

## IL REATTORE INVISIBILE. CONTAMINANTI NEOFORMATI, PROCESSI E LIMITI DELLA REGOLAZIONE DELLE DISCARICHE.

DI ORESTE PATRONE

**Sommario** – 1. Introduzione – 2. La lezione del cloruro di vinile – 3. La generazione interna dei contaminanti – 4. Il caso dei PFAS – 5. Il paradosso del trattamento – 6. Il quadro normativo: struttura, lacune e responsabilità – 7. Verso una regolazione dei processi – 8. Conclusioni

### Abstract

*I processi che avvengono all'interno di una discarica ne fanno un reattore biochimicamente attivo, capace di generare in situ contaminanti non presenti nei rifiuti che vi erano stati conferiti o presenti in forme diverse. Due vicende paradigmatiche — la comparsa del cloruro di vinile nel biogas e nel percolato tra la fine degli anni Novanta e i primi anni Duemila, e oggi quella delle sostanze per- e polifluoroalchiliche — rivelano il medesimo limite strutturale di un modello regolatorio costruito attorno al controllo di ciò che entra nell'invaso e a ciò che ne esce, privo degli strumenti concettuali per osservare le trasformazioni che si compiono al suo interno. Muovendo dal caso dei PFAS, il contributo mostra come il trattamento biologico aerobico del percolato — necessario per ridurre il carico inquinante — possa paradossalmente incrementare la concentrazione di forme terminali più persistenti e mobili di queste sostanze, portando a compimento la conversione dei precursori polifluorurati mobilizzati nelle fasi precedenti. Il paradosso è duplice, poiché tale incremento resta latente: esclusi dai parametri tabellari dello scarico, i PFAS non entrano nel giudizio di ecotossicità. Nessun regime, tra diritto dei rifiuti, delle acque e delle emissioni, segue la sostanza lungo l'intera catena causale che dall'ammissione dei rifiuti nell'impianto conduce allo scarico. L'istruttoria autorizzativa, che può intercettare il fenomeno nel singolo caso, non vale a risolverlo in via generale in difetto di soglie armonizzate. Di qui la proposta di spostare il baricentro della tutela ambientale dal controllo degli effetti alla regolazione dei processi.*

### 1. Introduzione

La discarica è il sorvegliato speciale del sistema di gestione dei rifiuti.

Gli uffici regionali e le agenzie regionali per la protezione dell'ambiente controllano tutto ciò che entra ed esce da quest'ultima, secondo un modello che trova fondamento, oltre che nelle ordinarie funzioni di controllo attribuite all'autorità competente, nella disposizione dettata dall'art. 10, comma 2, lett. 1), del d.lgs. 36/2003, che impone al gestore di trasmettere, almeno una volta all'anno, una relazione sui rifiuti smaltiti, sui risultati del programma di sorveglianza e sui controlli effettuati durante la fase operativa e post-operativa.

La vita ordinaria dell'autorizzazione si scandisce nell'adempimento periodico, che nelle proprie modalità tradisce l'invisibilità interna di cui questo lavoro intende occuparsi. Quell'adempimento non è solo la forma che assume il controllo: esso incorpora un paradigma, poiché certifica la regolarità della gestione contro una traiettoria presunta verso la stabilizzazione all'interno di un modello di tipo sostanzialmente statico. Ed è proprio quel paradigma che l'osservazione del comportamento delle discariche lungo il loro intero arco di vita, compresa la gestione successiva alla chiusura, ha da tempo smentito.

La massa dei rifiuti non tende a un assestamento lineare, ma genera al proprio interno sostanze che al momento del conferimento non erano presenti nei rifiuti. Da tale acquisizione si è aperta una tensione tra la definizione giuridica della discarica e la sua realtà ingegneristica come luogo di processo, già esaminata in un precedente contributo<sup>i</sup>. La presente riflessione muove da quelle premesse per mostrare come il modello statico non si limiti solo a presupporre la stabilizzazione, ma la istituzionalizzi in due perimetri normativi — l'ammissibilità all'ingresso, i valori limite di emissione all'uscita — la cui apparente completezza, per costruzione, sottrae il divenire della massa al giudizio di conformità.

La consapevolezza dei limiti del modello suddetto è emersa gradualmente, attraverso molteplici esperienze e osservazioni. Ci sono tuttavia almeno due momenti storici nei quali tale inadeguatezza è emersa con particolare evidenza.

Il primo momento si colloca tra la fine degli anni Novanta e i primi anni Duemila, quando la comparsa di cloruro di vinile nel gas e nelle acque di discarica costrinse a riconoscere che un sistema pensato per confinare i rifiuti era capace di produrre contaminanti che non vi erano stati conferiti.

La seconda volta è oggi, con le sostanze per- e polifluoroalchiliche. I PFAS.

Nel primo caso, il processo di dealogenazione riduttiva, favorito dalle condizioni anaerobiche e metanogeniche della massa interrata, genera *in situ* un contaminante che può derivare dalla trasformazione di composti organoclorurati preesistenti e che, in molti casi, non era presente come tale al momento del conferimento dei rifiuti. Nei PFAS il fenomeno è più articolato e si sviluppa su una traiettoria che attraversa diverse componenti funzionali del sistema impiantistico integrato. Esso coinvolge infatti *in primis* l'invaso, nel quale s'innescano i processi di trasformazione dei composti fluorurati, che chiameremo precursori, e successivamente il trattamento biologico aerobico del percolato, che degraderà in forme terminali i composti mobilizzati dal percolato nella fase precedente.

Ciò che accomuna i due casi è il limite strutturale del modello regolatorio che essi rivelano.

In entrambi, un contaminante si forma per trasformazione interna al sistema di smaltimento e, in entrambi, sistemi di controllo costruiti su una logica sostanzialmente statica non riescono a intercettarne le traiettorie di formazione.

## 2. La lezione del cloruro di vinile

Agli inizi degli anni Novanta, la California Air Resources Board documentò la presenza di cloruro di vinile nel gas emesso da siti di discarica, avanzando l'ipotesi che il composto potesse originarsi non soltanto dal conferimento di materiali contenenti PVC, ma anche da processi di trasformazione biologica in condizioni anaerobiche tipiche della massa dei rifiuti interrati.<sup>ii</sup>

Il meccanismo è stato progressivamente chiarito dalla letteratura.

In presenza di condizioni riducenti e anaerobiche, tipiche della fase metanogenica matura di una discarica, i batteri organoalogenorespiranti catalizzano la dealogenazione riduttiva, ovvero la progressiva rimozione degli atomi di cloro in composti più pesanti, fino al cloruro di vinile, che è il composto meno suscettibile di ulteriore dealogenazione in assenza di specifici consorzi microbici<sup>iii</sup>, che diventa di conseguenza il prodotto terminale di questa catena<sup>iv</sup>.

La conferma più recente di questo percorso si ritrova nei documenti preparatori della valutazione del rischio condotta dalla EPA statunitense sul cloruro di vinile, pubblicati nel 2025, che riconoscono espressamente la degradazione di etileni clorurati polisostituiti in condizioni anaerobiche come via di formazione ambientale del composto e includono le discariche tra i comparti di interesse prioritario.<sup>v</sup>

Gli anni in cui maturava la comprensione di questi fenomeni furono gli stessi che videro il recepimento nazionale della direttiva 1999/31/CE relativa alle discariche di rifiuti, avvenuto con il

decreto legislativo 13 gennaio 2003, n. 36. Fu una coincidenza significativa: proprio mentre si affrontava in modo sistematico il comportamento della discarica nel tempo, fissando limiti temporali alla gestione successiva alla chiusura, la comparsa del cloruro di vinile in alcuni siti assunse il carattere di un'anomalia rivelatrice. Del resto, la direttiva recepita recava già, nel settimo considerando, l'assunto su cui l'intera disciplina dell'ammissibilità si sarebbe dovuta sorreggere: «le discariche devono poter essere controllate per quanto riguarda le sostanze contenute nei rifiuti ivi depositati» e «tali sostanze dovrebbero, nella misura del possibile, presentare soltanto reazioni prevedibili». <sup>vi</sup> La prevedibilità delle reazioni era affidata dunque, fin dall'origine, al controllo in entrata.

Da un lato il diritto, dall'altro l'osservazione scientifica, convergono per strade diverse alla medesima conclusione: un'idea del tempo nuova, non mero conto alla rovescia sullo sfondo della gestione, atto a sancirne la fine, ma una variabile dell'equazione del reattore invisibile. La discarica non era solo un contenitore da svuotare periodicamente del percolato, come un catino messo sotto una perdita, e mantenere in ordine, ma un sistema capace di evolvere e generare composti nuovi a partire da premesse note.

### 3. La generazione interna dei contaminanti

La rappresentazione della discarica come reattore trifasico, in cui materiali in fase solida, liquida e gassosa reagiscono dando luogo a emissioni che si sviluppano su scale temporali lunghe, non è nuova nella letteratura ingegneristica <sup>vii</sup> ed è stata già oggetto di ampia discussione. Essa ha progressivamente guadagnato terreno rispetto a un modello che non ne ignorava la biochimica interna, ma ne offriva una lettura selettiva delle traiettorie, assumendo che i processi di degradazione convergessero verso una stabilizzazione definitiva dei rifiuti, trascurando le trasformazioni intermedie e i composti che esse potevano generare lungo il percorso. L'opzione della gestione attiva del corpo rifiuti — mediante aerazione forzata, ricircolo del percolato o combinazioni delle due tecniche — si colloca nella medesima logica. Il ricircolo del percolato, in particolare, è una tecnica di reingresso del liquido raccolto all'interno della massa dei rifiuti, con l'obiettivo di accelerare la fase metanogenica, favorire la stabilizzazione biologica, incrementare la resa energetica del biogas recuperato e ridurre i tempi della post-gestione. <sup>viii</sup>

La questione della legittimità di questa pratica è già stata affrontata in un precedente lavoro <sup>ix</sup>, ciò che questo intende mostrare è che la correttezza concettuale di un'operazione non esaurisce le domande che quella stessa operazione impone, ma può spostarle a un livello diverso.

L'accelerazione della metanogenesi, che rappresenta uno degli effetti desiderati del ricircolo del percolato, ne è un esempio. La fase metanogenica è infatti quella in cui si registrano le condizioni termodinamiche più favorevoli alla dealogenazione riduttiva dei composti organoclorurati <sup>x</sup>, che raggiunge i suoi tassi più elevati e la sua massima estensione di substrati. Per i composti perfluorurati, il quadro è più complesso e ancora scientificamente aperto <sup>xi</sup>: le condizioni anaerobiche di cui la metanogenesi è indicatore rappresentano l'ambiente ossidoriduttivo più prossimo a quello richiesto dalle cinetiche degradative dei composti perfluorurati, sebbene se gli stessi meccanismi specifici siano ancora oggetto di studio.

Quando l'ingegneria rivendica il merito di anticipare l'evoluzione del diritto con soluzioni tecniche innovative, non può sottrarsi alla responsabilità epistemica, operativa e giuridica che discende da quel primato. Le criticità che emergono come conseguenze delle scelte tecniche, possono ridefinire il perimetro della conoscenza disponibile e, con esso, le premesse su cui il diritto è chiamato a intervenire. Ciò che oggi appare come risposta tecnica consolidata può rivelarsi, alla luce di nuove acquisizioni, il punto di partenza per soluzioni più raffinate — e, in ultima analisi, per una comprensione più profonda dell'oggetto regolato.

### 4. Il caso dei PFAS

Le sostanze per- e polifluoroalchiliche, comunemente note come PFAS, sono composti organici caratterizzati dalla presenza di almeno un gruppo metilico o metilenico completamente fluorurato.

Questa particolare caratteristica conferisce loro un'elevata resistenza al calore, all'acqua, agli agenti chimici e ai processi di degradazione naturale, qualità che ne hanno favorito l'impiego in un numero straordinariamente ampio di applicazioni industriali e di consumo.

La parabola storica di queste sostanze ha inizio nei laboratori chimici tra gli anni '30 e '40 del Novecento, per poi tradursi in una produzione industriale di massa nel secondo dopoguerra. Per oltre cinquant'anni, l'ampio utilizzo dei PFAS nei settori tessile, conciario, dell'imballaggio e delle schiume antincendio è avvenuto in un contesto di sostanziale vuoto regolatorio e di riservatezza circa i dati di tossicità e bioaccumulo.

La consapevolezza istituzionale del rischio ambientale associato ai PFAS e la conseguente introduzione di restrizioni normative si sono consolidate a livello internazionale soprattutto dagli anni Duemila, dapprima con riferimento ai composti a catena lunga e, in particolare, al PFOS. In Italia, il caso veneto si è imposto all'attenzione pubblica e istituzionale a partire dal 2013, a seguito della pubblicazione dello studio MATTM-IRSA-CNR sui PFAS nei bacini fluviali italiani, che evidenziò concentrazioni elevate nel sistema Agno-Fratta Gorzone e nelle acque potabili di comuni dell'area vicentina, individuando nello stabilimento Miteni di Trissino la principale fonte puntuale della contaminazione, pur senza escludere la presenza di ulteriori sorgenti<sup>xii</sup>.

Se si considera che fino ai primi anni Duemila la discarica ha rappresentato la destinazione prevalente dei rifiuti urbani prodotti in Italia, è immediato comprendere come tali impianti abbiano progressivamente accumulato il risultato di decenni di produzione, utilizzo e smaltimento di manufatti contenenti PFAS o i loro precursori. Le discariche costituiscono dunque un osservatorio privilegiato per comprendere il destino di queste sostanze nel lungo periodo e i processi di trasformazione che possono interessare i composti fluorurati presenti all'interno del corpo rifiuti.

Come noto, il percolato che si raccoglie all'interno dell'invaso — composto da una componente endogena, prodotta dalla degradazione biologica della frazione organica, e da una componente esogena, derivante dalla lisciviazione operata dalle acque meteoriche che si infiltrano nella massa depositata — mobilita i composti solubili presenti nei rifiuti, convogliandoli verso il sistema di drenaggio e raccolta. Le forme terminali a catena corta — idrofile e discretamente solubili — migrano direttamente nella fase acquosa, mentre i precursori a catena lunga, poco solubili, vengono trascinati, associati al particolato e alla sostanza organica disciolta.

I composti fluorurati presenti nel corpo rifiuti possono comprendere, accanto alle forme terminali misurate dalle analisi, una quota rilevante di precursori polifluorurati: alcoli fluorotelomerici, composti sulfonamidici, fosfonati. Questi precursori non sono normalmente inclusi nei piani di monitoraggio mirati alle specie terminali più comunemente regolamentate, ma durante la fase metanogenica subiscono una trasformazione soltanto parziale, che ne genera intermedi polifluorurati e li mobilita nel percolato. La conversione nelle forme terminali — quelle che i programmi di monitoraggio e la disciplina normativa assumono come oggetto — si compie invece, in misura prevalente, più a valle, nel trattamento biologico aerobico del percolato. È qui, infatti, che l'ossidazione aggredisce le porzioni idrogenate e non perfluorate dei precursori e, recidendone i legami più deboli, lascia inalterato lo scheletro perfluorurato.

Lo studio più completo condotto in Europa sul tema — un'analisi di 22 discariche tedesche pubblicata nel 2010 su *Environmental Pollution* — ha rilevato concentrazioni totali di PFAS nel percolato non trattato comprese tra 31 e 12.819 ng/L, con netta prevalenza di composti a catena corta, in particolare PFBA e PFBS (C4)<sup>xiii</sup>, dominanza che riflette la maggiore mobilità e solubilità di tali composti e lo spostamento storico della produzione industriale verso le catene corte, cui si aggiunge il contributo della trasformazione interna parziale dei precursori. La rassegna critica di Hamid, Li e Grace del 2018, basata sugli studi peer-reviewed individuati dagli autori sulla presenza e trasformazione dei PFAS nelle discariche, conferma che il fenomeno non è circoscritto a singoli contesti locali, ma ricorre nella letteratura relativa a Nord America, Europa settentrionale, Australia e Cina.<sup>xiv</sup> Uno studio del 2017 su 95 campioni da 18 discariche ha stimato che i precursori e i loro prodotti di degradazione possono raggiungere quantità comparabili o superiori ai PFAA terminali, con un rilascio annuo nazionale stimato in 563–638 kg per i 19 composti quantificati<sup>xv</sup>.

Ciò che rende questo processo particolarmente rilevante è la sua proiezione oltre i confini del corpo rifiuti. A differenza di quanto osservato nel caso del cloruro di vinile, nel quale la formazione del contaminante è riconducibile principalmente ai processi che avvengono all'interno del corpo rifiuti, la dinamica dei PFAS coinvolge infatti un sistema più articolato che comprende la discarica, la rete di raccolta del percolato e le successive fasi di trattamento. La discarica mantiene un ruolo centrale, in quanto costituisce il principale serbatoio di accumulo dei precursori e il punto di origine della loro mobilitazione, che rappresenta nondimeno solo una delle dimensioni del fenomeno, dato che i processi di trasformazione che conducono alle forme terminali più persistenti e mobili si distribuiscono lungo l'intera filiera di gestione del percolato. Ne deriva che il caso dei PFAS richiede una prospettiva sistemica, nella quale la produzione del contaminante deriva dall'interazione tra processi che si sviluppano in comparti diversi, funzionalmente connessi.

## 5. Il paradosso del trattamento

Come si è detto in apertura del contributo, l'aumento della concentrazione di alcune specie terminali di PFAS, rispetto al percolato in ingresso, può rappresentare una conseguenza indesiderata del processo che, nelle medesime condizioni operative funzionali all'abbattimento di ammoniaca e COD, innesca reazioni competitive collaterali che ossidano i precursori polifluorurati — composti a fluorurazione parziale, presenti nel percolato ma esterni al perimetro analitico ordinario — consumandone la sola porzione idrogenata e arrestandosi dove la catena perfluorurata preclude ogni ulteriore mineralizzazione. Il trattamento, ancora una volta, non inventa una biochimica ma sostiene e prolunga un processo che la discarica già conduce nelle proprie fasi ossidative: è in regime aerobico — transitorio e parziale nel corpo del rifiuto, controllato e continuo nell'impianto di trattamento del percolato — che i precursori fluorotelomerici vengono consumati e portati fino alle catene terminali più corte.

Diversi studi documentano questo fenomeno.<sup>xvi</sup>

L'Allegato 1 al d.lgs. 13 gennaio 2003, n. 36, impone, al punto 2.3, la captazione, la raccolta e lo smaltimento per l'intera vita dell'impianto e configura, quanto alla destinazione del liquido, una vera e propria gerarchia, prescrivendo che il percolato sia preferibilmente trattato in loco in impianti tecnicamente idonei e relegando il conferimento a impianto terzo all'ipotesi residuale in cui particolari condizioni tecniche impediscano o non rendano ottimale tale soluzione. Ove si consideri che tale trattamento è preordinato a consegnare all'ambiente un refluo di ridotta pericolosità, da quanto detto emerge il paradosso che dà il titolo a questo paragrafo, che è in realtà duplice.

Il primo paradosso attiene, infatti, alla materia.

Un trattamento prescritto per ridurre la pericolosità dell'effluente finisce per incrementare, quale effetto indesiderato ma sistematico, la concentrazione di talune specie chimiche a forte impatto ecosistemico. Il mezzo predisposto per attenuarne il carico finisce per incidere direttamente sulla finalità che lo giustifica.

Il secondo paradosso costituisce, in un certo senso, una condizione di latenza del primo.

La sicurezza ecotossicologica di un effluente non è proprietà assoluta della materia, bensì l'esito di una rilevazione che deriva *in primis* da una selezione di parametri rilevanti, operata a monte, e che s'inserisce all'interno di una cornice che ne definisce lo scopo. Poiché, come si vedrà nel paragrafo dedicato all'impianto normativo, non esistono, all'attualità e a livello nazionale, limiti normalizzati allo scarico per i PFAS, ciò che non viene misurato non entra nel campo della valutazione e ciò che non vi entra non concorre al giudizio di ecotossicità: l'incremento documentato si compie, così, nell'ennesima frattura tra ingegneria e diritto. Che quell'incremento dipenda dal trattamento e non sia proprietà originaria del percolato, potrebbe suggerire un difetto contingente — emendabile e non strutturale. Risolverlo impone di accantonare momentaneamente la frattura e di tornare sul terreno dell'ingegneria poiché è lì che si decide se a una tecnica che genera il contaminante possa subentrarne o aggiungersene una in grado di rimuoverlo.

Tra le tecnologie più consolidate e capaci di raggiungere efficienze superiori al 95% figurano le membrane ad alta pressione — osmosi inversa e nanofiltrazione — e, con prestazioni più variabili e limitate ai composti a catena lunga, l'adsorbimento su carbone attivo granulare.<sup>xvii</sup> Entrambe, però, concentrano i PFAS invece di distruggerli: l'osmosi inversa produce un concentrato che deve essere smaltito; il carbone attivo saturo deve essere sostituito e il materiale esausto avviato a incenerimento.

Resta la strada della distruzione, quella che non si limita a trasferire il contaminante ma mira a eliminarlo alla radice. È su questo versante che si concentrano oggi le principali linee di ricerca. Senza indulgere in un eccesso di dettagli tecnici, può dirsi che diverse tecnologie — tra cui l'ossidazione elettrochimica, la defluorurazione riduttiva, la sonolisi e l'ossidazione in acqua supercritica — condividono l'obiettivo di rompere il legame carbonio-fluoro e trasformare i PFAS in specie più semplici e stabili.<sup>xviii</sup> I risultati più significativi sono stati tuttavia ottenuti in condizioni controllate, su soluzioni semplificate, mentre assai più ridotte sono le evidenze relative a matrici complesse quali il percolato di discarica, che è proprio quello che qui ci interessa. Tali soluzioni restano, allo stato, confinate alla ricerca o a sperimentazioni pilota e non risultano ancora recepite tra le migliori tecniche disponibili.

Il paradosso si chiude dunque su sé stesso in modo geometrico.

Il percolato estratto da una discarica gestita attivamente con ricircolo — che mobilita i precursori accumulati nel corpo rifiuti — e poi trattato biologicamente in condizioni aerobiche può quindi recare un carico di PFAS terminali superiore a quello del percolato di una discarica normale. Non perché la gestione attiva sia in sé sbagliata, ma perché il percolato così mobilitato viene poi consegnato a un trattamento che, nel depurarlo, ne conduce a compimento la conversione. Ma è proprio questo il compito dell'ingegneria: assumere come nuovi dati di partenza gli esiti delle soluzioni che ha già progettato e, da quelli, muovere verso le successive. Il carico di forme terminali che il trattamento porta a compimento diventa il punto di partenza di quella chiamata a rimuoverlo.

## 6. Il quadro normativo: struttura, lacune e responsabilità

La Direttiva 1999/31/CE non impone il trattamento biologico del percolato e lo stesso vale per la normativa nazionale di recepimento. Nessuna delle due fonti prescrive una specifica tecnologia di trattamento. La disciplina si limita a imporre che il percolato venga raccolto e trattato, lasciando alla progettazione impiantistica e alla prassi gestionale la scelta delle soluzioni tecniche ritenute più idonee. È stata la natura stessa del percolato, caratterizzato da elevate concentrazioni di sostanza organica biodegradabile e di azoto ammoniacale, a favorire l'affermazione dei trattamenti biologici aerobici e anaerobici come soluzione tecnica di riferimento. Che tale modalità di trattamento possa favorire la trasformazione dei precursori in forme terminali PFAS più persistenti e mobili, è una conseguenza inattesa dell'applicazione di una tecnologia selezionata per la rimozione del carico organico, non una violazione della norma.

La questione assume una dimensione normativa ulteriore se si considera la disciplina europea sugli inquinanti organici persistenti. Il Regolamento (UE) 2019/1021 classifica come POP alcuni composti della famiglia PFAS — il PFOS sin dall'origine, il PFOA in una revisione successiva — e impone che i rifiuti contenenti tali sostanze al di sopra di determinate concentrazioni soglia siano gestiti in modo da garantirne la distruzione o la trasformazione irreversibile, escludendone di fatto lo smaltimento in discarica ordinaria.

La disciplina, tuttavia, è costruita sull'assunzione implicita che i POP siano già presenti e identificabili nel rifiuto al momento del conferimento. Il caso dei contaminanti neoformati introduce una situazione che la normativa non contempla. Un precursore polifluorurato — un alcol fluorotelomerico, un composto sulfonamidico — non è classificato come POP al momento in cui entra nel corpo rifiuti, e il rifiuto che lo contiene non è quindi soggetto alle restrizioni del Regolamento. Ma se quel precursore si degrada biologicamente in PFOA o PFOS all'interno della discarica, il prodotto della trasformazione sarebbe, in astratto, una sostanza la cui presenza nei rifiuti avrebbe imposto un regime gestionale radicalmente diverso.

Il quadro normativo vigente non dispone degli strumenti per intercettare questa trasformazione, perché continua a guardare al rifiuto in ingresso anziché al sistema in evoluzione. Se è vero che la discarica costituisce un sistema reattivo nel quale i contaminanti possono trasformarsi e dare origine a composti diversi da quelli inizialmente conferiti, allora tale conoscenza non può che riflettersi anche sul momento precedente dell'ammissione dei rifiuti, regolato dall'art. 7 del medesimo d.lgs. 36/2003 e, soprattutto, dal decreto ministeriale 27 settembre 2010, recante i criteri di ammissibilità dei rifiuti in discarica. I criteri di accettabilità non sono, infatti, un mero strumento descrittivo delle caratteristiche iniziali del rifiuto, ma rappresentano il principale mezzo attraverso il quale l'ordinamento può intervenire sugli effetti dell'evoluzione interna del sistema. Conoscere i prodotti finali di un determinato processo significa, infatti, poter intervenire a monte sulle condizioni che ne favoriscono la formazione. Se un rifiuto contiene precursori suscettibili di trasformarsi, nel tempo, in contaminanti persistenti che le tecnologie disponibili non sono in grado di distruggere efficacemente, tale circostanza diviene giuridicamente rilevante già nella fase di ammissibilità. La selezione dei rifiuti conferibili non è più orientata soltanto alla compatibilità del rifiuto con la discarica, ma anche alla compatibilità della discarica con gli esiti prevedibili della sua evoluzione chimica e biologica.

Sotto questo profilo, la crescente comprensione dei processi di trasformazione non costituisce soltanto un progresso scientifico, ma modifica il contenuto stesso del principio di precauzione, di cui all'art. 191, par. 2, del Trattato sul funzionamento dell'Unione Europea. Quanto più aumenta la capacità di prevedere gli esiti delle reazioni che si svilupperanno nel corpo della discarica, tanto meno diviene giustificabile una disciplina dell'ammissibilità costruita esclusivamente sulle caratteristiche del rifiuto al momento del conferimento. La conoscenza dei processi impone, invece, una regolazione orientata anche ai prodotti della trasformazione e ai limiti delle tecnologie disponibili per gestirli una volta formati, in coerenza con il principio di prevenzione e con l'obbligo di adottare le migliori tecniche disponibili (BAT), ai sensi della direttiva 2010/75/UE sulle emissioni industriali e degli artt. 29-bis e ss. del d.lgs. n. 152 del 2006.

Rimettendo alla progettazione impiantistica e alla prassi gestionale la scelta delle soluzioni di trattamento, il legislatore aveva affidato alla tecnica il compito di individuare il metodo più efficace per depurare il percolato. La tecnica ha assolto quel compito, ma lo ha fatto assumendo il trattamento come problema autonomo, separato dalla storia chimica del refluo. L'attenzione si è così concentrata sull'efficienza del singolo processo depurativo, senza interrogarsi sulle trasformazioni che avevano avuto origine nel corpo della discarica e che il trattamento avrebbe potuto completare anziché interrompere. È proprio questa ricomposizione del fenomeno a riportare oggi la questione sul terreno del diritto. Ciò che rientra nel suo campo non è soltanto la scelta di una diversa tecnologia, ma la definizione dell'oggetto stesso della regolazione: non più il solo trattamento del percolato, bensì l'intera sequenza di processi che conduce dalla presenza dei precursori nel rifiuto alla formazione dei contaminanti terminali.

Una tensione analoga emerge nella disciplina delle acque.

La Direttiva (UE) 2020/2184 sulla qualità delle acque destinate al consumo umano ha introdotto specifici parametri per i PFAS, successivamente recepiti nell'ordinamento italiano dal d.lgs. 18/2023. La disciplina interviene tuttavia nel punto finale del percorso ambientale del contaminante, vale a dire l'acqua destinata al consumo umano, senza prevedere una regolazione armonizzata delle sorgenti puntuali che possono contribuire a generarlo.

La questione assume contorni ancora più significativi se si considera che il principale vettore di trasferimento dei PFAS dall'ambiente discarica ai corpi idrici non coincide con le ipotesi patologiche di perdita del sistema di contenimento. Nelle discariche realizzate secondo gli standard progettuali attuali, la raccolta del percolato costituisce infatti parte integrante del normale funzionamento dell'impianto. Il percorso di mobilitazione del contaminante è quindi, in primo luogo, quello rappresentato dal trattamento del percolato e dallo scarico delle acque reflue derivanti da tale trattamento, cioè attraverso il funzionamento ordinario e autorizzato del sistema.

Le lacune appena evidenziate conducono inevitabilmente al tema della responsabilità.

La questione dei contaminanti neoformati non coincide con le ipotesi tradizionali di cattiva gestione dell'impianto. Il gestore può avere rispettato integralmente le condizioni di ammissibilità dei rifiuti, le prescrizioni autorizzative e le migliori tecniche disponibili applicabili al momento del conferimento. Ciononostante, il sistema può produrre nel tempo sostanze che non erano state considerate né dalla progettazione né dalla regolazione. In tali situazioni il danno ambientale non deriva necessariamente da un malfunzionamento della discarica, ma dal suo funzionamento ordinario all'interno di un quadro conoscitivo successivamente rivelatosi incompleto.

È qui che la funzione dell'istruttoria amministrativa potrebbe assolvere a un ruolo cruciale.

Ferma restando la centralizzazione del vaglio generale, residua infatti in capo all'amministrazione il potere di intervenire sul singolo titolo attraverso gli strumenti dell'accertamento sostanziale — la verifica in concreto dell'idoneità dell'impianto a trattare quel percolato, al di là della sua riconducibilità formale a una categoria autorizzativa — l'integrazione delle prescrizioni autorizzative, l'imposizione di obblighi di monitoraggio mirati<sup>xix</sup>, oltre l'attivazione del riesame nei casi residuali che lo giustificano — tutti strumenti già rientranti nel perimetro delle competenze che le sono istituzionalmente attribuite.

Tra questi, l'accertamento sostanziale, in particolare, non incontra il proprio limite nelle tabelle della Parte Terza del d.lgs. 152/2006. È precisamente questo lo spazio in cui i PFAS possono essere ricondotti entro il controllo: non attraverso un limite generale, ma attraverso la prescrizione puntuale che l'istruttoria è abilitata a imporre. La discrezionalità tecnica, in questa veste, diviene la sede naturale di un approccio realmente integrato, che tratti l'impianto di trattamento del percolato come componente del ciclo della discarica e non come segmento estraneo. Resta tuttavia un dato che ne segna il confine: questo potere è facoltativo, affidato alla sensibilità della singola autorità, e privo di un metodo di riferimento e di una soglia armonizzata su cui fondarsi e reggere in sede di contenzioso. L'istruttoria è la sede in cui il problema può essere intercettato impianto per impianto, non quella in cui può essere risolto in via generale, trattandosi di una funzione puntuale che non può comunque supplire a un difetto di regolazione. La circostanza che la Decisione di esecuzione (UE) 2018/1147 del 10 agosto 2018 non affronti in modo significativo il comportamento dei PFAS nel trattamento biologico del percolato segnala che la lacuna principale si colloca a monte, nella sede istituzionalmente deputata a recepire lo stato dell'arte.

In questa prospettiva, il processo avviato a livello europeo per la predisposizione di conclusioni BAT specificamente dedicate alle discariche assume un'importanza che trascende il solo aggiornamento tecnologico del settore. Per la prima volta il comparto sarà oggetto di un autonomo processo di definizione delle migliori tecniche disponibili in una fase storica nella quale il ruolo dei PFAS e dei loro precursori è oggetto di crescente attenzione scientifica. Le conclusioni BAT, una volta adottate, diventeranno il parametro di riferimento obbligatorio per i riesami delle AIA esistenti, fissando — con efficacia erga omnes rispetto agli impianti soggetti a autorizzazione integrata — la soglia aggiornata di ciò che il sistema considera tecnicamente esigibile. È precisamente in quella sede che la conoscenza scientifica oggi disponibile dovrebbe tradursi in prescrizioni cogenti, sottraendo la questione alla discrezionalità del caso per caso e collocandola nel quadro sistematico che essa merita.

## 7. Verso una regolazione dei processi

L'approccio basato sul contenimento, che controlla le emissioni della discarica e non i suoi processi interni, ha prodotto risultati importanti e continua a svolgere una funzione essenziale. Tuttavia, esso tende a osservare il problema soltanto nel momento in cui si manifesta: è, per certi aspetti, come misurare la febbre senza interrogarsi sulle condizioni che hanno reso possibile l'insorgenza dell'infezione.

Qualcosa di analogo accade nel diritto ambientale.

Le emissioni rappresentano spesso il sintomo di trasformazioni che si sviluppano all'interno di sistemi complessi e che rimangono per lo più esterne all'orizzonte della regolazione. Eppure, quei processi non sono separati dall'ambiente. Il fatto che siano di origine antropica non li colloca fuori

dalla sfera ecologica. Le discariche, gli impianti industriali, i sistemi di trattamento e le infrastrutture tecnologiche sono parte integrante degli ecosistemi nei quali operano e con i quali interagiscono in modo continuo e bidirezionale. Continuare a considerarli soltanto come sorgenti di emissioni significa trascurare sistematicamente i meccanismi attraverso i quali le emissioni vengono generate. È precisamente ciò che è accaduto con il cloruro di vinile e con i PFAS.

Quella cecità all'interno non è un difetto sopravvenuto: discende dal modo stesso in cui i controlli sono collocati. La direttiva 1999/31/CE affidava la prevedibilità delle reazioni al controllo di ciò che entra e quel controllo ha assunto la forma dei criteri di ammissibilità. Ciò che esce è sorvegliato a sua volta dai limiti allo scarico e alle emissioni. Si tratta, tuttavia, di una disciplina diversa, che non comunica con la prima. Tra i due controlli resta scoperto il tratto intermedio, dove opera il reattore. La trasformazione che rende imprevedibili le reazioni matura dopo la soglia e prima dello scarico, fuori dalla portata di entrambi i regimi: l'aspirazione del settimo considerando è tradita non perché ignorata, ma perché ciò che la smentisce accade nello spazio che nessuna delle due discipline si preoccupa d'indagare. Il margine di imprevedibilità che il legislatore aveva consapevolmente ammesso non è governato da nessuno dei due.

La sfida consiste allora nello spostare progressivamente il baricentro della tutela ambientale dal solo controllo degli effetti alla comprensione e alla regolazione dei processi. Non per sostituire i tradizionali strumenti di monitoraggio e di controllo, che restano imprescindibili, ma per affiancarli a una capacità reale di osservare ciò che accade prima che il problema emerga nelle matrici ambientali. È una transizione che richiede non soltanto nuovi strumenti tecnici, ma una diversa concezione del rapporto tra attività umane, infrastrutture e sistemi naturali.

Non si tratta di un'idea astratta. In molti contesti tecnologici consolidati questa logica è già operativa, e il suo fondamento non è soltanto pratico ma epistemologico. Nel compostaggio industriale, ad esempio, l'intero sistema di controllo è costruito attorno alla distinzione tra il monitoraggio del processo e la verifica del risultato finale. Durante la fase di biossidazione accelerata — quella in cui si concentrano le principali reazioni di degradazione biologica della biomassa — il gestore è tenuto a controllare parametri come la temperatura della massa in lavorazione. Non si tratta di un adempimento formale. Nello stadio termofilo le temperature elevate sono la condizione necessaria per la rimozione degli agenti patogeni: affinché si possa attestare la conformità igienico-sanitaria del prodotto finale, è necessario che quella temperatura sia stata mantenuta per il tempo prescritto<sup>xx</sup>. Senza quella verifica intermedia, l'analisi finale perde la sua capacità rappresentativa. Il campione, per definizione, non è l'intera massa di prodotto ma una sua parte molto piccola: affinché il suo esito analitico possa essere riferito all'intera massa sono necessarie una corretta procedura di prelievo e, a monte, una filiera controllata. Queste condizioni non sono alternative ma complementari. L'analisi a campione è l'anello terminale della catena di controllo, il sugello di una buona condotta gestionale, non una procedura autosufficiente. In nessun caso la certificazione analitica può essere invocata da sola quale fattore dirimente sulla conformità del prodotto, se i protocolli di controllo del processo sono stati violati o semplicemente non esistono.

Ciò che questo esempio mostra è che la distinzione tra controllo del processo e verifica degli esiti è una questione di coerenza logica del sistema di controllo. Un risultato finale è interpretabile soltanto se il processo che lo ha generato è stato osservato.

Qualcosa di analogo vale per la discarica, nella quale trasformazioni chimiche e microbiologiche complesse si sviluppano nel tempo, modificando la natura e la composizione di ciò che il sistema produce.

L'avvio, a livello europeo, delle attività finalizzate alla predisposizione di un documento BAT specificamente dedicato alle discariche rappresenta uno dei passaggi regolatori più attesi degli ultimi anni nel settore della gestione dei rifiuti. Le future conclusioni BAT sono chiamate a colmare un vuoto storico, introducendo per la prima volta un quadro organico di migliori tecniche disponibili e di standard prestazionali elaborati espressamente per un sistema impiantistico che, pur avendo svolto per decenni un ruolo centrale nella gestione dei rifiuti, è rimasto a lungo privo di un riferimento tecnico europeo dedicato.

L'attesa che accompagna questo processo è comprensibile.

Proprio per questo, tuttavia, il percorso di elaborazione delle BAT offre anche un'occasione più ampia di riflessione. La questione non riguarda soltanto quali limiti emissivi saranno fissati o quali tecnologie saranno individuate come migliori tecniche disponibili. Riguarda il modello conoscitivo che tali strumenti incorporeranno. Il nuovo BREF potrebbe non rappresentare il superamento del paradigma precedente, ma la sua evoluzione più sofisticata: un sistema più preciso, più articolato e più avanzato, che continua tuttavia a muoversi entro il medesimo schema. Proprio per questo le future BAT potrebbero trasformarsi nel nuovo orizzonte statico del sistema regolatorio, perché costruite attorno a una rappresentazione del fenomeno che rischia di restare parziale rispetto alla complessità dei processi che avvengono all'interno della discarica.

Le conclusioni BAT, del resto, rappresentano inevitabilmente una fotografia dello stato delle conoscenze disponibili nel momento in cui vengono elaborate<sup>xxi</sup>.

La loro efficacia dipenderà quindi non soltanto dal contenuto delle prescrizioni che introdurranno, ma dalla capacità dell'ordinamento di mantenerle permeabili all'evoluzione della ricerca scientifica, aggiornandole con una rapidità compatibile con la velocità con cui emergono nuove evidenze.

Su questo punto, vale la pena ricordare che l'IPPC Bureau è stato istituito nel 1997<sup>xxii</sup>, che la prima direttiva IPPC risale al 1996 e che la sua rifusione nella Direttiva IED è del 2010. Le conclusioni BAT dedicate agli impianti di trattamento dei rifiuti sono arrivate con la decisione di esecuzione (UE) 2018/1147 della Commissione, del 10 agosto 2018. Ventisette anni separano l'istituzione del sistema dal suo primo riferimento tecnico organico per uno dei comparti più diffusi e longevi della gestione dei rifiuti europei. Il processo di elaborazione delle BAT specificamente dedicate alle discariche è ancora più recente e si trova tuttora nelle sue fasi iniziali. Sono dati che autorizzano qualche riserva sulla capacità strutturale di questo sistema di adattarsi alla velocità con cui la ricerca scientifica ridefinisce i termini del problema che si propone di governare. Un ciclo di elaborazione di quella durata, applicato a un settore in cui le evidenze scientifiche si accumulano con la rapidità documentata in questo lavoro, rischia di rendere strutturale il ritardo che si intende colmare. In assenza di tale capacità adattiva, anche il più sofisticato dei sistemi regolatori rischia di riprodurre il medesimo paradosso già osservato in passato: quello di governare con precisione crescente fenomeni che, nel frattempo, hanno già iniziato a cambiare forma.

## 8. Conclusioni

La storia del cloruro di vinile e quella dei PFAS mostrano come la questione esaminata nel presente lavoro non riguardi soltanto la complessità chimica dei contaminanti, ma il modo stesso in cui il diritto ambientale osserva e governa i fenomeni che intende regolare.

Il paradosso emerso con riferimento al trattamento biologico del percolato rende questa criticità ancora più evidente. Le prescrizioni che impongono il trattamento del percolato sono state elaborate in un contesto scientifico nel quale il ruolo dei precursori polifluorurati e delle loro trasformazioni non era ancora pienamente compreso. Non si tratta di norme errate, ma di norme costruite attorno a una rappresentazione inevitabilmente incompleta dell'oggetto regolato. Le conoscenze oggi disponibili mettono in discussione presupposti tecnici che per anni sono stati considerati acquisiti e mostrano i limiti di un approccio fondato esclusivamente sugli esiti.

Questo limite non è superabile con aggiustamenti incrementali. Richiede una diversa concezione del rapporto tra regolazione e processo, la capacità di osservare — e in prospettiva di governare — le trasformazioni. Ma questa transizione ha un costo istituzionale non marginale.

Il modo in cui regoliamo le discariche riflette il modo in cui, culturalmente e giuridicamente, abbiamo sempre pensato ai rifiuti: qualcosa da allontanare, da confinare, da tenere a distanza. La regolazione ambientale delle discariche è, in questo senso, la forma giuridica di un gesto originario di separazione. Controlliamo i confini — le mura del sistema — perché è lì che il distanziamento si compie e si

certifica. Si potrebbe obiettare che i valori di guardia nelle acque sotterranee rispondono esattamente all'esigenza di intercettare la contaminazione prima che raggiunga il recettore finale, ma anche questa soluzione replica il medesimo schema, spostando semplicemente il perimetro di controllo su una cinta muraria più esterna.

Il cloruro di vinile e i PFAS mostrano che questa postura non basta. Non perché le mura siano inutili, ma perché il problema nasce dentro, dove le sentinelle non guardano. Governare la discarica come reattore significa accettare che l'oggetto regolato non è separabile dai processi che lo attraversano — e che il diritto, se vuole essere all'altezza di questa complessità, deve imparare a stare dentro i fenomeni invece di presidiarli dall'esterno.

È qui che si apre la domanda con cui il diritto ambientale dei prossimi decenni dovrà misurarsi: siamo in grado di costruire una regolazione capace di governare i processi prima che i loro effetti emergano nelle matrici ambientali o continuiamo a preferire una normativa che contenga il rischio là dove lo sappiamo già vedere? La risposta non è solo tecnica. È una scelta sul modello di precauzione che le nostre istituzioni sono disposte a adottare — e, in ultima analisi, sul rapporto che il diritto vuole avere con la complessità dei fenomeni che si propone di governare.

<sup>i</sup> Sia consentito rinviare a O. Patrone, *La discarica tra definizione giuridica e realtà ingegneristica*, in RGA Online, aprile 2026, n. 74/2026.

<sup>ii</sup> California Air Resources Board, *Vinyl Chloride in Landfill Gas*, Research Division, Sacramento (CA), 1990.

<sup>iii</sup> M. Bellino, T. Forte, L. Musmeci, *Sintesi degli studi significativi inerenti la neoformazione di cloruro di vinile monomero in impianti di discarica di rifiuti urbani*, in *Annali dell'Istituto Superiore di Sanità*, vol. 37, n. 2, 2001, pp. 301–307. Gli autori ricostruiscono il meccanismo della dealogenazione riduttiva in condizioni anaerobiche e sottolineano l'esigenza di includere il cloruro di vinile tra i parametri da monitorare sistematicamente nelle matrici acqua e aria in prossimità delle discariche.

<sup>iv</sup> J. Yan, J. Wang et al. (F.E. Löffler), *Respiratory Vinyl Chloride Reductive Dechlorination to Ethene in TceA-Expressing Dehalococcoides mccartyi*, in *Environmental Science & Technology*, vol. 55, n. 8, 2021. Lo studio dimostra che la dealogenazione completa del cloruro di vinile a etilene dipende dalla presenza di ceppi specifici di Dehalococcoides mccartyi esprimenti dealoalogenasi funzionali e da disponibilità adeguata di vitamina B12: in condizioni di carenza di questo cofattore, la dealogenazione si arresta con accumulo di VC come prodotto intermedio stabile.

<sup>v</sup> U.S. Environmental Protection Agency (EPA), *Draft Scope of the Risk Evaluation for Vinyl Chloride*, Washington, D.C., 2025 (documento preliminare pubblicato ai sensi del Toxic Substances Control Act). Il documento riconosce espressamente che il cloruro di vinile si forma come prodotto di trasformazione di altri composti organoclorurati attraverso processi di dechlorazione riduttiva in ambienti anaerobici, indicando in particolare PCE e TCE quali precursori più comuni. L'EPA include inoltre tra i percorsi ambientali oggetto della valutazione il percolato di discarica (landfill leachate), le acque sotterranee e il suolo.

<sup>vi</sup> La collocazione dell'enunciato tra i *considerando* e non nell'articolato, non ne attenua la rilevanza interpretativa. Il preambolo, infatti, orienta la lettura del dispositivo e qui registra, come obiettivo dichiarato, la prevedibilità delle reazioni delle sostanze conferite — obiettivo che l'articolato non traduce in alcuna prescrizione diretta a governare le trasformazioni interne alla massa.

<sup>vii</sup> R. Cossu, *Il bilancio di massa per la discarica sostenibile*, UniPD, 2004. La rappresentazione della discarica come reattore trifasico costituisce il riferimento concettuale attorno al quale si organizza la letteratura ingegneristica più recente sulla gestione avanzata dei siti di smaltimento.

<sup>viii</sup> T.G. Townsend, J. Powell, P. Jain, Q. Xu, T. Tolaymat, D. Reinhart, *Sustainable Practices for Landfill Design and Operation*, Springer, New York, 2015, capp. 1, 6, 11 e 17. Gli autori descrivono il *landfill bioreactor* come un modello di discarica nel quale il corpo rifiuti è gestito attivamente mediante il controllo delle condizioni di umidità e di produzione del gas, al fine di accelerare la stabilizzazione biologica dei rifiuti. In tale contesto, il ricircolo del percolato consiste nella reimmissione del liquido raccolto dal sistema di drenaggio all'interno della massa dei rifiuti e si distingue dal trattamento esterno del percolato finalizzato allo scarico, costituendo una tecnica di gestione della biodegradazione del corpo rifiuti che può contribuire ad anticipare la produzione di biogas e a ridurre le esigenze di gestione nel lungo periodo.

<sup>ix</sup> Sia consentito rinviare, sul punto, a O. Patrone, *Il percolato tra rifiuto e refluo. Fratture ontologiche e continuità funzionale nella gestione integrata della discarica*, su RGA Online, maggio 2026, n. 75/2026, ove si è argomentata la

qualificazione del percolato come fluido di processo funzionalmente integrato nel ciclo dell'impianto e si è ricostruita la legittimità del suo ricircolo quale atto di gestione attiva del corpo rifiuti, distinto dallo smaltimento, là dove strutturalmente inserito nel funzionamento autorizzato della discarica.

<sup>x</sup> Sul ruolo della fase metanogenica come contesto biochimicamente privilegiato per la dealogenazione riduttiva dei composti organoclorurati, cfr. U.S. Environmental Protection Agency – Office of Research and Development, *Principles and Practices of Enhanced Anaerobic Bioremediation of Chlorinated Solvents*, EPA/600/R-04/173, 2004, pp. 12–14, ove si documenta che, benché la dealogenazione riduttiva anaerobica si verifichi anche in condizioni di riduzione dei nitrati e dei solfati, i tassi più rapidi e applicabili alla gamma più ampia di idrocarburi alogenati si registrano in condizioni metanogeniche; per il collegamento esplicito tra ricircolo del percolato e promozione della dealogenazione riduttiva in un bioreattore in situ a circuito chiuso, v. *ivi*, p. 37.

<sup>xi</sup> Per i composti perfluoroalchilici, il quadro scientifico è ancora aperto. Sul piano termodinamico, L.P. Wackett, *Nothing Lasts Forever: Understanding Microbial Biodegradation of Polyfluorinated Compounds and Perfluorinated Alkyl Substances*, in *Microbial Biotechnology*, vol. 15, n. 3, 2022, pp. 773–792, ove si documenta che il potenziale redox necessario per la riduzione del legame C–F è nell'ordine di  $-400 / -700$  mV, un valore biologicamente estremo, e che il trasferimento di elettroni da substrati ossidabili microbicamente tipici — il cui potenziale redox non scende al di sotto di  $-450$  mV — verso i PFAS sarebbe termodinamicamente sfavorevole; a differenza della riduzione del legame C–Cl, la riduzione del legame C–F non è pertanto accoppiabile a una catena respiratoria capace di generare ATP. Sul piano delle evidenze sperimentali, M. Hu, C. Scott, *Toward the Development of a Molecular Toolkit for the Microbial Remediation of Per- and Polyfluoroalkyl Substances*, in *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 90, n. 4, 2024, pp. 7–8, ove si documenta che la defluorurazione riduttiva biologica dei PFAS in condizioni anossiche è stata osservata in via sperimentale su composti a basso grado di fluorurazione, ma che i risultati si sono rivelati difficilmente replicabili, che i microrganismi e gli enzimi responsabili non sono stati identificati, e che la partecipazione diretta dei metanogeni è stata esplicitamente esclusa nei casi meglio controllati. Il riferimento nel testo va pertanto inteso nel senso che le condizioni anaerobiche profonde di cui la metanogenesi è indicatore rappresentano l'ambiente redox più ridotto e quindi termodinamicamente più prossimo — pur senza raggiungerne la soglia — alle condizioni necessarie alla rottura biologica del legame C–F, non che i batteri metanogeni agiscano direttamente sui composti perfluorurati.

<sup>xii</sup> S. Polesello, R. Pagnotta, L. Marziali et al., *Realizzazione di uno studio di valutazione del rischio ambientale e sanitario associato alla contaminazione da sostanze perfluoro-alchiliche (PFAS) nel bacino del Po e nei principali bacini fluviali italiani. Relazione finale*, IRSA-CNR, 2013. Lo studio evidenziò nel bacino Agno–Fratta Gorzone concentrazioni particolarmente elevate di PFAS nelle acque superficiali e nelle acque destinate al consumo umano e individuò nello stabilimento Miteni di Trissino la principale sorgente della contaminazione osservata nel sistema idrografico interessato, ammettendo che era stata riscontrata la presenza di altre fonti di inquinamento di PFOA nel bacino idrografico indagato delle quali era necessario approfondire lo studio per individuarne con precisione la localizzazione. Sul ruolo svolto dalla pubblicazione dello studio nella successiva attenzione pubblica rivolta al caso veneto v. anche C. Tromba, *Inquinamento da PFAS in Veneto. Dopo gli USA tocca all'Italia*, in *Epidemiologia & Prevenzione*, 2017, 41(5-6), pp. 232-236.

<sup>xiii</sup> J. Busch, L. Ahrens, R. Sturm, R. Ebinghaus, *Polyfluoroalkyl compounds in landfill leachates*, in *Environmental Pollution*, 158, 2010, pp. 1467–1471. Primo studio sistematico europeo condotto su 22 discariche tedesche. Lo studio documenta concentrazioni totali di PFAS nel percolato grezzo comprese tra 31 e 12.819 ng/L, con predominanza dei composti a catena corta, in particolare PFBA e PFBS (C4), e osserva che gli effluenti sottoposti a trattamento biologico presentano le concentrazioni più elevate tra i sistemi di trattamento esaminati, ipotizzando la trasformazione biologica dei precursori come possibile spiegazione.

<sup>xiv</sup> H. Hamid, L.Y. Li, J.R. Grace, *Review of the fate and transformation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in landfills*, in *Environmental Pollution*, 235, 2018, pp. 74–84. La review evidenzia che i PFAA sono regolarmente rilevati nel percolato di discarica e che i composti a catena corta C4–C7 risultano generalmente più abbondanti degli omologhi a catena più lunga. Segnala inoltre incrementi, sito- e composto-specifici, delle concentrazioni di singoli PFAA dopo trattamento biologico del percolato, nell'intervallo 10-250%, compatibili con la trasformazione di precursori in PFAA terminali.

<sup>xv</sup> J.R. Lang, B.M. Allred, J.A. Field, J.W. Levis, M.A. Barlaz, *National Estimate of Per- and Polyfluoroalkyl Substance (PFAS) Release to U.S. Municipal Landfill Leachate*, in *Environmental Science & Technology*, 51, 2017, pp. 2197–2205. Lo studio analizza 70 PFAS in 95 campioni di percolato provenienti da 18 discariche statunitensi e, accoppiando le concentrazioni stimate per età del rifiuto e condizioni climatiche ai volumi annui di percolato mediante analisi Monte Carlo, perviene a una stima del rilascio nazionale di 19 PFAS compresa tra 563 e 638 kg per l'anno di campionamento (2013). La quota maggioritaria è costituita dai PFCA (291 kg/anno), seguiti dagli FTCA (285 kg/anno) e, in misura minore, dai PFSA e relativi precursori (84 kg/anno): la considerazione dei precursori e dei loro prodotti di degradazione conduce così a quantità comparabili o superiori ai PFAA terminali, rivelando come le stime fondate sui soli PFAA misurati sottostimino il rilascio complessivo.

<sup>xvi</sup> I. Fuertes, S. Gómez-Lavín, M.P. Elizalde, A. Urriaga, *Perfluorinated alkyl substances (PFASs) in northern Spain municipal solid waste landfill leachates*, in *Chemosphere*, 168, 2017, 399-407: le concentrazioni totali di PFAS nel percolato trattato (3162,3 ng/L) risultano circa il doppio di quelle nel percolato grezzo (1378,9 ng/L). In senso conforme, H. Hamid, L.Y. Li, J.R. Grace, *op. cit.*, ove l'incremento — specifico per analita e per sito — è documentato tra il 10% e

il 250% per i singoli PFAA, sulla base dei dati primari di H. Yan, I.T. Cousins, C. Zhang, Q. Zhou, *Perfluoroalkyl acids in municipal landfill leachates from China: occurrence, fate during leachate treatment and potential impact on groundwater*, in *Science of the Total Environment*, 524, 2015, 23-31.

<sup>xvii</sup> Ibidem.

<sup>xviii</sup> Tra i principali contributi possono richiamarsi: H. Moriwaki, Y. Takagi, M. Tanaka et al., *Sonochemical Decomposition of Perfluorooctane Sulfonate and Perfluorooctanoic Acid*, in *Environmental Science & Technology*, 39, 2005, pp. 3388–3392, che dimostra la degradazione sonochimica di PFOS e PFOA mediante cavitazione ultrasonica; H. Hori, H. Yamamoto, A. Hayakawa et al., *Efficient Decomposition of Environmentally Persistent Perfluorocarboxylic Acids by Use of Persulfate as a Photochemical Oxidant*, che sviluppa un processo fotochimico di ossidazione mediante persolfato capace di ottenere un'estesa defluorurazione dei PFAA; H. Park, C.D. Vecitis, Y. Cheng et al., *Reductive Defluorination of Aqueous Perfluorinated Alkyl Surfactants: Effects of Ionic Headgroup and Chain Length*, *J. Phys. Chem. A*, 2009, 113, 690–696, che chiarisce i meccanismi della defluorurazione riduttiva mediante elettroni idratati e l'influenza della struttura molecolare sulla degradazione; Y. Song, Z. Tang, H. Wang et al., *Reductive Defluorination of Perfluorooctanoic Acid by Hydrated Electrons in a Sulfite-Mediated UV Photochemical System*, *J. Hazard. Mater.*, 2013, 262, 332–338, che migliora l'efficienza del processo UV/solfito dimostrando elevate percentuali di defluorurazione del PFOA; B. Gomez-Ruiz, S. Gómez-Lavín, N. Diban et al., *Efficient Electrochemical Degradation of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) from the Effluents of an Industrial Wastewater Treatment Plant*, in *Chemical Engineering Journal*, 322, 2017, pp. 196–204, che verifica l'efficacia dell'ossidazione elettrochimica con anodi in diamante drogato con boro su un refluo industriale reale contenente miscele di PFAS; S.P. Sahu, M. Qanbarzadeh, M. Ateia et al., *Rapid Degradation and Mineralization of Perfluorooctanoic Acid by a New Petitjeanite Bi<sub>3</sub>O(OH)(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> Microparticle UV Photocatalyst*, che propone un innovativo catalizzatore fotocatalitico ad elevata attività nei confronti del PFOA; M.J. Krause, E. Thoma, E. Sahle-Damesessie et al., *Supercritical Water Oxidation as an Innovative Technology for PFAS Destruction*, in *Journal of Environmental Engineering*, 148, 2022, che documenta risultati superiori al 99% di abbattimento dei PFAS mediante ossidazione in acqua supercritica, evidenziandone il potenziale quale tecnologia distruttiva.

<sup>xix</sup> In giurisprudenza è stato affermato che i casi di riesame previsti dall'art. 29-octies, commi 3 e 4, d.lgs. n. 152/2006 non costituiscono un elenco tassativo delle ipotesi in cui l'AIA può essere modificata, ma individuano soltanto quelle in cui il riesame è obbligatorio. Al di fuori di tali fattispecie, l'autorizzazione può essere adeguata ogniqualvolta emerga la necessità di introdurre ulteriori misure di tutela, anche in applicazione dei principi di prevenzione e precauzione, non essendo ammissibili vuoti o ritardi nella salvaguardia della salute e dell'ambiente. – T.S.A.P. 11 maggio 2022, n. 92, principio poi ripreso per espressa adesione da TAR Veneto, sez. II, 10 ottobre 2022, n. 1518, e integralmente recepito, ai sensi dell'art. 74 c.p.a., da TAR Veneto, sez. II, 4 luglio 2023, n. 976.

<sup>xx</sup> Reg. (UE) 2019/1009 del Parlamento europeo e del Consiglio del 5 giugno 2019, Allegato II, Parte II, CMC 3, punto 1. La disposizione richiede che «tutte le parti di ciascun lotto» siano sottoposte, durante il compostaggio, a determinati profili tempo-temperatura, configurando l'igienizzazione come requisito di processo riferito all'intera massa in lavorazione e non come semplice caratteristica del prodotto finale. Il controllo analitico sul compost opera, pertanto, come verifica conclusiva di una filiera produttiva previamente monitorata e non come strumento autonomo idoneo a supplire all'assenza o all'inadeguatezza dei controlli di processo.

<sup>xxi</sup> Il modello regolatorio fondato sul controllo degli effluenti e delle concentrazioni nelle matrici ambientali esterne costituisce l'impianto strutturale della disciplina europea sulla prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento fin dalla Direttiva 96/61/CE. Come osservava già Emmott nel 1999, i permessi IPPC sono costruiti attorno ai valori limite di emissione e alle condizioni di monitoraggio degli scarichi verso aria, acqua e suolo; e le discariche, in particolare, erano state sottratte in sede di Posizione comune del Consiglio alla piena valutazione BAT prevista dalla proposta originaria della Commissione, in una delle incoerenze strutturali che lo stesso autore segnalava come sintomatiche di un approccio privo di visione strategica: N. Emmott, *IPPC and beyond — developing a strategic approach to industry for European environmental policy*, in *Journal of Environmental Policy & Planning*, 1, 1999. Per il processo Siviglia e le sue criticità strutturali già emerse nella fase iniziale, v. N. Emmott, S. Bär, R.A. Kraemer, *IPPC and the Sevilla Process*, 2000.

<sup>xxii</sup> L'European IPPC Bureau è stato istituito dal Joint Research Centre della Commissione europea, con sede a Siviglia presso l'Institute for Prospective Technological Studies (IPTS), in attuazione dell'art. 16 della Direttiva 96/61/CE, che imponeva alla Commissione di organizzare lo scambio di informazioni tra Stati membri sulle migliori tecniche disponibili e di pubblicarne i risultati.