

METODOLOGIA PER LA VERIFICA DEL MANTENIMENTO DELLO STATO DI QUALITÀ DEI CORPI IDRICI A SEGUITO DELL'IMMISSIONE DI SCARICHI DI DEPURATORI MUNICIPALI

Giorgio Bertanza¹, Alessandro Abba^{1,*}

¹ Università degli Studi di Brescia – Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e di Matematica (DICATAM).

Sommario

Il presente lavoro propone una metodologia semplificata per la verifica del mantenimento dello stato di qualità dei corpi idrici superficiali a seguito dell'immissione di scarichi di depuratori municipali. L'approccio si basa sull'utilizzo dell'indice LIM_{eco} e sull'applicazione di un bilancio di massa ai macrodescrittori azoto ammoniacale, azoto nitrico e fosforo totale, al fine di stimare l'impatto degli effluenti depurati sul corpo idrico recettore. La metodologia consente di simulare diversi scenari, considerando variazioni delle portate, delle caratteristiche qualitative dei corpi idrici e delle prestazioni degli impianti di depurazione, anche in relazione a limiti allo scarico più restrittivi. Per facilitarne l'applicazione, sono stati definiti valori standard di qualità dei corpi idrici e concentrazioni attese degli effluenti, rispettivamente sulla base dei dati di qualità monitorati da ARPA nei corpi idrici lombardi e sulla normativa vigente e futura. L'approccio è stato applicato a casi studio in Lombardia, evidenziando come il fattore di dispersione (rapporto tra portata del corpo idrico e dello scarico) costituisca il parametro chiave nel determinare il mantenimento o il deterioramento dello stato di qualità. La metodologia si configura come uno strumento operativo utile per supportare le decisioni in ambito di pianificazione e gestione degli scarichi, in coerenza con gli obiettivi di tutela ambientale.

Parole chiave: corpi idrici superficiali, depuratori municipali, LIM_{eco}, bilanci di massa, fattore di dispersione.

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE MAINTENANCE OF WATER BODY QUALITY STATUS FOLLOWING THE DISCHARGE OF MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT PLANTS

Abstract

This study presents a simplified yet robust methodology for assessing whether the quality status of surface water bodies can be maintained following the discharge of effluents from municipal wastewater treatment

plants (WWTPs). The approach is designed to support environmental management and regulatory compliance by providing a practical and operational tool to evaluate the effect of treated discharges on the ecological objectives established by current and forthcoming legislation, with particular reference to the requirements of the European Directive for urban wastewater treatment.

The proposed methodology is based on the application of the LIM_{eco} index (Ecological Status Index based on Macrodescriptors), which integrates key physico-chemical parameters into a single synthetic indicator of ecological quality. In particular, the analysis focuses on three major nutrient-related macrodescriptors – ammoniacal nitrogen (N-NH₄⁺), nitrate nitrogen (N-NO₃⁻), and total phosphorus (TP) – which are widely recognized as critical drivers of eutrophication processes in freshwater systems and are therefore central to water quality assessment. A mass balance approach is applied to these parameters in order to estimate their concentrations downstream of the discharge point, accounting for both the flow rate and quality characteristics of the receiving water body and the WWTP effluent, under the assumption of complete mixing conditions.

The methodology enables the simulation of multiple scenarios, including variations in hydrological conditions (e.g., variations in river flow due to climate change or water abstraction), differences in background water quality, and modifications in treatment plant performance. It also allows the evaluation of the potential benefits associated with the adoption of more stringent discharge limits, including those introduced by future European directives. To facilitate its application in contexts where monitoring data may be limited or unavailable, the study defines standard reference values for both water body quality and expected effluent concentrations. These values are derived from extensive datasets provided by ARPA Lombardia (covering more than 7000 observations collected between 2021 and 2024) and from existing and upcoming regulatory frameworks, ensuring both representativeness and consistency with real-world conditions.

The methodology has been tested through application to representative case studies in the Lombardy region

* Per contatti: Via Branze 43, 25123 Brescia. Tel 030.3711303. alessandro.abba@unibs.it

Ricevuto il 9-5-2026; Correzioni richieste il 19-7-2026; Accettazione finale il 26-7-2026

(Italy), covering different hydrological and plant-size conditions. The results highlight the central role of the dispersion factor – defined as the ratio between the flow rate of the receiving water body and that of the WWTP discharge – in determining whether the ecological status is preserved downstream of the discharge. In particular, situations characterized by low dispersion factor may lead to a deterioration of water quality even when regulatory limits are met and treatment performance is high.

Conversely, high dispersion factor values can ensure the maintenance of good ecological status with a significant safety margin, even under variable operating conditions. Overall, the proposed approach provides a flexible and operational decision-support tool for authorities and practitioners involved in water resource planning and wastewater management. It enables rapid preliminary assessments, supports the identification of critical conditions, and helps prioritize interventions, while maintaining consistency with environmental protection objectives. Moreover, the methodology emphasizes that, although stricter discharge limits can contribute to improving water quality, they may not always be sufficient on their own, thereby underscoring the importance of integrated basin-scale management strategies and a holistic approach to water protection.

Keywords: *surface water bodies, municipal wastewater treatment plants, LIM_{eco} , mass balances, dispersion factor.*

1. Introduzione

La difesa dell'ambiente naturale è il principale obiettivo definito dalle normative comunitarie e nazionali, al cui interno la tutela delle acque dall'inquinamento costituisce un principio fondamentale. Come definito all'art. 73 del D.Lgs. 152/2006 e s.m.i., le disposizioni previste dalle normative ambientali sono volte alla “[...] *tutela delle acque superficiali, marine e sotterranee perseguendo i seguenti obiettivi: (a) prevenire e ridurre l'inquinamento e attuare il risanamento dei corpi idrici inquinati; (b) conseguire il miglioramento dello stato delle acque ed adeguate protezioni di quelle destinate a particolari usi; (c) perseguire usi sostenibili e durevoli delle risorse idriche, con priorità per quelle potabili; (d) mantenere la capacità naturale di autodepurazione dei corpi idrici, nonché la capacità di sostenere comunità animali e vegetali ampie e ben diversificate; (e) mitigare gli effetti delle inondazioni e della siccità [...]*”.

In altri termini, le normative comunitaria e nazionale sanciscono il principio di definire i limiti allo scarico per gli impianti di trattamento acque reflue, nell'ottica di garantire la salvaguardia dei corpi idrici.

I limiti allo scarico sono differenti a seconda del carico nominale dell'agglomerato, intendendo, per quest'ultimo, ai sensi della Direttiva 91/271/CEE sul trattamento delle acque reflue urbane, un'area in cui la popolazione e/o le attività economiche sono sufficientemente concentrate da rendere possibile la raccolta e il convogliamento delle acque reflue urbane verso un impianto di trattamento o verso un punto finale di scarico. Tale concetto è stato sostanzialmente ribadito nella nuova Direttiva (UE) 2024/3019.

Il raggiungimento degli obiettivi di qualità ambientale dipende anche dalla relazione tra la qualità dell'effluente depurato e le caratteristiche del corpo idrico recettore. In linea teorica, ciò suggerisce l'opportunità di valutare caso per caso gli effetti degli scarichi, tenendo conto sia del carico nominale dell'agglomerato, sia delle caratteristiche quali-quantitative del corso d'acqua. Nella pratica, tali valutazioni risultano spesso complesse, poiché: (i) la normativa prevede generalmente limiti allo scarico definiti per classi di potenzialità dell'impianto (o, più propriamente, del carico nominale dell'agglomerato), piuttosto che limiti specifici per ciascun impianto; (ii) anche il rispetto dei limiti vigenti e l'adozione delle migliori tecnologie disponibili potrebbero non essere sufficienti a garantire il raggiungimento o il mantenimento dello stato di qualità ambientale richiesto per il corpo idrico recettore.

La valutazione degli effetti degli scarichi sui corpi idrici può essere condotta mediante modelli di qualità delle acque, ampiamente utilizzati nella pianificazione a scala di bacino. Tali strumenti, pur rappresentando il riferimento per le analisi di dettaglio, richiedono dati, tempi e competenze specialistiche non sempre disponibili nelle valutazioni preliminari. In questo contesto risulta utile disporre di metodologie semplificate che consentano una rapida analisi di scenari alternativi e supportino l'individuazione delle situazioni che richiedono successivi approfondimenti modellistici.

Nel presente studio, commissionato da PoliS-Lombardia e svolto in collaborazione con Regione Lombardia, si vuole proporre uno strumento di semplice applicazione per simulare l'effetto degli effluenti depurati sui corsi d'acqua, in relazione alla necessità del raggiungimento o mantenimento di determinati obiettivi di qualità. Lo strumento messo a punto consente di simulare anche scenari in cui si ipotizzi l'adozione di limiti più restrittivi, limiti che comunque devono tener conto della sostenibilità tecnico-economica. Per una esemplificazione del metodo, si è considerato il caso di studio della regione Lombardia, e quindi, si è fatto riferimento alle classi di limiti già in vigore nella normativa regionale (R.R. 6/2019), nonché di quelli che entreranno in vigore

Tabella 1. Soglie per l'assegnazione dei punteggi ai singoli parametri e classificazione di qualità secondo i valori di LIM_{eco}

Parametro	Livello 1	Livello 2	Livello 3	Livello 4	Livello 5	Stato	LIM _{eco}
100 - %OD _{sat}	≤ 10	≤ 20	≤ 40	≤ 80	> 80	Elevato	≥ 0,66
N-NH ₄ ⁺ [mg/L]	< 0,03	≤ 0,06	≤ 0,12	≤ 0,24	> 0,24	Buono	≥ 0,50
N-NO ₃ ⁻ [mg/L]	< 0,6	≤ 1,2	≤ 2,4	≤ 4,8	> 4,8	Sufficiente	≥ 0,33
P _{TOT} [µg/L]	< 50	≤ 100	≤ 200	≤ 400	> 400	Scarso	≥ 0,17
Punteggio*	1	0,5	0,25	0,125	0	Cattivo	< 0,17

* Punteggio da attribuire al singolo parametro

con la Direttiva UE 2024/3019 sul trattamento delle acque di scarico.

Lo stato di qualità dei corpi idrici superficiali è determinato da molteplici fattori: elementi di qualità biologica (EQB), elementi fisico-chimici, chimici (inquinanti specifici) e idromorfologici (Poikane *et al.*, 2019; van de Bund e Poikane, 2015).

Il LIM_{eco} (Livello di Inquinamento dai Macrodescrittori per lo stato ecologico) è particolarmente adatto per studiare scenari definiti sulla base delle caratteristiche quali-quantitative del corso d'acqua ricettore e dello scarico depurato. È possibile infatti svolgere questa valutazione mediante l'applicazione rigorosa di un bilancio di massa sui parametri inquinanti utilizzati per il calcolo del LIM_{eco} stesso.

I nutrienti e l'ossigeno disciolto, ai fini della classificazione, vengono integrati in un singolo descrittore (LIM_{eco}) utilizzato per derivare la classe di qualità in accordo con quanto riportato nella Tabella 1. Il punteggio LIM_{eco} da attribuire al corpo idrico nel punto di monitoraggio considerato è dato dalla media dei singoli LIM_{eco} dei vari campionamenti effettuati nell'arco dell'anno in esame. Il valore medio del LIM_{eco} calcolato è utilizzato per attribuire la classe di qualità.

2. Approccio metodologico

L'approccio metodologico proposto consente di verificare l'effetto degli effluenti depurati sulla qualità dei corpi idrici recettori. È possibile simulare sia lo stato di fatto sia altri scenari in cui si possa prevedere, ad esempio, una variazione della portata del corso d'acqua (conseguente ai cambiamenti climatici o a prelievi/restituzioni) o della dimensione dell'agglomerato, o delle prestazioni dell'impianto di depurazione (ciò che si traduce in una variazione delle concentrazioni residue di inquinanti nell'effluente). In particolare, la procedura di verifica proposta in questo studio si applica considerando le seguenti casistiche:

- lo stato di qualità di un corso d'acqua (come risultante dal calcolo dell'indice LIM_{eco}) è BUONO o ELEVATO a monte dello scarico e si mantiene tale anche a valle, con un adeguato margine di sicurezza.

- Lo stato di qualità di un corso d'acqua (come risultante dal calcolo dell'indice LIM_{eco}) è BUONO o ELEVATO a monte dello scarico, ma lo scarico determina, a valle, un declassamento della qualità (anche nel caso ipotetico di adozione di standard allo scarico più restrittivi). In queste situazioni, in linea di principio, si dovrebbe valutare l'adozione di opportuni interventi, con un livello di priorità definibile in base ai molti fattori coinvolti (entità dello scostamento dagli obiettivi di qualità, dimensione dell'agglomerato, esistenza di alternative tecnico-impiantistiche sostenibili, rilevanza del corpo ricettore ecc.).
- Lo stato di qualità del corpo idrico (come risultante dal calcolo dell'indice LIM_{eco}) è inferiore a BUONO già a monte dello scarico dell'effluente depurato. Ovviamente, l'onere di risanare un corso d'acqua già compromesso non può ricadere sull'impianto di depurazione, quindi le valutazioni vengono svolte assumendo caratteristiche del corso d'acqua corrispondenti allo stato BUONO a monte dello scarico, cioè, ponendosi nella situazione ideale in cui a monte siano stati messi in atto tutti gli interventi per garantire il livello di qualità minimo richiesto dalla normativa. A questo punto, viene svolta la simulazione, ricadendo, a seconda dei risultati, in uno dei due casi precedenti.

Nel presente studio, per “misurare” l'effetto dello scarico sul ricettore, si adotta un margine di sicurezza (per tenere conto delle incertezze e approssimazioni e dei possibili scenari futuri in relazione al regime idraulico dei corsi d'acqua e alla dimensione degli agglomerati serviti dai depuratori) e si valutano i benefici raggiungibili mediante l'ipotetica applicazione di limiti allo scarico più restrittivi.

L'applicazione della procedura di verifica si sviluppa attraverso i seguenti passi:

- la definizione delle caratteristiche qualitative e della portata dei corpi idrici recettori;
- la definizione delle caratteristiche quali-quantitative dello scarico del depuratore;
- il calcolo dello stato di qualità del corpo idrico con l'applicazione della metodologia proposta.

2.1. Caratteristiche dei corpi idrici recettori

Per poter applicare in modo corretto la metodologia proposta è necessario disporre delle caratteristiche quali-quantitative dei corpi idrici recettori.

Per quanto riguarda le caratteristiche *quantitative* dei corpi idrici recettori è necessario basarsi su dati di portata misurati o stimati.

Per quanto riguarda invece gli *aspetti qualitativi*, si possono individuare i seguenti casi.

CASO 1. Qualora siano disponibili misure dettagliate e attendibili appena a monte (sufficientemente vicini allo scarico dell'impianto di depurazione in modo da non avere ulteriori immissioni di scarichi/corpi idrici non sottoposti a monitoraggio) o appena a valle dello scarico (sufficientemente lontano per garantire che sia avvenuta una corretta miscelazione), si possono usare tali dati.

CASO 2. In alternativa, o forse preferibilmente, si possono utilizzare dati standard di qualità dei corsi d'acqua. Questo per i seguenti principali motivi:

- le concentrazioni dei parametri per il calcolo del LIM_{eco} sono molto variabili;
- è opportuno adottare un approccio generale, che contempli anche la possibilità che a monte dello scarico del depuratore, nel tempo, le condizioni cambino;
- è preferibile utilizzare un approccio semplificato e di facile applicazione;

- raramente sono disponibili misure direttamente a monte o a valle dello scarico di un depuratore.

Per esemplificare la metodologia proposta, si è fatto riferimento, come caso di studio, ai corsi d'acqua della Lombardia. Per la definizione dei dati standard di qualità dei corsi d'acqua, è stata quindi effettuata l'analisi statistica di oltre 7.000 dati ufficiali ARPA Lombardia delle concentrazioni dei parametri utilizzati per il calcolo del LIM_{eco} ($N-NH_4^+$, $N-NO_3^-$, P_{TOT} , $|100 - \%O.D._{sat}|$) in tutti i corpi idrici monitorati nel periodo 2021-2024. Dalla Figura 1 si osserva che l'azoto nitrico rappresenta il parametro più critico, perché ha una distribuzione di frequenza allargata, con numerosità di casi rilevante anche nelle classi di qualità BUONO e SUFFICIENTE. Il fosforo totale e l'ossigeno alla saturazione, invece, rappresentano i parametri meno critici, poiché la maggior parte dei dati ricade nell'intervallo di qualità ELEVATO. L'azoto ammoniacale si colloca in una situazione intermedia.

Sulla base dell'analisi statistica sopra riportata, si possono definire i dati standard di qualità dei corsi d'acqua, ossia "concentrazioni standard" dei parametri utilizzati per il calcolo del LIM_{eco} nelle classi di qualità ELEVATO e BUONO. Come visto in precedenza, questo consente di applicare la metodologia proposta anche in assenza di dati di monitoraggio del corpo idrico. Non sono state definite "concentrazioni stan-

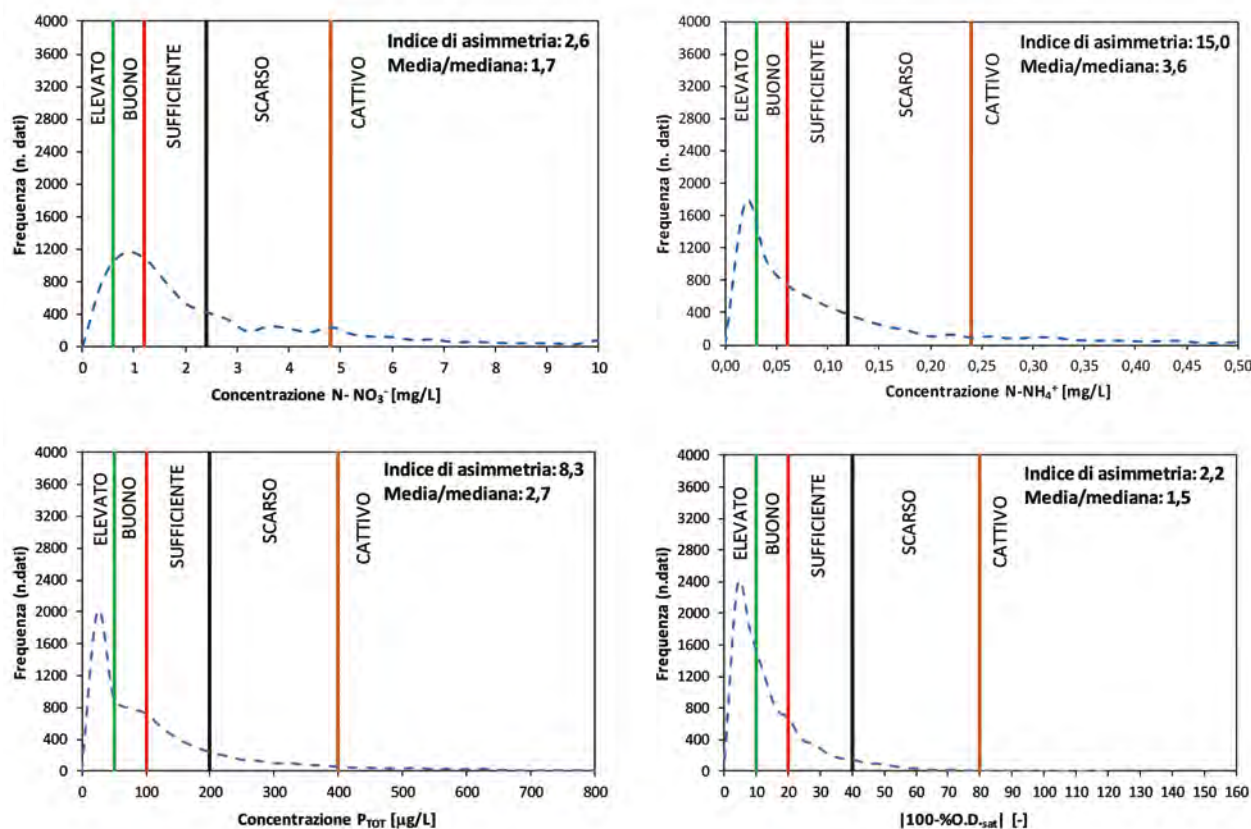


Figura 1. Distribuzione di frequenza dei macrodescrittori LIMeco nei corpi idrici superficiali lombardi. Elaborazioni dati ARPA Lombardia 2021-2024.

Tabella 2. Dati standard di qualità in funzione del LIM_{eco} ARPA (stato ELEVATO e BUONO)

Scenari		Numero dei parametri e relativa classe di qualità	Parametri			
			$ 100 - \%O.D._{sat} $ [-]	N-NH ₄ ⁺ [mg/L]	N-NO ₃ ⁻ [mg/L]	P _{TOT} [µg/L]
ELEVATO	Scenario 1 elevato LIM _{eco ARPA} > 0,875	4 elevato	10	0,023	0,45	37,5
	Scenario 2 elevato 0,75 ≤ LIM _{eco ARPA} ≤ 0,875	3 elevato + 1 buono	10	0,023	0,9	37,5
	Scenario 3 elevato 0,66 ≤ LIM _{eco ARPA} < 0,75	2 elevato + 2 buono	10	0,045	0,9	37,5
BUONO	Scenario 1 buono 0,59 ≤ LIM _{eco ARPA} < 0,66	1 elevato + 3 buono	10	0,045	0,9	75,0
		2 elevato + 2 sufficiente	10	0,090	1,8	37,5
	Scenario 2 buono 0,53 ≤ LIM _{eco ARPA} < 0,59	2 elevato + 2 scarso	10	0,180	3,6	37,5
		1 elevato + 2 buono + 1 sufficiente	10	0,045	1,8	75,0
	Scenario 3 buono 0,50 ≤ LIM _{eco ARPA} < 0,53	4 buono	15	0,045	0,9	75,0
		1 elevato + 1 buono + 2 sufficiente	10	0,090	1,8	75,0

dard” per le classi di qualità inferiori a BUONO, poiché il metodo proposto prevede che, nel caso in cui a monte o a valle dello scarico dell’effluente depurato lo stato di qualità del corpo idrico (calcolando il LIM_{eco}) sia inferiore all’obiettivo minimo (BUONO), si assuma lo stato BUONO a monte dello scarico, essendo questo il target minimo da perseguire secondo quanto prescritto dalle direttive europee.

Nella Tabella 2 sono riportati i dati standard di qualità per le classi di qualità ELEVATO e BUONO, sulla base del LIM_{eco} desunto, laddove possibile, dalle misure effettuate da ARPA (LIM_{eco ARPA}). Rispetto al livello di qualità ELEVATO, per ottenere un LIM_{eco} nella classe di qualità BUONO sono possibili molte più combinazioni di valori dei parametri macrodescrittori; pertanto, sono state previste due alternative per ciascuno scenario. Nella Tabella 2 sono evidenziate (in grigio) le alternative che, a giudizio degli scriventi, sono preferibili, ovvero più idonee a rappresentare una situazione generica più vicina alle condizioni reali dei corsi d’acqua lombardi.

Si fa presente che le concentrazioni inserite delle forme azotate e del fosforo totale rappresentano il 75% delle concentrazioni massime di tali parametri corrispondenti ai diversi livelli per il calcolo del LIM_{eco}. Tra le infinite possibilità di valori utilizzabili, è stato scelto di adottare il 75% delle concentrazioni massime nelle diverse classi del LIM_{eco} in modo tale da mantenersi in una “posizione baricentrica” tra i valori limite relativi alle due classi

adiacenti. Ad esempio la concentrazione di azoto nitrico pari a 0,9 mg/L corrisponde al 75% della massima concentrazione riferita al livello 2 – buono, pari ad 1,2 mg/L (si veda la Tabella 1). Il valore ottenuto adottando il 75% è pari alla media tra la concentrazione limite relativa al livello 1 – elevato (0,6 mg/L) e quella relativa al livello 2 – buono (1,2 mg/L).

2.2. Caratteristiche dello scarico del depuratore

Per quanto riguarda le caratteristiche qualitative degli scarichi dei depuratori, per valutare il loro impatto sui corpi idrici recettori sono stati definiti (Tabella 3) valori “attesi” di concentrazione per gli inquinanti utilizzati nel calcolo del LIM_{eco}, ad eccezione del parametro $|100 - \%O.D._{sat}|$ per il quale non è possibile effettuare un bilancio di massa.

Tali valori rappresentano concentrazioni medie che ragionevolmente ci si può attendere nell’effluente di un impianto in funzione della classe di potenzialità dello stesso (ovvero dei limiti da rispettare). Non sono pertanto da considerare come limiti allo scarico, bensì rappresentano concentrazioni da utilizzare per il bilancio di massa (come si vedrà successivamente) nella metodologia proposta.

Come si vede dalla Tabella 3, in aggiunta alle classi di potenzialità previste dal R.R. n. 6/2019 (si ricorda che, per una esemplificazione del metodo proposto, si

Tabella 3. Concentrazioni “attese” per l’effluente depurato in funzione della dimensione dell’agglomerato servito.

Parametro	Carico generato nell’agglomerato [AE]				
	≥ 2.000 < 10.000	≥ 10.000 < 50.000	≥ 50.000 < 100.000	≥ 100.000	≥ 100.000 PLUS
N-NH ₄ ⁺ [mg/L]	1	0,5	0,5	0,5	0,5
N-NO ₃ ⁻ [mg/L]	18	12	12	7,5	4,0
P _{TOT} [mg/L]	2,5	1,8	0,9	0,9	0,45

Tabella 4. Schema logico per la valutazione dell'effetto di uno scarico depurato in un corpo idrico.

Dati disponibili [^]	Dati da utilizzare	LIM _{eco} a valle	Verifica	Azione
LIM _{eco} ARPA a monte = ELEVATO	Concentrazioni a monte misurate da ARPA (media triennio)	ELEVATO	Calcolo di $Q_{min,f}$ Calcolo di k Confronto di k con k^*	Se $k \geq k^* \rightarrow$ nessun intervento Se $k < k^* \rightarrow$ adozione di opportuni interventi ^{^^}
	Concentrazioni a monte "standard" (vedi Tabella 2 – ELEVATO)			
LIM _{eco} ARPA a valle = ELEVATO	Concentrazioni a valle misurate da ARPA (media triennio)	-		
	Concentrazioni a valle "standard" (vedi Tabella 2 – ELEVATO)			
LIM _{eco} ARPA a monte = ELEVATO	Concentrazioni a monte misurate da ARPA (media triennio)	BUONO o SUFFICIENTE o SCARSO o CATTIVO	-	Adozione di opportuni interventi ^{^^}
	Concentrazioni a monte "standard" (vedi Tabella 2 – ELEVATO)			
LIM _{eco} ARPA a monte = BUONO	Concentrazioni a monte misurate da ARPA (media triennio)	BUONO	Calcolo di $Q_{min,f}$ Calcolo di k Confronto di k con k^*	Se $k \geq k^* \rightarrow$ nessun intervento Se $k < k^* \rightarrow$ adozione di opportuni interventi ^{^^}
	Concentrazioni a monte "standard" (vedi Tabella 2 – BUONO)			
Nessun dato di LIM _{eco} prossimo allo scarico	Concentrazioni a monte "standard" (vedi Tabella 2 – BUONO, Scenario 2 preferibile)			
LIM _{eco} ARPA a valle = BUONO	Concentrazioni a valle misurate da ARPA (media triennio)	-		
	Concentrazioni a valle "standard" (vedi Tabella 2 – BUONO)			
LIM _{eco} ARPA a monte = BUONO	Concentrazioni a monte misurate da ARPA (media triennio)	SUFFICIENTE o SCARSO o CATTIVO	-	Adozione di opportuni interventi ^{^^}
	Concentrazioni a monte "standard" (vedi Tabella 2 – BUONO)			
Nessun dato di LIM _{eco} ARPA prossimo allo scarico	Concentrazioni a monte "standard" (vedi Tabella 2 – BUONO, Scenario 2 preferibile)			
LIM _{eco} ARPA a monte o a valle = SUFFICIENTE o SCARSO o CATTIVO	IPOTESI DI STATO BUONO Concentrazioni a monte "standard" (vedi Tabella 2 – BUONO, Scenario 2 preferibile)	BUONO	Calcolo di $Q_{min,f}$ Calcolo di k Confronto di k con k^*	Se $k \geq k^* \rightarrow$ nessun intervento Se $k < k^* \rightarrow$ adozione di opportuni interventi ^{^^}
		SUFFICIENTE o SCARSO o CATTIVO	-	Adozione di opportuni interventi ^{^^}

LIM_{eco} ARPA: valore del LIM_{eco} desunto dalle misure effettuate da ARPA. LIM_{eco} a valle: valore del LIM_{eco} calcolato a valle dello scarico del depuratore mediante il bilancio di massa. $Q_{min,f}$: portata minima del fiume che garantisce il mantenimento dello stato di qualità attuale. $Q_{eff,f}$: portata effettiva del fiume. k : $Q_{eff,f}/Q_{min,f}$. k^* : fattore di sicurezza pari ad 1,25.

[^] Si intende che la sezione di monitoraggio ARPA è sufficientemente prossima al punto di scarico del depuratore e quindi rappresentativa della situazione a monte (senza interferenze) oppure a valle (considerando che sia avvenuta la miscelazione dell'effluente depurato con il corpo idrico).

^{^^} Nella procedura proposta si valutano i benefici raggiungibili mediante ipotetica applicazione di limiti allo scarico più restrittivi, in particolare ipotizzando l'adozione di quelli della classe superiore di potenzialità e, per la classe di potenzialità ≥ 100.000 AE, i limiti della Direttiva UE 2024/3019.

è considerato il caso di studio della Regione Lombardia), è stata introdotta la categoria "≥ 100.000 PLUS", dove i valori "attesi" sono stati definiti in funzione dei limiti allo scarico presenti nella Direttiva Europea 2024/3019 di futuro recepimento.

Nella metodologia proposta, analogamente alle caratteristiche qualitative dei corpi idrici recettori, nel caso in cui siano disponibili misure frequenti e rappresentative della qualità media degli scarichi dei depuratori, si possono utilizzare tali dati.

In merito alle caratteristiche quantitative, anche in questo caso, come per i corpi idrici, per la determinazi-

one della portata dell'effluente scaricato non si può prescindere da misure. Tuttavia, a differenza dei corpi idrici, questo dato è di immediato reperimento e di facile misurazione o stima.

2.3. Calcolo dello stato di qualità del corpo ricettore

Nella Tabella 4 sono riassunti i passi da seguire per l'applicazione della metodologia di calcolo proposta. In particolare, vengono riportate tutte le situazioni riscontrabili e, per ciascuna di esse, le operazioni da eseguire per valutare l'impatto dello scarico del depura-

Tabella 5. Casi studio analizzati (n.d.: informazione non disponibile).

	WWTP#1	WWTP#2
Potenzialità [AE]	40.800	9.488
Carico servito [AE]	33.811	5.409
Portata scaricata – media 2020-2022 [m ³ /s]	0,102	0,024
Stazione di monitoraggio ARPA a monte	1,2 km a monte dello scarico	1,3 km a monte dello scarico
Stazione di monitoraggio ARPA a valle	400 m a valle dello scarico	n.d.

tore sul corpo idrico (mediante un bilancio di massa sui macrodescrittori utilizzati nel LIM_{eco}), evidenziando infine la eventuale necessità di mettere in atto opportuni interventi migliorativi (qualora ne sussista la sostenibilità).

Si è considerato cautelativo, per il mantenimento della classe di qualità BUONO o ELEVATO, assumere un determinato fattore di sicurezza, ovvero garantire lo stato di qualità anche nell'ipotesi di riduzione della portata del corso d'acqua di 1,25 volte (k^* nella Tabella 4) rispetto alla portata attuale. Il fattore di sicurezza di 1,25 è stato introdotto con finalità cautelative per tenere conto della possibile riduzione della portata disponibile per la dispersione rispetto alle condizioni assunte nelle simulazioni. Tale scelta non deriva dalla stima di una specifica riduzione media delle portate osservata a scala regionale, ma rappresenta un margine prudenziale volto a considerare la naturale variabilità idrologica dei corsi d'acqua e le possibili condizioni di magra che possono verificarsi durante la vita utile dell'impianto. Questo coefficiente è naturalmente adattabile caso per caso se si ritiene di simulare condizioni molto più gravose di quelle medie.

3. Esempi di applicazione della metodologia

A titolo di esempio, la metodologia sopra descritta è stata applicata a due casi studio i cui elementi principali sono riportati nella Tabella 5.

I casi studio riportati nel seguito hanno finalità esclusivamente illustrative e sono stati selezionati per mo-

strare l'applicazione della metodologia in differenti condizioni operative. Essi non rappresentano un'applicazione sistematica della procedura all'intero territorio regionale, ma esempi utili a evidenziarne le modalità di utilizzo.

3.1. WWTP#1

Dati disponibili

Dai dati ARPA risulta che il LIM_{eco} del corpo idrico a monte dello scarico è pari a 0,617, corrispondente ad uno stato di qualità BUONO.

Dati da utilizzare

Caratteristiche del corpo idrico recettore:

- qualità: dati “standard” da Tabella 2 – scenario 1 buono (sulla base del LIM_{eco} ARPA è stato selezionato lo scenario 1, alternativa preferibile);
- portata: 0,258 m³/s (dai dati ARPA – valore medio 2020-2022).

Caratteristiche dello scarico del depuratore:

- qualità: valori “attesi” standard da Tabella 3 (colonna 10.000 AE ≤ P < 50.000 AE);
- portata: 0,102 m³/s (dati ARPA – valore medio 2020-2022).

Calcolo del LIM_{eco} a valle dello scarico

Dal bilancio di massa sui tre parametri considerati (azoto ammoniacale, azoto nitrico e fosforo totale) si possono calcolare i carichi di inquinanti nel corpo idrico a valle dello scarico del depuratore e, sulla ba-

Tabella 6. Caso WWTP#1: risultati (n.d.: non disponibile).

Parametro		Valore		
		Corpo idrico recettore a monte dello scarico	Scarico WWTP#1	Corpo idrico recettore a valle dello scarico
Portata	[m ³ /s]	0,258	0,102	0,360
100 – %OD _{5sat}	[-]	10	n.d.	10*
N-NH ₄ ⁺	[mg/L]	0,045	0,50	0,174
N-NO ₃ ⁻	[mg/L]	0,900	12,00	4,045
P _{TOT}	[mg/L]	0,075	1,80	0,564
N-NH ₄ ⁺	[kg/d]	1	4	5
N-NO ₃ ⁻	[kg/d]	20	106	126
P _{TOT}	[kg/d]	2	16	18
LIM _{eco}	[-]			0,313 - SCARSO

* Ipotesi: come a monte dello scarico

se della portata complessiva (somma della portata del corpo idrico e dello scarico), le loro concentrazioni (Tabella 6).

Sulla base di tali concentrazioni, è possibile calcolare il LIM_{eco} a valle dello scarico: lo stato di qualità è SCARSO.

Verifica

In questo caso, sulla base degli esiti ottenuti, non è prevista la fase di verifica.

Azione

In base a quanto riportato nella Tabella 4, è necessaria l'adozione di opportuni interventi.

A titolo di esempio, è stato simulato l'effetto dell'adozione di limiti più restrittivi, ovvero quelli della classe superiore di potenzialità (colonna $50.000 AE \leq P < 100.000 AE$) sullo stato di qualità del corpo idrico recettore. In questo caso, nella definizione dei nuovi limiti l'unico parametro che cambia (dei tre considerati nel calcolo del LIM_{eco}) è il fosforo totale, il cui limite passa da 2 a 1 mg/L. Le concentrazioni "attese" dello scarico del depuratore varieranno; in particolare saranno:

- $N-NH_4^+ = 0,5 \text{ mg/L}$
- $N-NO_3^- = 12,0 \text{ mg/L}$
- $P_{TOT} = 0,9 \text{ mg/L}$

Sempre dal bilancio di massa, si possono calcolare i carichi di inquinanti nel corpo idrico a valle dello scarico del depuratore e, sulla base della portata complessiva (somma della portata del corpo idrico e dello scarico), le loro concentrazioni e, pertanto, il LIM_{eco} a valle dello scarico. Esso risulta 0,344, corrispondente ad uno stato di qualità SUFFICIENTE.

In definitiva, l'adozione di limiti più restrittivi (intervento simulato per questo impianto) consente di migliorare di una classe lo stato di qualità del corpo

idrico a valle dello scarico, che, comunque non riesce a raggiungere il livello minimo di BUONO. In questo caso il fattore critico è rappresentato da un insufficiente fattore di dispersione (FD) calcolato come rapporto tra la portata del corpo idrico recettore e quella dello scarico del depuratore, in analogia a quanto proposto dalle linee guida redatte da Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, ISPRA, CNR-IRSA, ISS (2023). Per il raggiungimento dello stato di qualità BUONO sarebbe richiesta un'ulteriore drastica (e di fatto irrealizzabile) riduzione dei limiti allo scarico.

3.2. WWTP#2

Dati disponibili

Dai dati ARPA risulta che il LIM_{eco} del corpo idrico a monte dello scarico è pari a 0,198, corrispondente ad uno stato di qualità SCARSO. Sulla base di quanto riportato nella Tabella 4, si ipotizza che lo stato di qualità del corpo idrico a monte dello scarico sia BUONO per le motivazioni esplicitate nel § 2 "approccio metodologico".

Dati da utilizzare

Caratteristiche del corpo idrico recettore:

- qualità: dati "standard" da Tabella 2 – buono (scenario 2, alternativa preferibile);
- portata: $24,611 \text{ m}^3/\text{s}$ (dai dati ARPA – valore medio 2020-2022).

Caratteristiche dello scarico del depuratore:

- qualità: valori "attesi" standard da Tabella 3 (colonna $2.000 AE \leq P < 10.000 AE$);
- portata: $0,024 \text{ m}^3/\text{s}$ (dati ARPA – valore medio 2020-2022).

Calcolo del LIM_{eco} a valle dello scarico

Analogamente a quanto esposto per il caso precedente, dal bilancio di massa sui tre parametri consi-

Tabella 7. Caso WWTP#2: risultati (n.d.: non disponibile).

Parametro		Valore		
		Corpo idrico recettore a monte dello scarico	Scarico WWTP#1	Corpo idrico recettore a valle dello scarico
Portata	[m ³ /s]	24,611	0,024	24,635
100 – %O ₂ D _{sat}	[-]	10	n.d.	10*
N-NH ₄ ⁺	[mg/L]	0,045	1,00	0,046
N-NO ₃ ⁻	[mg/L]	1,800	18,00	1,816
P _{TOT}	[mg/L]	0,075	2,50	0,077
N-NH ₄ ⁺	[kg/d]	96	2	98
N-NO ₃ ⁻	[kg/d]	3.828	38	3.866
P _{TOT}	[kg/d]	159	5	164
LIM_{eco}	[-]			0,563 - BUONO

* Ipotesi: come a monte dello scarico

derati (azoto ammoniacale, azoto nitrico e fosforo totale) si possono calcolare i carichi di inquinanti e le concentrazioni nel corpo idrico a valle dello scarico del depuratore (Tabella 7).

È possibile calcolare il LIM_{eco} a valle dello scarico: lo stato di qualità è BUONO.

Verifica

In base a quanto riportato nella Tabella 4, è stata calcolata la portata minima del fiume che garantisce il mantenimento dello stato attuale ($Q_{min,f}$). Pertanto è stata diminuita iterativamente la portata del fiume fino a raggiungere il valore che consente di mantenere lo stato di qualità BUONO: essa risulta pari a $1,516 \text{ m}^3/\text{s}$.

È stato successivamente calcolato il rapporto $k = Q_{eff,f}/Q_{min,f}$ dove $Q_{eff,f}$ è la portata effettiva del corpo idrico. Risulta: $k = 24,6 \text{ m}^3/\text{s} / 1,516 \text{ m}^3/\text{s} = 16,2$.

Azione

Sulla base dei risultati ottenuti al punto precedente, k risulta superiore a k^* .

Lo scarico del depuratore nel corpo idrico è in grado di mantenere lo stato di qualità BUONO con un adeguato margine di sicurezza ($k \geq k^*$). Non è pertanto necessario prevedere alcun intervento.

4. Sintesi

Come si è visto anche dagli esempi sopra riportati, il fattore di dispersione (FD), ovvero il rapporto tra portata del corpo idrico recettore e portata dello scarico dell'impianto, è il parametro chiave per la stima dell'impatto degli scarichi sui corpi idrici recettori.

Nell'ottica di semplificare la metodologia proposta e consentire agli Enti preposti di effettuare una rapida valutazione dell'effetto dello scarico di un depuratore sulla qualità del corpo idrico recettore, in sede di pianificazione o di valutazione preliminare di alternative di intervento, è stato elaborato un grafico (Figura 2), dove è riportato il fattore di dispersione (incrementato di un opportuno coefficiente di sicurezza k^* in coerenza con il metodo di valutazione descritto in precedenza) necessario per mantenere lo stato di qualità (ELEVATO oppure BUONO) in funzione dei limiti autorizzati (a loro volta determinati dalla classe di dimensione dell'agglomerato, secondo il regolamento attualmente vigente in Lombardia).

A titolo di esempio, per un impianto di depurazione a servizio di un agglomerato da 30.000 AE, se il fattore di dispersione FD fosse pari a 100:

- si riuscirebbe a mantenere lo stato di qualità BUONO, a valle dello scarico, partendo da uno stato BUONO a monte;
- non si riuscirebbe a mantenere lo stato di qualità ELEVATO, partendo dallo stato ELEVATO a monte; in questo caso si dovrebbero adottare opportuni interventi. Se, a titolo di esempio, si ipotizzasse di adottare i limiti allo scarico della classe di potenzialità superiore ($50.000 \text{ AE} \leq P < 100.000 \text{ AE}$), si riuscirebbe (ovviamente con il medesimo FD) a mantenere il corso d'acqua nello stato di qualità ELEVATO.

Poiché, sia per lo stato di qualità ELEVATO che per lo stato BUONO, sono possibili diversi scenari (correlati a differenti combinazioni delle concentrazioni dei parametri che portano al calcolo del LIM_{eco}), nella Figura

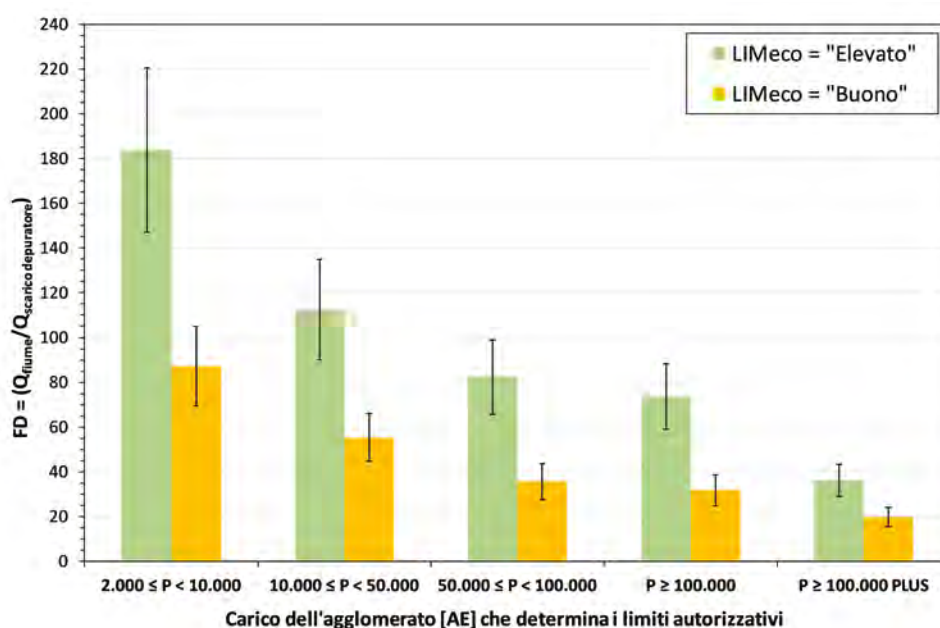


Figura 2. Fattore di dispersione dello scarico (FD) per il mantenimento della classe di qualità a valle dello scarico (con adeguato margine di sicurezza), in funzione dei limiti autorizzati.

2 sono state riportate opportune deviazioni ($\pm 25\%$) dai valori medi. In altre parole, il fattore di dispersione necessario può variare a seconda delle concentrazioni effettive dei macrodescrittori misurate nel corso d'acqua: le barre di errore rappresentano questo tipo di variabilità includendo un'elevata gamma di scenari plausibili.

Il fattore di dispersione dipende direttamente dalle portate del corpo idrico recettore. Nel presente lavoro, nei casi di studio riportati, sono stati utilizzati i dati disponibili relativi al periodo 2020-2022, coerenti con il periodo di riferimento delle informazioni qualitative impiegate nell'analisi. Sebbene tale scelta consenta di mantenere omogenea la base dati utilizzata, essa non rappresenta necessariamente l'intera variabilità idrologica dei corsi d'acqua, che può risultare influenzata da oscillazioni climatiche e dalla crescente frequenza di eventi estremi. Pertanto, nell'applicazione della metodologia a casi specifici è opportuno utilizzare, ove disponibili, serie di portata più estese e rappresentative delle condizioni idrologiche del bacino.

5. Conclusioni

La metodologia proposta nel seguente lavoro rappresenta uno strumento semplice ma efficace per valutare i potenziali effetti degli scarichi di depuratori municipali sui corpi idrici superficiali, in relazione agli obiettivi di qualità ambientali previsti dalla normativa vigente.

Dall'applicazione ai casi studio in Lombardia emerge chiaramente come il fattore di dispersione sia l'elemento determinante nel controllo dell'impatto degli scarichi sul corpo idrico ricettore.

L'analisi evidenzia inoltre che l'adozione di limiti allo scarico più restrittivi può migliorare lo stato del corpo idrico, ma non sempre è sufficiente a garantire il raggiungimento della classe di qualità "buono", soprattutto in presenza di condizioni idrauliche sfavorevoli. Ciò suggerisce la necessità di affiancare eventuali interventi sugli impianti a strategie più ampie di gestione del bacino.

La disponibilità di dati standard e l'impostazione semplificata rendono la metodologia facilmente applicabile anche in contesti con limitate informazioni, configurandosi come un utile supporto per le valutazioni preliminari, la pianificazione e la definizione di priorità di intervento.

Tuttavia, l'affidabilità delle simulazioni dipende dalla rappresentatività dei dati di input, in particolare delle informazioni relative alla qualità e alla portata del corpo idrico recettore. La metodologia non intende sostituire i modelli di qualità delle acque utilizzati nella pianificazione a scala di bacino, che ri-

mangono gli strumenti di riferimento per le analisi di dettaglio, ma si propone come un approccio complementare per orientare le valutazioni preliminari ed individuare i casi che possono richiedere successivi approfondimenti.

Riferimenti bibliografici

- CNR-IRSA, ISPRA, ISS, Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (2023). Linea guida per la definizione di valori limite di emissione (VLE) per le sostanze chimiche prioritarie, pericolose prioritarie e per gli inquinanti specifici.
- Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152, "Norme in materia ambientale", pubblicato nella Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n. 88 del 14 aprile 2006 – Supplemento Ordinario n. 96, e successive modifiche e integrazioni (s.m.i.).
- Direttiva (UE) 2024/3019 del Parlamento europeo e del Consiglio, relativa al trattamento delle acque reflue urbane.
- Poikane S., Kelly M.G., Herrero E.S., Pitt J.-A., Jarvie H.P., Claussen U., Leujak W., Solheim A.L., Teixeira H., Phillips G. (2019). Nutrient criteria for surface waters under the European Water Framework Directive: Current state-of-the-art, challenges and future outlook. *Science of the Total Environment*, 695, 133888. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133888
- Regione Lombardia, Regolamento Regionale 29 marzo 2019, n. 6. "Disciplina e regimi amministrativi degli scarichi di acque reflue domestiche e di acque reflue urbane, disciplina dei controlli degli scarichi e delle modalità di approvazione dei progetti degli impianti di trattamento delle acque reflue urbane". Bollettino Ufficiale della Regione Lombardia (BURL), Supplemento n. 14 del 2 aprile 2019.
- van de Bund W., Poikane S. (2015). Water Framework Directive scientific and technical support related to ecological status – Summary report of JRC activities in 2015. EUR 27707 EN. doi:10.2788/071200

Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato finanziato da PoliS-Lombardia – Istituto regionale per il supporto alle politiche della Lombardia, nell'ambito della Convenzione attuativa per approfondimenti coordinati in materia di "Stima dei carichi inquinanti di origine industriale nelle acque reflue urbane" – cod. 210416STA. Si ringrazia la Struttura Pianificazione e Tutela Risorsa Idrica, Gestione Canoni Acque Pubbliche di Regione Lombardia per la collaborazione alle attività di ricerca.



INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2026 è sostenuta da:



A Tsurumi Pump Company

