UNIONE EUROPEA
Fondo Sociale Europeo
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Ministero dell'Università e della Ricerca

PON RICERCA E INNOVAZIONE 2014 - 2020

OR5: Modelli e tool per la valutazione della sostenibilità degli interventi

Responsabile: Alessandra Bonoli, DICAM, Università di Bologna

Azione II.2 – Cluster tecnologici D.D. prot.1735 del 13 Luglio 2017
"Avviso per la presentazione di Progetti di Ricerca Industriale e Sviluppo Sperimentale nelle 12 aree di Specializzazione individuate dal PNR 2015-2020"
Progetto ARS01_01080: L'efficientamento energetico del Servizio Idrico Integrato - WATERGY

UNIONE EUROPEA
Fondo Sociale Europeo
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Ministero dell'Università e della Ricerca

PON RICERCA E INNOVAZIONE 2014 - 2020

attività 5.1 Identificazione delle metriche e degli strumenti di analisi

attività 5.2 Sviluppo e applicazione degli strumenti di analisi

attività 5.3 Calcolo delle metriche per la valutazione di sostenibilità degli interventi

UNIONE EUROPEA
Fondo Sociale Europeo
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Ministero dell'Università e della Ricerca

PON RICERCA E INNOVAZIONE 2014 - 2020

Attività 5.1 Identificazione delle metriche e degli strumenti di analisi

Attività 5.1 Identificazione delle metriche e degli strumenti di analisi

In questa attività è stata svolta una prima **revisione di letteratura**, attraverso la consultazione di articoli e riviste scientifiche, report nazionali ed europei, tesi di laurea, al fine di identificare le principali metriche esistenti per le analisi e le valutazioni di impatto ambientale.

gli strumenti maggiormente utilizzati sono: **Life Cycle Assessment (LCA), Life Cycle Costing (LCC), Social Life Cycle Assessment (SLCA), Life Cycle Sustainable Assessment (LCSA), Cost-Benefit Analysis (CBA), Material Flow Analysis (MFA), Substance Flow Analysis (SFA), KPI specifici di natura ambientale** (es. Carbon Footprint e Water Footprint).

Inoltre, l'utilizzo di questo tipo di strumenti oggettivi e scientifici, in ottemperanza alle norme ISO 14040 – 14044 (LCA – Life Cycle Assessment), ISO 14067 (CFP – Carbon Footprint), ISO 14046 (WFP – Water Footprint), permette alle imprese o enti di ottenere **certificazioni** (ambientali di prodotto o servizio, di valutazione della propria impronta climatica), comunicando così il loro impegno attivo alla transizione ecologica e contributo all'attuazione degli obiettivi sostenibili e dei target fissati dall'Agenda ONU 2030

METODOLOGIA LCA
LCA è uno strumento metodologico finalizzato alla **valutazione delle performance ambientali di un prodotto, servizio o organizzazione**

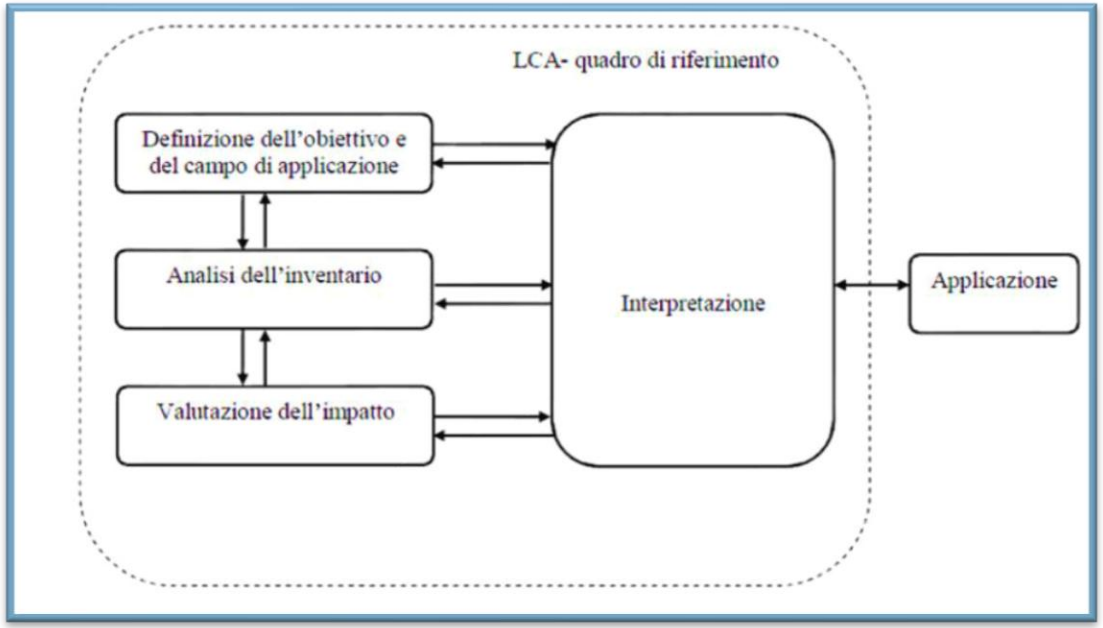
"processo che permette di valutare gli impatti ambientali associati ad un prodotto, un processo o un'attività, attraverso l'identificazione e la quantificazione dei consumi di materia, energia ed emissioni nell'ambiente e l'identificazione e la valutazione delle opportunità per diminuire questi impatti. La valutazione include l'intero ciclo di vita del processo o attività comprendendo l'estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale (SETAC, 1993)".

del **confronto/comparazione** tra due o più prodotti/ servizi / metodi alternativi, con l'obiettivo di far emergere i punti deboli presenti lungo le catene produttive, di migliorare le qualità ambientali, di promuovere prodotti o processi ecologici, di comparare approcci alternativi e dare fondamento alle azioni suggerite.

L'approccio di ciclo di vita è ormai considerato centrale per il tema della sostenibilità
E' un elemento di qualificazione in tutti i campi dove è richiesto una valutazione della sostenibilità (eco-innovazione, scelte strategiche, progetti di ricerca e tecnologie, ecc.).
L'approccio che sta alla base del LCA è noto come "**Life Cycle Thinking**" (LCT) ed ha ispirato l'organismo di supporto alle politiche europee "Joint Research Centre - JRC" nell'elaborazione dell'International Reference Life Cycle Data System (ILCD) al fine di indirizzare esperti ed operatori nel campo dell'LCA.

Sviluppo studio Life Cycle Assessment

L'analisi LCA segue le fasi iterative fissate dagli standard (UNI EN ISO 14040:2006 e UNI EN ISO 14044:2006)



Funzioni di sistema: rappresentano le caratteristiche e le prestazioni che il prodotto/processo in esame deve possedere.
• **Unità funzionale** (UF): quell'unità di riferimento complessa che quantifica la performance di un prodotto/servizio e a cui riferire tutti i flussi materiali ed energetici in entrata ed in uscita. Risulta fondamentale e necessaria per garantire la comparabilità dei risultati di diversi sistemi analizzati.
• **Confini del sistema**: criteri geografici, tecnologici, economici, ecc., che delimitano l'ampiezza dell'analisi di studio e includono le unità di processo che si vuole considerare.
• **Metodi di allocazione e qualità dei dati utilizzati**: i criteri di distinzione/distribuzione dei flussi in entrata e in uscita, qualora ci siano più prodotti riferiti allo stesso processo

Raccolta dati

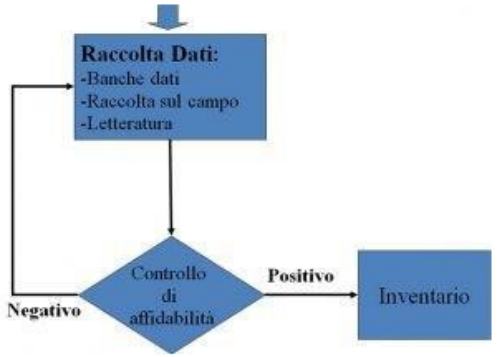
La raccolta dati rappresenta una criticità degli studi di LCA in quanto espressione di una manifestazione di soggettività da parte di chi conduce lo studio, il quale si trova per cause di forza maggiore ad effettuare delle scelte difficilmente riscontrabili e analizzabili con criteri oggettivi.

A tal proposito le raccomandazioni delle norme ISO e dei testi rivolti agli esperti convergono verso la necessità di reperire dati "primari", cioè informazioni di qualità elevata derivanti da rilevazioni dirette.

Valutazione dell'impatto del ciclo di vita

Lo scopo di questa terza fase "Life Cycle Impact Assessment (LCIA)" è la quantificazione dell'impatto potenziale che il sistema analizzato crea sull'ambiente. Essa risulta strettamente correlata con la fase finale di interpretazione dei risultati, e può portare a generare delle modifiche/miglioramenti degli obiettivi e scopi del progetto (UNI EN ISO 14040:2006).

Scelta delle categorie di impatto (UNI EN ISO 14040:2006)



Interpretazione dei risultati e soluzioni di miglioramento

I risultati dell'LCA sono utili per (UNI EN ISO 14040:2006):

- descrivere l'impatto ambientale complessivo di un prodotto;
- confrontare gli impatti ambientali di prodotti differenti aventi la stessa funzione;
- identificare lo stadio del ciclo di vita di un prodotto con un maggiore impatto dal punto di vista ambientale;
- supportare la progettazione di nuovi prodotti o servizi;
- indicare le strategie da adottare per un miglioramento ambientale.

UNIONE EUROPEA
Fondo Sociale Europeo
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

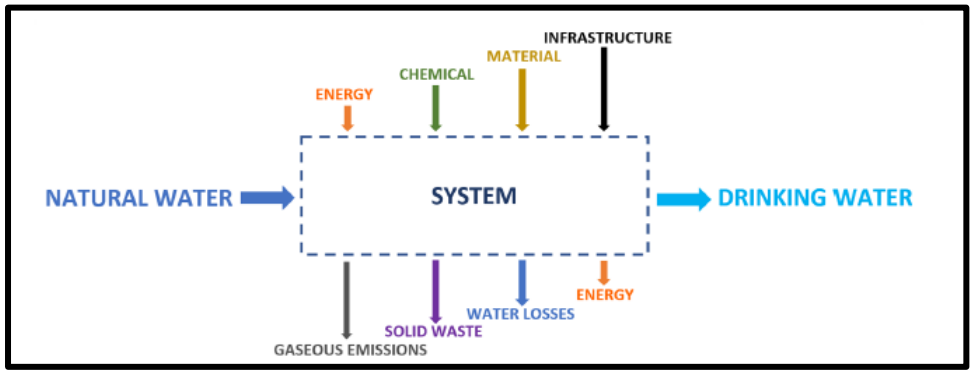
Ministero dell'Università e della Ricerca

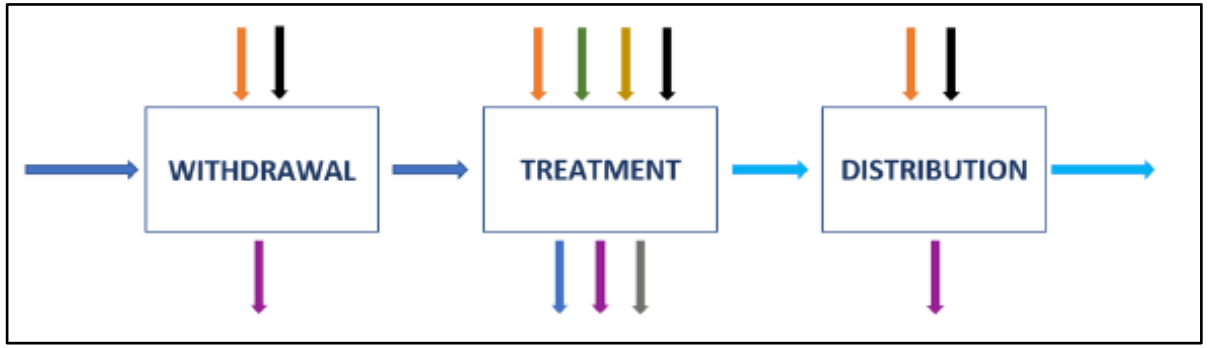
PON RICERCA E INNOVAZIONE 2014 - 2020

attività 5.2 Sviluppo e applicazione degli strumenti di analisi

la sostenibilità nella gestione della risorsa idrica passa attraverso valutazioni quantitative e modellazioni.
La valutazione degli impatti ambientali delle diverse alternative di produzione, trattamento e distribuzione dell'acqua può supportare i decisori e le comunità locali nella pianificazione della gestione delle risorse idriche al fine di ottimizzare un accesso affidabile e a lungo termine

Rappresentazione degli input e output di un sistema idrico integrato e rappresentazione sequenziale dei tre step principali di un sistema idrico





Fonte: Arfelli et al. (2022).

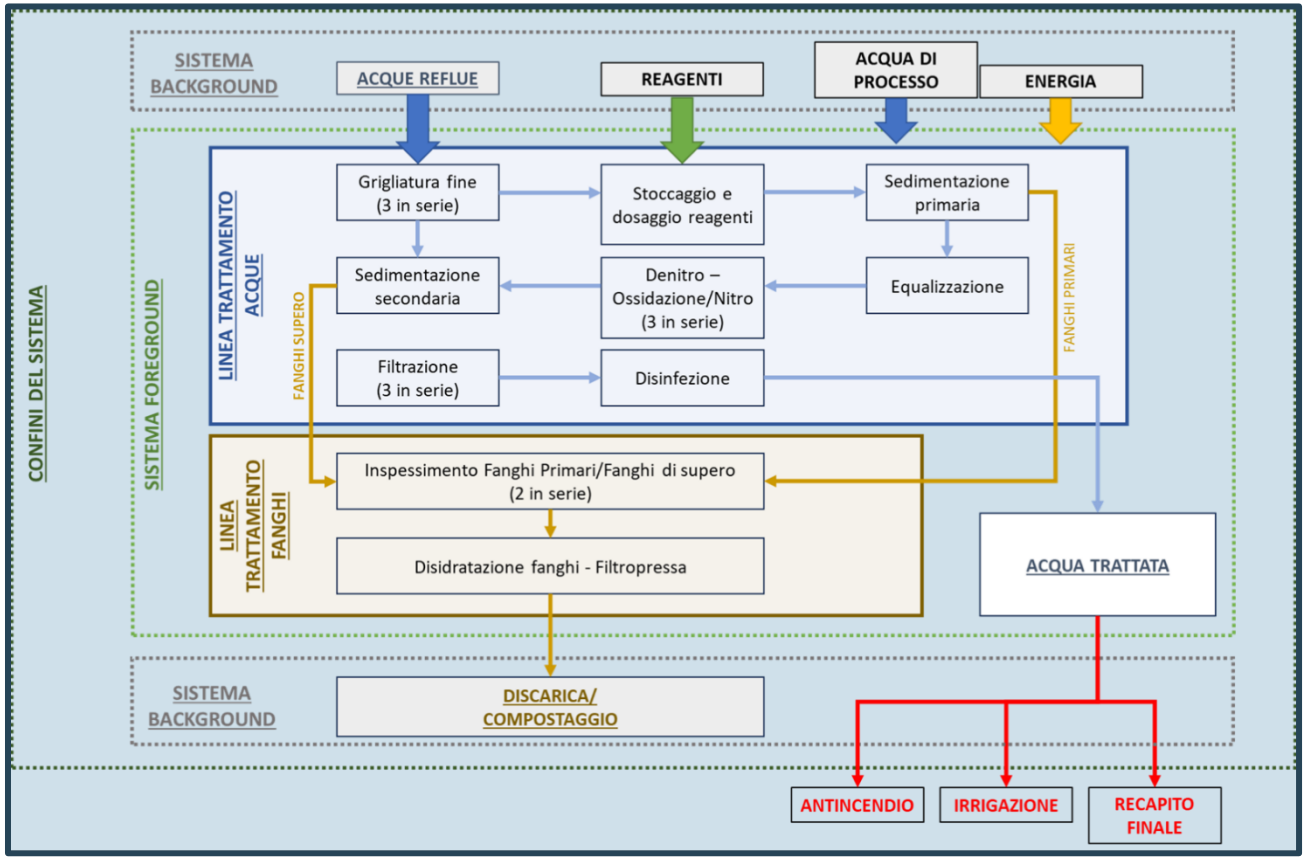
AMBITO SISTEMA DI DEPURAZIONE

Per quanto riguarda l'ambito dei **sistemi di depurazione**, le metodologie più utilizzate per valutare gli impatti sull'ambiente di questi impianti sono principalmente LCA, seguito da WFP e CFP.

La metodologia LCA risulta la più utilizzata viste le sue capacità di fornire prospettive più ampie e globali, nelle quali vengono incluse gli **impatti diretti e indiretti** che caratterizzano l'attività analizzata.
Seguendo il trend di sviluppo sostenibile e economia circolare promossi dalle politiche ONU nell'Agenda 2030, anche i progetti di trattamento e depurazione delle acque reflue vedono un cambiamento di paradigma: la rimozione degli inquinanti e il raggiungimento di standard di qualità degli effluenti (riguardo a BOD, TSS, etc..) viene sostituito con un **concetto più ampio e multi-obiettivo che aggiunge il recupero delle risorse e la gestione dell'energia**.
Non si parlerà più, quindi, di semplice "impianto di depurazione acque", ma di "**sistema di recupero delle risorse**" (in particolare acqua, nutrienti ed energia).
In questo scenario, l'LCA gioca un ruolo importante come strumento di supporto decisionale per esaminare scenari futuri alternativi e pianificare nuove strategie nel settore idrico con un'attenzione particolare per la sostenibilità dei progetti
Più in generale si può affermare come, nel campo dei sistemi di trattamento e depurazione delle acque, l'utilizzo della metodologia LCA per l'analisi di valutazione ambientale può fornire:

- una conoscenza globale dell'intero sistema acque reflue, includendo elementi e dati sia a monte (approvvigionamento e distribuzione) sia a valle (smaltimento dei rifiuti, riciclo e riuso);
- un aiuto nell'identificazione degli hot-spots e dei punti deboli del sistema per l'analisi, il miglioramento e l'ottimizzazione della performance;
- informazioni su spostamenti imprevisti e indesiderati di carico all'interno dei sistemi;
- informazioni per la verifica degli obiettivi di sostenibilità idrici.

confini di sistema per un impianto di trattamento delle acque reflue (es. Impianto depurazione Potenza)



L'inclusione delle fasi di costruzione all'interno dei confini obbliga a definire, non solo i limiti geografici del sistema, ma anche quelli temporali.
La durata di vita delle infrastrutture di un impianto di trattamento delle acque reflue deve necessariamente essere definita, in modo da considerare e stimare il contributo che queste hanno sull'impatto ambientale, considerata tra i 15 e i 100 anni, ed in particolare 50 anni per le strutture in cemento, 15-25 anni per le apparecchiature, mentre per le tubazioni l'intervallo temporale risulta molto variabile, dipendendo considerevolmente dalle condizioni del suolo, dal materiale e dalle condizioni climatiche

I confini del sistema sono divisi in foreground e background.
Il foreground comprende tutte le attività di depurazione delle acque reflue, ivi compresa la fase di fine vita dei fanghi.
Il sistema di background include tutti i processi che forniscono risorse, reagenti ed energia per supportare le attività del foreground.
.

Inventario

Per gli studi di impatto ambientale relativi a sistemi di trattamento e depurazione delle acque reflue le informazioni che servono a comporre l'inventario si dividono nei seguenti gruppi di dati

1. Emissioni in aria, acqua e suolo

I principali parametri di inquinanti in acqua solitamente misurati direttamente (dati primari) sono: BOD/COD, TKN, NH4+, N03-, TSS, PO4, TP.

Emissioni dirette in aria causate dalle linee di trattamento di acque e/o fanghi, risulta più comune fare riferimento a dati secondari. I principali parametri ricercati sono: CH4, CO2, N2O, H2S.

2. Energia

3. Composti chimici

4. Materiali da costruzione

Parameters	Unit	ASP	CW	SBR	UASB
Wastewater treatment[a]					
Input from technosphere					
Electricity	kWh	0.173	0.0219	0.309	0.0329
Emissions to air					
Carbon dioxide	kg	0.197	−0.0438	0.351	0.0822
Sulphur dioxide	g	1.62	0.219	2.87	0.438
Nitrogen oxides	g	0.701	0.11	1.24	0.241
Carbon monoxide	g	0.932	0.219	1.6	0.625
Mercury	mg	0.0252	0.00329	0.0438	0.00471
Particulates	g	0.416	0.0515	0.723	0.0964
Emissions to water					
COD	kg	0.070	0.0548	0.05	0.0986
Nitrogen, total	kg	0.0329	0.0219	0.0145	0.0986
Phosphorus, total	kg	0.006	0.005	0.000997	0.00767
Heavy metals	g	2.29	1.96	0.964	2.49
Emission to soil					
Nitrogen, total	g	1.81	0.997	2.82	3.5
Phosphorus, total	g	0.449	0.252	0.707	0.877
Output to technosphere					
Sludge	kg	0.05	0.02	0.01	0.02
Sludge treatment[b]					
Input from technosphere					
Electricity	kWh	0.166	0.0975	0.235	0.0975
Heat	kWh	0.64	–	0.65	–
Truck	tkm	0.074	0.06	0.1	0.06
Polyacrylamide	kg	0.0091	0.0091	0.0091	0.0091
Lime	kg	–	0.165	–	0.165
Avoided products					
Ammonium sulfate, as N	kg	0.012	–	0.011	–
Phosphate fertilizer, as P_2O_5	kg	0.0016	–	0.0014	–
Electricity	kWh	0.7	–	0.84	0.0649
Heat	kWh	0.75	–	0.895	–
Emissions to air					
Methane, biogenic	kg	0.0089	0.024	0.0106	0.024
Carbon dioxide, biogenic	kg	0.6	0.308	0.712	0.308
Nitrogen oxides	kg	8E-5	–	0.0001	–
Dinitrogen monoxide	kg	0.00017	–	0.00016	–
Hydrogen sulphide	kg	1E-5	–	1E-5	–
Ammonia	kg	0.0007	0.014	0.00085	0.014
Emissions to water					
Phosphate	kg	0.0272	0.029	0.028	0.029
Nitrate	kg	0.3	0.262	0.264	0.262
Ammonium, ion	kg	0.058	0.06	0.058	0.06
Nitrogen dioxide	kg	0.0034	0.0036	0.0034	0.0036

[a]Functional unit is per m^3.
[b]Functional unit is per kg.

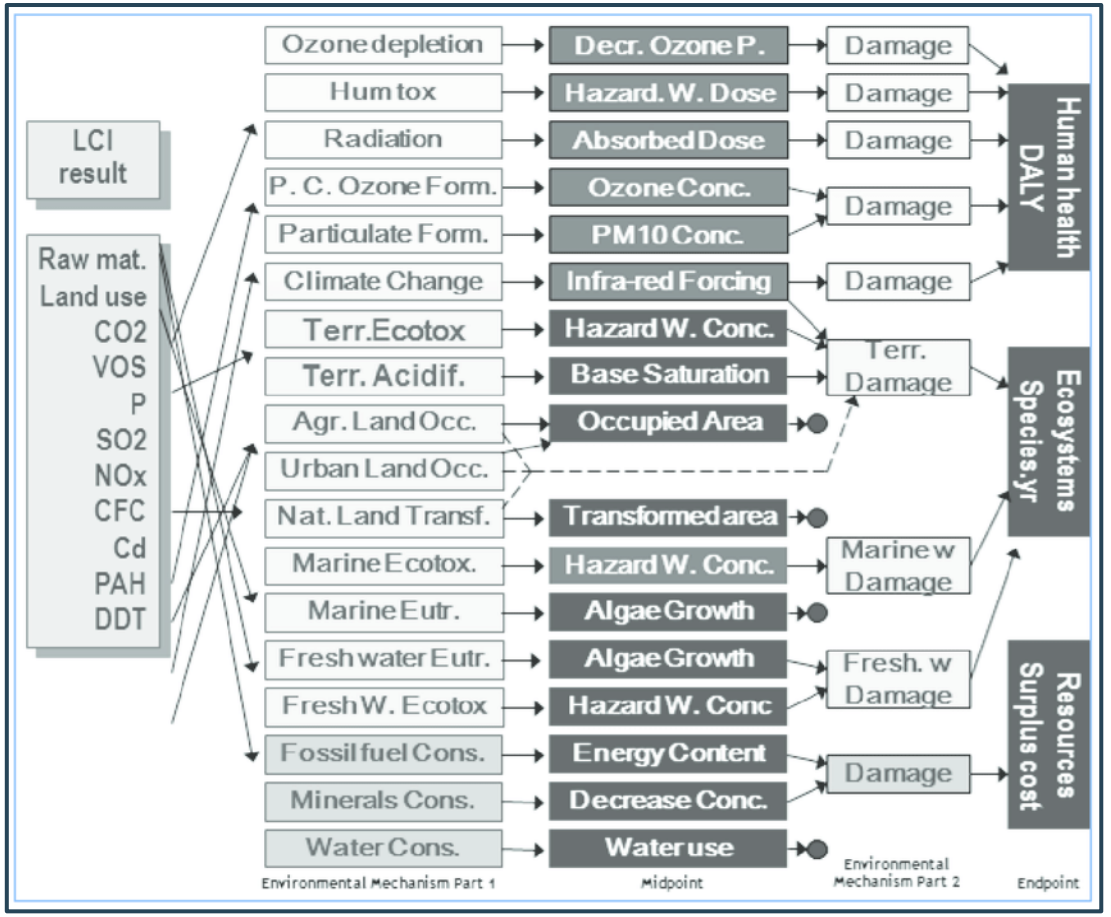
Valutazione di Impatto

Per sistemi di trattamento e depurazione delle acque reflue

Si è riscontrato come la maggior parte delle metodologie LCIA includano le seguenti categorie di impatto: cambiamento climatico, eutrofizzazione, riduzione dell'ozono, acidificazione, eco-tossicità, e tossicità per l'uomo (cancerogeno e non cancerogeno).

Altre categorie utilizzate possono essere rappresentative degli effetti sulla respirazione (es. formazione di particolato), sulla formazione di ozono (es. smog), sulla riduzione delle disponibilità di risorse (es. riduzione combustibili fossili) e sulle alterazioni del territorio (es. uso del territorio).

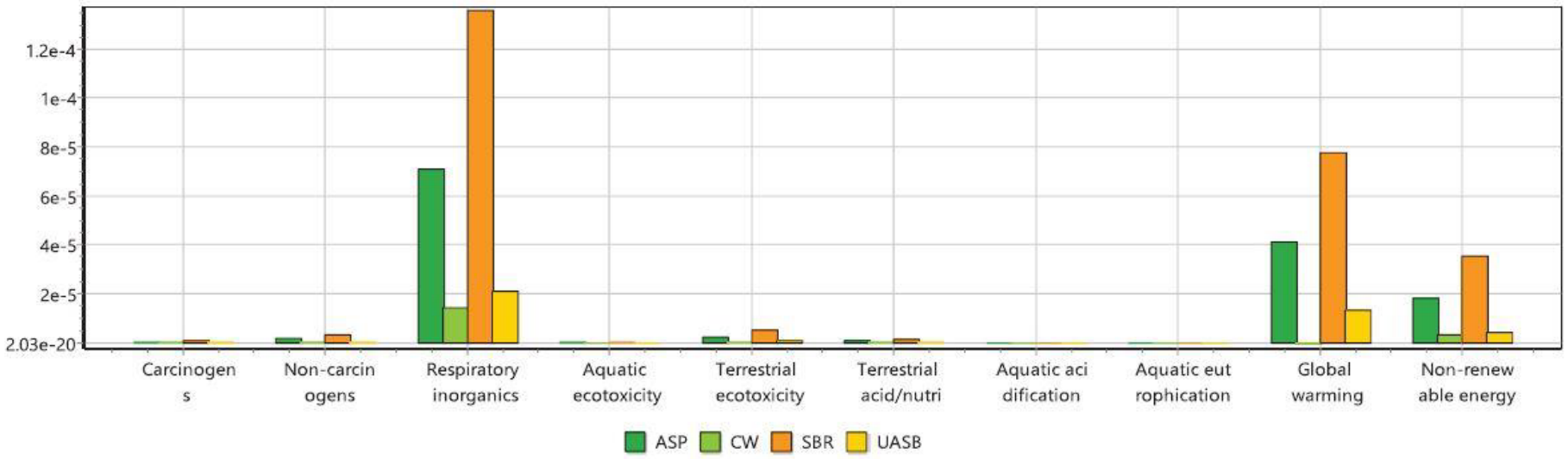
Qui la struttura della metodologia ReCiPe, che mostra come i dati dell'inventario LCI siano accorpati per il calcolo degli indicatori di mid-point (18 categorie di impatto) e di end-point (3 categorie di danno)



Risultati finali e Interpretazione

Dopo la LCIA viene eseguita la fase di elaborazione e interpretazione dei risultati, attraverso la lettura di diagrammi e grafici riassuntivi, come quelli riportati di seguito.

In figura vengono confrontati quattro diverse tipologie di trattamenti acque in termini di impatto sull'ambiente: trattamento a fanghi attivi (ASP), trattamenti fitodepurativi (CWs), trattamenti fanghi attivi con flusso discontinuo e fasi sequenziali programmate (SBR) , trattamento anaerobico dei fanghi (UASB).



UNIONE EUROPEA
Fondo Sociale Europeo
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Ministero dell'Università e della Ricerca

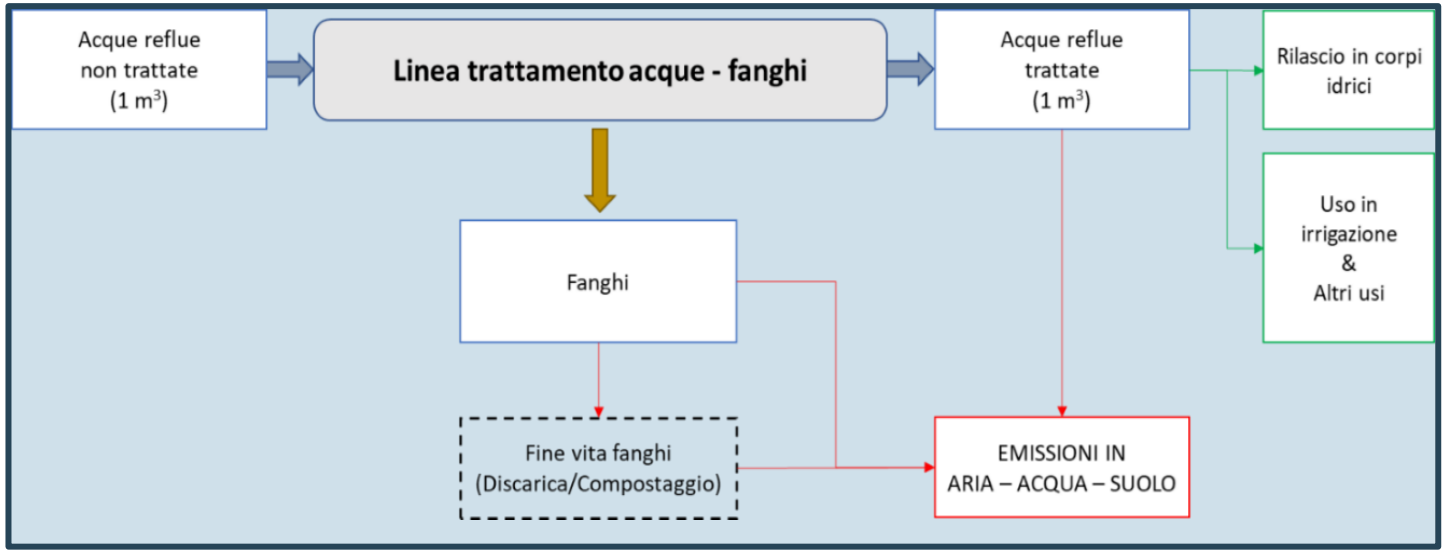
PON RICERCA E INNOVAZIONE 2014 - 2020

attività 5.3 Calcolo delle metriche per la valutazione di sostenibilità degli interventi

Nell'ambito dell'analisi delle prestazioni di Acquedotto Lucano e Acquedotto Pugliese, è stato concordato dal gruppo di lavoro di analizzare nello specifico **il depuratore installato nell'impianto per il trattamento delle acque reflue rispettivamente di Potenza e di Lecce.**

Le analisi LCA e LCC sono di tipo comparativo, ovvero sono orientate alla valutazione del processo di depurazione, considerando gli scenari di fine vita dei fanghi di depurazione.

L'unità funzionale è stata fissata ed è pari a 1 m^3 di acque reflue in ingresso trattate dal depuratore in 1 anno solare



Scenario Base (BS) e Scenario Alternativo (NS)

Per quanto riguarda la fase di fine vita, sono stati scelti due scenari:

uno scenario base, che rappresenta lo scenario attuale dei fanghi prodotti a valle della depurazione delle acque reflue, dove i fanghi vengono inviati in discarica (acquedotto lucano) e parzialmente compostati (acquedotto pugliese)

Lo scenario alternativo prevede una riduzione dello smaltimento in discarica del 50% come scenario migliorativo dello scenario base, per aumentare l'efficienza energetica dell'impianto di depurazione

Il trasporto dei fanghi in discarica o verso l'impianto di compostaggio è stato trascurato, in quanto la distanza media è inferiore a 100 km

Scenario Fine Vita Fanghi di depurazione		
	Scenario Base (BS)	Scenario alternativo (NS)
Acquedotto Lucano	100% discarica	50% discarica 50% compostaggio
Acquedotto Pugliese	40% discarica 60% compostaggio	20% discarica 80% compostaggio

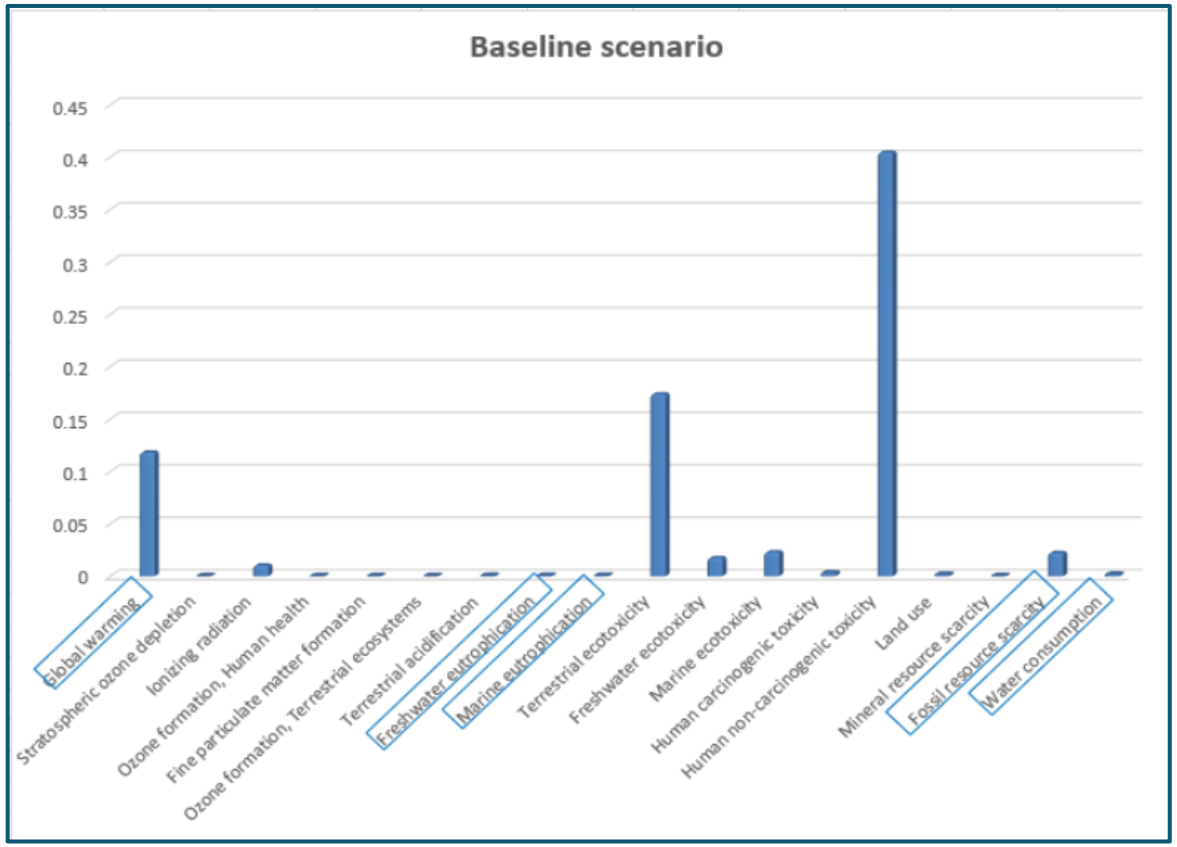
Definizione del metodo di valutazione degli impatti ambientali

Il metodo utilizzato per valutare le prestazioni ambientali del depuratore è Recipe2016 Midpoint (H)

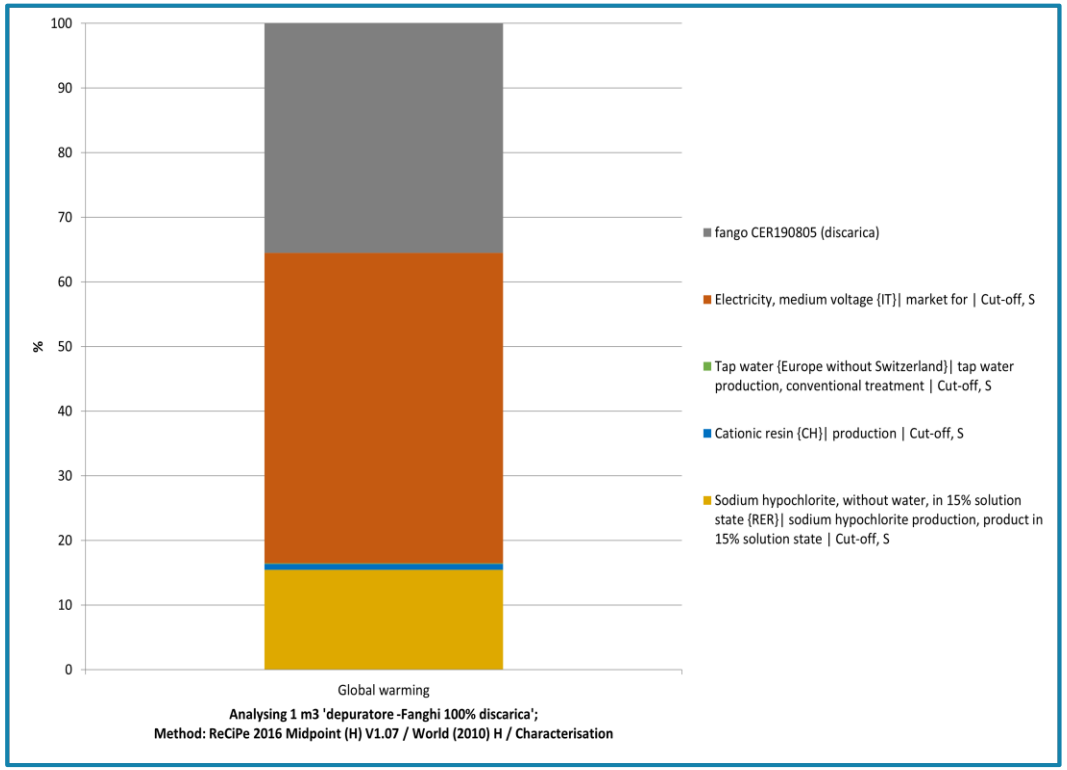
Categorie di impatto (livello mid-point)	Fattore di caratterizzazione
Global warming	kg CO2 eq
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq
Ozone formation, Human health	kg NOx eq
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq
Terrestrial acidification	kg SO2 eq
Freshwater eutrophication	kg P eq
Marine eutrophication	kg N eq
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB
Land use	m2a crop eq
Mineral resource scarcity	kg Cu eq
Fossil resource scarcity	kg oil eq
Water consumption	m3

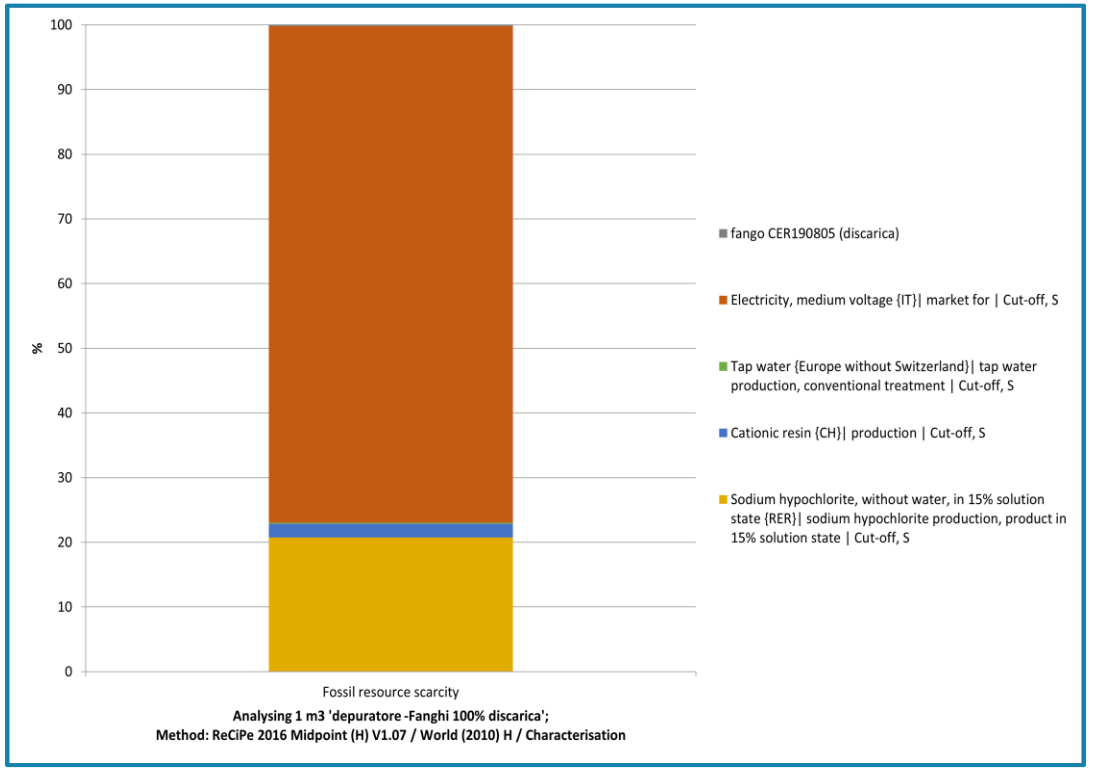
Risultati degli impatti ambientali per il sistema di depurazione di Potenza (Acquedotto Lucano)
Scenario Base

impatti totali su tutte le categorie di impatto analizzate con il metodo ReCiPe 2016 (H)

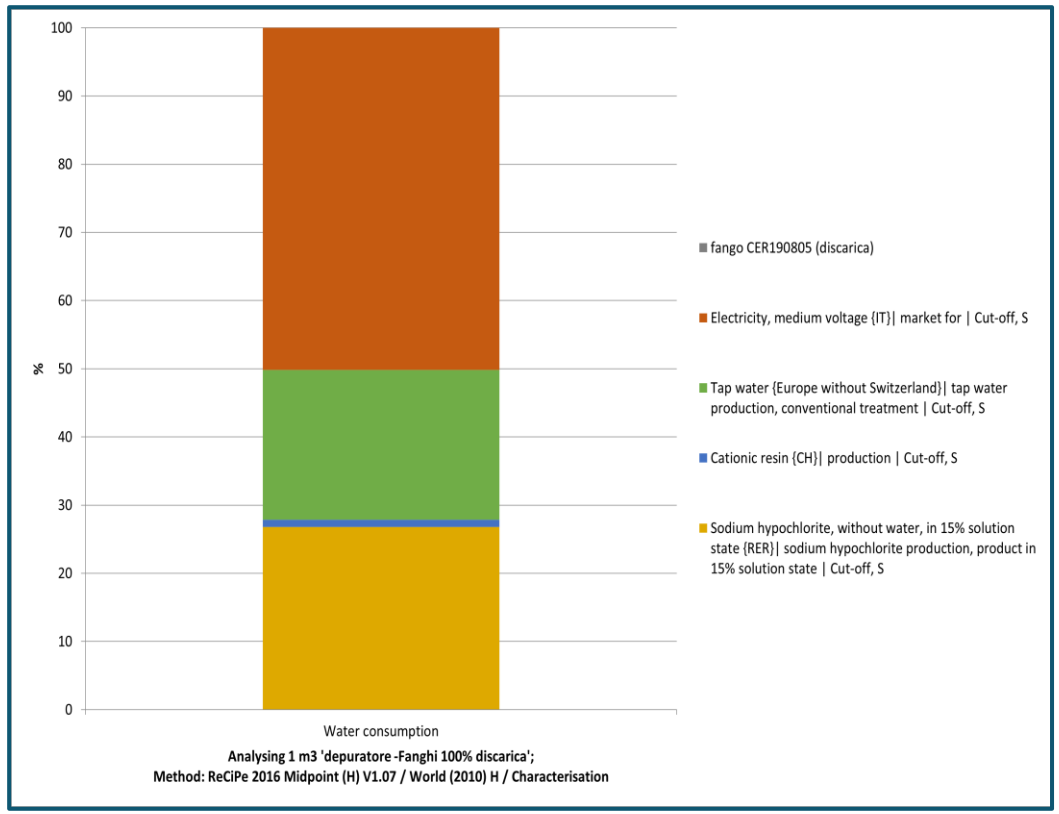


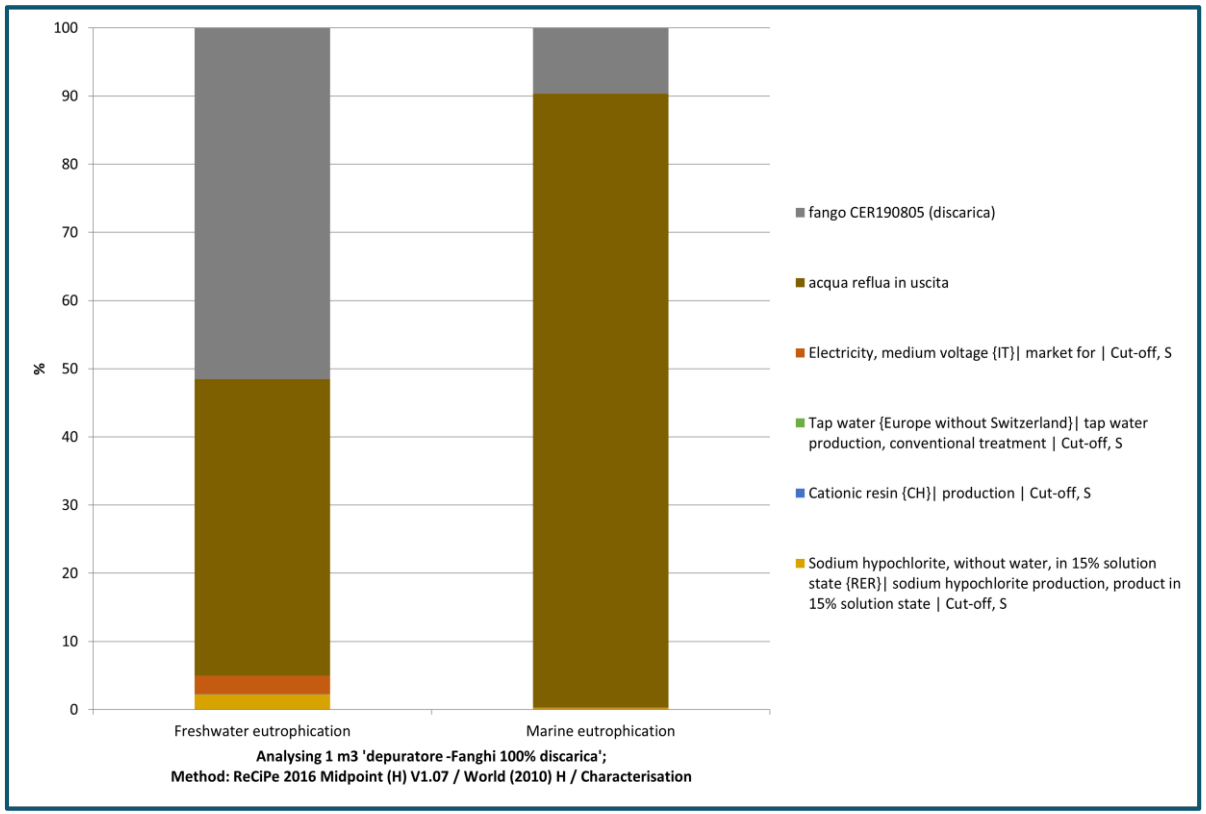
Risultati degli impatti ambientali per il sistema di depurazione di Potenza (Acquedotto Lucano)





Risultati degli impatti ambientali per il sistema di depurazione di Potenza (Acquedotto Lucano)





UNIONE EUROPEA
Fondo Sociale Europeo
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

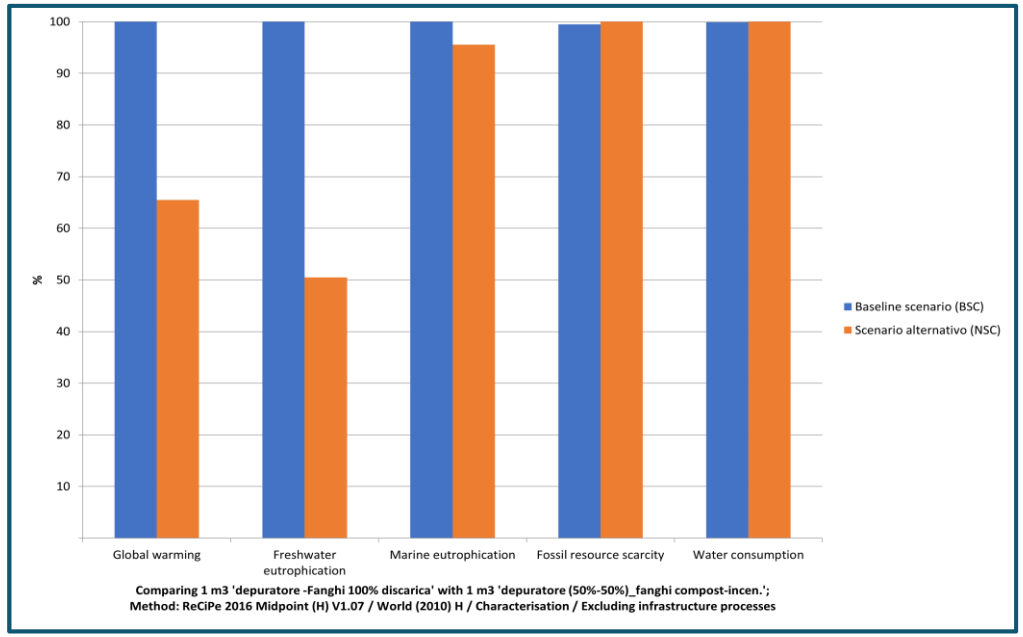
Ministero dell'Università e della Ricerca

PON RICERCA E INNOVAZIONE 2014 - 2020

Risultati degli impatti ambientali per il sistema di depurazione di Potenza (Acquedotto Lucano)

Scenario alternativo

Il cambiamento di scenario di fine vita ha una variazione significativa sugli impatti con riferimento a tutte quelle categorie in cui gli impatti sono legati al trattamento di fine vita dei fanghi.
Nella categoria global warming si osserva una riduzione degli impatti molto significativa (-65,75%); nella categoria freshwater eutrophication si registra una riduzione degli impatti importante (-51%). Nelle altre categorie la variazione è trascurabile.

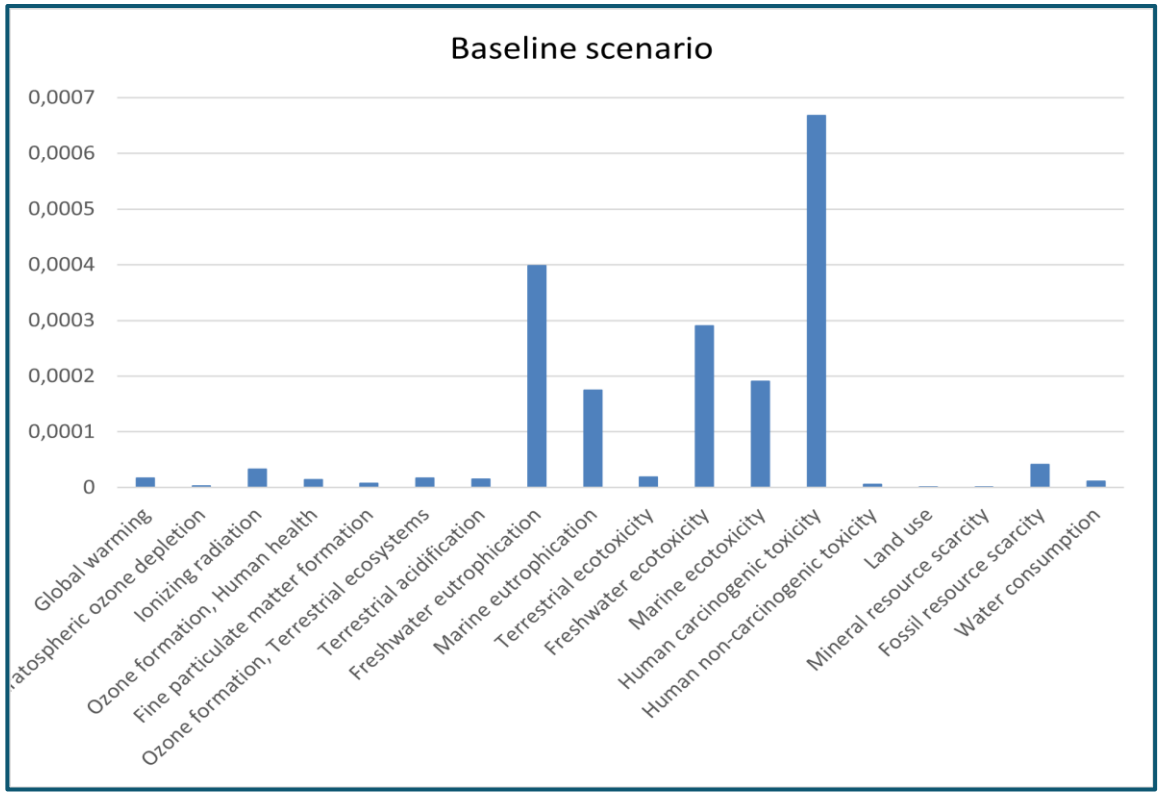


Global warming. In questa categoria si registra una riduzione del 65,76% degli impatti totali.
In termini di emissioni, il maggior calo si registra per l'ossido nitroso (-80%) e per il metano (-48%). In particolare, il 50% dei fanghi destinati al compostaggio permette di evitare 70 kg CO_{2eq}/t di fanghi trattati.

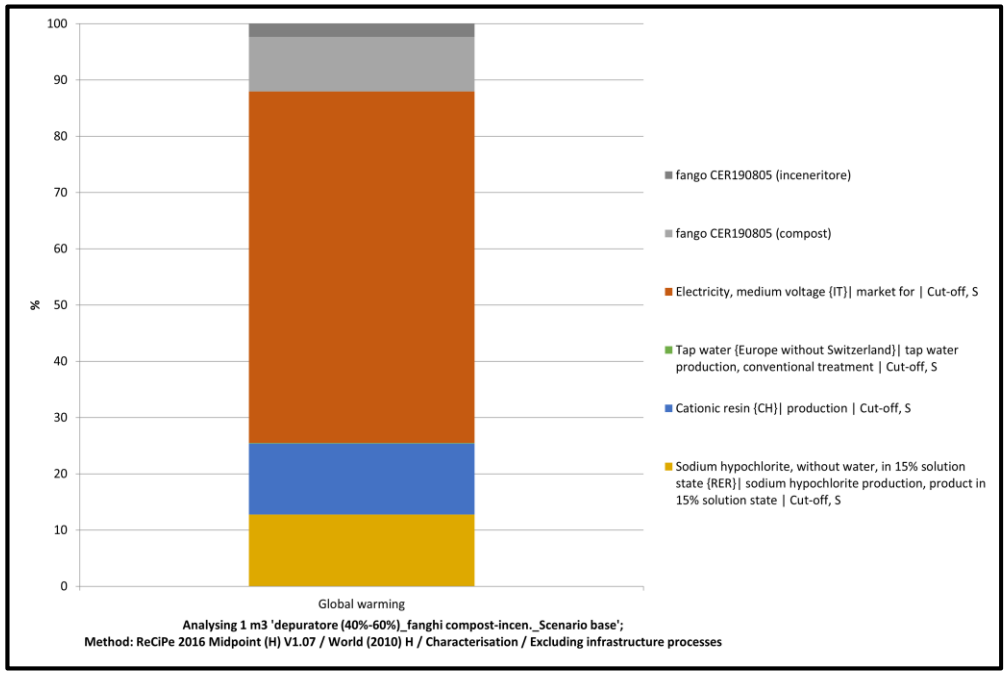
Freshwater eutrophication. In questa categoria si registra una riduzione degli impatti totali molto importante, con un valore percentuale pari a 51%, legata alla mitigazione delle emissioni in acqua di fosforo e fosfato, in entrambi i casi con una riduzione del 51% delle emissioni totali.
Le quantità di fosforo come emissione nel suolo rimangono trascurabili, ma anche in questo caso la riduzione è del 51%.
L'applicazione dello scenario alternativo consente di evitare gli impatti per un valore pari a 94 $kg_{P\ eq}$/ t di fanghi trattati.

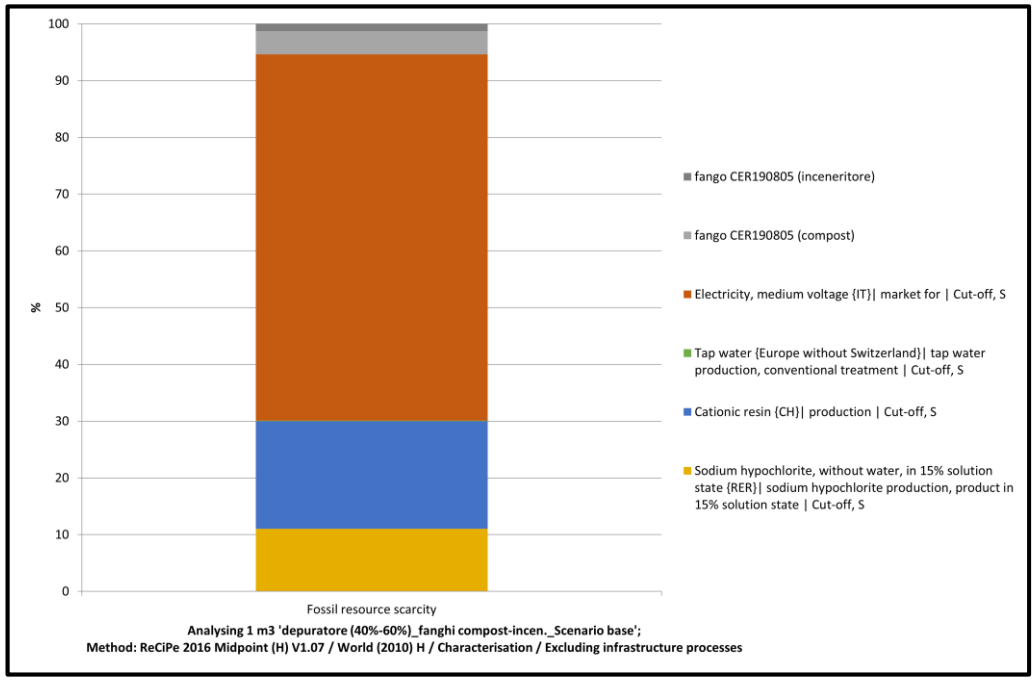
Risultati per il sistema di depurazione di Lecce (Acquedotto Pugliese)
Scenario Base

analisi LCA, metodo ReCiPe 2016 (H), categorie principali: global warming, fossil depletion, water consumption, freshwater and marine eutrophication.

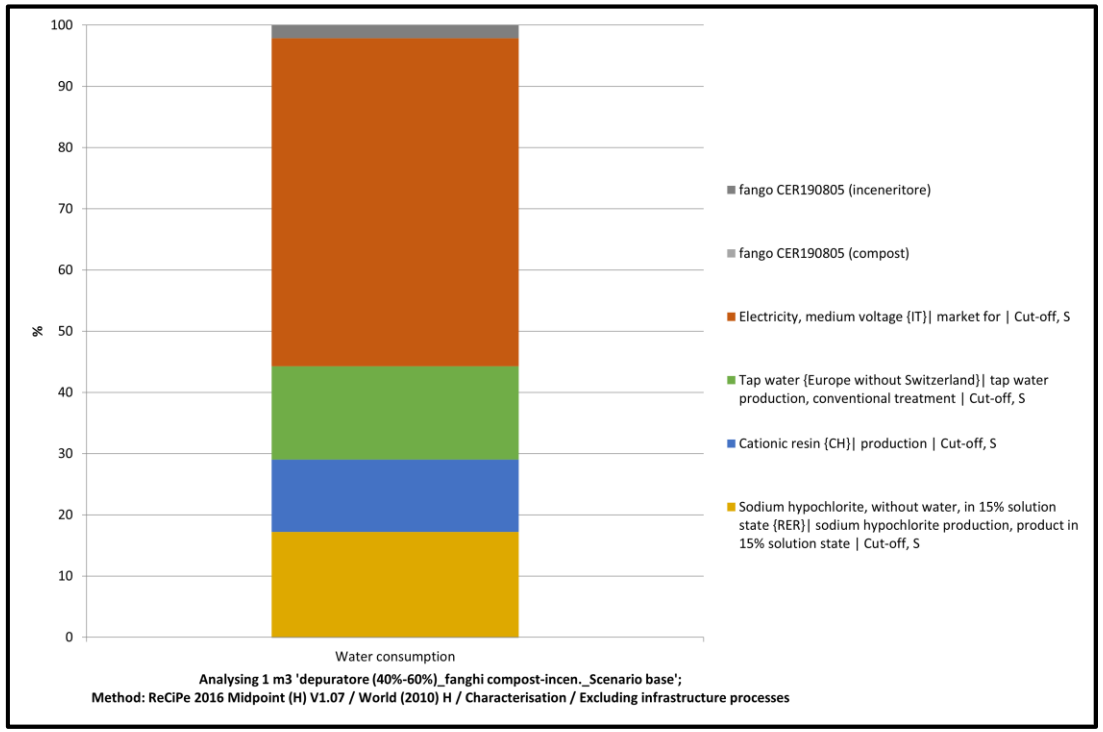


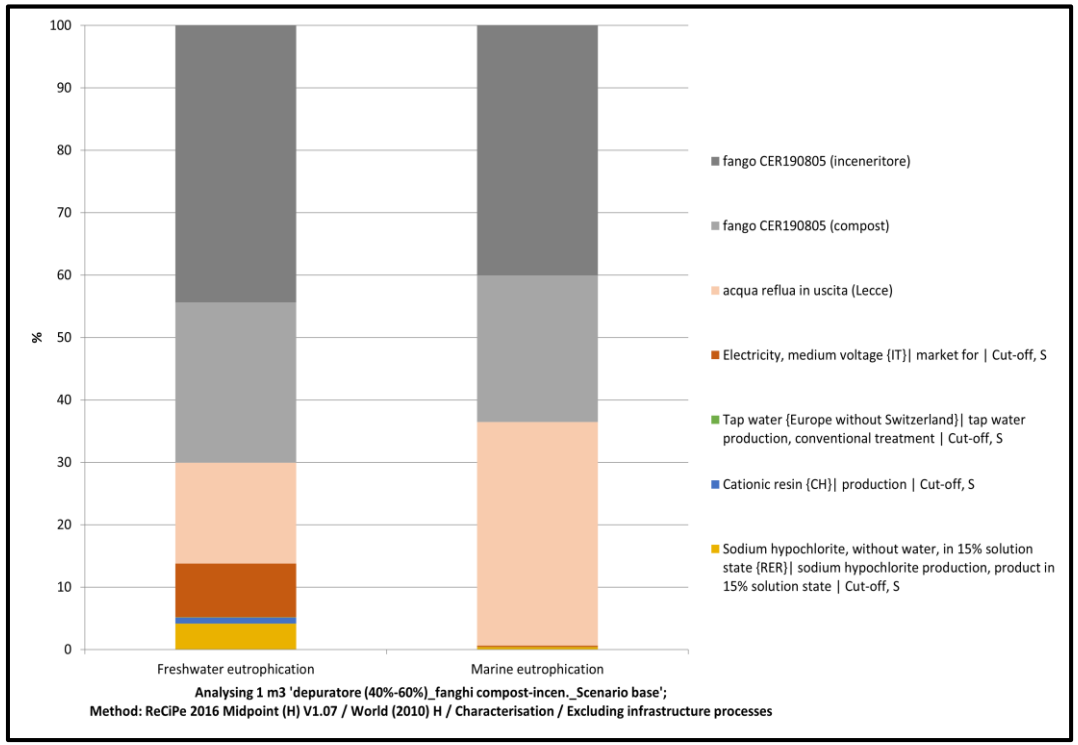
Risultati per il sistema di depurazione di Lecce (Acquedotto Pugliese) Scenario Base





Risultati per il sistema di depurazione di Lecce (Acquedotto Pugliese) Scenario Base

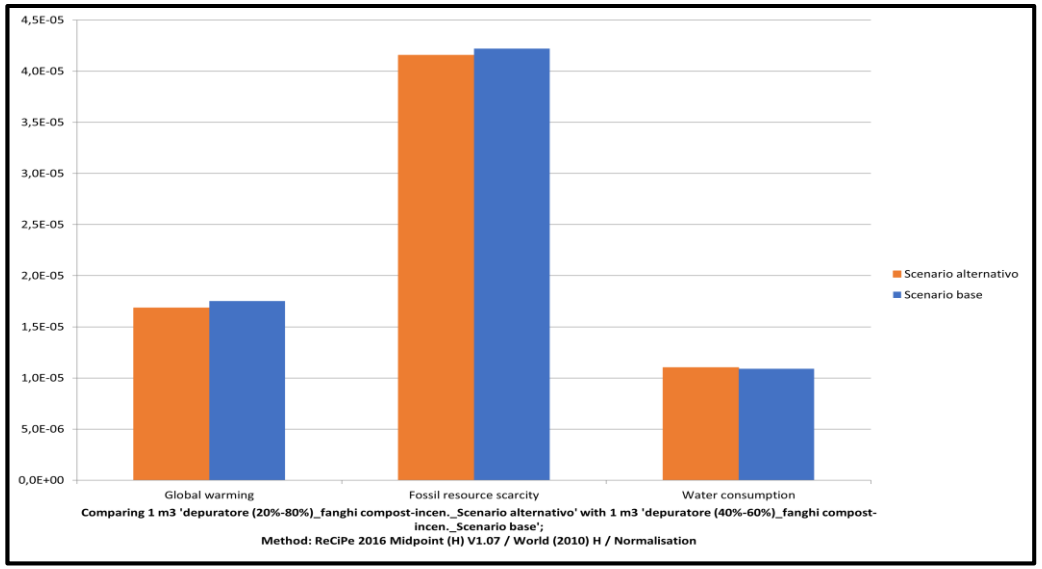


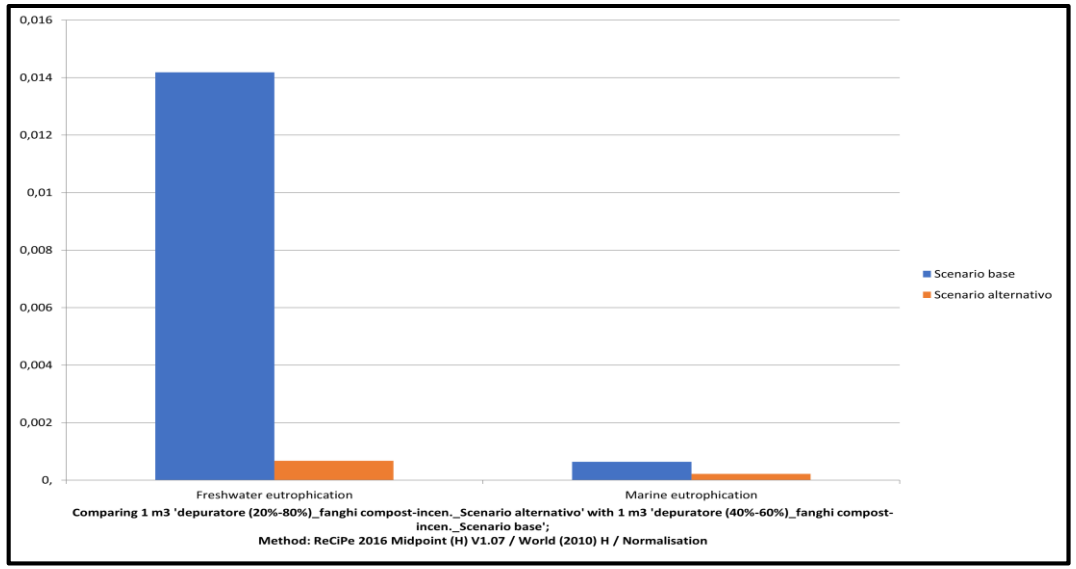


Risultati per il sistema di depurazione di Lecce (Acquedotto Pugliese) scenario alternativo

Il cambiamento di scenario di fine vita ha una minima variazione sugli impatti con riferimento a tutte le categorie legate al trattamento dei fanghi.

Lo scenario alternativo dell'Acquedotto Pugliese, con particolare riferimento alla gestione dei fanghi, offre un'analisi approfondita delle pratiche attuali. Attualmente, la destinazione del 60% dei fanghi a compostaggio rappresenta un passo importante verso la sostenibilità ambientale, dimostrando la consapevolezza dell'ente riguardo alla gestione responsabile dei rifiuti.





Risultati per il sistema di depurazione di Lecce (Acquedotto Pugliese)

Il passaggio al 80% non si configura come una svolta rivoluzionaria, poiché gli impatti ambientali complessivi non subiscono miglioramenti significativi.

Per compiere progressi sostanziali sarebbe opportuno valutare l'opzione di destinare **l'intero volume di fanghi al compostaggio**. Questa strategia non solo rafforzerebbe l'impegno dell'acquedotto verso la sostenibilità, ma porrebbe l'ente all'avanguardia nella gestione responsabile dei rifiuti liquidi in uscita dal sistema di depurazione.

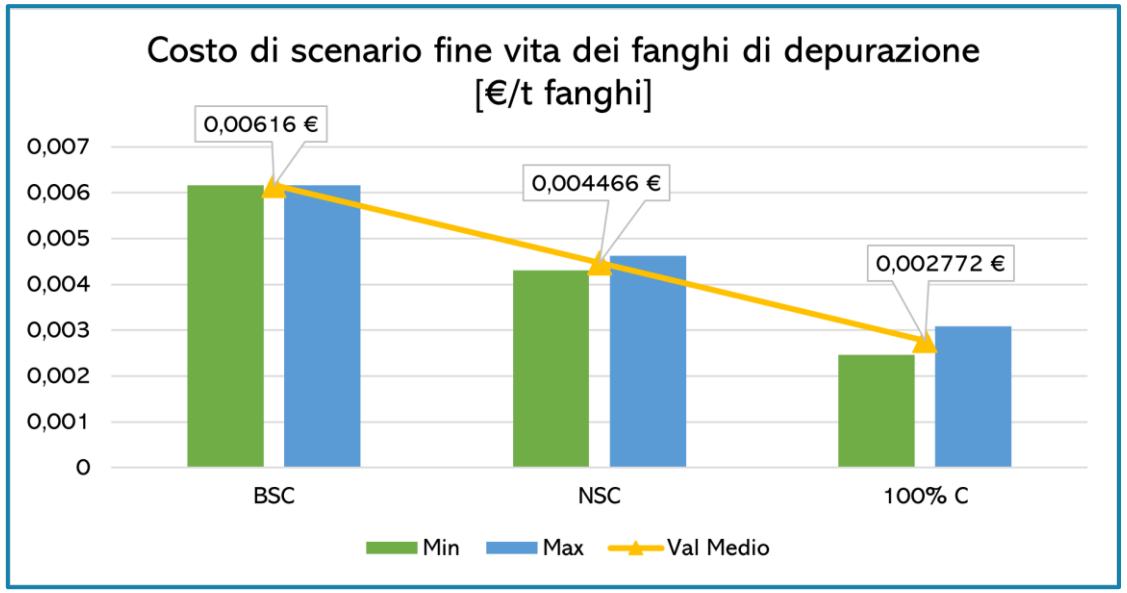
L'invio del 100% dei fanghi a compostaggio non solo elimina gli impatti associati allo smaltimento tradizionale, ma può anche trasformare questi rifiuti in un prezioso fertilizzante organico, contribuendo a creare azioni di economia circolare all'interno dell'acquedotto Pugliese.

Un approccio più audace alla gestione dei fanghi riflette una consapevolezza ambientale avanzata, ed apre anche la strada a un ciclo di vita più sostenibile e circolare. Considerando che l'Acquedotto Pugliese è già sulla strada giusta, un'evoluzione verso la gestione integrale dei fanghi potrebbe fungere da esempio ispiratore per altre realtà, promuovendo l'adozione di pratiche eque nei confronti dell'ambiente e potendo diventare un modello di gestione sostenibile e innovativa.

Risultati degli impatti economici per il sistema di depurazione di Potenza (Acquedotto Lucano)

I risultati ottenuti attraverso l'analisi LCC considerano le categorie di costi operativi di natura variabile, che includono i costi di materie prime, energia e risorse e i costi ambientali

FU[1]	1 m^3 acqua in ingresso	Euro
Consumable		
	Sodium hypochlorite	0,0022
	CH: cationic resin, at plant	0,0026
	Water	0,8272
Energy		
	Electricity	1,1786

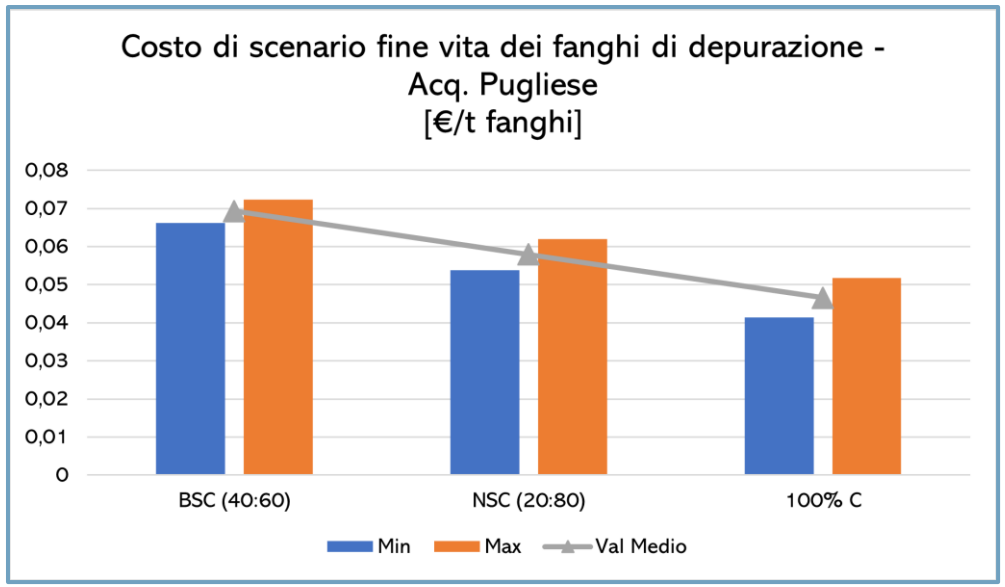


Risultati degli impatti economici per il sistema di depurazione di Lecce (Acquedotto Pugliese)

I risultati ottenuti attraverso l'analisi LCC, sviluppata da ENCO, considerando le categorie di costi operativi di natura variabile, che includono i costi di materie prime, energia e risorse e i costi ambientali

Costi dei materiali di consumo e di energia per l'impianto di depurazione di Lecce riferiti all'unità funzionale

FU[1]	1 m^3 acqua in ingresso	Euro
Consumable		
	Sodium hypochlorite	0,0043
	CH: cationic resin, at plant	0,0037
	Soda Caustica	0,1454
	Policloruro Alluminio	0,0308
	Water	0,9254
Energy		
	Electricity	3,1428



UNIONE EUROPEA
Fondo Sociale Europeo
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Ministero dell'Università e della Ricerca

PON RICERCA E INNOVAZIONE 2014 - 2020

Alessandra Bònoli
DICAM - Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali
alessandra.bonoli@unibo.it

Azione II.2 – Cluster tecnologici D.D. prot.1735 del 13 Luglio 2017
"Avviso per la presentazione di Progetti di Ricerca Industriale e Sviluppo Sperimentale nelle 12 aree di Specializzazione individuate dal PNR 2015-2020"
Progetto ARS01_01080: L'efficientamento energetico del Servizio Idrico Integrato - WATERGY