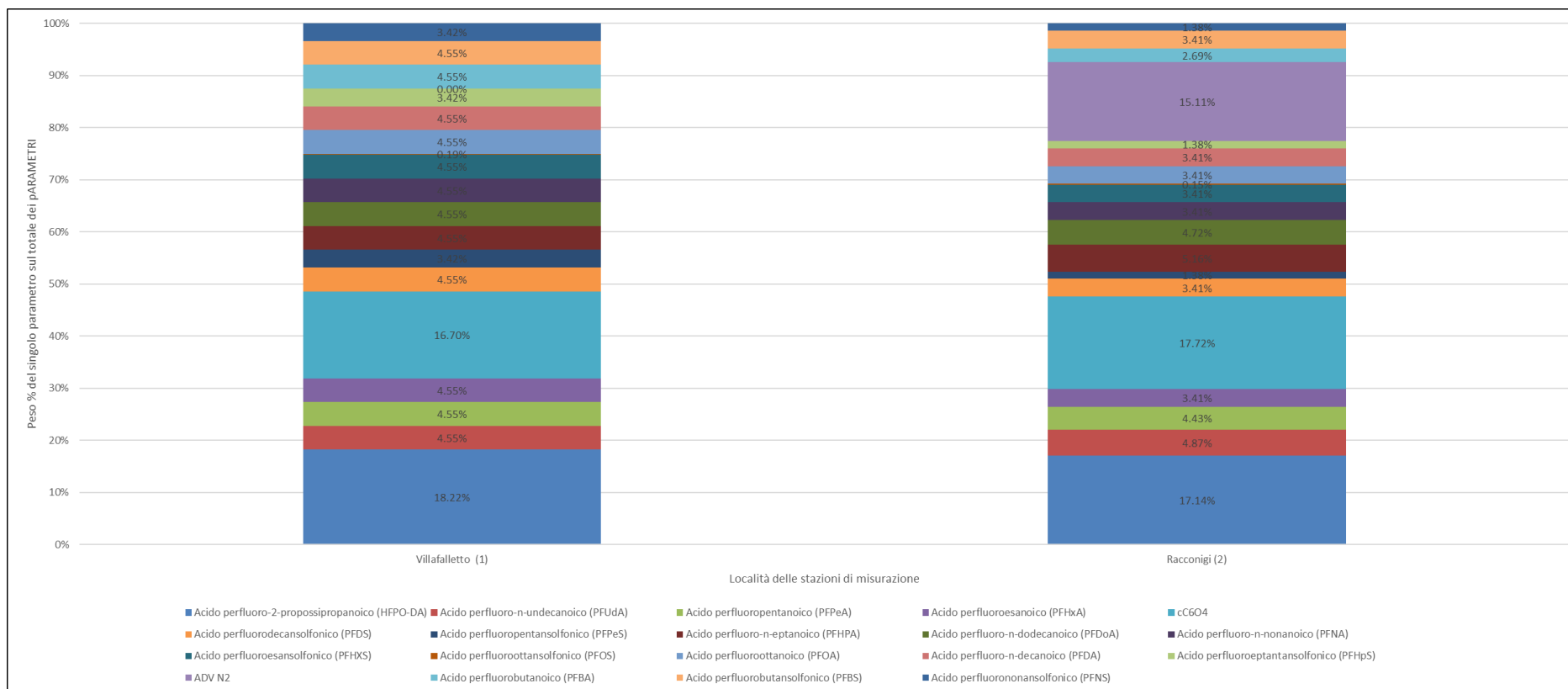


Figura 3-24 - Grafico fingerprinting del fiume Maira

Dall'analisi di fingerprinting precedente è opportuno evidenziare, per ciascuna località, quali misurazioni hanno superato il limite di rilevabilità e possono pertanto essere considerate statisticamente significative. Le misure inferiori al limite di rilevabilità sono costruite artificialmente ipotizzando che sia la metà del limite e quindi non rappresentano una vera prova di rilevazione dei parametri nel fiume.

In aggiunta alle informazioni rappresentate nel grafico di fingerprinting, nelle tabelle successive sono rappresentati i valori medi misurati lungo le stazioni di misurazione suddivise per anno. Nelle tabelle sono evidenziati i parametri critici (evidenziati in giallo) e parametri molto critici (evidenziati in rosso) in termini di concentrazione media misurata.

Fiume Maira - 2021			
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Villafalletto (1)	Racconigi (2)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	n.a.	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	n.a.	0.0005
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	n.a.	n.a.	n.a.
ADV N2	0.04	n.a.	0.020
cC6O4	0.04	n.a.	0.020
Fiume Maira - 2022			
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Villafalletto (1)	Racconigi (2)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	n.a.	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	n.a.	0.0005
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	n.a.	n.a.	n.a.
ADV N2	0.04	n.a.	0.020
cC6O4	0.04	n.a.	0.020
Fiume Maira - 2023			
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Villafalletto (1)	Racconigi (2)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	n.a.	0.0004
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	n.a.	0.005
ADV N2	0.04	n.a.	0.020
cC6O4	0.04	n.a.	0.020

Fiume Maira - 2024			
	Limite di rilevabilità [$\mu\text{g/l}$]	Villafalletto (1)	Racconigi (2)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	0.020	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluorooottanoico (PFOA)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.0002	0.0003	0.0004
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	0.005	0.005
ADV N2	n.a.	n.a.	n.a.
cC6O4	0.04	0.020	0.020
Fiume Maira - 2025			
	Limite di rilevabilità [$\mu\text{g/l}$]	Villafalletto (1)	Racconigi (2)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorooottanoico (PFOA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.0002	n.a.	0.0002
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	n.a.	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	n.a.	0.005
ADV N2	n.a.	n.a.	n.a.
cC6O4	0.04	n.a.	0.020

Figura 3-25 - Fiume Maira: Misurazioni medie 2021-2025

Dalle figure precedenti si evince che non sono presenti particolari parametri critici per il fiume Maira ma solo alcune tracce del parametro Acido perfluorooottansolfonico (PFOS).

Nelle pagine seguenti vengono riportati i boxplot del parametro PFOS risultato in tracce per verificarne la distribuzione lungo le stazioni di misurazione e negli anni 2021 e il 2025.

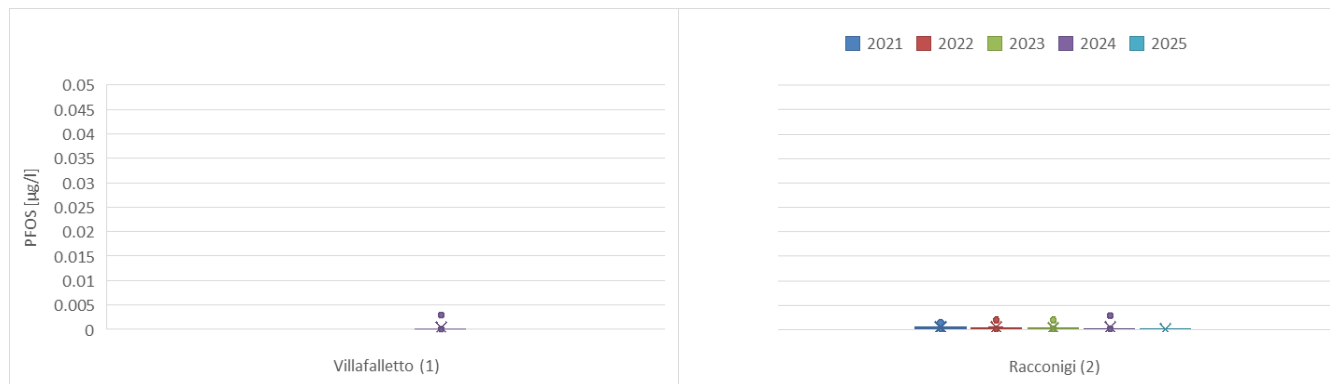


Figura 3-26 - Boxplot parametro PFOS nel fiume Maira

I boxplot precedenti chiariscono una situazione in linea generale positiva, il fiume Maira risulta essere in larga misura privo di sostanze riconducibili a PFAS se non in tracce per quanto riguarda il parametro PFOS che può essere riconducibile a reflui di origine civile alla luce delle concentrazioni basse misurate.

In merito alle concentrazioni è importante sottolineare che il parametro PFOS è misurato tramite strumenti con una sensibilità superiore rispetto agli altri parametri. In particolare, la sensibilità dello strumento o limite di rilevabilità, è dell'ordine di 0,0002 µg/l in confronto agli altri parametri che hanno un limite di rilevabilità variabile tra 0,01 e 0,04 µg/l.

3.6 Elaborazione statistica: Fiume Po

Il Po è il fiume più lungo interamente compreso nel territorio italiano, con una lunghezza di 652 km e un bacino idrografico di circa 70.330 km². Nasce alle pendici del Monviso, sulle Alpi Cozie in Piemonte, a 2.020 m s.l.m. in località Pian del Re, e sfocia nel Mar Adriatico attraverso un vasto delta di sei rami. Il regime idrologico è di tipo composito, con due massimi in primavera e in autunno e due minimi in inverno e in estate, in funzione della diversità dei regimi dei suoi affluenti alpini e appenninici; la portata media alla foce è di circa 1.540 m³/s, con valori di piena storicamente superiori ai 13.000 m³/s. Il distretto idrografico del Po interessa 8 regioni italiane e la Provincia Autonoma di Trento, per una superficie complessiva nazionale di circa 82.790 km², con una popolazione residente di circa 16 milioni di abitanti; gran parte della Pianura Padana ricade in questo distretto, che produce il 32% della produzione agricola nazionale e il 51% del valore aggiunto industriale italiano. (A.D.B.PO, 2026)

Dal punto di vista della qualità delle acque, il Po e i suoi affluenti piemontesi sono oggetto di un sistematico programma di monitoraggio ambientale. ARPA Piemonte gestisce la rete regionale di monitoraggio quali-quantitativo delle risorse idriche superficiali, svolgendo attività di analisi delle condizioni idro-morfologiche, studio delle pressioni e degli impatti delle attività umane sui corpi idrici e classificazione dello stato qualitativo dei corpi idrici superficiali e sotterranei. (ARPA Piemonte, 2026)

Nella successiva Figura 3-27 è riportato il grafico di fingerprinting del fiume Po con le dieci località di monitoraggio:

1. Crissolo;
2. Villafranca Piemonte;
3. Carignano;
4. Torino;
5. Brandizzo;
6. Lauriano;
7. Trino;
8. Frassinetto Po;
9. Valenza;
10. Isola Sant'Antonio.

Dal grafico è evidente che procedendo da monte a valle, la concentrazione di sostanze inquinanti varia principalmente tra la prima e la seconda stazione di monitoraggio ed in modo meno marcato nelle seguenti. Nelle seguenti tabelle verranno approfonditi i singoli parametri misurati nelle stazioni di monitoraggio in modo da verificarne l'effettiva presenza lungo il percorso del fiume.

Il numero di misure e la relativa percentuale sopra tale limite sono riportati nella seguente Tabella 3-7:

Località	N misur.	% ≤ LOQ	% > LOQ
Crissolo (1)	22	86.36%	13.64%
Villafranca Piemonte (2)	763	97.90%	2.10%
Carignano (3)	794	97.48%	2.52%
Torino (4)	840	95.48%	4.52%
Brandizzo (5)	823	93.92%	6.08%
Lauriano (6)	826	95.04%	4.96%
Trino (7)	812	95.07%	4.93%
Frassineto Po (8)	723	95.02%	4.98%
Valenza (9)	751	94.41%	5.59%
Isola Sant'Antonio (10)	763	94.89%	5.11%

Tabella 3-7 - Misurazioni del fiume Po e % oltre il limite di rilevabilità

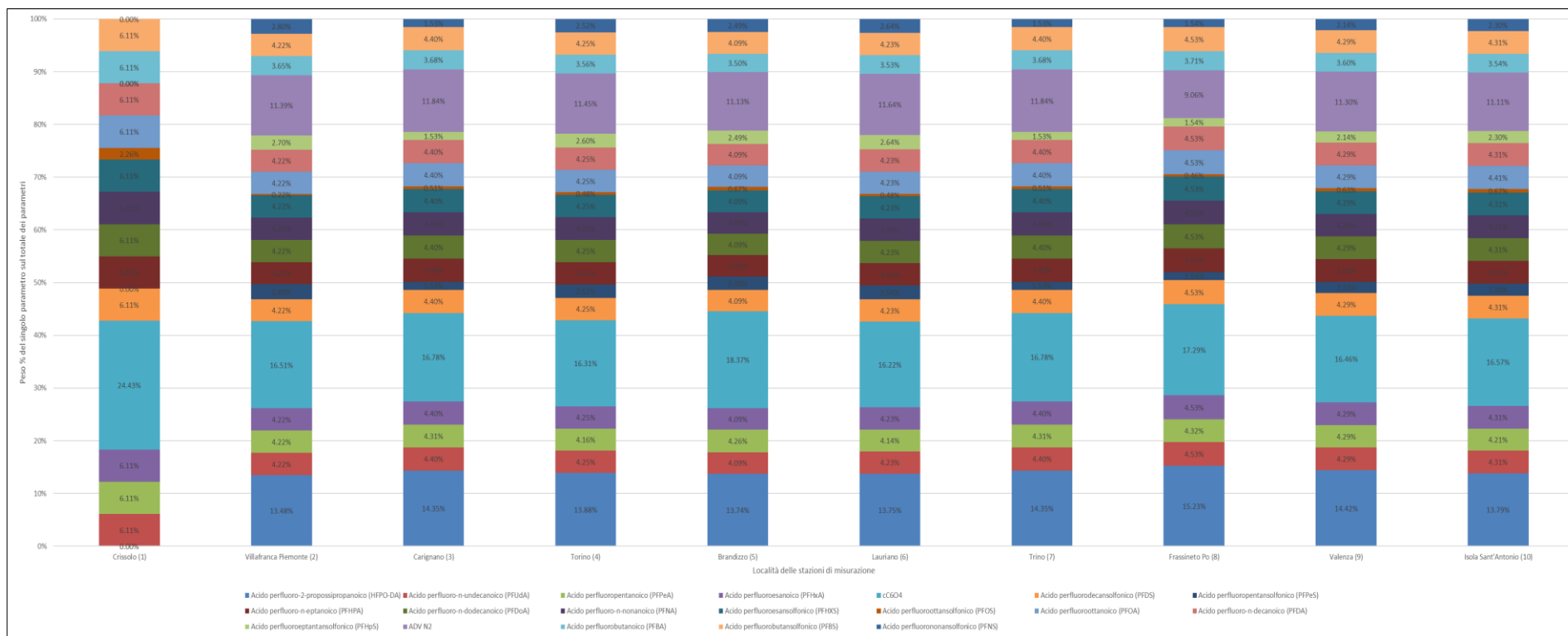


Figura 3-27 - Grafico fingerprinting del fiume Po

Dall'analisi di fingerprinting precedente è opportuno evidenziare, per ciascuna località, quali misurazioni hanno superato il limite di rilevabilità e possono pertanto essere considerate statisticamente significative. Le misure inferiori al limite di rilevabilità sono costruite artificialmente ipotizzando che sia la metà del limite e quindi non rappresentano una vera prova di rilevazione dei parametri nel fiume.

In aggiunta alle informazioni rappresentate nel grafico di fingerprinting, nelle tabelle successive sono rappresentati i valori medi misurati lungo le stazioni di misurazione suddivise per anno. Nelle tabelle sono evidenziati i parametri critici (evidenziati in giallo) e parametri molto critici (evidenziati in rosso) in termini di concentrazione media misurata.

Fiume Po - 2021											
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Crissolo (1)	Villafranca Piemonte (2)	Carignano (3)	Torino (4)	Brandizzo (5)	Lauriano (6)	Trino (7)	Frassineto Po (8)	Valenza (9)	Isola Sant'Antonio (10)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroheptansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	0.0003	0.0002	0.0002	0.0008	0.0015	0.0009	0.0008	0.0007	0.0010	0.0010
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
ADV N2	0.04	n.a.	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
cC604	0.04	0.020	0.020	0.020	0.020	0.025	0.020	0.025	0.020	0.020	0.020
Fiume Po - 2022											
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Crissolo (1)	Villafranca Piemonte (2)	Carignano (3)	Torino (4)	Brandizzo (5)	Lauriano (6)	Trino (7)	Frassineto Po (8)	Valenza (9)	Isola Sant'Antonio (10)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroheptansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	n.a.	0.0003	0.0003	0.0011	0.0014	0.0011	0.0012	0.0010	0.0018	0.0023
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
ADV N2	0.04	n.a.	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
cC604	0.04	n.a.	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.023
Fiume Po - 2023											
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Crissolo (1)	Villafranca Piemonte (2)	Carignano (3)	Torino (4)	Brandizzo (5)	Lauriano (6)	Trino (7)	Frassineto Po (8)	Valenza (9)	Isola Sant'Antonio (10)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.	0.020	0.020	0.020	0.028	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroheptansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.007
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	n.a.	0.0004	0.0003	0.0013	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0022	0.0021
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
ADV N2	0.04	n.a.	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
cC604	0.04	n.a.	0.020	0.020	0.020	0.045	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020

Fiume Po - 2024												
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Crissolo (1)	Villafranca Piemonte (2)	Carignano (3)	Torino (4)	Brandizzo (5)	Lauriano (6)	Trino (7)	Frassineto Po (8)	Valenza (9)	Isola Sant'Antonio (10)	
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	n.a.	0.006	0.005	0.005	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	n.a.	0.0009	0.0003	0.0009	0.0014	0.0010	0.0006	0.0010	0.0012	0.0010	
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.008	0.005	0.006	0.005	0.008	0.006	
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
ADV N2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
cC6O4	0.04	n.a.	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	
Fiume Po - 2025												
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Crissolo (1)	Villafranca Piemonte (2)	Carignano (3)	Torino (4)	Brandizzo (5)	Lauriano (6)	Trino (7)	Frassineto Po (8)	Valenza (9)	Isola Sant'Antonio (10)	
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	n.a.	0.0001	0.0001	0.0023	0.0025	0.0018	0.0013	0.0015	0.0014	0.0014	
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	
ADV N2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
cC6O4	0.04	n.a.	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	

Figura 3-28 - Fiume Po: Misurazioni medie 2021-2025

Dalle figure precedenti si evince che l'unico composto presente in tutti gli anni e quasi in tutte le località è l'Acido perfluorooottansolfonico (PFOS).

Nelle pagine seguenti vengono riportati i boxplot del parametro PFOS risultato in tutte le località per verificarne la distribuzione lungo le stazioni di misurazione e negli anni 2021 e il 2025.

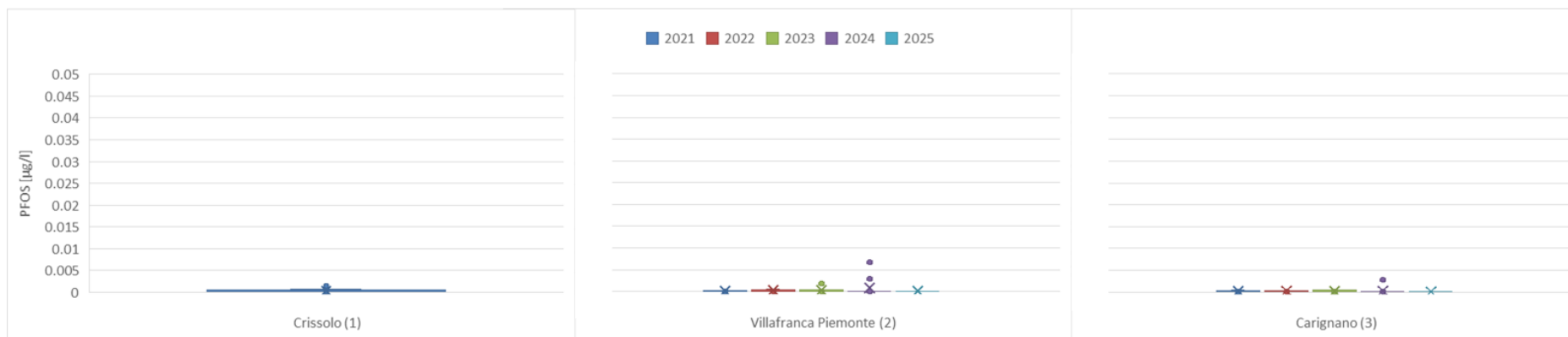


Figura 3-29 - Boxplot parametro PFOS nel fiume Po: Località 1-3

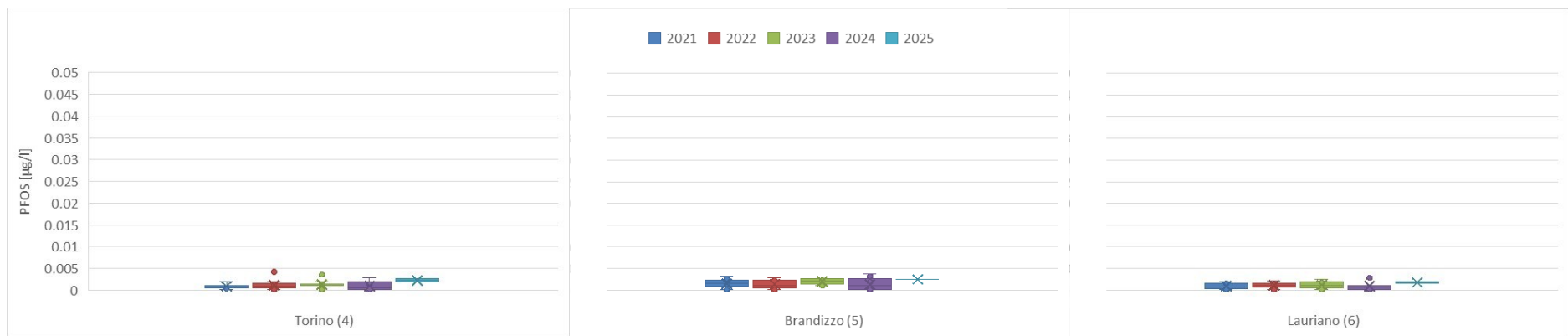


Figura 3-30 - Boxplot parametro PFOS nel fiume Po: Località 4-6

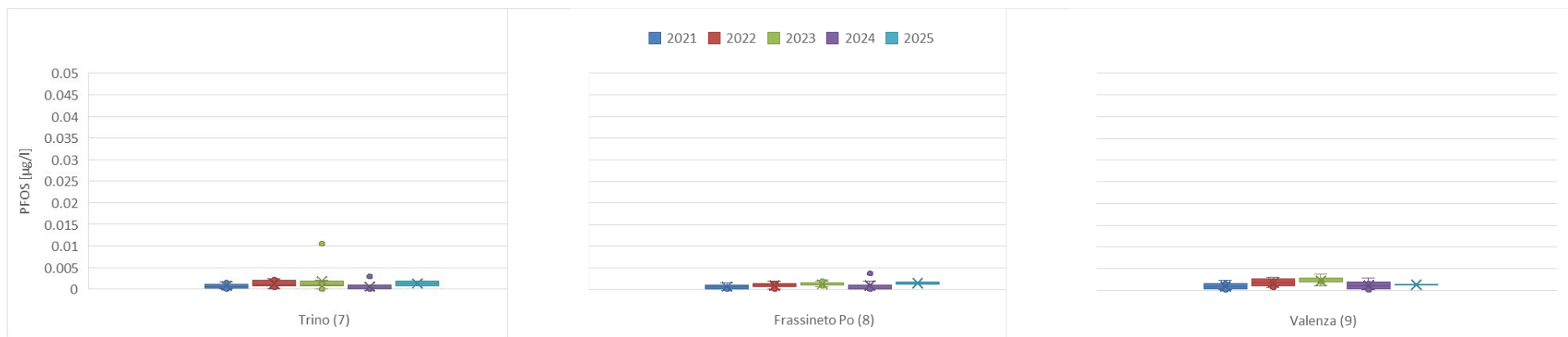


Figura 3-31 - Boxplot parametro PFOS nel fiume Po: Località 7-9

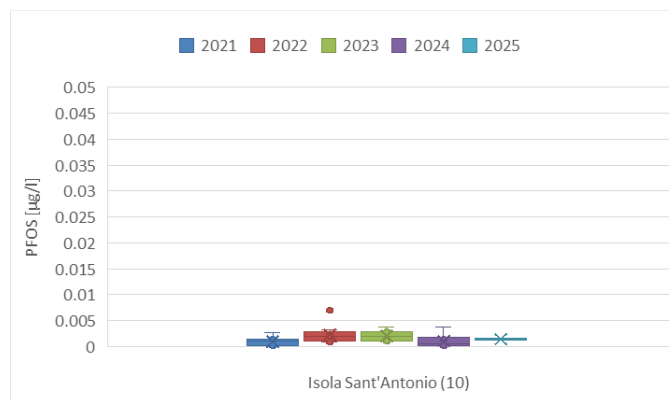


Figura 3-32 - Boxplot parametro PFOS nel fiume Po: Località 10

I boxplot precedenti chiariscono una situazione in linea generale positiva, il fiume Po risulta essere in larga misura privo di sostanze riconducibili a PFAS. L'unico parametro, che è stato rilevato in concentrazioni apprezzabili, è PFOS. La concentrazione del parametro da monte a valle rimane pressoché invariata, e questo indica che lungo l'asta del fiume è possibile risalire a immissioni puntuali di reflui contenenti sostanze riconducibili a PFAS da siti industriali oppure che l'apporto di sostanze sia dovuto all'immissione di acque già contaminanti provenienti da affluenti del fiume Po.

In merito alle concentrazioni è importante sottolineare che il parametro PFOS è misurato tramite strumenti con una sensibilità superiore rispetto agli altri parametri. In particolare, la sensibilità dello strumento o limite di rilevabilità, è dell'ordine di 0,0002 µg/l in confronto agli altri parametri che hanno un limite di rilevabilità variabile tra 0,01 e 0,04 µg/l.

3.7 Elaborazione statistica: Fiume Scrivia

Il torrente Scrivia nasce sull'Appennino Ligure, in prossimità dello spartiacque ligure-piemontese, e percorre complessivamente circa 88 km prima di sfociare nel Po, varcando il confine tra Piemonte e Lombardia. Il bacino idrografico si divide morfologicamente in due settori distinti: un primo tratto tipicamente appenninico, con valle stretta e scoscesa in direzione nord-ovest fino ad Arquata Scrivia, dove riceve il torrente Borbera, suo principale affluente, e un tratto di pianura che si apre a partire da Serravalle Scrivia, dove il corso rallenta e l'alveo assume andamento meandriforme intrecciato, suddividendosi in più rami. Il regime idrologico è nettamente torrentizio, con piene talvolta disastrose in autunno e magre quasi totali in estate, con tratti completamente asciutti tra Cassano Spinola e Casei Gerola anche per più mesi consecutivi; la portata media annua alla foce è di circa 19 m³/s, a fronte di piene storiche che hanno superato i 2.000 m³/s, come nell'evento catastrofico dell'ottobre 1970. (A.D.B.PO, 2001d)

Nella successiva Figura 3-33 è riportato il grafico di fingerprinting del torrente Scrivia con le quattro località di monitoraggio:

1. Serravalle Scrivia;
2. Villalvernia;
3. Castelnuovo Scrivia;
4. Guazzora.

Dal grafico è evidente che procedendo da monte a valle, la concentrazione di sostanze inquinanti varia principalmente tra la prima e la seconda stazione di monitoraggio ed in modo meno marcato nelle seguenti. Nelle seguenti tabelle verranno approfonditi i singoli parametri misurati nelle stazioni di monitoraggio in modo da verificarne l'effettiva presenza lungo il percorso del fiume.

Il numero di misure e la relativa percentuale sopra tale limite sono riportati nella seguente Tabella 3-8:

Località	N misur.	% ≤ LOQ	% > LOQ
Serravalle Scrivia (1)	439	91.80%	8.20%
Villalvernia (2)	548	89.96%	10.04%
Castelnuovo Scrivia (3)	318	89.31%	10.69%
Guazzora (4)	279	87.81%	12.19%

Tabella 3-8 - Misurazioni del torrente Scrivia e % oltre il limite di rilevabilità

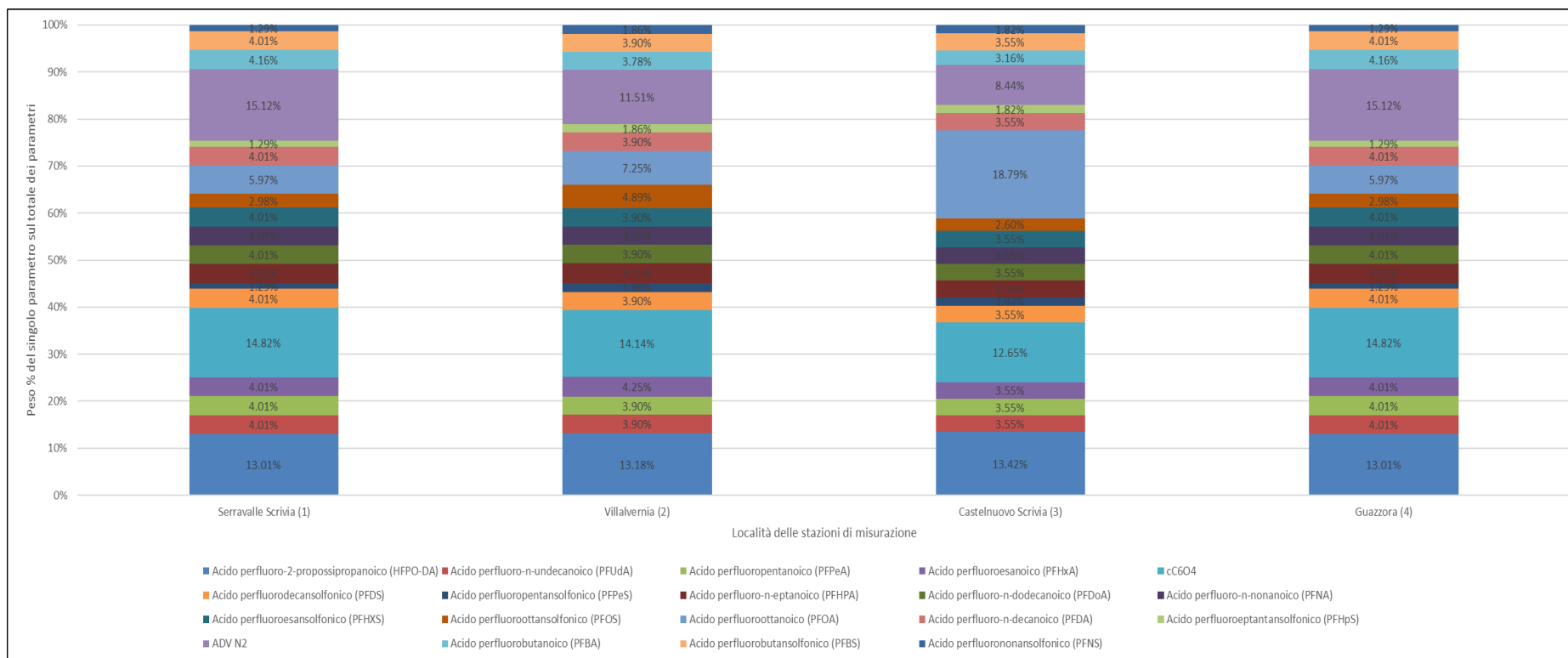


Figura 3-33 - Grafico fingerprinting del torrente Scrivia

Dall'analisi di fingerprinting precedente è opportuno evidenziare, per ciascuna località, quali misurazioni hanno superato il limite di rilevabilità e possono pertanto essere considerate statisticamente significative. Le misure inferiori al limite di rilevabilità sono costruite artificialmente ipotizzando che sia la metà del limite e quindi non rappresentano una vera prova di rilevazione dei parametri nel fiume.

In aggiunta alle informazioni rappresentate nel grafico di fingerprinting, nelle tabelle successive sono rappresentati i valori medi misurati lungo le stazioni di misurazione suddivise per anno. Nelle tabelle sono evidenziati i parametri critici (evidenziati in giallo) e parametri molto critici (evidenziati in rosso) in termini di concentrazione media misurata.

Torrente Scivia - 2021					
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Serravalle Scivia (1)	Villalvernia (2)	Castelnuovo Scivia (3)	Guazzora (4)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	0.020	0.020	0.020	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	0.007	0.009	0.005	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	0.015	0.014	0.037	0.030
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	0.0076	0.0200	0.0067	0.0113
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
ADV N2	0.04	0.020	0.020	0.020	0.020
cC6O4	0.04	0.020	0.020	0.020	0.020
Torrente Scivia - 2022					
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Serravalle Scivia (1)	Villalvernia (2)	Castelnuovo Scivia (3)	Guazzora (4)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	0.020	0.020	0.020	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	0.011	0.008	0.005	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	0.005	0.009	0.005	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	0.005	0.009	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.016
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.049
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	0.007	0.019	0.025	0.031
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	0.0052	0.0077	0.0033	0.0066
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
ADV N2	0.04	0.020	0.020	0.020	0.020
cC6O4	0.04	0.020	0.020	0.020	0.020
Torrente Scivia - 2023					
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Serravalle Scivia (1)	Villalvernia (2)	Castelnuovo Scivia (3)	Guazzora (4)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	0.020	0.020	0.020	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	0.008	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	0.013	0.018	0.005	0.037
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	0.0112	0.0189	0.0041	0.0064
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
ADV N2	0.04	0.020	0.020	0.020	0.020
cC6O4	0.04	0.020	0.020	0.020	0.020

Torrente Scrivia - 2024					
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Serravalle Scrivia (1)	Villalvernia (2)	Castelnuovo Scrivia (3)	Guazzora (4)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.	0.020	0.020	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUDA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	n.a.	0.0143	0.0975	0.0763
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	n.a.	0.0051	0.0106	0.0101
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	n.a.	0.005	0.005	0.005
ADV N2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
cC6O4	0.04	n.a.	0.020	0.020	0.020
Torrente Scrivia - 2025					
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Serravalle Scrivia (1)	Villalvernia (2)	Castelnuovo Scrivia (3)	Guazzora (4)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	0.020	0.020	0.020	n.a.
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	0.005	0.005	0.005	n.a.
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	0.005	0.005	0.005	n.a.
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	0.005	0.005	0.005	n.a.
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	0.005	0.005	0.005	n.a.
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	0.005	0.005	0.005	n.a.
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	0.005	0.005	0.005	n.a.
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	0.005	0.005	0.005	n.a.
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	0.005	0.005	0.005	n.a.
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	0.005	0.005	0.005	n.a.
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	0.005	0.005	0.005	n.a.
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	0.005	0.005	0.005	n.a.
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUDA)	0.01	0.005	0.005	0.005	n.a.
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	0.005	0.005	0.020	n.a.
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	0.0012	0.0025	0.0037	n.a.
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	0.005	0.005	0.005	n.a.
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	0.005	0.005	0.005	n.a.
ADV N2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
cC6O4	0.04	0.020	0.020	0.020	n.a.

Figura 3-34 - Torrente Scrivia: Misurazioni medie 2021-2025

Dalle figure precedenti si evince che nel torrente Scrivia sono state rilevate concentrazioni medie di diversi parametri e concentrazioni critiche principalmente dei parametri Acido perfluoroottanoico (PFOA) e Acido perfluoroottansolfonico (PFOS).

Nelle pagine seguenti vengono riportati i boxplot dei parametri PFOA e PFOS misurati per verificarne la distribuzione lungo le stazioni di misurazione e negli anni 2021 e il 2025.



Figura 3-35 - Boxplot parametro PFOA nel torrente Scrivia, località 1-2



Figura 3-36 - Boxplot parametro PFOA nel torrente Scrivia, località 3-4



Figura 3-37 - Boxplot parametro PFOS nel torrente Scrivia, località 1-2



Figura 3-38 - Boxplot parametro PFOS nel torrente Scrivia, località 3-4

I boxplot precedenti presentano una situazione di inquinamento diffuso di sostanze PFAS ed in particolare per i parametri PFOA e PFOS nel torrente Scrivia. Questo quadro identifica anche delle zone di origine di questi inquinanti distribuite tra le stazioni di monitoraggio 1 e 2 e a monte della stazione di monitoraggio 4.

In merito alle concentrazioni è importante sottolineare che il parametro PFOS è misurato tramite strumenti con una sensibilità superiore rispetto agli altri parametri. In particolare, la sensibilità dello strumento o limite di rilevabilità, è dell'ordine di 0,0002 µg/l in confronto agli altri parametri che hanno un limite di rilevabilità variabile tra 0,01 e 0,04 µg/l.

3.8 Elaborazione statistica: Fiume Sesia

Il Sesia è uno dei fiumi più lunghi della regione con circa 140 km di percorso, e un affluente di sinistra del Po. Nasce dal ghiacciaio del Monte Rosa a circa 2.500 m s.l.m. e scende rapidamente lungo la Valsesia, ricevendo nel tratto montano le acque di numerosi torrenti, tra cui il Sermenza, l'Otro, il Vogna, l'Artogna e il Sorba, che ne arricchiscono notevolmente la portata.

Il bacino idrografico raccoglie le acque di una superficie di circa 2.920 km², con una portata media di circa 78 m³/s e valori massimi storici che possono raggiungere i 1.350 m³/s. Il regime idrologico è classificato come glaciale dalle sorgenti fino a Campertogno, pluvio-nivale nel tratto intermedio fino a Caresanablot, e pluviale nel tratto di pianura fino alla confluenza in Po. Nonostante l'alimentazione nivale garantita dal ghiacciaio del Monte Rosa, il fiume è soggetto a magre estive molto accentuate, principalmente a causa dell'intenso sfruttamento irriguo delle sue acque, mentre in occasione di precipitazioni eccezionali può raggiungere portate di piena tra le più elevate in assoluto tra gli affluenti del Po, con valori stimati fino a 5.500–6.000 m³/s.

Dal punto di vista dell'assetto idrogeologico, il bacino montano del Sesia presenta un'elevata suscettibilità ai fenomeni di dissesto: circa il 40% dei comuni attraversati dal fiume è classificato a rischio da elevato a molto elevato, con dissesti concentrati lungo tutta l'asta principale a partire da Varallo fino alla confluenza in Po, e fenomeni analoghi riscontrabili nei comuni attraversati dal Cervo. (A.D.B.PO, 2001e)

Dal punto di vista della qualità delle acque e della contaminazione da PFAS, il Sesia rientra nella rete regionale di monitoraggio gestita da ARPA Piemonte. I primi dati relativi ad analisi di PFAS effettuate da ARPA Piemonte risalgono al 2010, con determinazioni iniziali di PFOA e PFOS su tre punti della rete di monitoraggio regionale. (ARPA Piemonte, 2025b)

Nella successiva Figura 3-39 è riportato il grafico di fingerprinting del fiume Maira con le due località di monitoraggio: la prima, a Villafalletto e la seconda a Racconigi.

Dal grafico è evidente che procedendo da monte a valle, la concentrazione di sostanze inquinanti rimane pressochè invariata. Nelle seguenti tabelle verranno approfonditi i singoli parametri misurati nelle stazioni di monitoraggio in modo da verificarne l'effettiva presenza.

Il numero di misure e la relativa percentuale sopra tale limite sono riportati nella seguente Tabella 3-9:

Località	N misur.	% ≤LOQ	% > LOQ
Motta de' Conti (1)	216	92.59%	7.41%

Tabella 3-9 - Misurazioni del fiume Sesia e % oltre il limite di rilevabilità

Dall'analisi di fingerprinting precedente è opportuno evidenziare, per ciascuna località, quali misurazioni hanno superato il limite di rilevabilità e possono pertanto essere considerate statisticamente significative. Le misure inferiori al limite di rilevabilità sono costruite artificialmente ipotizzando che sia la metà del limite e quindi non rappresentano una vera prova di rilevazione dei parametri nel fiume.

In aggiunta alle informazioni rappresentate nel grafico di fingerprinting, nelle tabelle successive sono rappresentati i valori medi misurati lungo le stazioni di misurazione suddivise per anno. Nelle tabelle sono evidenziati i parametri critici (evidenziati in giallo) e parametri molto critici (evidenziati in rosso) in termini di concentrazione media misurata.

Fiume Sesia - 2021		
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Motta de' Conti (1)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	0.005
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	0.0011
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	n.a.	n.a.
ADV N2	0.04	n.a.
cC6O4	0.04	0.020
Fiume Sesia - 2022		
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Motta de' Conti (1)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	0.023
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	0.005
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	0.0032
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	n.a.	n.a.
ADV N2	0.04	0.020
cC6O4	0.04	0.020
Fiume Sesia - 2023		
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Motta de' Conti (1)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	n.a.
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	n.a.
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	n.a.
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	n.a.
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	n.a.
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	n.a.
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	n.a.
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	n.a.
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	n.a.
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	n.a.
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	n.a.
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	n.a.
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	n.a.
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	n.a.
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	n.a.
ADV N2	0.04	n.a.
cC6O4	0.04	n.a.

Fiume Sesia - 2024		
	Limite di rilevabilità [$\mu\text{g/l}$]	Motta de' Conti (1)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	n.a.
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	n.a.
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	n.a.
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	n.a.
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	n.a.
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	n.a.
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	n.a.
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	n.a.
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	n.a.
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	n.a.
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	n.a.
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	n.a.
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	n.a.
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	n.a.
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	n.a.
ADV N2	n.a.	n.a.
cC6O4	0.04	n.a.
Fiume Sesia - 2025		
	Limite di rilevabilità [$\mu\text{g/l}$]	Motta de' Conti (1)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	n.a.
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	n.a.
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	n.a.
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	n.a.
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	n.a.
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	n.a.
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	n.a.
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	n.a.
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	n.a.
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	n.a.
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	n.a.
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	n.a.
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	0.0051
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	n.a.
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	n.a.
ADV N2	n.a.	n.a.
cC6O4	0.04	n.a.

Figura 3-40 - Fiume Sesia: Misurazioni medie 2021-2025

Dalle figure precedenti si evince che non sono presenti particolari parametri critici per il fiume Sesia ma delle concentrazioni misurate elevate per il parametro Acido perfluoroottansolfonico (PFOS).

Nelle pagine seguenti vengono riportati i boxplot del parametro PFOS risultato per verificarne la distribuzione lungo le stazioni di misurazione e negli anni 2021 e il 2025.

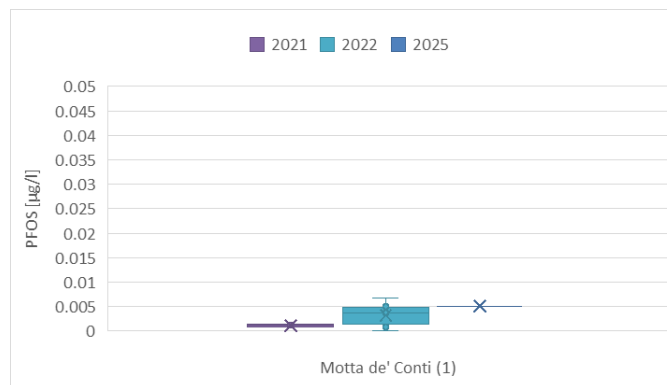


Figura 3-41 - Boxplot parametro PFOS nel fiume Sesia

Il boxplot precedente delinea una situazione in linea generale positiva, il fiume Sesia risulta essere in larga misura privo di sostanze riconducibili a PFAS se per quanto riguarda il parametro PFOS.

In merito alle concentrazioni è importante sottolineare che il parametro PFOS è misurato tramite strumenti con una sensibilità superiore rispetto agli altri parametri. In particolare, la sensibilità dello strumento o limite di rilevabilità, è dell'ordine di $0,0002 \mu\text{g/l}$ in confronto agli altri parametri che hanno un limite di rilevabilità variabile tra $0,01$ e $0,04 \mu\text{g/l}$.

3.9 Elaborazione statistica: Fiume Stura di Demonte

La Stura di Demonte è un fiume del Piemonte affluente di sinistra del Tanaro, interamente compreso nella provincia di Cuneo, con un bacino idrografico di 1.579 km² e una portata media di 36 m³/s alla confluenza in Tanaro, valore non molto distante da quello del Tanaro nel punto stesso di confluenza, a testimonianza del notevole apporto idrico della Stura. Il fiume ha uno sviluppo complessivo di circa 111 km dalla sorgente alla confluenza, con un tratto montano di circa 56 km dalla sorgente fino a Vignolo (Borgo San Dalmazzo) e un tratto di pianura di circa 55 km fino alla foce. Il regime è prevalentemente torrentizio, con piene particolarmente intense e imponenti, in parte a causa del carattere estremamente capriccioso del suo principale affluente, il torrente Gesso, con il quale la Stura confluisce nei pressi di Cuneo raddoppiando il proprio volume d'acque. (A.D.B.PO, 2001b)

Dal punto di vista morfologico, la Stura di Demonte ha uno sviluppo complessivo di circa 111 km dalla sorgente alla confluenza in Tanaro, con un tratto montano di circa 56 km che si sviluppa dalla sorgente fino a Vignolo (Borgo San Dalmazzo) e un tratto di pianura di circa 55 km fino alla foce. Il regime del fiume è prevalentemente torrentizio, con piene particolarmente intense e imponenti, in parte a causa del carattere estremamente capriccioso del suo affluente Gesso. La portata media alla confluenza in Tanaro è di 36 m³/s, un valore non molto distante da quello del Tanaro nel punto stesso di confluenza, a testimonianza del notevole apporto idrico della Stura. (A.D.B.PO, 2001a),(Pianificazione Risorse Idriche FASE, 2004)

Nella successiva Figura 3-24 è riportato il grafico di fingerprinting del fiume Maira con le due località di monitoraggio: la prima, a Villafalletto e la seconda a Racconigi.

Dal grafico è evidente che procedendo da monte a valle, la concentrazione di sostanze inquinanti rimane pressochè invariata. Nelle seguenti tabelle verranno approfonditi i singoli parametri misurati nelle stazioni di monitoraggio in modo da verificarne l'effettiva presenza.

Il numero di misure e la relativa percentuale sopra tale limite sono riportati nella seguente Tabella 3-10:

Località	N misur.	% ≤ LOQ	% > LOQ
Cuneo (1)	203	97.54%	2.46%
Cherasco (2)	221	95.48%	4.52%

Tabella 3-10 - Misurazioni del fiume Stura di Demonte e % oltre il limite di rilevanza

Dall'analisi di fingerprinting precedente è opportuno evidenziare, per ciascuna località, quali misurazioni hanno superato il limite di rilevabilità e possono pertanto essere considerate statisticamente significative. Le misure inferiori al limite di rilevabilità sono costruite artificialmente ipotizzando che sia la metà del limite e quindi non rappresentano una vera prova di rilevazione dei parametri nel fiume.

In aggiunta alle informazioni rappresentate nel grafico di fingerprinting, nelle tabelle successive sono rappresentati i valori medi misurati lungo le stazioni di misurazione suddivise per anno. Nelle tabelle sono evidenziati i parametri critici (evidenziati in giallo) e parametri molto critici (evidenziati in rosso) in termini di concentrazione media misurata.

Fiume Stura di Demonte - 2021			
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Cuneo (1)	Cherasco (2)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.	n.a.
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	n.a.	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	n.a.	n.a.
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	n.a.	n.a.	n.a.
ADV N2	0.04	n.a.	n.a.
cC6O4	0.04	n.a.	n.a.
Fiume Stura di Demonte - 2022			
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Cuneo (1)	Cherasco (2)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.	n.a.
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	n.a.	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	n.a.	n.a.
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	n.a.	n.a.	n.a.
ADV N2	0.04	n.a.	n.a.
cC6O4	0.04	n.a.	n.a.
Fiume Stura di Demonte - 2023			
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Cuneo (1)	Cherasco (2)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	0.020	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	0.0004	0.0006
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	0.005	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	0.005	0.005
ADV N2	0.04	0.020	0.020
cC6O4	0.04	0.020	0.020

Fiume Stura di Demonte - 2024			
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Cuneo (1)	Cherasco (2)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.	n.a.
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	n.a.	n.a.
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	n.a.	n.a.
ADV N2	n.a.	n.a.	n.a.
cC6O4	0.04	n.a.	n.a.
Fiume Stura di Demonte - 2025			
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Cuneo (1)	Cherasco (2)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.	n.a.
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	n.a.	n.a.
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	n.a.	n.a.
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	n.a.	n.a.
ADV N2	n.a.	n.a.	n.a.
cC6O4	0.04	n.a.	n.a.

Figura 3-43 - Fiume Stura di Demonte: Misurazioni medie 2021-2025

Dalle figure precedenti si evince che non sono presenti particolari parametri critici per il fiume Stura di Demonte ma solo alcune tracce del parametro Acido perfluoroottansolfonico (PFOS). Questi risultati però sono incompleti, molti dati non sono stati misurati oppure forniti, il che porta ad un'incertezza generale su questo fiume.

Nelle pagine seguenti vengono riportati i boxplot del parametro PFOS risultato in tracce per verificarne la distribuzione lungo le stazioni di misurazione e negli anni 2021 e il 2025.

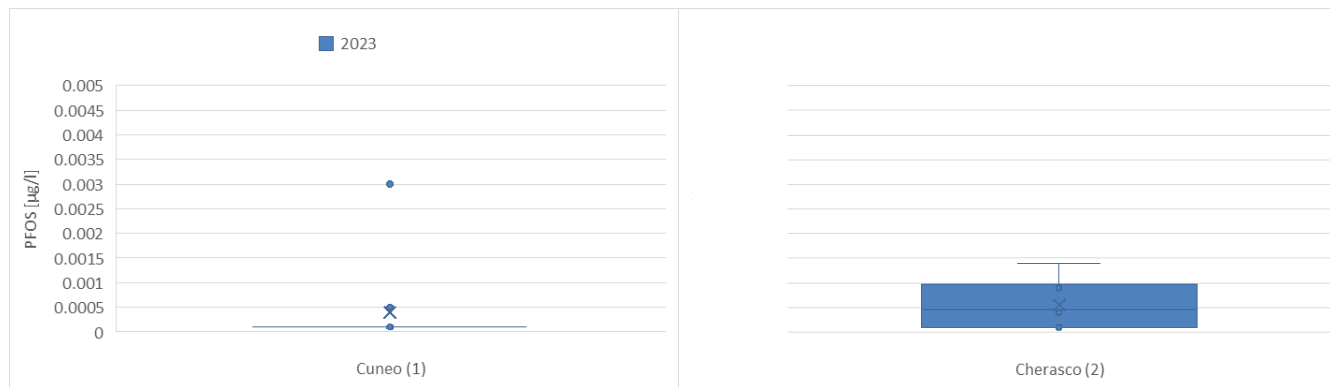


Figura 3-44 - Boxplot parametro PFOS nel fiume Stura di Demonte

I boxplot precedenti chiariscono una situazione in linea generale positiva, il fiume Stura di Demonte risulta essere contaminato solo in tracce per quanto riguarda il parametro PFOS, ma non è possibile definire un quadro generale chiaro per mancanza di dati consistenti. Solo nell'anno 2023 le misurazioni sono complete e forniscono un quadro rassicurante sulla presenza di PFAS in questo fiume.

In merito alle concentrazioni è importante sottolineare che il parametro PFOS è misurato tramite strumenti con una sensibilità superiore rispetto agli altri parametri. In particolare, la sensibilità dello strumento o limite di rilevabilità, è dell'ordine di $0,0002 \mu\text{g/l}$ in confronto agli altri parametri che hanno un limite di rilevabilità variabile tra $0,01$ e $0,04 \mu\text{g/l}$.

3.10 Elaborazione statistica: Fiume Tanaro

Il Tanaro è il secondo fiume per lunghezza del Piemonte dopo il Po, del quale è il principale affluente di destra, con una lunghezza di circa 276 km e un bacino idrografico di circa 8.175 km². È uno dei maggiori fiumi d'Italia, sesto per lunghezza dopo Po, Adige, Tevere, Adda e Oglio.

Il regime idrologico del Tanaro è di tipo complesso, praticamente a metà strada tra i connotati dei fiumi alpini e di quelli appenninici, essendo il suo bacino distribuito in parte sulla catena alpina e in parte su quella appenninica. Da ciò deriva un equilibrio assai fragile del bacino, distribuito su territori estremamente delicati dal punto di vista idrogeologico, spesso soggetti a notevoli fenomeni di dissesto quali smottamenti, frane, erosioni e dilavamento. Le precipitazioni medie nel bacino variano da 700 mm/anno nelle zone pianeggianti fino a oltre 1.400 mm/anno nelle aree montane, con eventi di piena storicamente associati alla concomitanza delle piene del Tanaro con quelle del Belbo, mentre i colmi della Bormida generalmente non sono concomitanti con quelli del Tanaro. (A.D.B.PO, 2001b)

Dal punto di vista della qualità delle acque e della presenza di PFAS, il Tanaro rientra tra i corpi idrici oggetto di monitoraggio sistematico da parte di ARPA Piemonte. (ARPA Piemonte, 2025b)

Nella successiva Figura 3-8 è riportato il grafico di fingerprinting del fiume Tanaro con le stazioni di monitoraggio della città di Priola, Alessandria e Bassignana.

Il numero di misure e la relativa percentuale sopra tale limite sono riportati nella seguente Tabella 3-11:

Località	N misur.	% ≤ LOQ	% > LOQ
Priola (1)	18	94.44%	5.56%
Alessandria (2)	45	73.33%	26.67%
Bassignana (3)	605	89.42%	10.58%

Tabella 3-11 - Misurazioni del fiume Tanaro e % oltre il limite di rilevabilità

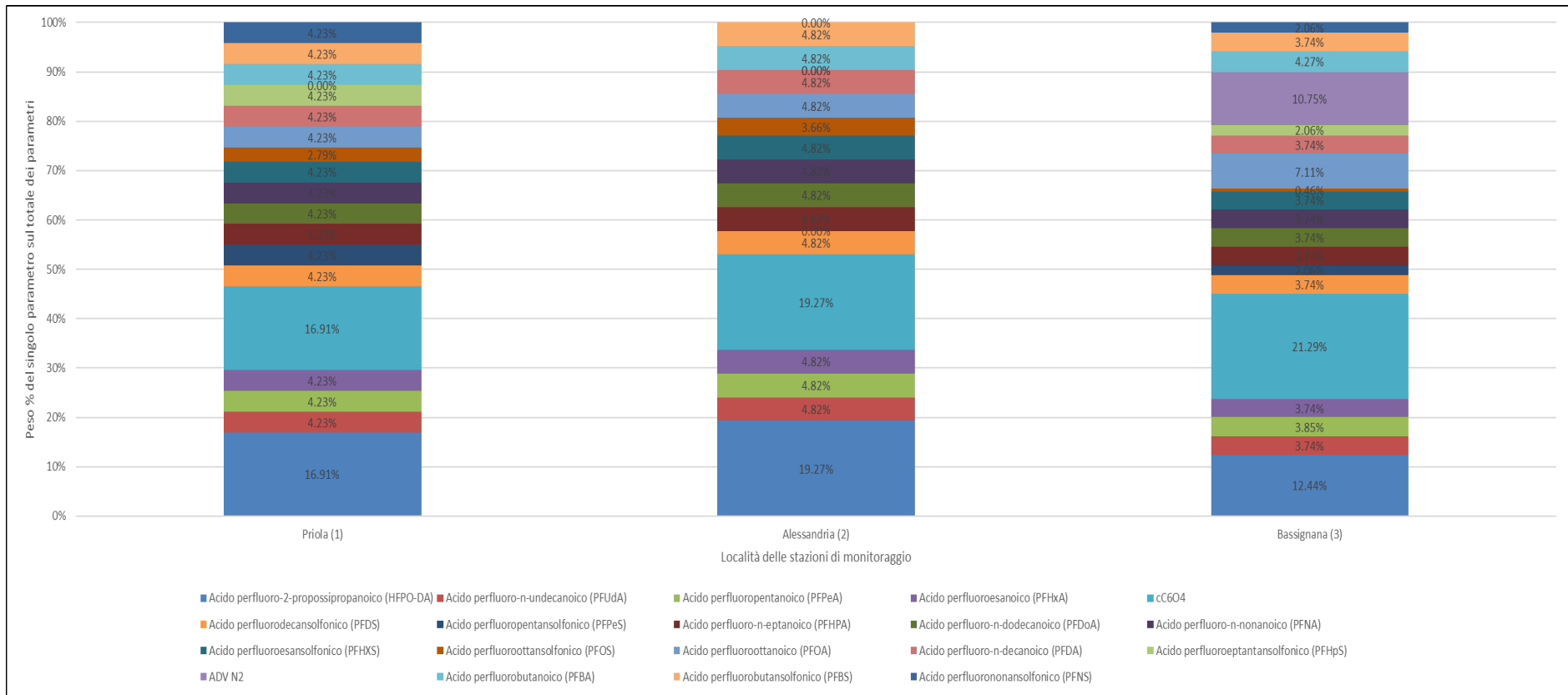


Figura 3-45 - Grafico fingerprinting del fiume Tanaro

Dall'analisi di fingerprinting precedente è opportuno evidenziare, per ciascuna località, quali misurazioni hanno superato il limite di rilevabilità e possono pertanto essere considerate statisticamente significative. Le misure inferiori al limite di rilevabilità sono costruite artificialmente ipotizzando che sia la metà del limite e quindi non rappresentano una vera prova di rilevazione dei parametri nel fiume.

In aggiunta alle informazioni rappresentate nel grafico di fingerprinting, nelle tabelle successive sono rappresentati i valori medi misurati nella stazione di misurazione suddivise per anno. Nelle tabelle sono evidenziati i parametri critici (evidenziati in giallo) e parametri molto critici (evidenziati in rosso) in termini di concentrazione media misurata.

Fiume Tanaro - 2021				
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Priola (1)	Alessandria (2)	Bassignana (3)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.	0.020	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	n.a.	0.005	0.011
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	n.a.	0.005	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	n.a.	0.005	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.	n.a.	n.a.
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	n.a.	0.005	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	n.a.	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	n.a.	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	n.a.	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	n.a.	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	n.a.	0.005	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUDA)	0.01	n.a.	0.005	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	n.a.	0.005	0.023
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	n.a.	0.0002	0.0013
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	n.a.	0.005	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
ADV N2	0.04	n.a.	n.a.	0.043
cC6O4	0.04	n.a.	0.020	0.071
Fiume Tanaro - 2022				
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Priola (1)	Alessandria (2)	Bassignana (3)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.	n.a.	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	n.a.	n.a.	0.014
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.	n.a.	n.a.
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUDA)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	n.a.	n.a.	0.026
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	n.a.	0.0009	0.0012
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	n.a.	n.a.	0.007
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
ADV N2	0.04	n.a.	n.a.	0.033
cC6O4	0.04	n.a.	n.a.	0.043
Fiume Tanaro - 2023				
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Priola (1)	Alessandria (2)	Bassignana (3)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.	n.a.	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUDA)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	n.a.	n.a.	0.013
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	n.a.	n.a.	0.0008
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
ADV N2	0.04	n.a.	n.a.	0.020
cC6O4	0.04	n.a.	n.a.	0.042

Fiume Tanaro - 2024				
	Limite di rilevabilità [$\mu\text{g/l}$]	Priola (1)	Alessandria (2)	Bassignana (3)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	n.a.	n.a.	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluorooottanoico (PFOA)	0.01	n.a.	n.a.	0.006
Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.0002	n.a.	n.a.	0.0012
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	n.a.	n.a.	0.005
ADV N2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
cC6O4	0.04	n.a.	n.a.	0.020
Fiume Tanaro - 2025				
	Limite di rilevabilità [$\mu\text{g/l}$]	Priola (1)	Alessandria (2)	Bassignana (3)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	0.020	n.a.	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	0.005	n.a.	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	0.005	n.a.	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	0.005	n.a.	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	0.005	n.a.	0.005
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	0.005	n.a.	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	0.005	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	0.005	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	0.005	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	0.005	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	0.005	n.a.	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	0.005	n.a.	0.005
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	0.005	n.a.	0.005
Acido perfluorooottanoico (PFOA)	0.01	0.005	n.a.	0.005
Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.0002	0.0033	0.0019	0.0022
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	0.005	n.a.	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	0.005	n.a.	0.005
ADV N2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
cC6O4	0.04	0.020	n.a.	0.020

Figura 3-46 - Fiume Tanaro: Misurazioni medie 2021-2025

Dalle figure precedenti si evince che sono presenti alcuni parametri critici per il fiume Tanaro, tra cui quelli che meritano maggiore attenzione sono:

- Acido perfluorooottansolfonico (PFOS);
- cC6O4.

Nelle pagine seguenti vengono riportati i boxplot dei composti che sono risultati per verificarne la distribuzione lungo le stazioni di misurazione e negli anni 2021 e il 2025.

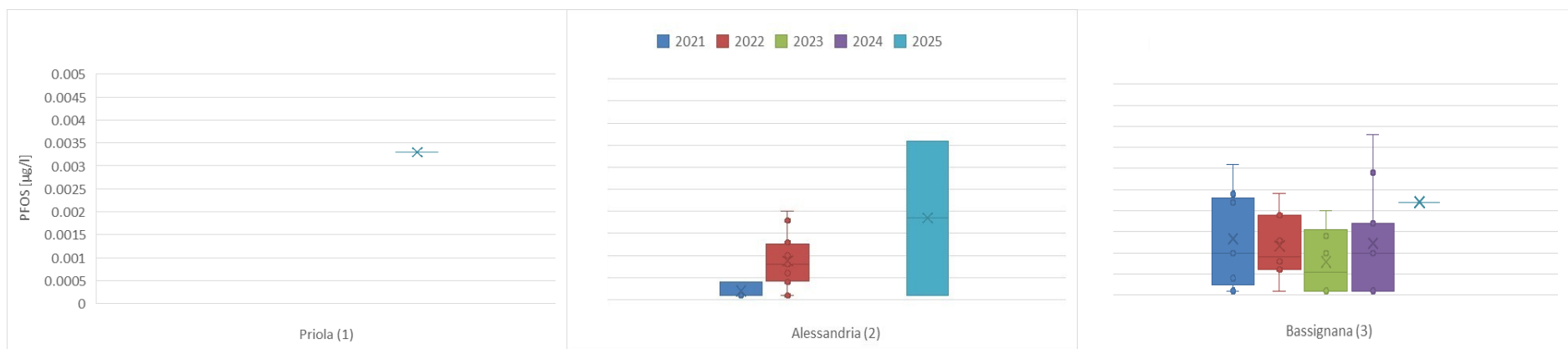


Figura 3-47 - Boxplot parametro PFOS nel fiume Tanaro

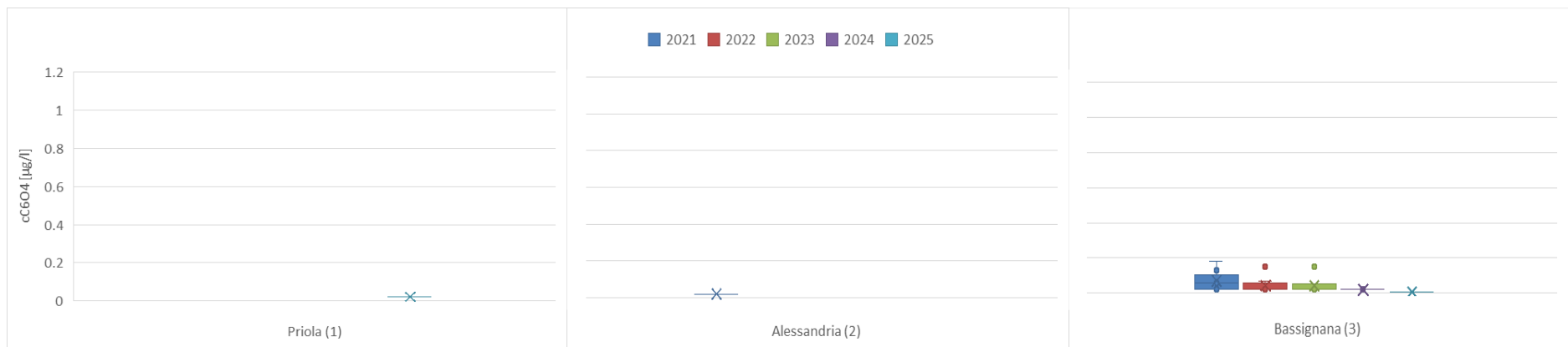


Figura 3-48 - Boxplot parametro cC6O4 nel fiume Tanaro

I boxplot precedenti chiariscono una situazione leggermente sotto pressione dal punto di vista concentrazioni di PFAS, il fiume Tanaro risulta essere sovraccarico per quanto riguarda i parametri PFOS e cC6O.

In merito alle concentrazioni è importante sottolineare che il parametro PFOS è misurato tramite strumenti con una sensibilità superiore rispetto agli altri parametri. In particolare, la sensibilità dello strumento o limite di rilevabilità, è dell'ordine di 0,0002 µg/l in confronto agli altri parametri che hanno un limite di rilevabilità variabile tra 0,01 e 0,04 µg/l.

3.11 Elaborazione statistica: Fiume Ticino

Il Ticino è un affluente di sinistra del Po lungo complessivamente 248 km, con un bacino idrografico di circa 7.230 km², il bacino idrografico del Ticino ha una superficie complessiva di circa 6.033 km², di cui il 53% in territorio svizzero e il restante 47% in territorio italiano, pari a circa 2.822 km². L'intero bacino si trova per il 79% in ambito montano e per il 21% in pianura.

Il regime idrologico è condizionato dalle abbondanti precipitazioni estive del bacino alpino e dall'apporto dei ghiacciai, con portate massime tra maggio e luglio, un secondo massimo in novembre e un minimo assoluto tra gennaio e febbraio. Con una portata media annua di circa 400 m³/s alla foce, il Ticino fornisce al Po un contributo idrico determinante, rappresentandone dal 20% al 50% della portata a seconda della stagione.(A.D.B.PO, 2007)

Dal punto di vista della qualità delle acque e del monitoraggio dei PFAS, il Ticino rientra nella rete regionale gestita da ARPA Piemonte. I campioni prelevati vengono analizzati nei laboratori dell'Agenzia, che ricercano 19 sostanze PFAS, con risultati archiviati e resi disponibili nel Geoportale di ARPA Piemonte con aggiornamento giornaliero. (ARPA Piemonte, 2025b)

Il numero di misure e la relativa percentuale sopra tale limite sono riportati nella seguente Tabella 3-12:

Località	N misur.	% ≤ LOQ	% > LOQ
Golasecca (1)	812	94.09%	5.91%
Oleggio (2)	824	93.93%	6.07%
Cuggiono (3)	732	94.26%	5.74%
Abbiategrasso (4)	729	93.96%	6.04%

Tabella 3-12 - Misurazioni del fiume Ticino e % oltre il limite di rilevabilità

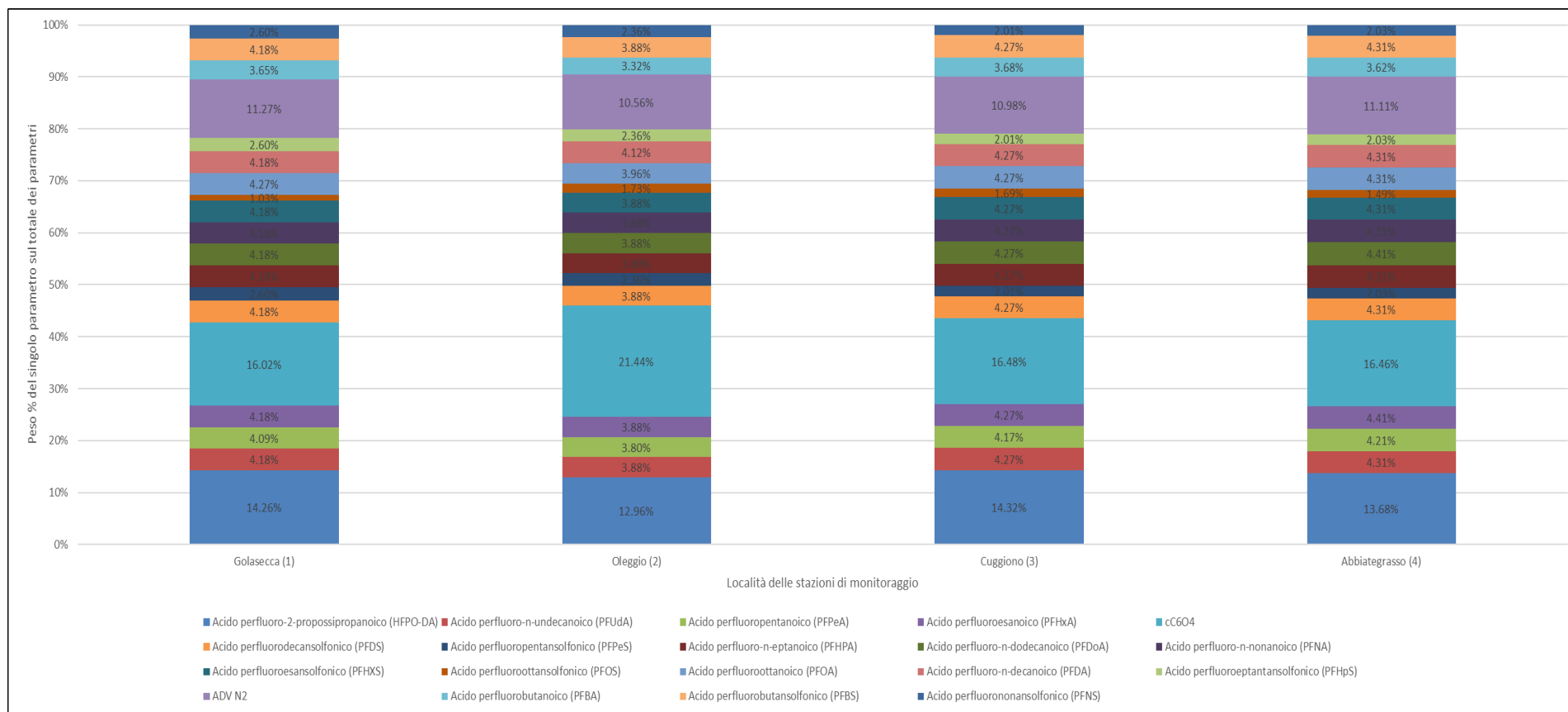


Figura 3-49 - Grafico fingerprinting del fiume Ticino

Dall'analisi di fingerprinting precedente è opportuno evidenziare, per ciascuna località, quali misurazioni hanno superato il limite di rilevabilità e possono pertanto essere considerate statisticamente significative. Le misure inferiori al limite di rilevabilità sono costruite artificialmente ipotizzando che sia la metà del limite e quindi non rappresentano una vera prova di rilevazione dei parametri nel fiume.

In aggiunta alle informazioni rappresentate nel grafico di fingerprinting, nelle tabelle successive sono rappresentati i valori medi misurati nella stazione di misurazione suddivise per anno. Nelle tabelle sono evidenziati i parametri critici (evidenziati in giallo) e parametri molto critici (evidenziati in rosso) in termini di concentrazione media misurata.

In aggiunta alle informazioni rappresentate nel grafico di fingerprinting, nelle tabelle successive sono rappresentati i valori medi misurati lungo le stazioni di misurazione suddivise per anno. Nelle tabelle sono evidenziati i parametri critici (evidenziati in giallo) e parametri molto critici (evidenziati in rosso) in termini di concentrazione media misurata.

Fiume Ticino - 2021					
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Golasecca (1)	Oleggio (2)	Cuggiono (3)	Abbiategrasso (4)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	0.020	0.020	0.020	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	0.005	0.006	0.005	0.005
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	0.0018	0.0044	0.0030	0.0024
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
ADV N2	0.04	0.020	0.020	0.020	0.020
cC6O4	0.04	0.020	0.096	0.024	0.020
Fiume Ticino - 2022					
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Golasecca (1)	Oleggio (2)	Cuggiono (3)	Abbiategrasso (4)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	0.020	0.020	0.020	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	0.005	0.008	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	0.0017	0.0038	0.0033	0.0038
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
ADV N2	0.04	0.020	0.020	0.020	0.020
cC6O4	0.04	0.020	0.020	0.020	0.020
Fiume Ticino - 2023					
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Golasecca (1)	Oleggio (2)	Cuggiono (3)	Abbiategrasso (4)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	0.020	0.020	0.020	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUdA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	0.0018	0.0040	0.0049	0.0042
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
ADV N2	0.04	0.020	0.020	0.020	0.020
cC6O4	0.04	0.020	0.020	0.020	0.020

Fiume Ticino - 2024					
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Golasecca (1)	Oleggio (2)	Cuggiono (3)	Abbiategrasso (4)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	0.020	0.020	0.020	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.006
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUDA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	0.006	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	0.0022	0.0053	0.0049	0.0037
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
ADV N2	0.04	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
cC6O4	0.04	0.020	0.020	0.020	0.020
Fiume Ticino - 2025					
	Limite di rilevabilità [µg/l]	Golasecca (1)	Oleggio (2)	Cuggiono (3)	Abbiategrasso (4)
Acido perfluoro-2-propossipropanoico (HFPO-DA)	0.04	0.020	0.020	0.020	0.020
Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorodecansolfonico (PFDS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroeptantansolfonico (PFHpS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroesanoico (PFHxA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroesansolfonico (PFHXS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-decanoico (PFDA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-dodecanoico (PFDoA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-eptanoico (PFHPA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-nonanoico (PFNA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluorononansolfonico (PFNS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoro-n-undecanoico (PFUDA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroottanoico (PFOA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoroottansolfonico (PFOS)	0.0002	0.0264	0.0089	0.0024	0.0027
Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
Acido perfluoropentansolfonico (PFPeS)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
ADV N2	0.04	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
cC6O4	0.04	0.020	0.020	0.020	0.020

Figura 3-50 - Fiume Ticino: Misurazioni medie 2021-2025

Dalle figure precedenti si evince che non sono presenti particolari parametri critici per il fiume Ticino se non per il parametro Acido perfluoroottansolfonico (PFOS) che è presente in concentrazioni medie importanti. In particolare, esiste una concentrazione di fondo con origine verosimilmente a monte della seconda stazione di monitoraggio, quindi tra Golasecca e Oleggio. Inoltre, è stato registrato nel 2025 un importante carico di PFOS a monte di Golasecca dovuto forse a sversamenti di carattere industriale.

Nelle pagine seguenti vengono riportati i boxplot del parametro PFOS risultato per verificarne la distribuzione lungo le stazioni di misurazione e negli anni 2021 e il 2025.



Figura 3-51 - Boxplot parametro PFOS nel fiume Ticino nelle località 1 e 2



Figura 3-52 - Boxplot parametro PFOS nel fiume Ticino nelle località 3 e 4

I boxplot precedenti chiariscono una situazione in linea generale positiva, il fiume Ticino risulta essere in larga misura privo di sostanze riconducibili a PFAS se non per quanto riguarda il parametro PFOS che può essere riconducibile ad un probabile refluo di origine industriale.

In merito alle concentrazioni è importante sottolineare che il parametro PFOS è misurato tramite strumenti con una sensibilità superiore rispetto agli altri parametri. In particolare, la sensibilità dello strumento o limite di rilevabilità, è dell'ordine di 0,0002 µg/l in confronto agli altri parametri che hanno un limite di rilevabilità variabile tra 0,01 e 0,04 µg/l.

3.12 Confronti di qualità fra corpi idrici superficiali

Sulla base delle misurazioni raccolte nelle stazioni di monitoraggio degli undici corpi idrici oggetto di studio, Agogna, Bormida, Dora Baltea, Dora Riparia, Maira, Po, Scrivia, Sesia, Stura di Demonte, Tanaro e Ticino, verranno discussi i parametri critici identificati, lo stato di contaminazione di ciascun fiume, i corpi idrici più compromessi e le implicazioni legate alla dinamica di flusso e di connessione idrogeografica del reticolo idrografico analizzato.

L'analisi complessiva dei dati ha evidenziato in modo inequivocabile che l'acido perfluorooctansolfonico (PFOS) risulta essere il parametro che, all'interno dell'intero dataset, mostra con maggiore frequenza valori di concentrazione superiori al livello di quantificazione, distinguendosi nettamente rispetto agli altri parametri analizzati; questo dato diventa ancora più rilevante se si considera che il PFOS risulta il parametro dominante nei corpi idrici monitorati: Agogna, Bormida, Po, Scrivia e Ticino presentano tutti il PFOS come sostanza di maggiore presenza e concentrazione lungo l'intero arco temporale.

Nelle seguenti tabelle riepilogative sono riportati i fiumi analizzati con i principali parametri individuati suddivisi per anno. Nella Figura 3-53 è riportata la legenda con il significato dei colori utilizzati per identificare tre livelli di criticità: Verde per un parametro non critico e quindi con concentrazione inferiore al LOQ, giallo per un parametro di media criticità cioè con concentrazione poco superiore al LOQ e quindi rilevata presenza nel corpo idrico e rosso per un parametro a criticità elevata con concentrazione superiore al limite di legge previsto nella Legge Regionale n. 25/2021.




Non critico	
Criticità media	
Criticità elevata	

Figura 3-53 - Scala di criticità

Fiumi analizzati 2021											
	Parametri critici	Località (1)	Località (2)	Località (3)	Località (4)	Località (5)	Località (6)	Località (7)	Località (8)	Località (9)	Località (10)
Agogna	Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.005	0.005	0.025	-	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.015	0.021	0.002	-	-	-	-	-	-	-
	cC6O4	0.032	0.020	0.046	-	-	-	-	-	-	-
Bormida	Acido perfluorobutanoico (PFBA)	n.a.	0.018	-	-	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluorooottanoico (PFOA)	n.a.	0.051	-	-	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	n.a.	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	n.a.	0.076	-	-	-	-	-	-	-	-
	ADV N2	n.a.	0.122	-	-	-	-	-	-	-	-
	cC6O4	n.a.	0.213	-	-	-	-	-	-	-	-
Dora Baltea	Acido perfluorooottanoico (PFOA)	n.a.	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	n.a.	0.0003	-	-	-	-	-	-	-	-
Dora Riparia	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.0004	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	cC6O4	0.020	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maira	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	n.a.	0.0005	-	-	-	-	-	-	-	-
Po	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.0003	0.0002	0.0002	0.0008	0.0015	0.0009	0.0008	0.0007	0.0010	0.0010
Scrivia	Acido perfluorooottanoico (PFOA)	0.015	0.014	0.037	0.030	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.0076	0.0200	0.0067	0.0113	-	-	-	-	-	-
Sesia	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.0011	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stura di Demonte	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	n.a.	n.a.	-	-	-	-	-	-	-	-
Tanaro	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	n.a.	0.0002	0.0013	-	-	-	-	-	-	-
	cC6O4	n.a.	0.020	0.071	-	-	-	-	-	-	-
Ticino	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.0018	0.0044	0.0030	0.0024	-	-	-	-	-	-

Tabella 3-13 - Parametri critici individuati nei fiumi monitorati nel 2021

Fiumi analizzati 2022											
	Parametri critici	Località (1)	Località (2)	Località (3)	Località (4)	Località (5)	Località (6)	Località (7)	Località (8)	Località (9)	Località (10)
Agogna	Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.005	0.005	0.088	-	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.016	0.013	0.004	-	-	-	-	-	-	-
	cC6O4	0.020	0.020	0.028	-	-	-	-	-	-	-
Bormida	Acido perfluorobutanoico (PFBA)	0.005	0.191	-	-	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluorooottanoico (PFOA)	0.005	0.072	-	-	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.002	0.004	-	-	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	0.005	0.069	-	-	-	-	-	-	-	-
	ADV N2	0.020	0.135	-	-	-	-	-	-	-	-
	cC6O4	0.020	0.260	-	-	-	-	-	-	-	-
Dora Baltea	Acido perfluorooottanoico (PFOA)	n.a.	0.044	-	-	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	n.a.	0.0004	-	-	-	-	-	-	-	-
Dora Riparia	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.0008	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	cC6O4	0.051	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maira	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	n.a.	0.0005	-	-	-	-	-	-	-	-
Po	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	n.a.	0.0003	0.0003	0.0011	0.0014	0.0011	0.0012	0.0010	0.0018	0.0023
Scrivia	Acido perfluorooottanoico (PFOA)	0.007	0.019	0.025	0.031	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.0052	0.0077	0.0033	0.0066	-	-	-	-	-	-
Sesia	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.0032	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stura di Demonte	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	n.a.	n.a.	-	-	-	-	-	-	-	-
Tanaro	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	n.a.	0.0009	0.0012	-	-	-	-	-	-	-
	cC6O4	n.a.	n.a.	0.043	-	-	-	-	-	-	-
Ticino	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.0017	0.0038	0.0033	0.0038	-	-	-	-	-	-

Tabella 3-14 - Parametri critici individuati nei fiumi monitorati nel 2022

Fiumi analizzati 2023											
	Parametri critici	Località (1)	Località (2)	Località (3)	Località (4)	Località (5)	Località (6)	Località (7)	Località (8)	Località (9)	Località (10)
Agogna	Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.005	0.005	0.037	-	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.018	0.012	0.005	-	-	-	-	-	-	-
	cC6O4	0.020	0.020	0.036	-	-	-	-	-	-	-
Bormida	Acido perfluorobutanoico (PFBA)	n.a.	0.039	-	-	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluorooottanoico (PFOA)	n.a.	0.030	-	-	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	n.a.	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	n.a.	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-
	ADV N2	n.a.	0.058	-	-	-	-	-	-	-	-
	cC6O4	n.a.	0.063	-	-	-	-	-	-	-	-
Dora Baltea	Acido perfluorooottanoico (PFOA)	0.005	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.0003	0.0002	-	-	-	-	-	-	-	-
Dora Riparia	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.0002	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	cC6O4	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maira	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	n.a.	0.0004	-	-	-	-	-	-	-	-
Po	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	n.a.	0.0004	0.0003	0.0013	0.0021	0.0012	0.0018	0.0012	0.0022	0.0021
Scrivia	Acido perfluorooottanoico (PFOA)	0.013	0.018	0.005	0.037	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.0112	0.0189	0.0041	0.0064	-	-	-	-	-	-
Sesia	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	n.a.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stura di Demonte	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.0004	0.0006	-	-	-	-	-	-	-	-
Tanaro	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	n.a.	n.a.	0.0008	-	-	-	-	-	-	-
	cC6O4	n.a.	n.a.	0.042	-	-	-	-	-	-	-
Ticino	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.0018	0.0040	0.0049	0.0042	-	-	-	-	-	-

Tabella 3-15 - Parametri critici individuati nei fiumi monitorati nel 2023

Fiumi analizzati 2024											
	Parametri critici	Località (1)	Località (2)	Località (3)	Località (4)	Località (5)	Località (6)	Località (7)	Località (8)	Località (9)	Località (10)
Agogna	Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.005	0.005	0.026	-	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.012	0.011	0.006	-	-	-	-	-	-	-
	cC6O4	0.020	0.020	0.031	-	-	-	-	-	-	-
Bormida	Acido perfluorobutanoico (PFBA)	n.a.	0.008	-	-	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluorooottanoico (PFOA)	n.a.	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	n.a.	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	n.a.	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-
	ADV N2	n.a.	n.a.	-	-	-	-	-	-	-	-
	cC6O4	n.a.	0.020	-	-	-	-	-	-	-	-
Dora Baltea	Acido perfluorooottanoico (PFOA)	n.a.	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	n.a.	0.0002	-	-	-	-	-	-	-	-
Dora Riparia	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.0002	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	cC6O4	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maira	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.0003	0.0004	-	-	-	-	-	-	-	-
Po	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	n.a.	0.0009	0.0003	0.0009	0.0014	0.0010	0.0006	0.0010	0.0012	0.0010
Scrivia	Acido perfluorooottanoico (PFOA)	n.a.	0.014	0.098	0.076	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	n.a.	0.0051	0.0106	0.0101	-	-	-	-	-	-
Sesia	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	n.a.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stura di Demonte	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	n.a.	n.a.	-	-	-	-	-	-	-	-
Tanaro	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	n.a.	n.a.	0.0012	-	-	-	-	-	-	-
	cC6O4	n.a.	n.a.	0.020	-	-	-	-	-	-	-
Ticino	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.0022	0.0053	0.0049	0.0037	-	-	-	-	-	-

Tabella 3-16 - Parametri critici individuati nei fiumi monitorati nel 2024

Fiumi analizzati 2025											
	Parametri critici	Località (1)	Località (2)	Località (3)	Località (4)	Località (5)	Località (6)	Località (7)	Località (8)	Località (9)	Località (10)
Agogna	Acido perfluorobutansolfonico (PFBS)	0.005	0.005	0.005	-	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.008	0.008	0.004	-	-	-	-	-	-	-
	cC6O4	0.020	0.020	0.020	-	-	-	-	-	-	-
Bormida	Acido perfluorobutanoico (PFBA)	n.a.	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluorooottanoico (PFOA)	n.a.	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	n.a.	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluoropentanoico (PFPeA)	n.a.	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-
	ADV N2	n.a.	n.a.	-	-	-	-	-	-	-	-
	cC6O4	n.a.	0.020	-	-	-	-	-	-	-	-
Dora Baltea	Acido perfluorooottanoico (PFOA)	n.a.	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	n.a.	0.0002	-	-	-	-	-	-	-	-
Dora Riparia	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	n.a.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	cC6O4	n.a.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maira	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	n.a.	0.0002	-	-	-	-	-	-	-	-
Po	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	n.a.	0.0002	0.0002	0.0023	0.0025	0.0018	0.0013	0.0015	0.0014	0.0014
Scrivia	Acido perfluorooottanoico (PFOA)	0.005	0.005	0.020	n.a.	-	-	-	-	-	-
	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.0012	0.0025	0.0037	n.a.	-	-	-	-	-	-
Sesia	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.0051	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stura di Demonte	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	n.a.	n.a.	-	-	-	-	-	-	-	-
Tanaro	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.0033	0.0019	0.0022	-	-	-	-	-	-	-
	cC6O4	0.020	n.a.	0.020	-	-	-	-	-	-	-
Ticino	Acido perfluorooottansolfonico (PFOS)	0.0264	0.0089	0.0024	0.0027	-	-	-	-	-	-

Tabella 3-17 - Parametri critici individuati nei fiumi monitorati nel 2025

Un aspetto metodologico di rilievo che incide sull'interpretazione di questi dati riguarda tuttavia la diversa sensibilità analitica, espressa come limite di quantificazione (LOQ), adottata per le diverse specie PFAS nel programma di monitoraggio. Il PFOS presenta un LOQ di 0,0002 µg/L, significativamente più basso rispetto a quello degli altri composti: per la maggior parte delle specie il LOQ è fissato a 0,01 µg/L, mentre per cC6O4, HFPO-DA e ADV N2 il valore è ancora superiore, pari a 0,04 µg/L.

Questo divario, con un rapporto di 50:1 tra il LOQ del PFOS e quello della maggior parte degli altri composti, e di 200:1 rispetto a cC6O4 e ADV N2, ha implicazioni dirette sulle misurazioni svolte e sui valori riportati nel dataset.

La diffusa presenza di PFOS nei corpi idrici monitorati è provata dalle misurazioni ottenute, ma è anche in parte amplificata dalla maggiore capacità dello strumento di rilevare questo composto a concentrazioni molto basse. Composti come cC6O4 o ADV N2, con LOQ più elevato, potrebbero essere presenti a concentrazioni analoghe a quelle del PFOS senza essere rilevabili con il metodo analitico adottato: la loro minore frequenza di rilevamento nel dataset non può quindi essere interpretata come assenza dal corpo idrico, ma riflette anche il limite della tecnica di misura. Lo stesso vale per gli altri parametri, il cui LOQ a 0,01 µg/L è cinquanta volte meno sensibile rispetto a quello del PFOS. Va inoltre considerato un ulteriore effetto distorsivo: quando una misurazione risulta inferiore al LOQ, il valore viene convenzionalmente riportato come uguale alla metà del LOQ stesso. Ne consegue che i valori sottosoglia dei composti meno sensibili, ad esempio 0,005 µg/L per PFOA o PFBA, oppure 0,02 µg/L per cC6O4, appaiono nel dataset numericamente più alti rispetto ai corrispondenti valori sottosoglia del PFOS (0,0002 µg/L), non perché le concentrazioni reali siano maggiori, ma esclusivamente perché il limite strumentale è più elevato. Questo meccanismo può portare a sovrastimare sistematicamente le concentrazioni apparenti dei composti con LOQ alto rispetto a quelle del PFOS, introducendo un bias nell'analisi comparativa che deve essere tenuto presente nell'interpretazione dei risultati. Nell'ambito della presente analisi, i valori riportati al LOQ sono stati trattati come pari alla metà del LOQ stesso: un approccio conservativo a favore della sicurezza, che consente di includere nel calcolo anche le misurazioni sottosoglia anziché escluderle. Questa scelta, pur introducendo una sovrastima controllata, è preferibile al rischio opposto di ignorare concentrazioni che potrebbero essere realmente presenti nel corpo idrico, anche se non quantificabili con certezza strumentale.

Al secondo posto per frequenza si trova il cC6O4 (acido perfluoro(2-metil-3-ossaesanoico)) rilevato in modo costante su Agogna, Bormida, Dora Riparia e Tanaro. Si tratta di un composto introdotto come alternativa ad altri composti dopo la progressiva messa al bando di PFOA e PFOS rispettivamente nel 2019 e 2009. Da quanto analizzato, non sembrerebbe evidente una tendenza in aumento della concentrazione di cC6O4 tra il 2021 e il 2025. Questo può essere riconducibile all'arco temporale di monitoraggio posteriore all'entrata in vigore delle restrizioni per PFOS e PFOA.

L'acido perfluorottanoico (PFOA), terzo per frequenza, è il parametro dominante sulla Dora Baltea e sullo Scrivia. A seguire i restanti parametri critici: PFBA nel fiume Bormida, PFBS sull'Agogna, PFPeA ancora in Bormida. Il composto ADV N2, presente con 3 occorrenze esclusivamente sulla Bormida, è un fluoropolimero industriale correlato alle produzioni industriali dell'area.

Bormida si distingue nettamente come il corpo idrico più compromesso dell'intero dataset, con una media dei valori massimi pari a 0,053 µg/L e un picco assoluto di 0,260 µg/L di cC6O4 registrato nel 2022 presso la seconda stazione di monitoraggio, corrispondente al tratto immediatamente a valle di Alessandria e dei complessi industriali. Il quadro di contaminazione del fiume Bormida è il più complesso tra tutti i fiumi analizzati, sia per il numero di composti PFAS critici rilevati, sei distinti parametri, sia per l'entità delle concentrazioni riscontrate.

Occorre inoltre ricordare che i PFAS a catena lunga possono subire processi di trasformazione, ad esempio biologici, dando origine a PFAS a catena più corta. Queste trasformazioni possono avvenire in diverse matrici ambientali, come suolo e acque, oppure durante i processi di trattamento. I composti a catena corta risultano generalmente più mobili e tendono a disperdersi più facilmente, di conseguenza, possono essere rilevati con maggiore frequenza nelle analisi.

Questo fenomeno può alterare l'interpretazione dei dati, poiché una diminuzione dei PFAS a catena lunga non implica necessariamente una riduzione della contaminazione, ma contrario, potrebbe indicare una loro trasformazione in specie a catena corta. I dati raccolti rilevano infatti solo le sostanze presenti al momento del campionamento. Ciò può portare a sottostimare il contributo originario dei PFAS a catena lunga e sovrastimare quelli a catena corta. È quindi importante considerare questi processi nella lettura dei risultati analitici.

Considerazioni finali

I parametri che richiedono maggiore attenzione comprendono cC6O4, ADV N2, PFBA, PFPeA, PFOA e PFOS: un profilo che rispecchia le emissioni tipiche di stabilimenti industriali dove vengono prodotti fluoropolimeri di nuova generazione. È significativo notare che sul fiume Bormida la presenza di PFAS è rilevante già nella prima stazione di monitoraggio suggerendo una diffusione della contaminazione attraverso le acque sotterranee o immissari distribuiti lungo l'asta fluviale.

I valori massimi di cC6O4 passano da 0,213 µg/L nel 2021 a 0,260 µg/L nel 2022, per poi decrescere progressivamente fino a 0,020 µg/L nel 2024 e 2025. Questa tendenza alla riduzione, pur incoraggiante, va interpretata con cautela: potrebbe riflettere interventi di contenimento delle emissioni adottati a causa di una maggiore attenzione a questi composti da parte degli enti di controllo ambientale, ma i valori rimangono comunque tra i più elevati dell'intero dataset regionale.

Il Ticino merita attenzione per il brusco aumento di PFOS nel 2025, con un picco di 0,026 µg/L nella prima stazione, il valore più alto mai rilevato su questo fiume, contro una media degli anni precedenti di 0,003–0,005 µg/L. Questo salto, se confermato, potrebbe indicare l'attivazione di una nuova sorgente di contaminazione nel tratto piemontese del fiume.

Sesia, Po, Maira e Stura di Demonte registrano le concentrazioni medie più contenute. Maira e Stura di Demonte mostrano valori prossimi al limite di quantificazione, con il solo PFOS come parametro critico rilevato in modo discontinuo. Il Sesia evidenzia una presenza sporadica compatibile con una contaminazione diffusa di bassa intensità piuttosto che con sorgenti puntuali.

Il Po, pur essendo il recettore finale di tutti gli apporti del bacino padano piemontese, presenta valori di PFOS relativamente contenuti e stabili, con concentrazioni medie tra 0,001 e 0,002 µg/L. Questo dato va tuttavia letto con cautela: le diluizioni operate dalla portata del Po tendono ad abbassare le concentrazioni puntuali pur in presenza di carichi complessivamente significativi. Si registra una progressiva seppur lenta crescita delle concentrazioni lungo il percorso del fiume, compatibile con il progressivo apporto degli affluenti.

La lettura dei dati di monitoraggio non può prescindere dalla struttura idrogeografica del bacino piemontese. Tutti i fiumi monitorati confluiscono, direttamente o indirettamente, nel Po, che a sua volta sfocia nel Mare Adriatico attraverso il delta veneto. I composti rilevati nei corsi d'acqua secondari finiscono inevitabilmente per confluire nel Po, che raccoglie gli apporti degli effluenti dall'intera Pianura Padana.

Particolarmente rilevante è il ruolo del Tanaro come collettore degli apporti di tre affluenti tra i più critici: il Bormida, il Maira e lo Stura di Demonte. Il fiume Bormida riversa nel Tanaro un carico di PFAS che include cC6O4, ADV N2, PFBA, PFPeA e PFOA in concentrazioni tra le più elevate del

dataset. Il Tanaro sfocia nel Po a valle di Alessandria, ne risulta che il tratto del Po tra Alessandria e Pavia è esposto a una sovrapposizione di apporti PFAS provenienti da direzioni diverse: da destra attraverso Tanaro, Bormida e Scrivia, e da sinistra attraverso Dora Baltea, Dora Riparia, Sesia e Agogna.

Anche il Ticino rappresenta un elemento di attenzione nel quadro complessivo. Affluente di sinistra del Po con foce nel territorio di Pavia, riceve le acque del Lago Maggiore, bacino nel quale confluiscano i corsi d'acqua dell'area del Verbano-Cusio-Ossola. Il brusco incremento di PFOS nel 2025 sulla prima stazione del Ticino merita approfondimento, in quanto potrebbe segnalare un'intensificazione dei carichi inquinanti in ingresso dal bacino lacustre.

L'analisi complessiva del quinquennio 2021–2025 restituisce un quadro di contaminazione diffusa da PFAS nelle acque superficiali piemontesi, con caratteristiche che variano significativamente da bacino a bacino ma con alcune considerazioni comuni. Il PFOS rimane la sostanza più presente e in modo praticamente continuo sui fiumi monitorati; la sua persistenza ambientale, la tendenza alla bioaccumulazione e la tossicità accertata ne fanno il marker prioritario per qualsiasi programma di monitoraggio. Va tuttavia tenuto presente che la sua predominanza nel dataset è anche in parte ascrivibile alla maggiore sensibilità strumentale del metodo analitico adottato per questo composto, e che gli altri PFAS potrebbero essere sottostimati rispetto alla loro effettiva presenza ambientale.

In conclusione, i dati indicano la necessità di mantenere e rafforzare il programma di monitoraggio regionale, con particolare attenzione ai tratti più critici e soprattutto al corpo idrico più sollecitato (il fiume Bormida) e di estendere le indagini verso l'identificazione puntuale delle sorgenti non ancora attribuite. Parallelamente, il progressivo adeguamento dei metodi analitici verso LOQ più bassi per i composti di nuova generazione, in particolare cC6O4 e ADV N2, rappresenta una priorità metodologica per garantire che il monitoraggio ambientale sia effettivamente in grado di verificare la conformità con i limiti normativi europei in via di introduzione.

Bibliografia

- Ackerman Grunfeld, D., Gilbert, D., Hou, J., Jones, A. M., Lee, M. J., Kibbey, T. C. G., & O'Carroll, D. M. (2024). Underestimated burden of per- and polyfluoroalkyl substances in global surface waters and groundwaters. *Nature Geoscience*, 17(4), 340–346. <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01402-8>
- A.D.B.PO. (2001a). Dora_Baltea. https://www.adbpo.it/PAI/3%20-%20Linee%20generali%20di%20assetto%20idraulico%20e%20idrogeologico/3.3%20-%20Elaborato%20Piemonte/Dora_Baltea.pdf. https://www.adbpo.it/PAI/3%20-%20Linee%20generali%20di%20assetto%20idraulico%20e%20idrogeologico/3.3%20-%20Elaborato%20Piemonte/Dora_Baltea.pdf
- A.D.B.PO. (2001b). *LINEE GENERALI DI ASSETTO IDROGEOLOGICO E QUADRO DEGLI INTERVENTI BACINO DEL TANARO*. <https://www.adbpo.it/PAI/3%20-%20Linee%20generali%20di%20assetto%20idraulico%20e%20idrogeologico/3.3%20-%20Elaborato%20Piemonte/Tanaro.pdf>
- A.D.B.PO. (2001c). *LINEE GENERALI DI ASSETTO IDROGEOLOGICO E QUADRO DEGLI INTERVENTI BACINO DELLA DORA RIPARIA*. https://www.adbpo.it/PAI/3%20-%20Linee%20generali%20di%20assetto%20idraulico%20e%20idrogeologico/3.3%20-%20Elaborato%20Piemonte/Dora_Riparia.pdf
- A.D.B.PO. (2001d). *LINEE GENERALI DI ASSETTO IDROGEOLOGICO E QUADRO DEGLI INTERVENTI BACINO DELLO SCRIVIA*. <https://www.adbpo.it/PAI/3%20-%20Linee%20generali%20di%20assetto%20idraulico%20e%20idrogeologico/3.3%20-%20Elaborato%20Piemonte/Scrivia.pdf>
- A.D.B.PO. (2001e). *LINEE GENERALI DI ASSETTO IDROGEOLOGICO E QUADRO DEGLI INTERVENTI (SESIA)*. <https://www.adbpo.it/PAI/3%20-%20Linee%20generali%20di%20assetto%20idraulico%20e%20idrogeologico/3.3%20-%20Elaborato%20Piemonte/Sesia.pdf>
- A.D.B.PO. (2007). *Direzione Pianificazione Risorse Idriche PIANO DI TUTELA PIANO DI TUTELA DELLE ACQUE DELLE ACQUE*. <https://www.regione.piemonte.it/web/temi/ambiente-territorio/ambiente/acqua/piano-tutela-delle-acque-pta-2007>
- A.D.B.PO. (2026). *Piano di Gestione del distretto idrografico del fiume Po*. <https://pianoacque.adbpo.it/>. <https://pianoacque.adbpo.it/>
- ARPA Piemonte. (2025a). *Geoportale PFAS Acque*. https://webgis.arpa.piemonte.it/pfas_acque/. https://webgis.arpa.piemonte.it/pfas_acque/
- ARPA Piemonte. (2025b). *MONITORAGGIO E CONTROLLO DELLE SOSTANZE PERFLUOROALCHILICHE (PFAS) NEL TERRITORIO DELLA REGIONE PIEMONTE*. https://www.arpa.piemonte.it/sites/default/files/media/2025-07/2025_relazione_pfas_piemonte.pdf
- ARPA Piemonte. (2026). *ARPA Piemonte*. <https://www.arpa.piemonte.it/temi/acqua>. <https://www.arpa.piemonte.it/temi/acqua>
- Arvaniti, O. S., Hwang, Y., Andersen, H. R., Stasinakis, A. S., Thomaidis, N. S., & Aloupi, M. (2015). Reductive degradation of perfluorinated compounds in water using Mg-aminoclay coated nanoscale zero valent iron. *Chemical Engineering Journal*, 262, 133–139. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.09.079>
- Autorità di bacino del fiume Po. (2001). *LINEE GENERALI DI ASSETTO IDROGEOLOGICO E QUADRO DEGLI INTERVENTI BACINO DEL MAIRA*. <https://www.adbpo.it/PAI/3%20-%20Linee%20generali%20di%20assetto%20idraulico%20e%20idrogeologico/3.3%20-%20Elaborato%20Piemonte/Maira.pdf>

- Autorità di Bacino del fiume Po. (2010). Monografia del sottobacino Agogna. *Piano di Gestione del Distretto Idrografico del Po (PdG Po)*. <https://www.adbpo.it/>
- Brunn, H., Arnold, G., Körner, W., Rippen, G., Steinhäuser, K. G., & Valentin, I. (2023). PFAS: forever chemicals—persistent, bioaccumulative and mobile. Reviewing the status and the need for their phase out and remediation of contaminated sites. In *Environmental Sciences Europe* (Vol. 35, Numero 1). Springer. <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00721-8>
- Buck, R. C., Franklin, J., Berger, U., Conder, J. M., Cousins, I. T., Voogt, P. De, Jensen, A. A., Kannan, K., Mabury, S. A., & van Leeuwen, S. P. J. (2011). Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: Terminology, classification, and origins. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 7(4), 513–541. <https://doi.org/10.1002/ieam.258>
- Cox, N. J., & Jones, K. (s.d.). *Exploratory data analysis*.
- Giglioli, S., Colombo, L., & Azzellino, A. (2023). Cluster and multivariate analysis to study the diffuse contamination of emerging per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in the Veneto Region plain (North-eastern Italy). *Chemosphere*, 319. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137916>
- Helsel, D. R. . (2012). *Statistics for censored environmental data using Minitab and R*. Wiley.
- Joerss, H., Schramm, T. R., Sun, L., Guo, C., Tang, J., & Ebinghaus, R. (2020). Per- and polyfluoroalkyl substances in Chinese and German river water – Point source- and country-specific fingerprints including unknown precursors. *Environmental Pollution*, 267. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115567>
- Lee, yu-C., Chen, Y.-P., Chen, M.-J., Kuo, J., & Lo, S.-L. (2017). Reductive Defluorination of Perfluorooctanoic Acid by Titanium(III) Citrate with Vitamin B 12 and Copper Nanoparticles. *Journal of Hazardous Materials*, 340. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.06.020>
- Lee, Y. C., Lo, S. L., Chiueh, P. Te, Liou, Y. H., & Chen, M. L. (2010). Microwave-hydrothermal decomposition of perfluorooctanoic acid in water by iron-activated persulfate oxidation. *Water Research*, 44(3), 886–892. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.09.055>
- Leung, S. C. E., Shukla, P., Chen, D., Eftekhari, E., An, H., Zare, F., Ghasemi, N., Zhang, D., Nguyen, N. T., & Li, Q. (2022). Emerging technologies for PFOS/PFOA degradation and removal: A review. In *Science of the Total Environment* (Vol. 827). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153669>
- Liu, F., Hua, L., & Zhang, W. (2020). Influences of microwave irradiation on performances of membrane filtration and catalytic degradation of perfluorooctanoic acid (PFOA). *Environment International*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105969>
- Liu, Z., Bentel, M., Yu, Y., Ren, C., Gao, J., Pulikkal, V., Sun, M., Men, Y., & Liu, J. (2021). Near-Quantitative Defluorination of Perfluorinated and Fluorotelomer Carboxylates and Sulfonates with Integrated Oxidation and Reduction. *Environmental science & technology*, 55. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00353>
- Marín-Marín, M. L., Rubio-Clemente, A., & Peñuela, G. (2023). Advanced Oxidation Processes Used in The Treatment of Perfluoroalkylated Substances in Water. *Revista UIS Ingenierías*, 22(3). <https://doi.org/10.18273/revuin.v22n3-2023010>
- Mitchell, S. M., Ahmad, M., Teel, A. L., & Watts, R. J. (2013). Degradation of Perfluorooctanoic Acid by Reactive Species Generated through Catalyzed H₂O₂ Propagation Reactions. *Environmental Science and Technology Letters*, 1(1), 117–121. <https://doi.org/10.1021/ez4000862>
- OECD. (2021). *Series on Risk Management No* (Numero 61). www.oecd.org/chemicalsafety/

- Park, S., Lee, L. S., Medina, V. F., Zull, A., & Waisner, S. (2016). Heat-activated persulfate oxidation of PFOA, 6:2 fluorotelomer sulfonate, and PFOS under conditions suitable for in-situ groundwater remediation. *Chemosphere*, *145*, 376–383. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.11.097>
- Pianificazione Risorse Idriche FASE, D. (2004). *REV. DATA REDAZIONE VERIFICA AUTORIZZAZIONE MODIFICHE RIPRODUZIONE O CONSEGNA A TERZI SOLO DIETRO SPECIFICA AUTORIZZAZIONE II BILANCIO DELLE DISPONIBILITA' IDRICHE NATURALI E VALUTAZIONE DELL'INCIDENZA DEI PRELIEVI II.h BILANCIO IDROLOGICO ELABORATO*. https://www.regione.piemonte.it/web/sites/default/files/media/documenti/2018-11/iih01_0.pdf
- Quan, H., Ji, F., Zhong, Z., Li, R., & Lu, H. (2025). PFAS in bottled water from China: High prevalence of ultrashort-chain compounds, health risks, and global insights. *Journal of Hazardous Materials*, *499*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.140184>
- Rackov, C., Lawal, W., Nfodzo, P., Vianna, M., doNascimento, C., & Choi, H. (2016). Degradation of PFOA by hydrogen peroxide and persulfate activated by iron-modified diatomite. *Applied Catalysis B: Environmental*, *192*. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.03.067>
- Regione Piemonte. (2021). aa_aa_regione piemonte - legge regionale_2021-10-20_78769. https://www.regione.piemonte.it/governo/bollettino/abbonati/2021/42/attach/aa_aa_regione%20piemonte%20-%20legge%20regionale_2021-10-20_78769.pdf. https://www.regione.piemonte.it/governo/bollettino/abbonati/2021/42/attach/aa_aa_regione%20piemonte%20-%20legge%20regionale_2021-10-20_78769.pdf
- Regione Piemonte. (2022). dgr_05220_1050_14062022. https://www.regione.piemonte.it/governo/bollettino/abbonati/2022/26/attach/dgr_05220_1050_14062022.pdf. https://www.regione.piemonte.it/governo/bollettino/abbonati/2022/26/attach/dgr_05220_1050_14062022.pdf
- Schymanski, E. L., Zhang, J., Thiessen, P. A., Chirsir, P., Kondic, T., & Bolton, E. E. (2023). Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in PubChem: 7 Million and Growing. *Environmental Science and Technology*, *57*(44), 16918–16928. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c04855>
- Usepa, Ow, & Ost. (2024). *Method 1633, Revision A Analysis of Per-and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Aqueous, Solid, Biosolids, and Tissue Samples by LC-MS/MS*. www.epa.gov
- Wang, Z., Buser, A. M., Cousins, I. T., Demattio, S., Drost, W., Johansson, O., Ohno, K., Patlewicz, G., Richard, A. M., Walker, G. W., White, G. S., & Leinala, E. (2021). A New OECD Definition for Per- And Polyfluoroalkyl Substances. In *Environmental Science and Technology* (Vol. 55, Numero 23, pagg. 15575–15578). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06896>
- Wanninayake, D. M. (2021). Comparison of currently available PFAS remediation technologies in water: A review. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 283). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.111977>
- Yang, S., Cheng, J., Sun, J., Hu, Y., & Liang, X. (2013). Defluorination of Aqueous Perfluorooctanesulfonate by Activated Persulfate Oxidation. *PLoS ONE*, *8*(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0074877>
- Yin, P., Hu, Z., Song, X., Liu, J., & Lin, N. (2016). Activated persulfate oxidation of perfluorooctanoic acid (PFOA) in groundwater under acidic conditions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *13*(6). <https://doi.org/10.3390/ijerph13060602>

Zhou, Z., Deng, F., Nie, J., Li, H., Jiang, X., Wang, S., & Guo, Y. (2025). From Sources to Environmental Risks: Research Progress on Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) in River and Lake Environments. In *Water (Switzerland)* (Vol. 17, Numero 21). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).
<https://doi.org/10.3390/w17213061>