doc. 04

PFAS: la minaccia invisibile alle acque europee tra scienza ecologica e diritto ambientale

di ALESSANDRO TACENTE e LUCA MARENGO

Contributo sottoposto a procedimento di revisione (single blind) e approvato per la pubblicazione

SOMMARIO – 1. Premessa: sfide interdisciplinari emergenti per la risorsa idrica. – **1.1.** Tutela delle risorse idriche nell'ordinamento italiano nel quadro regolatorio europeo – **2.** I PFAS negli ecosistemi acquatici: caratteristiche, diffusione e persistenza. – **3.** Impatti ecotossicologici e rischi per la salute umana. – **4.** Verso un approccio integrato tra diritto ambientale ed ecologia.

ABSTRACT – *Il contributo esamina, in prospettiva interdisciplinare, la minaccia rappresentata dalle sostanze per- e polifluoroalchiliche (PFAS) per la tutela delle acque europee, ponendo in dialogo diritto ambientale e scienze ecologiche. Muovendo dal riconoscimento dell'acqua quale bene comune essenziale alla vita, l'analisi evidenzia come la persistenza e la diffusività dei PFAS compromettano gli ecosistemi acquatici e i servizi ecosistemici, rivelando criticità strutturali nei sistemi di prevenzione e gestione del rischio. Sul piano giuridico, l'articolo indaga i principali strumenti del diritto dell'Unione europea in materia di acque e sostanze chimiche, mettendone in luce sviluppi recenti, lacune regolatorie e limiti applicativi rispetto a contaminanti persistenti, anche alla luce del principio di precauzione. Il contributo dell'ecologo, con taglio scientifico, approfondisce i meccanismi di dispersione dei PFAS, gli effetti sugli organismi acquatici e le potenziali implicazioni per la salute umana, evidenziando l'interconnessione tra comparti ambientali. In tale contesto, si valutano le possibili ricadute per l'ordinamento italiano e si propone un ripensamento della tutela ambientale e idrica in chiave integrata, fondato su un rinnovato equilibrio tra uomo e ambiente e su una più stretta integrazione tra scienza e diritto, quale condizione essenziale per affrontare le sfide emergenti nel contesto europeo.*

KEY-WORDS – *PFAS; tutela delle acque; diritto ambientale europeo; ecosistemi acquatici*.

1. Premessa: sfide interdisciplinari emergenti per la risorsa idrica.

Le trasformazioni ambientali contemporanee pongono la risorsa idrica al centro di una pluralità di sfide sistemiche[1], che spaziano dai disastri idrogeologici alla crescente difficoltà di accesso all'acqua potabile, dalla gestione degli scarichi e dell'inquinamento diffuso fino alle interconnessioni tra acqua, sicurezza alimentare e sprechi.
In tale contesto, il diritto non può più rimanere confinato entro categorie tradizionali e autoreferenziali, ma è chiamato a confrontarsi in modo strutturale con le scienze naturali e

[1] In ordine alla distribuzione fisica delle risorse idriche a livello planetario, si veda *National Geographic Education*, *The Hydrosphere*, che rileva come l'acqua ricopra circa il 71 % della superficie terrestre, configurandosi quale elemento fisico dominante del pianeta, disponibile all'indirizzo: *https://education.nationalgeographic.org/resource/resource-library-hydrosphere/*

sociali, sviluppando un dialogo interdisciplinare capace di cogliere la complessità dei fenomeni in atto.
Al contempo, le analisi scientifiche dimostrano come la problematica trascenda la dimensione locale-nazionale costituendo un problema di rilievo internazionale[2]. Nel diritto pubblico italiano, l'acqua si configura come un bene costituzionale complesso[3]: elemento naturale che precede il diritto positivo e ne sollecita l'evoluzione, imponendo un ampliamento delle categorie giuridiche tradizionali. Essa si colloca al crocevia tra competenze normative, esigenze di tutela ecologica, garanzie dei diritti fondamentali[4] e interessi economici, costituendo uno dei terreni più sensibili della governance contemporanea. In questa prospettiva, la risorsa idrica assume una natura polisemica, configurandosi al contempo come diritto fondamentale, prestazione sociale, bene comune[5] e risorsa economicamente rilevante, il cui accesso deve essere assicurato in condizioni di universalità.
Soprattutto, l'acqua rappresenta una risorsa limitata, la cui gestione richiede un governo pubblico capace di coniugare sostenibilità ambientale, equità sociale e responsabilità intergenerazionale.
Essa diviene così un prisma attraverso cui valutare la capacità degli ordinamenti di riconoscere e tutelare ciò che è essenziale: non soltanto una risorsa, ma una condizione materiale della vita, un elemento che connette ecosistemi, comunità umane e ordine giuridico.
In tale prospettiva si impone un approccio interdisciplinare e multilivello, idoneo a cogliere le prospettive e criticità nonché a delineare un modello europeo emergente di tutela della risorsa idrica, sempre più orientato alla qualificazione dell'acqua come bene comune, da custodire e rigenerare nell'interesse delle generazioni presenti e future. In questo scenario si inserisce la crescente attenzione verso i PFAS (*sostanze per- e polifluoroalchiliche*), una vasta famiglia di composti sintetici sviluppati a partire dalla metà del Novecento[6] e oggi ampiamente utilizzati in numerosi settori produttivi, dall'industria chimica e tessile fino all'aerospazio e al comparto alimentare[7]. La loro diffusione capillare, unita alla persistenza ambientale e alla difficoltà di degradazione, ha determinato il riconoscimento di un elevato potenziale inquinante, con effetti rilevanti sia per la salute umana sia per gli ecosistemi.
La questione dei PFAS si colloca oggi al centro dell'attenzione scientifica e giuridica in quanto le prime pronunce giudiziarie[8] hanno accertato responsabilità significative a carico di operatori industriali, mentre le indagini ambientali hanno evidenziato la dimensione transnazionale del fenomeno. La risorsa idrica rappresenta il principale vettore di diffusione di tali contaminanti, rendendo la tutela delle acque il fulcro della risposta giuridica e regolatoria.
La gestione dei PFAS pone dunque una sfida cruciale per il diritto ambientale contemporaneo: da un lato, richiede l'adozione di misure preventive idonee a proteggere i corpi idrici non ancora contaminati; dall'altro, impone lo sviluppo di strategie giuridiche e tecniche per la bonifica e il ripristino degli ecosistemi compromessi. La comprensione di tale fenomeno presuppone necessariamente un approccio interdisciplinare, che integri le

[2] L. CATER, *EU ministers get their blood tested for forever chemicals*, in *POLITICO*, 10 luglio 2025, disponibile online all'indirizzo: https://www.politico.eu/article/eu-ministers-pfas-blood-test-forever-chemicals/.
[3] Sul punto, A. MORRONE, *Lo statuto costituzionale dell'acqua. Premesse per un costituzionalismo dell'effettività*, in *Federalismi.it*, 2025, n. 19, spec. p. 133.
[4] S. SILEONI, *L'acqua: una risorsa fondamentale, quale diritto?*, in *Rivista AIC*, 2016, n. 3, p. 5.
[5] A. ALGOSTINO, *Riflessioni sui beni comuni tra il "pubblico" e la Costituzione*, in *Costituzionalismo.it*, fasc. 3/2013, pp. 3-7.
[6] L. G. T. GAINES, Historical and current usage of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A literature review, in *American Journal of Industrial Medicine*, 2023, vol. 66, n. 5, pp. 353–378.
[7] J. GLÜGE et al., *An overview of the uses of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS)*, in *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2020, 22, pp. 2345–2373.
[8] Come si vedraà nel par. 1.1.

conoscenze ecologiche[9], chimiche e fisiche, – quali i processi di trasporto degli inquinanti, la biomagnificazione[10] e i cicli biogeochimici – con un'analisi critica del quadro normativo vigente e delle sue possibili evoluzioni.
In questa luce si colloca il presente contributo, frutto del dialogo tra competenze giuridiche ed ecobiologiche, volto a indagare la minaccia rappresentata dai PFAS per le acque europee e a delineare possibili traiettorie evolutive del diritto ambientale nella gestione di tali contaminanti emergenti[11].

1.1. Tutela delle risorse idriche nell'ordinamento italiano nel quadro regolatorio europeo.

Nell'ordinamento italiano, la disciplina delle risorse idriche si colloca all'interno di un sistema multilivello fortemente influenzato dal diritto dell'Unione europea[12], che ne orienta in modo decisivo principi, obiettivi e strumenti di tutela. Tale intreccio emerge con particolare evidenza nel settore delle acque, ove la regolazione interna si presenta come il risultato di un processo di progressiva integrazione con il quadro normativo eurounitario.
Il perno della disciplina nazionale è rappresentato dal d.lgs. 3 aprile 2006, n. 152 (Testo unico ambientale), che, in attuazione delle direttive europee, disciplina la tutela delle acque dall'inquinamento, la gestione quantitativa e qualitativa della risorsa e l'organizzazione del servizio idrico integrato. In particolare, la Parte III del decreto recepisce il modello della pianificazione per distretto idrografico introdotto dalla Direttiva 2000/60/CE[13], articolando la gestione della risorsa in piani di bacino, programmi di misure e obiettivi di qualità ambientale dei corpi idrici.
Il quadro nazionale si fonda, dunque, su principi di derivazione eurounitaria – prevenzione, precauzione e responsabilità del soggetto inquinatore – che trovano attuazione attraverso strumenti amministrativi e pianificatori volti a garantire un uso sostenibile della risorsa. In tale prospettiva, l'ordinamento italiano recepisce anche le ulteriori evoluzioni del diritto europeo in materia di acque, tra cui la disciplina sulle acque sotterranee (direttiva 2006/118/CE[14]), la gestione del rischio alluvioni (direttiva 2007/60/CE[15]), la qualità delle

[9] Per scienza ecologica si intende quella branca delle scienze naturali che studia le relazioni tra gli organismi viventi e l'ambiente in cui essi interagiscono, analizzando i processi che regolano la distribuzione, l'abbondanza e le dinamiche degli ecosistemi, nonché i flussi di energia e materia nei sistemi naturali. In tale prospettiva, l'ecologia fornisce strumenti essenziali per comprendere i fenomeni di diffusione, accumulo e biomagnificazione degli inquinanti, tra cui i PFAS, contribuendo in modo determinante all'elaborazione di politiche e strumenti giuridici di tutela ambientale.
[10] La biomagnificazione è l'accumulo lungo la catena alimentare di determinate sostanze. La *magnificazione ecologica* è il processo per cui i contaminanti assorbiti da organismi di un livello trofico aumentano di concentrazione nel trasferimento a organismi del livello trofico successivo tramite la rete trofica. Per info, si veda, www.isprambiente.gov.it; https://www.treccani.it/enciclopedia/bioaccumulo/.
[11] Il giurista operante in tale ambito deve impostare un dialogo strutturale e continuo con i saperi scientifici - quali l'ecologia, le scienze naturali, l'etica e l'economia - facendo ricorso ai dati scientifici con metodo critico e rigore tecnico, nella consapevolezza della complessità intrinseca della materia e della necessità di un approccio autenticamente interdisciplinare. Ciò sta avvenendo ad esempio in materia climatica. Sul ruolo dei dati scientifici nel contenzioso climatico-ambientale, si veda, M.F. CAVALCANTI, Fonti del diritto e cambiamento climatico: il ruolo dei dati tecnico-scientifici nella giustizia climatica in Europa, in DPCE Online, Vol. 58, n. SP2, 2023, p. 329.
[12] Per una ricostruzione dei principi comuni alla tradizione giuridica europea in materia di tutela dell'acqua, si veda, D. CASALINI, Fondamenti per un diritto delle acque dolci, Giappichelli, Torino, 2014, spec. cap. V.
[13] Direttiva 2000/60/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 23 ottobre 2000, che istituisce un quadro per l'azione comunitaria in materia di acque (Direttiva quadro sulle acque), in GUCE L 327 del 22 dicembre 2000.
[14] Direttiva 2006/118/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 12 dicembre 2006, sulla protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento, in GUUE L 372 del 27 dicembre 2006.
[15] Direttiva 2007/60/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 23 ottobre 2007, relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni, in GUUE L 288 del 6 novembre 2007.

acque destinate al consumo umano (direttiva UE 2020/2184[16]) e, più di recente, la rifusione della normativa sul trattamento delle acque reflue urbane nella Direttiva (UE) 2024/3019[17]. Accanto al recepimento formale, assume rilievo il ruolo conformativo della giurisprudenza nazionale e sovranazionale.

A tal punto, è doveroso menzionare il recente e paradigmatico caso della contaminazione da PFAS verificatasi in Veneto, che rappresenta una delle più significative applicazioni giurisprudenziali in materia di responsabilità ambientale connessa all'inquinamento delle risorse idriche. Con sentenza del 26 giugno 2025, la Corte d'assise di Vicenza (caso Miteni) ha definito il giudizio di primo grado relativo alle attività dello stabilimento chimico Miteni S.p.A., sito nel comune di Trissino, accertando la responsabilità penale di undici ex dirigenti per reati di estrema gravità, tra cui l'avvelenamento doloso delle acque e il disastro ambientale doloso. La vicenda si inserisce in un contesto di contaminazione diffusa delle acque sotterranee e potabili che ha interessato un'ampia porzione del territorio veneto, coinvolgendo le province di Vicenza, Padova e Verona e incidendo su una popolazione stimata di centinaia di migliaia di individui. L'accertamento giudiziale ha evidenziato come la produzione industriale di PFAS, protrattasi per decenni, sia avvenuta in assenza di adeguati sistemi di prevenzione e contenimento, nonostante la conoscenza – o quantomeno la prevedibilità – dei rischi ambientali e sanitari connessi alla dispersione di tali sostanze. Di particolare rilievo è il riconoscimento della natura dolosa delle condotte, che segna un passaggio di notevole importanza nella qualificazione giuridica delle forme più gravi di inquinamento industriale. La pronuncia si distingue altresì per l'ampiezza del sistema risarcitorio delineato, che ha riconosciuto il diritto al ristoro del danno in favore di una pluralità di soggetti pubblici e privati, confermando la dimensione collettiva e diffusa del danno ambientale. Il caso *Miteni* assume, dunque, una portata sistemica, sia per l'entità del danno accertato, sia per il contributo che esso offre alla definizione dei confini della responsabilità penale in materia ambientale, con particolare riferimento a contaminanti persistenti e diffusivi quali i PFAS, evidenziando al contempo la centralità della risorsa idrica quale fulcro della tutela giuridica multilivello.

In prospettiva comparata risulta significativo il caso deciso dal Giudice di pace di Anversa il 27 aprile 2023, relativo alla contaminazione da PFAS riconducibile allo stabilimento 3M di Zwijndrecht. I ricorrenti erano residenti dell'area limitrofa al sito industriale, i quali lamentavano l'elevata concentrazione di PFAS nel sangue e il conseguente rischio per la propria salute e per quella dei familiari. Il giudice ha qualificato la fattispecie nell'ambito del *trouble anormal de voisinage*, riconoscendo una forma di responsabilità oggettiva fondata sull'alterazione dell'equilibrio tra proprietà confinanti. In assenza della prova di un danno sanitario attuale, la decisione ha valorizzato il rischio concreto per la salute. La pronuncia assume rilievo per l'anticipazione della tutela risarcitoria e per l'attenuazione dell'onere probatorio, risultando particolarmente significativa nei casi di contaminazione da sostanze persistenti. Essa rappresenta un esempio paradigmatico di adattamento delle categorie civilistiche tradizionali a fenomeni di inquinamento emergente, in linea con il principio di precauzione. Per quanto concerne, invece, la giurisprudenza della Corte di giustizia

[16] Parlamento europeo e Consiglio, Direttiva (UE) 2020/2184 del 16 dicembre 2020, concernente la qualità delle acque destinate al consumo umano (rifusione), in *G.U.U.E.*, L 435 del 23 dicembre 2020. – La direttiva introduce un approccio basato sulla gestione del rischio lungo l'intera filiera idropotabile, rafforza gli standard qualitativi, amplia i parametri di controllo (inclusi alcuni contaminanti emergenti come i PFAS) e promuove l'accesso universale all'acqua potabile.

[17] Parlamento europeo e Consiglio, Direttiva (UE) 2024/3019 relativa al trattamento delle acque reflue urbane (rifusione), in *G.U.U.E.*, 2024. La direttiva aggiorna il quadro europeo in materia di depurazione delle acque reflue, rafforzando gli obblighi di trattamento, introducendo standard più stringenti anche per i contaminanti emergenti (tra cui microinquinanti e PFAS) e promuovendo un approccio integrato in linea con gli obiettivi del Green Deal europeo.

dell'Unione europea, in assenza di pronunce specifiche, essa ha contribuito a definire in termini stringenti gli obblighi degli Stati membri. In particolare, la sentenza *Weser* (C-461/13[18]) ha chiarito il carattere vincolante del divieto di deterioramento dello stato dei corpi idrici, mentre la pronuncia *Holohan* (C-461/17[19]) ha rafforzato l'approccio ecosistemico nella valutazione degli impatti ambientali, incidendo indirettamente anche sulla gestione delle risorse idriche.
Nonostante l'elevato grado di armonizzazione normativa, il sistema italiano continua a presentare rilevanti criticità sul piano dell'attuazione. Tra queste si segnalano la frammentazione delle competenze amministrative, le disomogeneità territoriali nella qualità del servizio idrico, i ritardi infrastrutturali – in particolare nel settore della depurazione – e il persistente contenzioso europeo, che ha condotto a più procedure di infrazione per il mancato rispetto degli obblighi derivanti dal diritto dell'Unione.
Alla luce di tali elementi, la regolazione delle risorse idriche nell'ordinamento italiano evidenzia uno scarto significativo tra il livello normativo, ampiamente allineato agli standard europei, e il grado di effettività della tutela. Ne deriva che la protezione della risorsa idrica non può essere valutata esclusivamente sul piano delle fonti, ma richiede un'analisi integrata che tenga conto della capacità amministrativa, dell'efficienza dei modelli di governance e dell'effettiva implementazione delle politiche pubbliche. In questo quadro, il diritto dell'Unione europea non si limita a fornire un insieme di regole, ma opera come parametro strutturale di orientamento e di conformazione dell'ordinamento interno, contribuendo alla progressiva costruzione di un sistema di tutela delle acque sempre più integrato, multilivello e orientato alla sostenibilità ambientale e sociale.

2. I PFAS negli ecosistemi acquatici: caratteristiche, diffusione e persistenza.

Diversi studi dimostrano come i PFAS possono essere trasportati su lunghe distanze venendo rilevati in quantità significative anche nelle regioni più remote del globo, negli organismi viventi e nei tessuti umani[20]. La grande motilità di questi inquinanti è legata ai cicli idrologici e, come evidenziano studi recenti, anche al trasporto atmosferico[21]. La contaminazione delle risorse idriche può avvenire attraverso molteplici vie: il dilavamento di aree urbane o agricole, lo scarico di acque reflue domestiche o da sversamenti volontari o involontari di origine industriale. Una volta contaminato un corso d'acqua o un bacino idrico diventa difficile bonificarli poiché queste sostanze rimangono strettamente associate alla matrice

[18]Corte di giustizia dell'Unione europea, 1° luglio 2015, Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland eV c. Bundesrepublik Deutschland, C-461/13 (Weser), nella quale la Corte ha affermato che il divieto di deterioramento dello stato dei corpi idrici previsto dall'art. 4 della direttiva 2000/60/CE si applica anche quando il peggioramento riguardi un singolo elemento di qualità e comporti il passaggio a una classe inferiore, imponendo obblighi giuridicamente vincolanti agli Stati membri

[19] Corte di giustizia dell'Unione europea, 7 novembre 2018, Brian Holohan e a. c. An Bord Pleanála, C-461/17, nella quale la Corte ha precisato che la valutazione appropriata richiesta dall'art. 6, par. 3, della direttiva 92/43/CEE (Direttiva Habitat) deve avere carattere completo e scientificamente fondato, includendo tutti gli effetti diretti, indiretti e cumulativi di un progetto su habitat e specie protetti, anche quando tali effetti si producano al di fuori del perimetro del sito Natura 2000, purché ecologicamente connessi agli obiettivi di conservazione, rafforzando così un approccio ecosistemico e integrato alla tutela ambientale.

[20] J. P. Giesy, K. Kannan, *Global distribution of perfluorooctane sulfonate in wildlife*, in *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(7), pp. 1339–1342.

[21] Greenpeace Italia, *Respirare PFAS. I "forever chemicals" sono anche nell'aria. In Piemonte le emissioni più significative, generate dalla ex Solvay*, dicembre 2025, disponibile online: https://www.greenpeace.org/static/planet4-italy-stateless/2025/12/f87a69d2-respirare_pfas.docx.pdf.
— Il rapporto evidenzia la presenza di PFAS anche nell'aria, analizzando i dati del registro europeo PRTR e individuando nel Piemonte – in particolare nell'area di Alessandria (ex Solvay) – il principale polo emissivo nazionale, con una quota prevalente delle emissioni italiane di gas fluorurati riconducibili a tali sostanze.

acquosa. Tracce di PFAS sono state rilevate nell'acqua piovana[22] mostrando che questi composti sono e rimarranno indelebilmente parte dell'ambiente naturale.
Oltre ad avere una grande mobilità all'interno degli ecosistemi, i PFAS sono caratterizzati da un'elevata persistenza e perciò vengono definiti "*forever chemicals*", cioè "sostanze chimiche eterne". Una volta introdotti nell'ambiente, questi composti di sintesi possono essere assorbiti da animali, funghi e piante accumulandosi[23] nei loro tessuti. Attraverso la catena alimentare i PFAS subiscono un processo di biomagnificazione fino a raggiungere i livelli massimi nell'essere umano e negli altri predatori apicali[24].
Rimuovere i PFAS dall'ambiente rappresenta una sfida complessa e costosa, oggetto ancora di studio[25]. Nella letteratura sono riportate diverse tecniche di bonifica, i cui costi sono generalmente elevati per via del dispendio energetico richiesto. L'Agenzia Europea dell'Ambiente (EEA) sottolinea che l'efficienza di tali tecniche varia in base al composto specifico che si vuole filtrare e che la maggior parte di queste tecniche non è in grado di distruggere i PFAS, ma si limita a catturarli, generando così nuovi residui da smaltire[26].
Le fonti di inquinamento, lo spostamento di questi inquinanti, l'attuale conoscenza sulle metodologie di bonifica e il processo di contaminazione degli ecosistemi e degli esseri umani sono fattori che è necessario tenere in considerazione nello studio e lo sviluppo degli strumenti giuridici sulla gestione delle risorse idriche.

3. Impatti ecotossicologici.

Le sostanze per- e polifluoroalchiliche (PFAS), inizialmente considerate chimicamente inerti e biologicamente poco reattive, sono state progressivamente riconosciute, a partire dagli anni Novanta, come contaminanti emergenti caratterizzati da elevata persistenza ambientale,

---

[22] D. Pfotenhauer, E. SELLERS, M. OLSON, K. PRAEDEL, M. SHAFER, *PFAS concentrations and deposition in precipitation: a 5-month intensive study at National Atmospheric Deposition Program (NADP-NTN) sites in Wisconsin, USA*, in *Atmospheric Environment*, 2022, 291, art. 119368.Lo studio analizza la presenza e la deposizione dei PFAS nelle precipitazioni atmosferiche, evidenziando come tali contaminanti siano diffusi anche attraverso il ciclo idrologico atmosferico. I risultati mostrano livelli di fondo diffusi, differenze nei profili chimici riconducibili alle fonti emissive e forniscono una delle prime stime dei tassi di deposizione umida dei PFAS, confermando il ruolo dell'atmosfera quale vettore di trasporto e redistribuzione su scala regionale.

[23] In ecologia, il trasferimento e aumento di concentrazione di elementi o sostanze tossiche nei tessuti degli organismi con cui entrano in contatto tramite acqua e cibo. Sulla si rinvia a: https://www.treccani.it/enciclopedia/bioaccumulo/.

[24] D. de A. MIRANDA, G. F. PEASLEE, A. M. ZACHRITZ, G. A. LAMBERTI, *A worldwide evaluation of trophic magnification of per- and polyfluoroalkyl substances in aquatic ecosystems*, in *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2022, 18(6), pp. 1500–1512, DOI: 10.1002/ieam.4579. Lo studio analizza, su scala globale, i fenomeni di biomagnificazione dei PFAS negli ecosistemi acquatici, evidenziando come tali sostanze tendano ad accumularsi lungo la catena trofica fino ai predatori apicali, con rilevanti implicazioni eco-tossicologiche e per la salute umana.

[25] J. Zhou, N. Saeidi, L. Y. WICK, Y. XIE, F.-D. KOPINKE, A. GEORGI, *Efficient removal of trifluoroacetic acid from water by surface-modified activated carbon and electro-assisted desorption*, in *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 436, art. 129051, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.129051. Lo studio propone una tecnologia avanzata per la rimozione dell'acido trifluoroacetico (TFA), composto appartenente alla famiglia dei PFAS, mediante carbone attivo modificato e processi di elettroadsorbimento/desorbimento. I risultati evidenziano elevata efficienza di rimozione anche in presenza di altri anioni e la possibilità di rigenerazione del materiale adsorbente, contribuendo allo sviluppo di soluzioni tecnologiche per il trattamento delle acque contaminate da PFAS.

[26] Agenzia europea dell'ambiente (EEA), *Treatment of drinking water to remove PFAS (Signal)*, in *European Zero Pollution Dashboards*, 16 aprile 2024 (agg. 3 marzo 2025), disponibile online: https://www.eea.europa.eu/en/european-zero-pollution-dashboards/indicators/treatment-of-drinking-water-to-remove-pfas-signal. Il documento evidenzia la diffusione ubiquitaria dei PFAS e il loro impatto sulla qualità delle acque potabili, richiamando i limiti introdotti dalla direttiva (UE) 2020/2184 (0,5 µg/l per il totale PFAS e 0,1 µg/l per 20 sostanze specifiche). Vengono inoltre sottolineate le criticità tecniche ed economiche connesse alle tecnologie di rimozione, evidenziando il ruolo centrale delle politiche europee nella transizione verso un ambiente a zero inquinamento.

mobilità e potenziale di bioaccumulo. Tali proprietà determinano una diffusione pervasiva nei comparti ambientali e lungo le reti trofiche, con fenomeni di biomagnificazione che amplificano le concentrazioni nei livelli apicali, inclusa la specie umana[27].
Dal punto di vista ecotossicologico, numerosi PFAS – in particolare l'acido perfluoroottanoico (PFOA) e l'acido perfluoroottansolfonico (PFOS) – sono associati a effetti avversi multi-sistemici, documentati sia in modelli sperimentali sia in studi epidemiologici. Tra i principali endpoint tossicologici si segnalano disfunzioni immunitarie (immunosoppressione e alterazione della risposta anticorpale), epatotossicità (alterazioni enzimatiche e steatosi epatica), interferenze endocrine (disregolazione ormonale e effetti sul metabolismo lipidico), nonché effetti sul sistema respiratorio. È inoltre emersa un'associazione significativa con l'aumento dell'incidenza di neoplasie, in particolare epatiche, pancreatiche e testicolari. Il PFOA presenta, altresì, una marcata capacità di attraversamento della barriera placentare e di trasferimento transplacentare, con conseguente esposizione prenatale. Tale esposizione è stata correlata a esiti avversi sullo sviluppo, tra cui riduzione del peso alla nascita, aumento della mortalità pre- e post-natale e alterazioni dei processi di crescita e sviluppo[28].
In considerazione delle loro proprietà di persistenza, bioaccumulabilità e tossicità (PBT), PFOS e PFOA sono stati inclusi nell'Allegato I della Convenzione di Stoccolma sugli inquinanti organici persistenti (Persistent Organic Pollutants – POPs), con conseguenti restrizioni e divieti alla produzione, all'immissione sul mercato e all'uso[29]. A livello europeo, l'Autorità europea per la sicurezza alimentare (EFSA)[30] ha inoltre individuato la dieta – in particolare il consumo di prodotti ittici – come una delle principali vie di esposizione umana, raccomandando la riduzione dell'assunzione per contenere il carico corporeo di tali sostanze.
Nonostante i progressi conoscitivi relativi ai PFAS "legacy", la crescente immissione sul mercato di composti di nuova generazione (short-chain PFAS e alternative fluorurate) evidenzia rilevanti lacune scientifiche in merito ai loro profili ecotossicologici, alle dinamiche di trasporto ambientale e ai meccanismi di esposizione cronica. Tale incertezza conoscitiva limita la capacità dei sistemi regolatori di elaborare strumenti normativi pienamente efficaci, rendendo necessario il ricorso a un approccio precauzionale e a una più stretta integrazione tra evidenze scientifiche ed elaborazione giuridica nella gestione del rischio ambientale.

4. Verso un approccio integrato tra diritto ambientale ed ecologia.

Alla luce delle considerazioni svolte, la questione dei PFAS evidenzia in modo paradigmatico i limiti dell'attuale modello di tutela ambientale e, al contempo, la necessità di una sua profonda riformulazione. La persistenza, la mobilità e la diffusività di tali sostanze mettono infatti in crisi le tradizionali categorie giuridiche fondate su un approccio settoriale e reattivo,

[27] F. A. UBEL, S. D. SORENSON, D. E. ROACH, *Health status of plant workers exposed to fluorochemicals: a preliminary report*, in *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1980, 41(8), pp. 584–589
[28] B. O. CLARKe, S. R. Smith, *Review of 'emerging' organic contaminants in biosolids and assessment of international research priorities for the agricultural use of biosolids*, in *Environment International*, 2011, vol. 37.
[29]Commissione europea, *Explanatory Memorandum to the Commission Delegated Act C(2025)2189*, relativo all'aggiornamento del regolamento (UE) 2019/1021 sugli inquinanti organici persistenti (POPs), in *EUR-Lex*, 2025, disponibile su: testo integrale. L'atto mira a rafforzare la tutela della salute umana e dell'ambiente attraverso la revisione delle restrizioni sulle sostanze persistenti, prevedendo in particolare una riduzione dei limiti di concentrazione di PFAS (quali PFOS) come contaminanti non intenzionali e un aggiornamento delle misure di eliminazione e controllo in linea con la Convenzione di Stoccolma.
[30] Autorità europea per la sicurezza alimentare (EFSA), *Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food*, EFSA Journal, 2020. Il parere scientifico valuta i rischi per la salute umana derivanti dall'esposizione ai PFAS attraverso la dieta, fissando una dose settimanale tollerabile (TWI) per i principali composti (PFOA, PFOS, PFNA e PFHxS) e raccomandando la riduzione dell'esposizione alimentare

mostrando come la protezione delle risorse idriche non possa più essere affrontata esclusivamente ex post, ma richieda un ripensamento strutturale in chiave preventiva e sistemica.
In tal senso occorre anche uno sforzo persistente del legislatore nazionale e sovranazionale, nonché della giurisprudenza nell'apprestare una tutela effettiva al diritto fondamentale all'acqua[31] in tutte le sue declinazioni. Sul punto occorre prendere atto della scarsità del dato giurisprudenziale.
Inoltre, la spinta derivante dal diritto europeo, dalle direttive quadro acque sino alla più recente Nature Restoration Regulation[32] del 2024, ha imposto standard minimi uniformi e obblighi di ripristino che condizionano profondamente l'azione dei legislatori nazionali e regionali.
tuttavia, l'esperienza dei PFAS dimostra come persistano significative lacune regolatorie, soprattutto rispetto ai contaminanti emergenti, caratterizzati da elevata complessità scientifica e da effetti a lungo termine ancora non pienamente conoscibili. Ne deriva l'esigenza di rafforzare gli strumenti giuridici esistenti, anche attraverso un ampliamento del perimetro della regolazione chimica e una maggiore integrazione con le politiche di tutela delle acque.
Parallelamente, sul piano nazionale, e in particolare nell'ordinamento italiano, emerge con chiarezza lo scarto tra l'elevato livello di conformità formale agli standard europei e le difficoltà attuative che continuano a incidere sull'effettività della tutela. In tale prospettiva, la sfida non è soltanto normativa, ma riguarda la capacità amministrativa, la qualità della governance e l'adeguatezza degli strumenti tecnici e infrastrutturali.
La complessità del fenomeno impone, dunque, un approccio autenticamente interdisciplinare, nel quale il diritto dialoghi stabilmente con le scienze ecologiche, al fine di comprendere i meccanismi di diffusione degli inquinanti, valutarne gli impatti e costruire risposte regolatorie adeguate. In questa direzione, l'integrazione tra conoscenza scientifica e decisione giuridica rappresenta non più un'opzione, ma una condizione necessaria per garantire una tutela effettiva delle risorse idriche.
In ultima analisi, la questione dei PFAS sollecita una riflessione ed una "revisione ecocompatibile"[33] del diritto ambientale nel costituzionalismo contemporaneo: la tutela dell'acqua, quale bene comune[34] essenziale e condizione materiale della vita, richiede un modello di regolazione capace di coniugare sostenibilità, equità e responsabilità intergenerazionale.
Solo attraverso tale evoluzione sarà possibile trasformare la gestione delle risorse idriche da ambito di mera regolazione tecnica a terreno privilegiato di costruzione di un nuovo equilibrio tra uomo, ambiente e sviluppo.

---

[31] F. STAIANO, *La progressiva emersione di un diritto umano e fondamentale all'acqua in sistemi di diritto internazionale e costituzionale: principi generali e prospettive di implementazione*, in *Federalismi.it*, 2013, n. 4, p. 1.
[32] La Nature Restoration Regulation - Regolamento (UE) 2024/1760 del Parlamento europeo e del Consiglio del 13 giugno 2024 - si colloca nel solco del diritto ambientale dell'Unione, completando e rafforzando gli obblighi già previsti dalla Direttiva Habitat 92/43/CEE e dalla Direttiva Uccelli 2009/147/CE, che costituiscono il fondamento della rete Natura 2000. Tale rete, che copre circa il 18% del territorio dell'Unione e una quota significativa delle acque interne, dei corsi d'acqua, delle zone umide e delle aree costiere, svolge una funzione essenziale nel garantire il mantenimento o il ripristino dello stato di conservazione favorevole degli habitat, compresi quelli idrici e idromorfologicamente sensibili.
[33] Già M. CECCHETTI, *La disciplina giuridica della tutela ambientale come "diritto all'ambiente"*, in *Federalismi.it*, 2006, n. 25, p. 1.
[34] Sia consentito il rinvio a L. BRUNI, S. ZAMAGNI, *L'economia civile*, il Mulino, Bologna, 2015, pp. 92 ss.

TACENTE A., MARENGO L., *PFAS: la minaccia invisibile alle acque europee tra scienza ecologica e diritto ambientale*, in *Riv. Trim. dir. amb.*, 01/2026, p. 34.