Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO

Ricerca di Sistema elettrico

Valutazione di sistemi e metodologie per la gestione efficiente della risorsa idrica e del rifiuto organico in una smart city

M. Canditelli, P. G. Landolfo, D. Mattioli,
F. Musmeci, L. Petta, G. Sabia

Report RdS/PAR2018/037

VALUTAZIONE DI SISTEMI E METODOLOGIE PER LA GESTIONE EFFICIENTE DELLA RISORSA IDRICA E DEL RIFIUTO ORGANICO IN UNA SMART CITY

M. Canditelli, P. G. Landolfo, L. Luccarini, D. Mattioli, F. Musmeci, L. Petta, G. Sabia (ENEA)

Dicembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA
Piano Annuale di Realizzazione 2018
Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici
Progetto: D.7 Sviluppo di un modello integrato di smart district urbano
Obiettivo: “Gestione sostenibile e circolare dell’ambiente urbano”
Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Indice

SOMMARIO 4

1 INTRODUZIONE 5

2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI 6

2.1 NATURE BASED SOLUTIONS (NBS) IN AMBITO URBANO PER LA GESTIONE DELLE ACQUE METEORICHE 6

2.2 EFFICIENZA ENERGETICA NEGLI IMPIANTI DI TRATTAMENTO DELLE ACQUE REFLUE 12

2.3 ANALISI DEL CICLO DI VITA DEL PROCESSO DI COMPOSTAGGIO CON CONFRONTO DI SCENARI ALTERNATIVI IN IMPIANTI INDUSTRIALI E/O DI BIODIGESTIONE, VALUTAZIONI DI COMPATIBILITÀ DEL PROCESSO NELLA DIVERSA SCALA DI IMPIANTO. 25

3 CONCLUSIONI 30

4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI 31

Sommario

Le attività relative al PAR 2018, nell'ambito della gestione ottimale delle acque fognarie e meteoriche, svolte in collaborazione con l'Università di Bologna, hanno consentito di valutare l'applicazione delle Nature Based Solutions (NBS) in ambito urbano per la gestione delle acque meteoriche in integrazione con sistemi di Real Time Control ed Early Warning. Tali soluzioni presentano sia una valenza in termini di strategia per il miglioramento della sicurezza urbana rispetto ad eventi meteorici estremi, sia una rilevanza idraulica ed ambientale rendendo le città Smart e resilienti. (Cfr. Report RdS/PAR2018/038).
Per quanto concerne il settore depurativo, ci si è focalizzati sulla elaborazione di una metodologia per il labelling energetico degli impianti di depurazione, mediante l'introduzione di opportune classi di efficienza energetica. In base alle tali classi di efficienza, è stata definita una procedura di etichettatura energetica. La metodologia è stata poi testata e validata su casi studio costituiti da impianti in scala reale, per i quali risulta essere individuabile il potenziale margine di miglioramento in termini di efficientamento energetico.
Relativamente alla gestione e valorizzazione del rifiuto organico è stato sviluppato un modello del processo di compostaggio in compostatore elettromeccanico finalizzato a stimare consumi elettrici, tempi ed emissioni a fronte delle scelte gestionali operate sulla macchina. L'analisi del ciclo di vita del processo ha permesso il confronto con scenari alternativi in impianti industriali e/o di biodigestione e le valutazioni di compatibilità del processo nella diversa scala di impianto. In particolare, nell'applicazione in un caso pilota (Canale Monterano,RM) l'LCA ha evidenziato l'importanza della preferibilità di soluzioni integrate.

1 Introduzione

Il presente documento si focalizza sull'analisi delle influenze del modello di gestione delle risorsa idrica e dei rifiuti sull'efficienza e sulla sicurezza del sistema elettrico andando ad approfondire e completare alcuni punti emersi come particolarmente rilevanti nel corso del PAR2016 e 2017. Le attività del sotto-obiettivo f.1 nello specifico hanno riguardato:

• nell'ambito della gestione ottimale delle acque fognarie e meteoriche, in collaborazione con l'Università di Bologna, la valutazione dell'applicazione delle Nature Based Solutions (NBS) in ambito urbano per la gestione delle acque meteoriche in integrazione con sistemi di Real Time Control ed Early Warning descritte sinteticamente nella sezione 2.1 del presente documento e in dettaglio nel Report RdS/PAR2018/038;

• nel settore depurativo, l'elaborazione di una metodologia per il labelling energetico degli impianti di depurazione descritta nella sezione 2.2;

• relativamente alla gestione e valorizzazione del rifiuto organico, l'analisi del ciclo di vita del processo per il confronto con scenari alternativi in impianti industriali e/o di biodigestione e le valutazioni di compatibilità del processo nella diversa scala di impianto descritta nella sezione 2.3.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Nature Based Solutions (NBS) in ambito urbano per la gestione delle acque meteoriche

A causa dei cambiamenti climatici e dell'incessante aumento delle aree urbanizzate, le insufficienze delle reti di drenaggio urbane sono sempre più evidenti e intollerabili per il contesto civile dato i rischi che esse comportano: allagamenti, danni ingenti a beni privati e pubblici, interruzione della normale vita civile e talvolta anche la perdita di vite umane. Allo stesso tempo, i problemi ambientali dovuti agli scarichi inquinanti delle acque nel ricettore in concomitanza con eventi meteorici intensi sono sempre più gravi e marcati.
I provvedimenti più comunemente adottati per la risoluzione o riduzione delle problematiche idraulico-ambientali legate alle precipitazioni possono essere suddivisi in due categorie:
Interventi strutturali: prevedono la realizzazione di manufatti o strutture e si suddividono in:

- **Interventi localizzati:** consistono nella realizzazione di invasi che hanno la funzione di trattenere provvisoriamente una parte dei volumi idrici derivanti dagli eventi meteorici, per inviarli successivamente alla depurazione (vasche di prima pioggia) o per restituirli alla rete a valle o al ricettore con portata con essi compatibile (vasche volano);
- **Interventi diffusi:** nature based solutions distribuite sull'area urbanizzata:
    - a scala di edificio → coperture e pareti verdi, recupero e riuso dell'acqua meteorica nelle abitazioni;
    - a scala di quartiere →aree ad allagamento controllato, fasce filtro, pavimentazioni e aree permeabili;

Interventi non strutturali: non comportano la realizzazione di manufatti o strutture; hanno lo scopo di sfruttare al meglio la rete di drenaggio esistente, massimizzandone la capacità d'invaso, o di ridurre gli inquinanti che entrano in fognatura come i sistemi di controllo in tempo reale RTC.

Le Nature Based Solutions (NBS) sono strategie e tecnologie per il drenaggio urbano sostenibile che puntano alla riduzione del picco di portata e, allo stesso tempo, alla limitazione del carico inquinante indirizzato al corpo idrico ricettore. Sono soluzioni che agiscono "a monte", riducendo i deflussi meteorici mediante politiche urbanistiche "verdi" di incremento della capacità di infiltrazione e di invaso. Le NBS sono soluzioni ispirate e basate sulla natura, nate per conciliare i benefici idraulici con quelli ambientali. Sono soluzioni economicamente vantaggiose, in grado di fornire benefici per l'ambiente, la società e l'economia, e di contribuire ad aumentare la resilienza dello spazio urbano.

I punti di forza delle NBS si possono sintetizzare in:

- Uso sostenibile dei materiali e dell'energia;
- Resilienza al cambiamento climatico;
- Gestione dell'acqua in relazione al rischio di siccità e inondazione;
- Qualità dell'acqua e dell'aria;
- Relazioni tra spazio fisico e urbano e benessere dei cittadini;
- Equità e coesione sociale;
- Rigenerazione urbana.

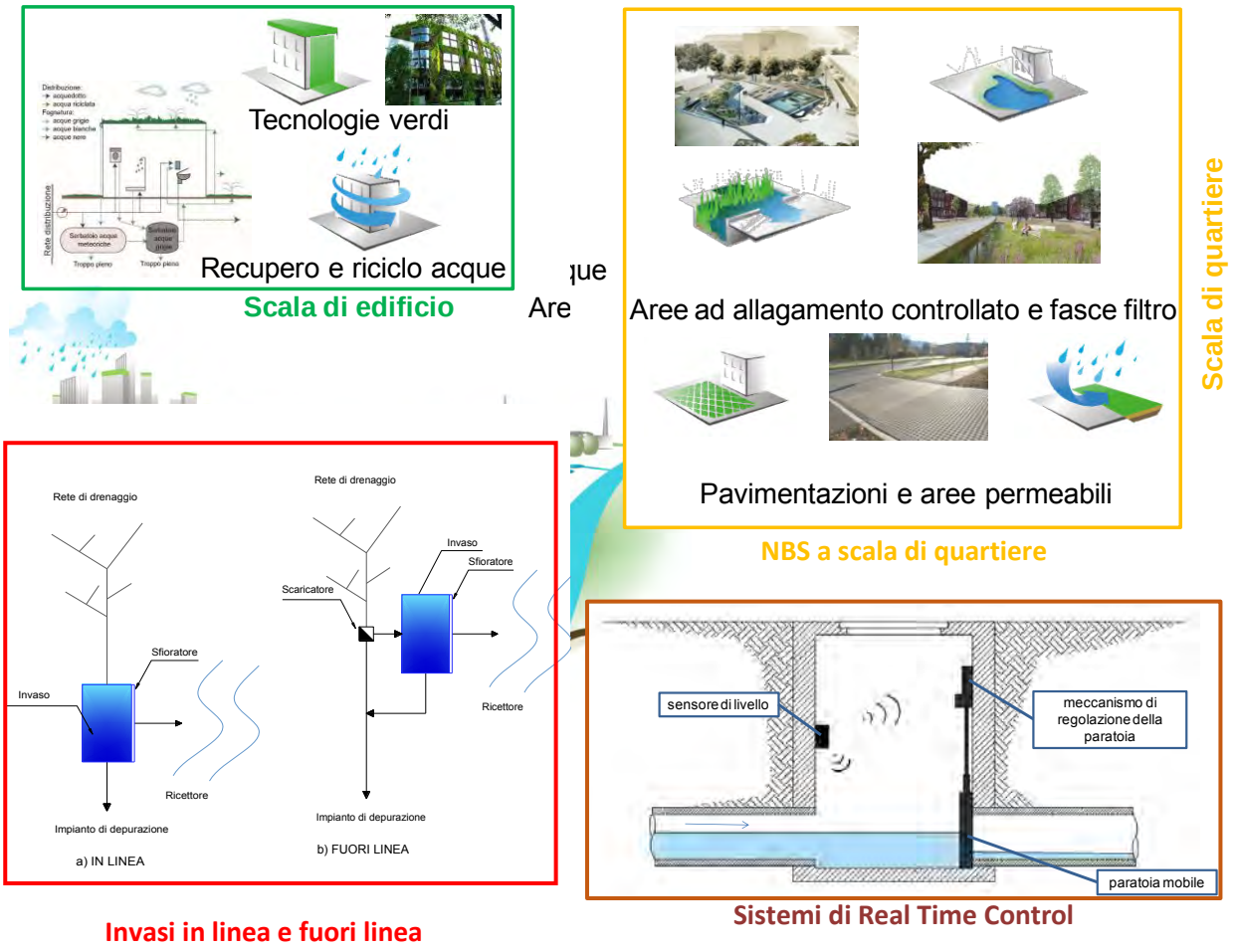

Figura 1: esempi dei provvedimenti più comunemente adottati per la risoluzione o riduzione delle problematiche idraulico-ambientali legate alle precipitazioni

La resilienza dei sistemi di drenaggio urbano, soggetti a forzanti esterne di diversa origine e entità, può essere incrementata attraverso l'uso combinato di NBS, vasche di accumulo e sistemi di Real Time Control che consentono di ridurre i picchi di portata e il volume di sostanze inquinanti sversate nei corpi idrici ricettori. A questo proposito sono state analizzate e modellate le coperture verdi, gli impianti per il recupero e il riuso delle acque meteoriche, le aree ad infiltrazione e gli invasi di laminazione, sia singolarmente sia in combinazione tra loro, per valutare la riduzione di afflussi meteorici in fognatura a scala di edificio e di quartiere.

A scala di edificio è stata effettuata la modellazione in continuo della copertura verde sperimentale installata presso il plesso del Lazzaretto della Scuola di Ingegneria e Architettura di Bologna. I risultati sono stati analizzati comparando i deflussi generati da una superficie impermeabile tradizionale con quelli uscenti dalla copertura verde. In particolare la Figura 2 illustra lo ietogramma di pioggia e l'idrogramma in uscita dalle due superfici in occasione di due eventi meteorici reali registrati nel 2009. L'evento del 4 marzo 2009 mette in evidenza come, nel caso del tetto verde (GR), il picco di portata sia ridotto e traslato rispetto a quello relativo alla copertura impermeabile di uguale superficie (RR). Nello specifico si ha una riduzione del picco di portata pari all'83% e un ritardo tra i picchi massimi di circa 30 minuti. L'evento meteorico del 29 agosto è stato analizzato in quanto rappresenta un episodio di forte intensità, il cui tempo di ritorno sui 15 minuti supera i 4 anni ed è preceduto da 22 giorni di tempo secco. Il grafico evidenzia come il tetto verde sia in grado di trattenere circo l'80% dell'evento. Le coperture verdi contribuiscono alla rigenerazione idrologica delle nostre città attraverso la riduzione dei deflussi superficiali, il ripristino dell'evapotraspirazione e l'incremento del tempo di corrivazione. A tali benefici si sommano altri benefici

ambientali quali ad esempio l'abbassamento delle temperature superficiali, l'incremento della biodiversità, etc.

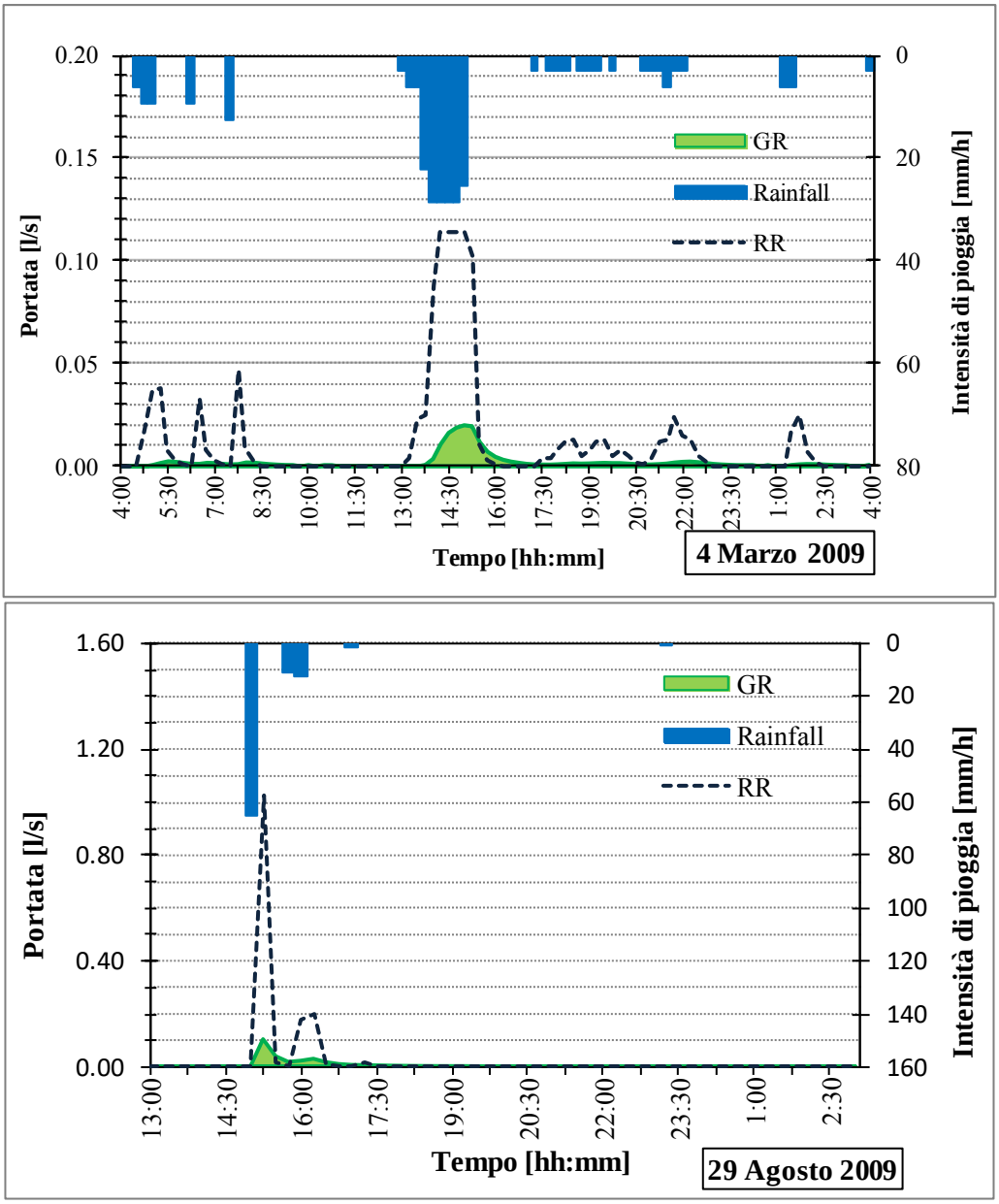

Figura 2: grafici relativi agli eventi del 4 marzo e del 29 agosto del 2009 con evidenziati il defluito dalla copertura impermeabile (RR) e da quella verde (GR)

Gli impianti per il recupero e il riuso delle acque meteoriche rappresentano un'altra valida soluzione per limitare l'apporto in fognatura; se utilizzate in combinazione, tetti verdi e impianti, possono portare a benefici notevoli in termini di minori portate immesse in rete e minor attivazione degli scolmatori di piena; questo beneficio è stato valutato modellando a scala di quartiere le diverse tecnologie verdi sia singolarmente sia combinate tra loro.

Per la modellazione, effettuata con il software SWMM 5.1, è stato utilizzato il bacino sperimentale del Fossolo, analizzato nel precedente PAR 2017, ipotizzando differenti scenari:

- **Scenario 1:** è stato ipotizzato che il 30% dell'area del Fossolo presenti coperture verdi, uniformemente distribuite sull'area, con substrato di 10 cm;
- **Scenario 2:** è stato ipotizzato che circa il 57% degli utenti sia servito da un impianto per il recupero e il riuso delle acque meteoriche da destinare agli scarichi dei wc;

- **Scenario 3:** si ipotizza di combinare insieme lo scenario 1 e il 2;
- **Scenario 4:** è stato ipotizzato di inserire delle aree ad infiltrazione per un incremento della permeabilità pari al 15% uniformemente distribuito;

Per ogni scenario sono state realizzate tre reti differenti (analizzate nel PAR 2017):

- la rete originale con il depuratore ed uno scolmatore di piena che convoglia le acque diluite oltre una certa soglia al corpo ricettore;
- la rete con paratoie mobile controllate da logica PID;
- la rete implementata con la logica PID più un ulteriore paratoia che controlla i deflussi verso il depuratore.

La rete (Figura 3) è stata modellata considerando una poggia uniforme sull'area del Fossolo, nello specifico è stato utilizzato l'anno 2009 poiché quello con cumulata di precipitazione media rispetto a 27 anni di dati. Per ogni scenario le grandezze analizzate, in termini di quantità e qualità, sono:

- massa dei Solidi Sospesi Totali;
- volume totale.

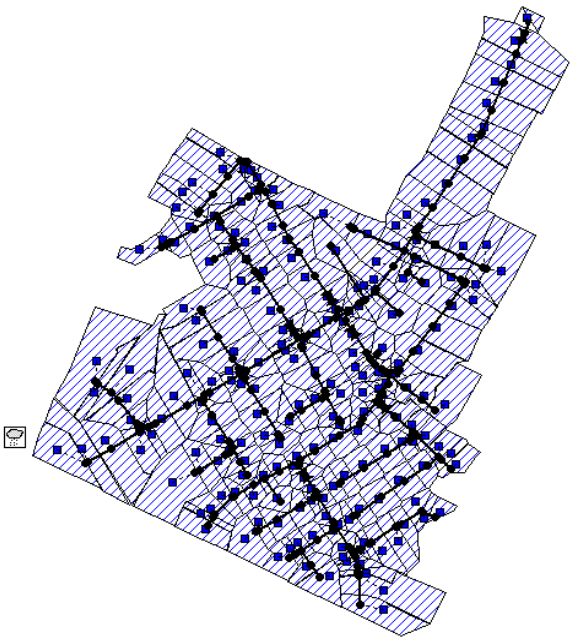

Figura 3: modello relativo al bacino del Fossolo in SWMM 5.1

I risultati ottenuti sono riassunti in Tabella 1.

Tabella 1: risultati ottenuti dalla modellazione con il software SWMM 5.1 della rete del Fossolo

Scenario	Soluzione	Volume (m3)	Massa (kg)
0- REALE	ORIGINALE	40272	3937
	PID	26201	1967
	PID+ORIFICE	39227	2572
1- 30% GR	ORIGINALE	18048	1783
	PID	9173	670
	PID+ORIFICE	13753	871
2- IMPIANTI	ORIGINALE	6837	925
	PID	3782	301
	PID+ORIFICE	5127	389

Scenario	Soluzione	Volume (m3)	Massa (kg)
3- 30% GR + IMPIANTI	ORIGINALE	3449	372
	PID	1526	82
	PID+ORIFICE	1937	77
4- +15% PERM	ORIGINALE	21557	3192
	PID	12311	1448
	PID+ORIFICE	18962	1906

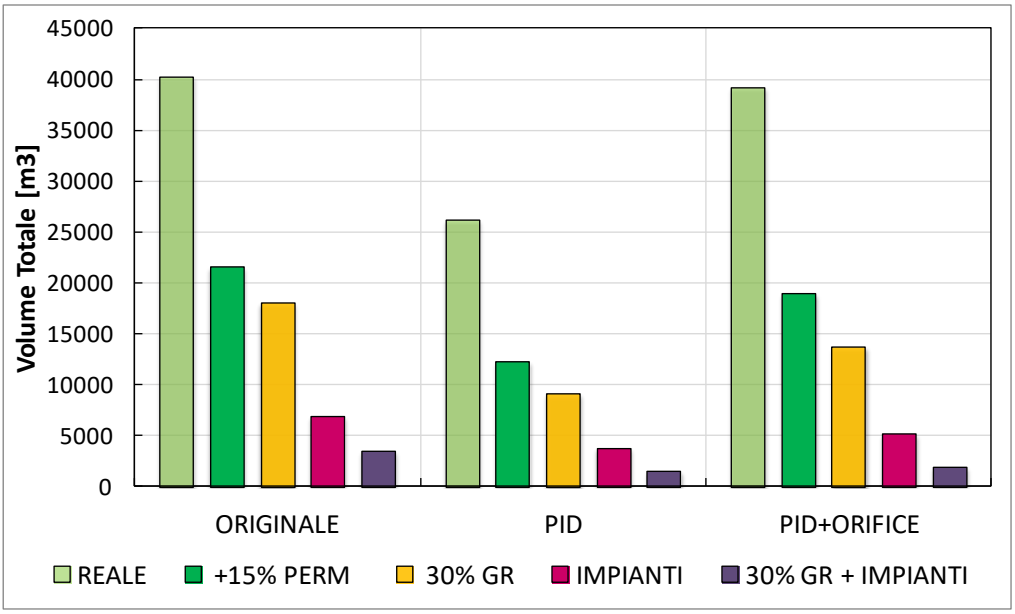

Figura 4: Grafico relativo al volume inviato verso il ricettore nelle varie configurazioni

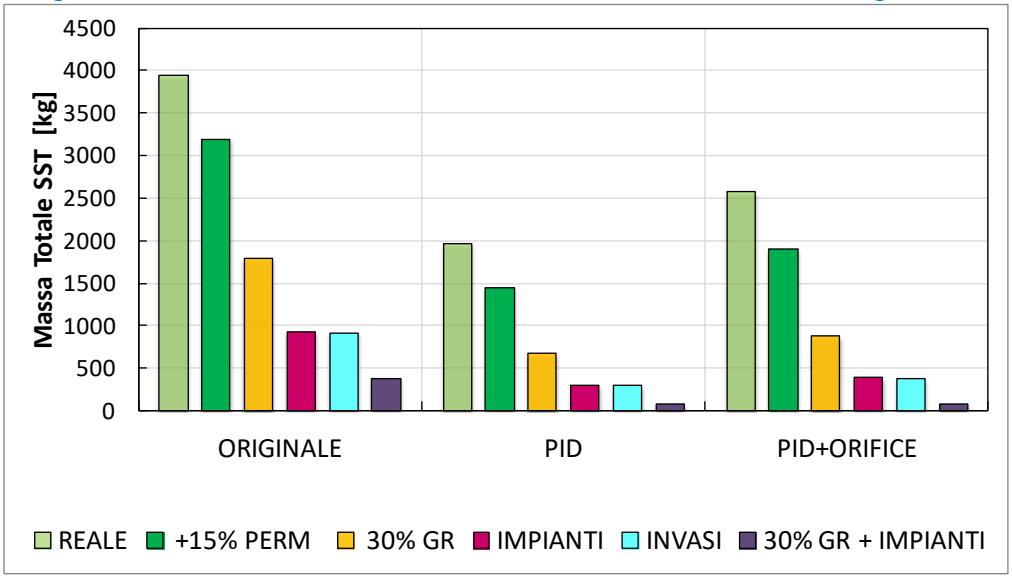

Figura 5: grafico relativo alla massa sversata nel corpo idrico ricettore nelle varie configurazioni analizzate poste a confronto

La soluzione con controllo in tempo reale gestito dal controllo PID risulta essere, tra le tre reti analizzate, quella che permette di ottimizzare i volumi e la massa inviata al ricettore, raggiungendo così l'obiettivo di minimizzare gli sversamenti e gli inquinanti, limitando, allo stesso tempo, il rischio di allagamento urbano grazie all'ottimizzazione della capacità di accumulo delle condotte stesse, in tutti gli scenari ipotizzati

Tra gli scenari ipotizzati, la soluzione che prevede l'utilizzo di tetti verdi insieme all'installazione di impianti per il recupero e il riuso delle acque meteoriche per scopi non potabili risulta essere quella che abbatte

sensibilmente sia i volumi sia gli inquinanti sversati nel ricettore in tutte le reti analizzate e, al contempo, determina una riduzione del consumo di acqua potabile. Nello specifico, nel caso di rete con RTC (PID), l'utilizzo una tecnologia che combina i tetti versi e gli impianti per il riuso delle acque meteoriche porta ad una riduzione rispetto al caso reale del 94% in termini di volume (Figura 4) e di circa il 96% in termini di massa (Figura 5) sversati al ricettore.

In ogni configurazione analizzata risulta evidente come l'utilizzo di tecnologie verdi NBS sia in grado di ridurre significativamente i volumi e gli inquinanti inviati al corpo idrico ricettore, ponendosi come soluzioni ad elevata rilevanza idraulica e ambientale, e offrendo così differenti possibili strategie per migliorare la sicurezza urbana rispetto a eventi meteorici estremi rendendo le città più resilienti.

2.2 Efficienza energetica negli impianti di trattamento delle acque reflue

In un contesto europeo e nazionale in cui l'attenzione ai consumi energetici assume sempre maggiore rilevanza, con target di riduzione del 20% al 2020, anche il settore della depurazione va considerato quale sistema su cui operare azioni di efficientamento energetico. Come ampiamente discusso nel PAR 2016 il comparto depurativo ha una incidenza significativa sul consumo energetico nazionale. D'altra parte, sebbene analisi di settore e studi scientifici stiano attualmente focalizzandosi sull'ambito della depurazione e su metodologie atte a promuovere e conseguire migliorie del bilancio energetico, non esiste ad oggi una procedura di riferimento adottabile per affrontare questa tipologia di studi. Recentemente organi di normazione tecnica sia a livello internazionale che nazionale hanno specificato i requisiti per condurre analisi in relazione alle performances energetiche di qualsiasi processo (es. UNI EN 16247-3:2014, ISO 50002:2014). Tuttavia le metodologie proposte hanno un carattere generale giacché applicabili a qualsiasi tipo di impianto/processo ed a qualsiasi forma di energia. Altri settori, quali quello edilizio o della produzione di beni quali elettrodomestici, trovano invece, un assetto normativo e tecnico ben più maturo e consolidato con relativi sistemi di analisi, classificazione ed attestazione delle performance energetiche (APE o etichettatura di prodotto). In tali contesti lo scopo è quello di promuovere la diffusione di ambienti abitativi e prodotti sempre più performanti in termini energetici con ricadute positive sull'ambiente (riduzione dell'uso di risorse e di emissioni di CO_2), utenti (costi di esercizio più bassi dovuti al minor consumo) e produttori (maggior visibilità e vendibilità di modelli avanzati, su cui si è investito in sviluppo tecnologico). Nella stessa ottica, anche il sistema depurativo va stimolato ad adottare soluzioni che mirino minimizzare i consumi energetici e di risorse. Di fatto, oltre che benefici di tipo ambientale, i gestori degli impianti di depurazione possono conseguire interessanti risparmi economici ed offrire un servizio più efficace ed efficiente agli utenti. D'altra parte anche questi ultimi potrebbero vedersi diminuire il costo tariffario dei servizi di depurazione.

Risulta quindi necessario sviluppare idonee metodologie che consentano di valutare in modo oggettivo ed affidabile le performance energetiche degli impianti di depurazione e orientino i gestori ad individuare soluzioni di efficientamento in ottica di sostenibilità economica ed ambientale.

Nell'ambito del presente PAR, le attività condotte sono state quindi mirate a definire e validare, a partire dai risultati conseguiti nelle fasi precedenti, una metodologia di classificazione ed assegnazione di etichette energetiche (*labelling*) agli impianti di depurazione delle acque reflue in base ai consumi energetici conseguiti. Richiamando la normativa tecnica relativa alla conduzione di analisi energetiche industriali, va sottolineato che questa prevede precise fasi procedurali tra cui: i) la stima e raccolta dei consumi energetici (anche disaggregando i servizi energetici ed i sotto-processi di produzione); ii) il calcolo degli indicatori energetici di performance; iii) il confronto con indicatori omogenei di settore. In concordanza con la normativa tecnica, la metodologia sviluppata nel corso delle attività si struttura per fasi e si basa sull'utilizzo di indicatori di prestazione energetica (***KPIs***) al fine di confrontare gli impianti di depurazione in base ai consumi energetici. Inoltre essa definisce modalità di classificazione ed etichettatura tramite l'applicazione di approcci di tipo statistico.

Nel complesso la metodologia delineata mira a definire uno strumento, per quanto possibile semplificato, applicabile al settore degli impianti di depurazione delle acque reflue, tenendo conto sia della complessità di tali sistemi in termini di configurazione impiantistiche e tipologia di processi sia delle informazioni sui consumi energetici più comunemente disponibili e reperibili. Di

fatto va detto che, nel panorama impiantistico, sono numerose le casistiche in cui i dati di consumo energetico disponibili fanno riferimento all'impianto globale mentre risultano limitati i casi in cui è possibile ottenere una disaggregazione dei consumi per comparto, processo o componente elettromeccanica. Allo stesso modo le caratteristiche quali-quantitative delle acque reflue sono solitamente disponibili solo per acque all'ingresso dell'impianto e all'uscita, dove campagne di analisi sono programmate secondo quanto stabilito dall'assetto normativo. Un livello informativo di maggior dettaglio richiederebbe la conduzione campagne ad hoc di monitoraggio con misurazioni dirette in campo dei consumi e delle caratteristiche chimiche delle acque reflue, con conseguente impiego di risorse economiche. In alcuni casi, ove sono presenti sistemi avanzati di controllo di processo dotati di sonde di misura e sistemi di acquisizione dati in continuo, è possibile avere dati di monitoraggio con maggiore frequenza e relativi a diverse sezioni dell'impianto. In questi casi è possibile definire un quadro conoscitivo di maggior dettaglio.
La metodologia punta a soddisfare una serie di criteri ritenuti di basilare importanza per poter definire politiche gestionali ed interventi di efficientamento energetico nel comparto della depurazione. In particolare l'intento finale è definire un *tool* capace di :

a) costituire un sistema oggettivo di valutazione delle efficienze prestazionali degli impianti di depurazione;

b) consentire un'attendibile analisi comparativa tra impianti di depurazione basato sul livello dei consumi energetici conseguiti;

c) effettuare analisi di *benchmark* tra impianti tenendo conto di parametri quali la taglia dimensionale di appartenenza, la configurazione impiantistica esistente e le tecnologie presenti;

d) individuare e definire potenziali interventi per conseguire il miglioramento della prestazione energetica degli impianti a fronte degli obiettivi di efficientamento definiti nella fase di benchmark.

Definizione della metodologia di classificazione ed assegnazione di etichette energetiche agli impianti di depurazione

La metodologia delineata nel corso delle attività si struttura su due fasi principali ognuna delle quali sviluppata su passaggi consecutivi che consentono di sfruttare il contenuto informativo di opportuni indicatori di prestazione energetica (**KPI*s***) al fine di:

Fase 1) effettuare analisi di benchmark e posizionare gli impianti di depurazione in base alle prestazioni energetiche rispetto a valori di riferimento;

Fase 2) definire metodi di classificazione degli impianti ed assegnare loro idonee etichette commisurate alle prestazioni energetiche tramite tecniche di statistica multivariata.

Fase di benchmark e valutazione delle performance energetiche degli impianti

La fase di benchmark prevede il confronto delle prestazioni energetiche degli impianti di depurazione con valori di riferimento desunti da un data-set elaborato da ENEA nel corso dell'annualità 2016 (RdSPAR2016027-ENEA). Il database di riferimento raccoglie e restituisce in forma tabellare le informazioni inerenti i consumi energetici di impianti di depurazione, acquisite nel corso di una dettagliata analisi di letteratura settoriale, a livello nazionale ed europeo, e mediante esperienze dirette di misurazione su impianti di depurazione esistenti. Successivamente alla fase di acquisizione dati, le informazioni ricavate sono state elaborate per il calcolo dei KPIs, i cui valori permettono di esprimere in modo immediato e conciso i consumi energetici (complessivi o per sezione impiantistica) e costituiscono la base per un raffronto tra le prestazioni di impianti di

depurazione. I KPI utilizzati sono quelli più comunemente riscontrabili in studi di settore e vengono elaborati rapportando i consumi energetici alla volumetria delle acque reflue trattate (kWh/m^3), agli abitanti equivalenti di progetto o a quelli effettivamente serviti (kWh/A.E. anno) e all'efficienza di rimozione (kWh/kg COD_{rim}). Gli indicatori elementari di performance sono stati quindi organizzati secondo criteri quali: taglia impiantistica di appartenenza; ciclo di trattamento applicato (CAS, BNR, digestione anaerobica); specifiche tecnologie implementate (aerazione prolungata, filtri percolatori, bioreattori a membrana, oxidation ditches, lagunaggio). Rispetto all'annualità 2016, il database è stato aggiornato riportando ulteriori casistiche provenienti dall'analisi di casi diretti e i valori dei KPI sono stati analizzati per la ricerca di *outliers* al fine di rendere ulteriormente affidabile il contenuto informativo e nel contempo validare il data-set in vista dell'applicazione di tecniche di tipo multivariato previste nella fase successiva. Per l'individuazione degli outlier sono stati applicati test statistici basati sulla distanza Euclidea, di *Mahalanobis* e di *Chauvenet*. Tali test sono appositamente concepiti ai fini dell'individuazione di *outlier* multivariati e sono stati scelti in virtù del numero delle variabili considerate, in questo ambito quindi dei tre KPI presi in esame. In seguito alla identificazione di dati anomali, riconosciuti tali tramite l'analisi dei risultati dei test statistici, si è quindi proceduto alla loro eliminazione dal database. Il criterio di esclusione utilizzato ha previsto la rimozione dei valori di KPI identificati quali outlier da almeno due dei tre test applicati. Si propone quindi in **Tabella 2**2 il data-set riportante i valori dei KPI organizzati per taglia, a valle della fase di rielaborazione.

Tabella 2 Data-set dei i valori dei KPI organizzati per taglia impiantistica

	<2 K	n.36 WWTP		2-10K	n. 62 WWTP		10-50K	n.92 WWTP	
KPI	**kWh/ m³**	**kWh/ AE*a**	**kWh/ COD_{rim}**	**kWh/ m³**	**kWh/ AE*a**	**kWh/ COD_{rim}**	**kWh/ m³**	**kWh/ AE*a**	**kWh/ COD_{rim}**
Max	3,13	157,48	3,89	1,63	139,98	5,61	1,68	118,00	2,84
75° perc.	2,21	118,49	2,76	0,83	75,18	1,81	0,63	51,14	1,20
Media	1,65	86,04	2,11	0,63	59,01	1,34	0,50	41,63	0,95
25° perc.	1,08	56,30	1,38	0,39	39,01	0,45	0,26	26,92	0,44
Min	0,49	18,28	0,53	0,19	17,08	0,17	0,11	12,97	0,14
Mediana	1,57	82,74	2,03	0,55	51,91	1,01	0,47	36,91	0,73

	50-200K	n. 47 WWTP		> 200K	n. 23 WWTP	
KPI	**kWh/ m³**	**kWh/ AE*a**	**kWh/ COD_{rim}**	**kWh/ m³**	**kWh/ AE*a**	**kWh/ COD_{rim}**
Max	0,93	80,00	3,26	0,78	98,00	2,64
75° perc.	0,57	38,95	1,08	0,47	40,90	1,30
Media	0,47	30,11	0,95	0,39	32,40	1,01
25° perc.	0,32	20,33	0,51	0,31	20,07	0,60
Min	0,13	9,92	0,23	0,21	9,53	0,23
Mediana	0,51	26,36	0,74	0,36	25,79	0,95

Come atteso, la taglia impiantistica in cui sono stati individuati il maggior numero di outlier è quella al di sotto dei 2k A.E.. In impianti di depurazione appartenenti a basse classi dimensionali la normativa richiede per la verifica della conformità allo scarico una minore frequenza dei controlli, vi è in generale una limitata capacità di laminazione delle portate di ingresso e non sono

generalmente presenti sistemi di controllo e gestione automatica di processo in ragione dei costi di investimento iniziali. Pertanto i dati disponibili, sia relativi alle caratteristiche quali-quantitative delle acque reflue sia dei consumi energetici, possono risultare non sufficientemente rappresentativi dello stato reale di funzionamento degli impianti e portare pertanto al calcolo di valori di KPI anomali. Per gli impianti di taglia superiore di contro, solo per alcuni rari casi i test statistici hanno individuato outlier. Nel caso della classe dimensionale maggiore a 200k A.E. nessun outlier è stato individuato.
La tabella consente di effettuare una rapida analisi comparativa dei consumi energetici di un impianto di depurazione delle acque reflue in base alla sua classe dimensionale tramite il raffronto dei valori dei singoli indicatori di performance con valori di riferimento; allo stesso tempo, essa offre la possibilità di cogliere le "distanze" dei KPI con impianti dalle maggiori performance energetiche (*benchmarking*). Tale approccio risulta di notevole importanza poiché permette, anche se in modo orientativo ed indicativo, di quantificare i potenziali risparmi a cui l'impianto può potenzialmente tendere implementando interventi e misure di efficientamento.

Procedura di classificazione e labelling energetico

La presente fase si basa sulla costruzione di un indice composito a partire dagli indicatori elementari KPI in grado di sintetizzare ed aggregare in maniera univoca il contenuto informativo in essi presente. L'indice tiene peraltro conto della loro importanza contributiva nella rivelazione del processo oggetto di analisi ovvero, nel caso specifico, la definizione delle performance energetiche degli impianti di depurazione di acque reflue. Vanno quindi individuati idonei valori di ponderazione per gli indicatori di base che consentano, in un secondo momento, una loro aggregazione finalizzata al calcolo del valore dell'indice finale capace di quantificare in un unico valore il consumo energetico globale di un impianto di depurazione (***GEI-Global Energetic Index).*** Una volta costruito, l'indice consente quindi di effettuare analisi comparative e ordinare gli impianti in base a criteri di performance (***rankizzazione)***.
Nel corso delle attività svolte, la costruzione dell'indice GEI è stata basata sull'uso di tecniche statistiche di analisi multivariata ed in particolare dell'analisi fattoriale (***Factorial Analysis-FA***) per il calcolo dei fattori di ponderazione ovvero dei pesi da utilizzare nella fase aggregativa degli indicatori di base (OECD, 2008). La procedura offre il vantaggio di essere adattabile al livello di dettaglio delle informazioni e al numero degli indicatori a disposizione. Nel caso specifico si è fatto riferimento ai 3 KPI disponibili, ma la metodologia risulta estendibile ad un numero maggiore di variabili, qualora siano a disposizione indicatori riferiti a sezioni o processi specifici condotti nel contesto degli impianti di depurazione. Prese in considerazione le matrici riportanti i valori dei KPI degli impianti presenti nel database di riferimento ed organizzati per classe dimensionale sono stati pertanto calcolati i valori dei pesi da assegnare agli indicatori elementari nella fase di aggregazione. I principali passaggi eseguiti sono elencati qui di seguito:

- Normalizzazione dei valori dei KPI presenti nelle matrici: tale fase consiste in una trasformazione dei dati finalizzata a rendere comparabili gli indicatori espressi con differenti unità di misura. Nel presente studio i valori dei KPI sono stati riproporzionati in modo da oscillare tra il valore più piccolo e quello più grande della distribuzione adottando il metodo di normalizzazione di tipo *min-max*;
- Applicazione di test statistici alle matrici definite per la verifica della loro assoggettabilità all'analisi fattoriale: la presente fase si avvale dell'uso di specifici test statistici con il fine di indagare il livello di correlazione esistente tra gli indicatori elementari al fine di verificare l'esistenza di un buon grado di interrelazione tra essi. Tale verifica è stata eseguita tramite il calcolo dell'indice di correlazione di *Pearson*, il test di sfericità di *Bartlett* e quello di

Kaiser-Meyer-Olkin. Il test di Pearson mette a confronto i KPI a coppie ed esprime, tramite il valore del coefficiente di correlazione r, un'eventuale relazione di linearità tra esse (valori di r tendenti all'unità sono indicatori di collinearità). Ove verificata, tale relazione deve peraltro risultare significativa (valori di significatività p-value <0.05) per poter procedere con l'applicazione della FA. I test di *Bartlett* e di *Kaiser-Meyer-Olkin* (*KMO*), invece, analizzano la matrice dei KPI in modo congiunto: mentre il primo verifica la presenza o meno di una correlazione significativa tra le variabili (valori di significatività *p*-value <0.05 consentono l'applicazione della FA), il secondo valuta il valore del rapporto tra la somma delle correlazioni osservate rispetto a quella delle correlazioni parziali ponendo delle soglie perché si possa procedere alla fattorializzazione della matrice considerata (valori di KMO>0.6 permettono di applicare la FA);

- Applicazione della FA e determinazione dei pesi a ciascun KPI di riferimento: l'applicazione della FA alle matrici dei KPI normalizzati mira alla definizione di opportuni pesi in grado di quantificare l'incidenza di ciascun indicatore sulle performance energetiche complessive degli ID considerati. La tecnica di analisi fattoriale valuta il contenuto informativo presente nella matrice ed esamina la varianza in comune che sussiste tra le variabili elementari estraendo alcune variabili supplementari non osservabili, comunemente definite fattori (latenti). Il contributo delle singole variabili di base sui tali fattori viene quantificato tramite la restituzione di un coefficiente, chiamato 'factor loading' o 'di saturazione'. In tal modo, la matrice di partenza viene trasformata in una nuova matrice riportante i factor loading delle variabili di base incrociate con i fattori estratti. Ulteriori elaborazioni sulla matrice dei factor loading consentono infine di definire il valore dei pesi da utilizzare nella fase di aggregazione degli indicatori elementari (*OECD*, 2008);
- Calcolo dell'indice GEI: tale passaggio si basa sull'aggregazione pesata dei valori dei KPI relativi ai singoli impianti di depurazione delle acque reflue. Nello specifico il metodo aggregativo utilizzato è di tipo lineare. Per la fase di calcolo dell'indice GEI il valore dei pesi derivati dalla FA viene ad essere normalizzato ad 1 per ogni classe dimensionale considerata ;
- Ordinamento gerarchico degli impianti di depurazione: tale passaggio consente di ordinare secondo un ordine di efficienza energetica gli impianti di depurazione in base al valore assunto dall'indice GEI;
- Definizione delle classi di performance energetica: la definizione di classi di efficienza energetica da applicare agli impianti di depurazione trae spunto dalle normative sull'°etichettatura energetica (Energy label) (Regolamento UE 1369/2017) applicata ai prodotti connessi all'energia che hanno impatto sul consumo di energia e su altre risorse essenziali. L'assetto normativo prevede la definizione di 7 classi di efficienza energetica indicate con le lettere da A a G ciascuna delle quali corrisponde a risparmi energetici. Nel presente lavoro si è adottata quindi la medesima simbologia e le classi sono state definite a partire dal valore della mediana dei dataset dei valori di GEI degli impianti organizzati per taglia. Tale valore individua il limite superiore della classe D e, considerando tale soglia, sono stati poi assegnati intervalli di riferimento per le classi superiori ed inferiori tramite equi-ripartizione del set di valori dei GEI rankizzati (procedura in accordo con gli standard europei per la certificazione energetica degli edifici, UNI EN ISO 52003-1:2018).
- Assegnazione ad una classe energetica e attribuzione dell'Energy Label: l'assegnazione di un impianto di depurazione delle acque reflue ad una classe energetica e l'attribuzione

dell'etichetta energetica (Energy Label) avviene tramite verifica dell'appartenenza del valore del relativo indice di consumo GEI al range prefissato delle classi A-G.

La metodologia descritta consente di classificare in modo oggettivo gli impianti di depurazione in funzione delle prestazioni energetiche. Per impianti oggetto di nuovi studi e valutazioni dei consumi è necessario ricavare le informazioni di base che cosentino di calcolare gli indicatori elementari. Per individuare la classe energetica di appartenenza è possibile quindi inserire il nuovo impianto nel database di riferimento in base alla taglia dimensionale e ripetere la metodologia descritta oppure, in modo più spedito, utilizzare i pesi di aggregazione ricavati. Nel primo caso l'impianto concorrerà contestualmente ad aggiornare il database di riferimento incrementandone la numerosità campionaria e rendendo, nel tempo, più affidabile l'informazione numerica presente.

La metodologia può essere utilizzata anche per effettuare paragoni tra impianti in modo indipendente dal database di riferimento. In tal caso i risultati sono da relativizzare al dataset considerato e la validità dell'analisi è da porre in relazione con il numero di casistiche considerate.
Si riportano qui di seguito (Tabella 3) i valori dei pesi, organizzati e normalizzati per classe dimensionale impiantistica, da assegnare agli indicatori nella fase di aggregazione per il calcolo dell'indice GEI. Questi sono stati quindi ricavati tramite l'applicazione dell'analisi fattoriale ai database riportanti i valori normalizzati degli indicatori elementari organizzati secondo la classe dimensionale impiantistica. Come descritto in precedenza, i test statistici di *Pearson*, di *Bartlett* e di *Kaiser-Meyer-Olkin* hanno permesso di verificare l'assoggettabilità alla FA dei database considerati. La **Figura** 6 mostra l'andamento dei pesi risultanti da applicare ai KPI nella fase di calcolo dell'indice GEI. Si evidenzia come, al di là della classe dimensionale più piccola e per l'indicatore KPI espresso come rapporto tra consumi e numero di abitanti equivalenti, il valore dei pesi ha un andamento di tipo lineare. Il valore dei pesi del KPI relativo alle unità di COD rimosse risulta incrementare al crescere della taglia impiantistica mentre un andamento opposto è verificabile per i valori del KPI relativo alle volumetrie di acque reflue trattate.

Tabella 3 Valori dei pesi normalizzati per classe dimensionale impiantistica

	TP<2k	TP 2-10k	TP 10-50k	TP 50-200k	TP >200k
kWh/m^3	0,39	0,35	0,35	0,31	0,30
kWh/A.E.·a	0,25	0,34	0,33	0,33	0,32
kWh/kgCOD$_{rim}$	0,36	0,31	0,32	0,35	0,38

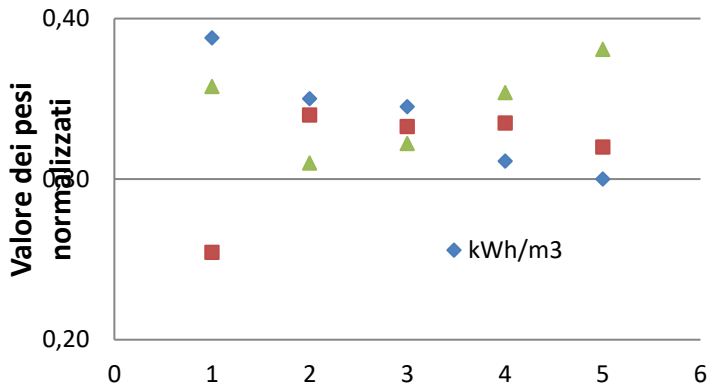

Figura 6 Plot del valore dei pesi normalizzati per singolo KPI

Caso applicativo della metodologia di classificazione e labelling energetico

Al fine di testare e validare la metodologia definita nel corso delle attività sono stati considerati alcuni casi studio inerenti impianti di depurazione su cui è risultato possibile disporre di dati specifici sui consumi energetici e sulle caratteristiche quali-quantitative delle acque reflue trattate. I dati di interesse sono stati collettati sulla base di una check-list appositamente predisposta da ENEA ed organizzati secondo la taglia dimensionale.

Si riporta qui di seguito, a titolo esemplificativo, i risultati relativi a due impianti appartenenti alla classe dimensionale >200k A.E. ed identificati, nel presente lavoro, con le sigle ID1 e ID2.

Come primo approccio ai casi studi si è proceduto ad effettuare una preliminare valutazione critica dei dati di input. Oltre a dati relativi al consumo energetico totale, alle volumetrie trattate ed alle efficienze di rimozione del COD rimosso è stato possibile procedere ad effettuare il calcolo di indicatori di prestazione in relazione ad altri parametri qualitativi delle acque reflue quali solidi sospesi totali, azoto e fosforo totale. Sono stati quindi ricavati su base mensile i valori degli indicatori elementari calcolabili e sono state verificate le relazioni esistenti tra i consumi energetici e le caratteristiche quali-quantitative delle acque reflue trattate. Le valutazioni effettuate si sono basate sulla verifica della proporzionalità tra consumi energetici, carichi di inquinanti rimossi e flussi di acque reflue trattate: data infatti una taglia dimensionale ed una configurazione impiantistica, un incremento dei consumi energetici è da relazionare a maggiori carichi di inquinanti da rimuovere e/o a maggiori apporti quantitativi di acque reflue afferenti. Si è proceduto quindi a valutare le relazioni esistenti tra i valori dei KPI calcolati ed i relativi paramenti di riferimento (i.e. abitanti equivalenti, volumetrie trattate, livelli di rimozione dei carichi di inquinanti), verificando la sussistenza delle correlazioni attese. I valori medi mensili relativi ai parametri considerati sono stati quindi plottati ed interpolati tramite l'impiego di una funzione potenza in accordo con quanto riportato nei riferimenti considerati (Campanelli et al., 2013). La bontà del fitting della funzione interpolante con le serie dati è stata quindi valutata attraverso l'analisi del coefficiente di determinazione R^2. Ai fini interpretativi, valori di R^2 tendenti all'unità esprimono un consistente livello di adeguamento del *fitting.*

Dall'analisi dei coefficienti di determinazione calcolati per tutte le coppie di parametri messi a confronto si evince, a conferma della attendibilità dei dati disponibili, un consistente livello di adeguamento del fitting della funzione interpolante con le serie plottate (Figura 7 e 8). Solo per la coppie di parametri kWh/m^3 vs m^3/d i valori di R^2 risultano al di sotto di 0.9, in particolare per l'impianto ID1. Tale osservazione sottolinea la necessità di effettuare verifiche sui dati di input al fine di comprendere se vi siano stati alcuni periodi in cui si sono verificate anomalie sull'impianto o se vi siano stati problemi di acquisizione dati. Comunque è da considerare che periodi particolarmente piovosi o la presenza di acque parassite in fogna possono portare in condizioni reali a fluttuazioni dei carichi di inquinanti e dei volumi delle acque reflue afferenti agli impianti di depurazione non rappresentative delle normali condizioni di funzionamento.

Nel prosieguo delle attività ai fini applicativi della fase preliminare di benchmark e della procedura di classificazione e labelling energetico i dati dei KPI espressi su base mensile sono stati ulteriormente elaborati ed espressi come valori medio, minimo, massimo, 25° e 75° percentile su base annuale (Tabella 4, Tabella 5).

Impianto ID 01

Figura 7 Plot dei valori dei KPI espressi su base mensile e loro interpolazione con una funzione potenza

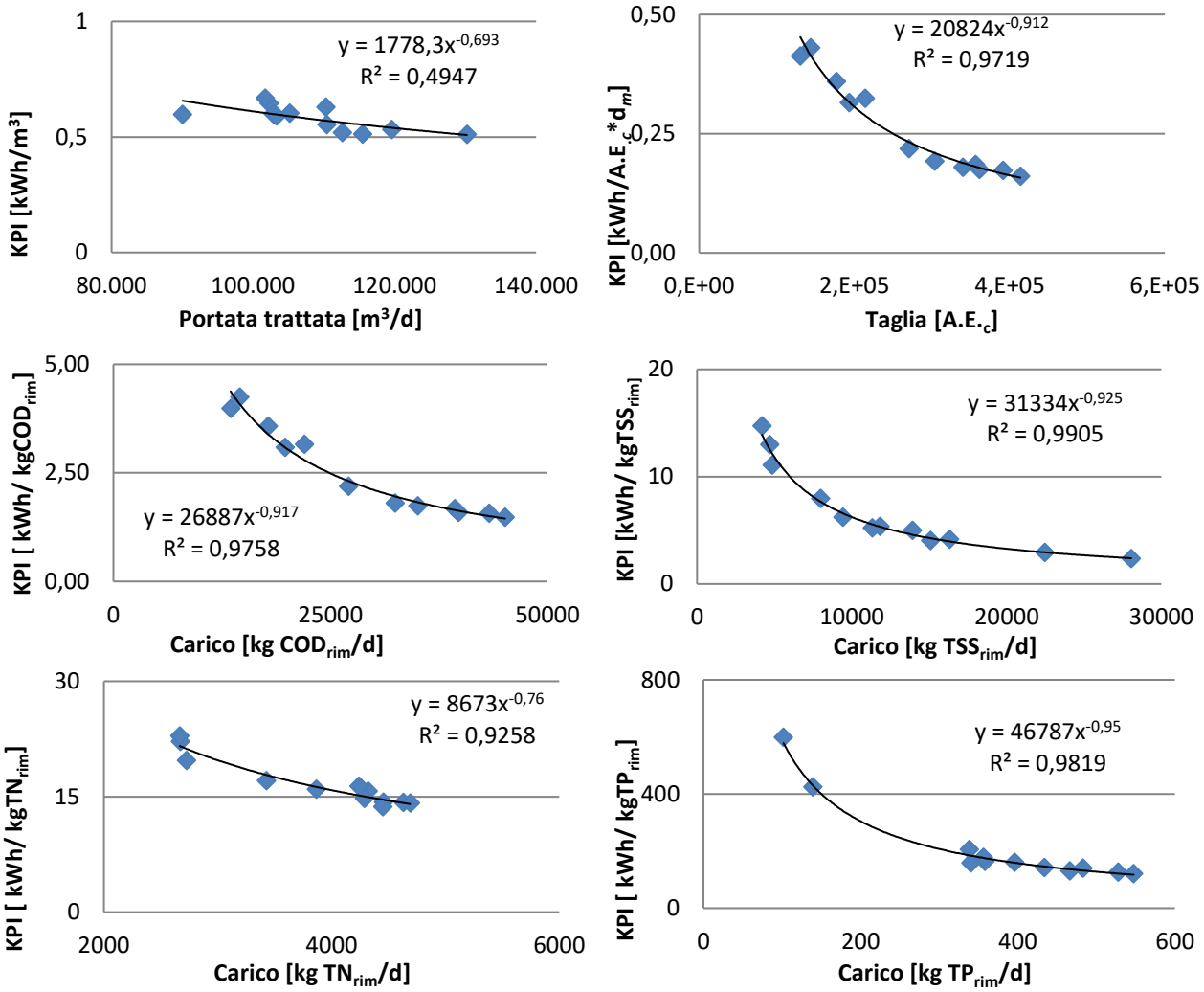

Tabella 4 Valori dei KPI calcolati su base mensile e loro media annua

ID1	kWh/m³	kWh/A.E.$_c$*d_m	kWh/kgCOD$_{rim}$	kWh/kgTSS$_{rim}$	kWh/kgTN$_{rim}$	kWh/kgTP$_{rim}$
gen	0,65	0,19	1,68	2,94	14,27	120,6
feb	0,51	0,16	1,48	2,38	14,21	126,25
mar	0,67	0,17	1,57	4,17	15,73	140,69
apr	0,63	0,32	3,16	4,99	16,39	205,19
mag	0,53	0,36	3,57	7,97	14,3	160,7
giu	0,55	0,32	3,09	13	13,72	130,93
lug	0,6	0,43	4,24	14,72	15,98	142,38
ago	0,6	0,41	3,98	11,09	19,74	157,88
set	0,52	0,19	1,8	6,22	17,09	163,25
ott	0,6	0,18	1,6	5,37	14,78	177,81
nov	0,51	0,22	2,19	5,23	22,18	425,21
dic	0,59	0,18	1,74	4,05	22,91	599,14
media	**0,58**	**0,26**	**2,51**	**6,84**	**16,78**	**212,5**
min	**0,51**	**0,16**	**1,48**	**2,38**	**13,72**	**120,6**
max	**0,67**	**0,43**	**4,24**	**14,72**	**22,91**	**599,14**
25° percentile	**0,53**	**0,18**	**1,66**	**4,14**	**14,29**	**138,25**
75° percentile	**0,61**	**0,33**	**3,26**	**8,75**	**17,75**	**184,66**

Impianto ID 02

Figura 8 Plot dei valori dei KPI espressi su base mensile e loro interpolazione con una funzione potenza

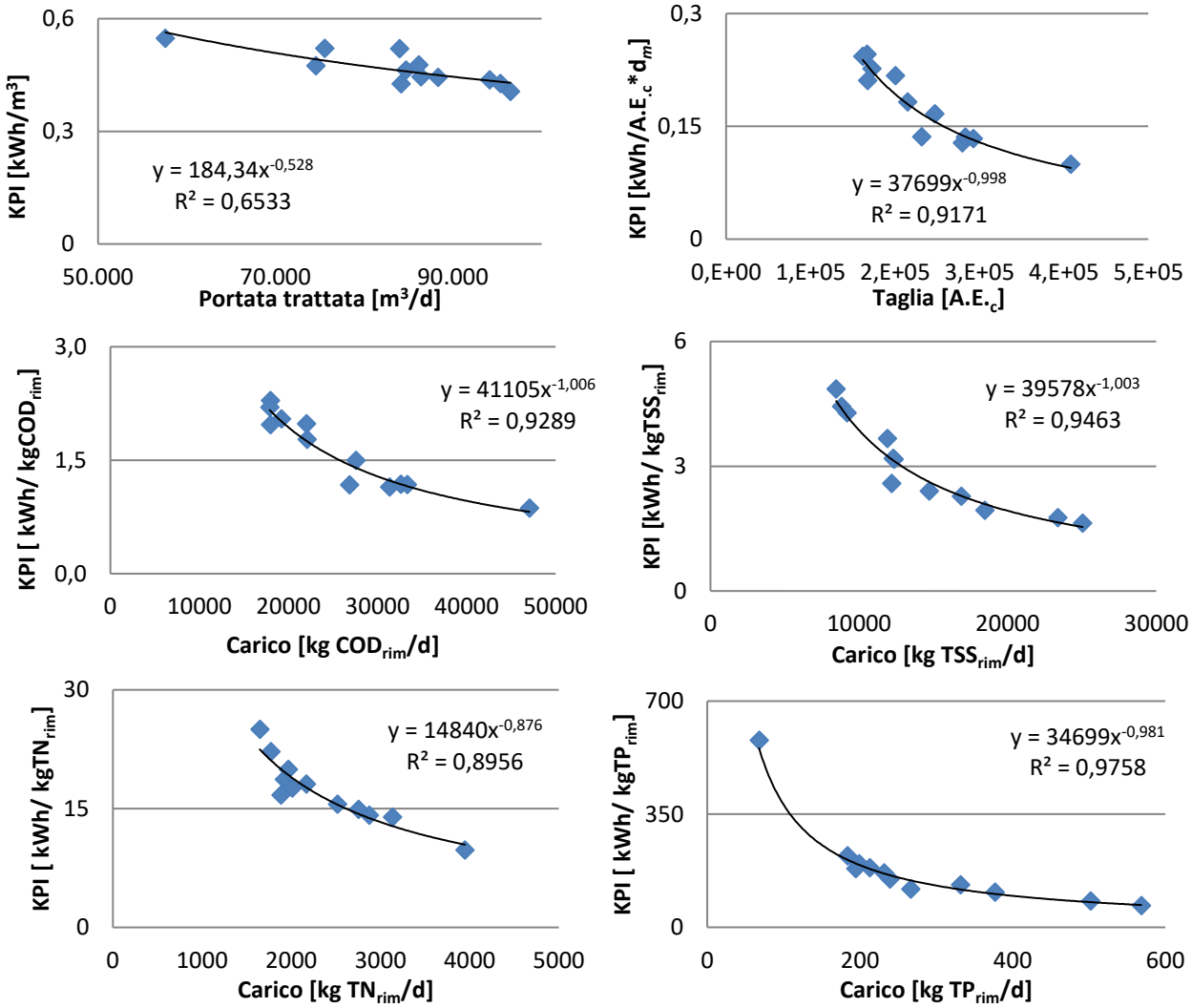

Tabella 5 Valori dei KPI calcolati su base mensile e loro media annuale

ID2	kWh/m³	kWh/A.E.$_c$*	kWh/kgCOD$_{rim}$	kWh/kgTSS$_{rim}$	kWh/kgTN$_{rim}$	kWh/kgTP$_{rim}$
gen-17	0.43	0.13	1.15	1.94	18.67	150.05
feb-17	0.44	0.17	1.49	1.76	25.00	82.03
mar-17	0.41	0.18	1.77	3.17	18.08	169.29
apr-17	0.44	0.23	2.04	4.44	15.57	197.34
mag-17	0.43	0.10	0.87	1.63	14.17	222.11
giu-17	0.45	0.14	1.18	2.28	9.74	67.67
lug-17	0.48	0.25	2.29	4.86	14.91	109.03
ago-17	0.52	0.22	1.98	3.67	13.92	131.60
set-17	0.52	0.24	2.20	4.28	22.20	579.13
ott-17	0.55	0.14	1.17	2.58	16.72	118.39
nov-17	0.47	0.21	1.97	2.40	17.57	181.93
dic-17	0.46	0.13	1.18	3.19	19.95	184.63
media	**0.47**	**0.18**	**1.61**	**3.02**	**17.21**	**182.77**
min	**0,41**	**0,1**	**0,87**	**1,63**	**9,74**	**67,67**
max	**0,55**	**0,25**	**2,29**	**4,86**	**25**	**579,13**
25°	**0,44**	**0,14**	**1,18**	**2,19**	**14,72**	**116,05**
75°	**0,49**	**0,22**	**2**	**3,82**	**18,99**	**187,81**

La fase preliminare di *benchmarking* è stata condotta procedendo al confronto tra i KPI calcolati e gli omologhi indicatori desunti dal database di riferimento. Nello specifico, i valori estrapolati da quest'ultimo sono rappresentati dal 25° e 75° percentile e i valori di minimo e massimo per ciascuno dei KPI considerati. Operativamente, è stata effettuata in primo luogo una comparazione tra i valori medi annuali dei KPI relativi ai 2 ID presi in esame ed il range 25°-75° percentile desunto dal data-set di riferimento, tenendo conto della rispettiva classe di appartenenza. In caso di discordanza, si è proceduto al confronto tra i valori estremi dei KPI relativi ai 2 ID in esame con i rispettivi valori desunti dal data-set di riferimento. Come si evince dalla Tabella 6, l'impianto ID1 risulta discordante per il KPI relativo ai consumi per unità di COD rimosso (kWh/kgCOD_{rim}, risultato evidenziato in rosso con valori ben superiori rispetto a quanto riscontrato in impianti di medesima taglia. La conoscenza sulla realtà impiantistica considerata ha consentito di giustificare la discordanza emersa ed imputare i consumi eccessivi alla tipologia di sistemi di areazione presenti a servizio del comparto biologico.

Tabella 6 Risultati del confronto dei valori dei KPI degli ID con quelli del database di riferimento.

Impianto	Classe	kWh/ m^3	perc. 25-75	min-max	kWh/ A.E. a	perc. 25-75	min-max	kWh/ COD_{rim}	perc. 25-75	min-max
ID1	**>200K**	**0,58**	>	<	**28,62**	=	=	**2,15**	>	>
ID2	**>200K**	**0,47**	=	=	**25,26**	=	=	**1,46**	>	<

Per la successiva fase di classificazione e labelling energetico si è proceduto ad inserire gli ID selezionati nel database di riferimento tenendo conto della taglia impiantistica di appartenenza (>200k A.E.). Nel caso specifico si è scelto, per chiarezza espositiva della metodologia, di ripetere l'intera procedura con applicazione della FA e calcolo dei pesi da assegnare ai KPI anziché ricorrere all'uso di quelli già ricavati e presentati in Tabella 3. In tal modo il dataset degli impianti ricadenti nella classe dimensionale considerata è stato ampliato ed aggiornato. I valori dei KPI della matrice risultante sono stati quindi normalizzati tramite il metodo *min-max* e, di seguito, sono stati applicati i test statistici per la verifica dell'assoggettabilità alla FA. I test di Bartlett e di Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) hanno indicato l'esistenza di un buon grado di interrelazione tra i valori dei KPI. Il livello di significatività del primo è risultato minore di 0.05 (p-value =0.0012) mentre il valore di KMO è risultato superiore allo 0.6 (KMO=0.62). A valle di tale verifica il dataset è stata sottoposto alla FA ed è stata ricavata la matrice del *factor loadings* (Tab. 7) dalla cui elaborazione sono stati calcolati i pesi da applicare nella fase di aggregazione dei KPI (analoghi a quanto riportato in Tabella 3).

Tabella 7 Tabella dei *factor loadings* ricavati dall'applicazione della FA

	Factor1	Factor2	Factor3
kWh/m^3	0,44	0,20	0,88
kWh/ AE·a	0,89	0,17	0,42
kWh/kgCOD_{rim}	0,15	0,98	0,16
Expl.Var	1,01	1,02	0,97
Prp.Totl	0,34	0,34	0,32

Il calcolo dell'indice GEI ha permesso di ordinare gli impianti in base alla performance energetica. Alla fase di ordinamento ha fatto seguito la definizione delle classi in base alle quali assegnare opportuni *energy label*. Come descritto in precedenza sono state individuate 7 classi contrassegnate con le lettere da A a G in concordanza con l'asseto normativo sull'etichettatura energetica ed è stato verificato, per ogni impianto, il range di appartenenza in base al relativo valore di GEI (Tab 8).

Tabella 8 Definizione di classi di appartenenza e labelling

	Classi energetiche	
	A	0,02
	B 0,02	0,04
	C 0,04	0,06
	D 0,06	0,08
	E 0,08	0,10
	F 0,10	0,12
	G 0,12	

I due ID considerati risultano rispettivamente alla 15ª e 12ª posizione del database analizzato. Tenendo in considerazione che il database di riferimento conta 23 impianti, i due ID mostrano avere delle prestazioni energetiche intermedie e il label loro assegnato risulta essere G per l'ID1 ed F per l'ID2 (Tab. 9).

Tabella 9 Valori dell'indice, rank e label energetico.

Impianti	GEI	Rank	Label
ID1	0,14	15	G
ID2	0,10	12	F
ID DB 1	0,07	6	D
ID DB 2	0,08	10	E
ID DB 3	0,10	13	F
ID DB 4	0,08	9	E
ID DB 5	0,08	8	D
ID DB 6	0,04	2	C
ID DB --	-----	-----	-----

I risultati della metodologia applicata fanno emergere pertanto come gli impianti sottoposti alle presenti valutazioni offrono considerevoli margini di miglioramento del bilancio energetico. Per la definizione di soluzioni implementabili risulta comunque necessario ricorrere a valutazioni di maggior dettaglio delle realtà impiantistiche, al fine di individuare i comparti e le unità più energivore su cui intervenire. Come discusso nei precedenti rapporti, strumenti utili allo scopo sono rappresentati dalla analisi dei consumi energetici tramite la conduzione di diagnosi energetiche che consentono di acquisire un adeguato livello informativo sulla base del quale stabilire e programmare interventi di efficientamento. Ai fini della valutazione delle migliorie

conseguibili tramite l'implementazione di specifiche soluzioni, sia di tipo gestionale che strutturale, è possibile ricorrere all'uso di strumenti di modellazione che consentono di effettuare analisi di scenario e quantificare i potenziali guadagni conseguibili. In tal modo è possibile indirizzarsi verso scelte coerenti con obiettivi di sostenibilità economica ed ambientale.

La metodologia sviluppata nel presente lavoro trova potenziali e concreti ambiti di applicazione a servizio di numerosi stakeholders quali gestori di impianti di depurazione e decisori politici. Di fatto, la possibilità di poter inquadrare in un contesto territoriale la situazione prestazionale energetica del parco impianti presente può facilitare l'individuazione delle casistiche su cui risulta necessario intervenire in via prioritaria con interventi di efficientamento, promuovere politiche di investimenti e predisporre strumenti normativi per incrementare i livelli prestazionali energetici. In tale ottica la metodologia sviluppata potrebbe essere vista come un tool per lo screening preliminare del parco impianti ovvero un sistema di supporto alle decisioni. D'altra parte, la facilità di lettura del contenuto informativo associato all'etichetta energetica, tutt'oggi in continua diffusione in ambito edilizio e per prodotti di tipo elettrico ed elettronico, rende i risultati della metodologia fruibili anche da parte dei cittadini. Laddove vengano apportati miglioramenti energetici importanti, il passaggio ad un livello di classificazione più elevato con l'assegnazione della relativa etichetta rende visibili, quantificabili e comunicabili gli sforzi effettuati e può garantire anche un ritorno di immagine. Da non sottovalutare inoltre che il conseguimento di risparmi energetici può consentire di liberare risorse da dedicare per azioni mirate ad efficientare gli impianti anche in termini di abbattimento e rimozione di inquinanti.

2.3 *Analisi del ciclo di vita del processo di compostaggio con confronto di scenari alternativi in impianti industriali e/o di biodigestione, valutazioni di compatibilità del processo nella diversa scala di impianto.*

L'analisi che segue confronta delle possibili soluzioni integrate per la gestione del rifiuto organico in un caso reale.
Per l'analisi del ciclo di vita (LCA) è stato infatti selezionato un caso concreto di applicazione al sistema di gestione del rifiuto organico in un comune esemplificativo. Il comune selezionato è il comune di Canale Monterano vicino al Centro di Ricerca della Casaccia con cui l'ENEA ha un accordo di collaborazione. Il comune è dotato di un impianto locale da 80 t/anno che serve l'area di Monte Virginio.
Per il software di base, tra i vari possibili è stato selezionato il software WARM (WAste Reduction Model) dell'EPA (Environmental Protection Agency degli USA).

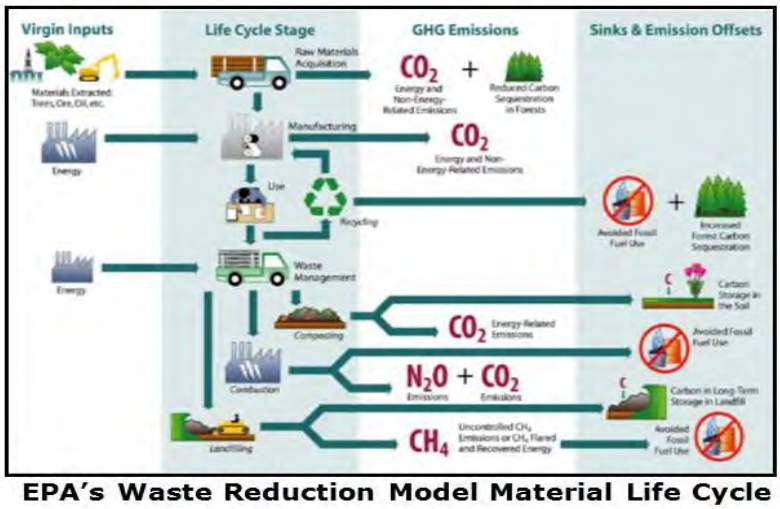

Figura 9: schema del modello WARM dell'EPA

La nuova versione 14 di WARM contiene un nuovo percorso di gestione del materiale, la digestione anaerobica e aggiornamenti regolari dei vari fattori utilizzati nel modello con le fonti di dati più recenti.

L'EPA ha aggiunto energia ed emissioni per la digestione anaerobica di materiali organici, compresi rifiuti alimentari, scarti da giardino e sostanze organiche miste. Questi fattori di emissione includono:

- l'energia e le emissioni associate al trasporto di materiali,
- l'operatività del digestore,
- le emissioni evitate dalla combustione di biogas,
- le applicazione di fertilizzanti (chimici e torba) evitate,
- rilascio di emissioni e stoccaggio del carbonio nel suolo derivanti dall'applicazione del digestato ai suoli agricoli.

Il percorso di digestione anaerobica in WARM include opzioni per l'utente per modellare un sistema di digestione sia wet (bagnato) che dry (a secco).
WARM consente inoltre all'utente di modellare l'applicazione anche del digestato (oltre che del compost) su terreni agricoli con o senza inspessimento. Inoltre, l'EPA ha rivisto il metodo di calcolo dell'energia e delle emissioni dal trasporto di materiali alle discariche, ai combustori, agli impianti di compostaggio e ai digestori anaerobici. Ciascuno di questi percorsi utilizza una fonte coerente per gli impatti dei trasporti per chilometro e mezzo di trasporto di rifiuti.

Inoltre, l'EPA ha apportato aggiornamenti regolari a vari fattori nel modello utilizzando le attuali fonti di dati. Le ultime statistiche del 2014 sul tenore di carbonio dei combustibili, la distribuzione della generazione di metano da discarica (per tipo di discarica) e il recupero dei gas di discarica e le percentuali di combustione sono state incorporate dall'EPA Inventory of United States Gas Emission and Sinks: 1990-2014. Il contenuto di carbonio non biogenico dei rifiuti solidi urbani misti (RSU) è stato aggiornato utilizzando i dati annuali sullo smaltimento dei rifiuti da rifiuti solidi urbani dell'EPA negli Stati Uniti, Fatti e cifre. Vari aspetti del mix di elettricità medio degli Stati Uniti sono stati aggiornati in base al Monthly Monthly Review dell'Amministrazione degli Stati Uniti sull'energia (DOE) Energy Information Administration (EIA), mentre i fattori di emissione della rete elettrica statale sono stati aggiornati sulla base dell'aggiornamento 2015 del database eGRID. L'EPA ha aggiornato le proprietà del materiale per i materiali biodegradabili utilizzati nella modellizzazione della digestione anaerobica e dello smaltimento in discarica sulla base di recenti lavori e ricerche. Queste proprietà includono il contenuto di carbonio, i fattori di accumulo di carbonio e la resa di metano. Questi aggiornamenti hanno comportato modifiche alla maggior parte dei fattori di emissione in WARM.
Purtroppo il modello non permette la personalizzazione del mix energetico in uso nel paese ai fini di una piena personalizzazione dei casi studio.
L'unica personalizzazione possibile, per questo fattore, è quella di selezionare uno degli stati degli USA. Allo scopo sono stati confrontate le componenti percentuali del mix energetico di ogni stato USA con quello italiano. Il confronto è stato effettuato calcolando la somma degli scarti quadratici per ogni componente. La tabella seguente, a titolo esemplificativo, presenta alcuni degli stati confrontati con l'Italia.

Tabella 10 Mix energetico di alcuni stati americani confrontati con il mix italiano

Stato	Gas	Petrolio	Carbone	Nucleare	Altro	Alternative	Scarto quadratico
Italia 17	**42,3**	**0,8**	**13,8**	**3,7**	**2,9**	**36,6**	**0**
Alaska	50,0	14,0	9,0	0,0	0,0	27,0	371
Arizona	29,0	0,0	27,0	30,0	0,0	14,0	1566
Arkansas	28,0	0,0	43,0	21,0	0,0	8,0	2188
California	41,0	0,0	0,0	8,0	0,0	51,0	426
Colorado	23,0	0,0	54,0	0,0	0,0	23,0	2201
Connecticat	46,0	1,0	1,0	47,0	0,0	5,0	3059
Florida	67,0	1,0	16,0	12,0	0,0	4,0	1754
Georgia	41,0	0,0	25,0	26,0	0,0	8,0	1453
Hawai	0,0	62,0	13,0	0,0	0,0	25,0	5701
Luisiana	60,0	3,0	13,0	16,0	0,0	8,0	1296
Massachusetts	66,0	2,0	2,0	15,0	0,0	15,0	1302
Oklaoma	**41,0**	**0,0**	**24,0**	**0,0**	**0,0**	**35,0**	**132**
Pennsylvenia	34,0	0,0	22,0	39,0	0,0	5,0	2393
Texas	45,0	0,0	30,0	9,0	0,0	16,0	733
Virginia	49,0	1,0	12,0	34,0	0,0	4,0	2038

Nel nostro uso di WARM è stato selezionato lo stato dell'Oklaoma che, rispetto all'Italia, ha il mix energetico più simile.

La versione 14 è anche la prima versione WARM che incorpora in uno strumento basato su un database sviluppato nel software openLCA. OpenLCA è un software open source gratuito per la valutazione del ciclo di vita sviluppato da GreenDelta.

La versione 14 di WARM è stata rilasciata a marzo 2016 ed è ora disponibile come strumento basato su un database sviluppato nel software openLCA, con versioni disponibili per utenti Windows e Macintosh.

Nel modello WARM, inizia dalla generazione del rifiuto con la stima dei fattori di emissione dei gas a effetto serra (GHG) per i rifiuti alimentari - tra cui carne bovina, pollame, cereali, pane, frutta e verdura e latticini. I fattori di emissione WARM GHG sono usati per confrontare le emissioni nette associate a questi sei tipi di materiali organici nelle seguenti cinque opzioni di gestione dei materiali: riduzione delle fonti, compostaggio, discarica, combustione e digestione anaerobica.

Per il comune di Canale Monterano sono state stimate le produzioni di organico (non la raccolta che è nota) con le assunzioni del piano regionale del Lazio. È stato ipotizzato che nel caso di autocompostaggio tutto il rifiuto organico sia effettivamente compostato. Nell'ipotesi di avvio ad impianto locale o distante è stato ipotizzato il mantenimento dell'attuale raccolta differenziata con la restante parte di organico avviata a discarica (come avviene ora).
La tabella seguente mostra alcuni dei dati di base per gli scenari analizzati.

Tabella 11: dati di base per gli scenari

Voce	Abitanti	Unità di misura
Abitanti	4169	n.
Produzione rifiuti	3409	t/anno
% Produzione organico/totale	30,8	Piano Lazio Prov.Roma
Produzione organico	1049,972	t/anno
Produzione procapite	0,8177020868	t/anno/ab
Produzione residuo	1907	t/anno
Produzione organico procapite	0,2518522427	t/anno/ab
Iscritti Albo compostatori	848	n.
Utenze TARI	2300	n.
Rifiuti totali umidi	1049,97	t/anno
Abitanti/Utenza	1,81	n.
Rifiuti organici/utenza	0,46	t/anno/u
Rifiut organicii autocompostati	387,12	t/anno
Rifiuti organici raccolti	237,00	t/anno
Rifiuti organici raccolti/utenza	0,27	t/anno/u
Raccolti+autocompostati	624,12	t/anno
Nell'indifferenziato	425,85	t/anno
% RD	59,44%	%
% Organico in indifferenziato	22,33%	%

Nel comune di Canale Monterano sono riconoscibili tre aree:

- Centro storico: case a più piani con poco verde, difficile compostaggio locale
- Monte virginio: borgata con parziale verde, possibile compostaggio di comunità
- Prati lunghi: villette con giardino, possibile compostaggio domestico.

Sulle 2300 utenze TARI attualmente 848 sono iscritte all'albo compostatori e effettuano il compostaggio domestico, in particolare nell'area di Prati Lunghi.

I risultati dell'analisi sono molto influenzabili dalle distanze da percorrere. Per questo motivo è stata posta particolare attenzione ai percorsi assumendo, per quanto possibile, assunzioni realistiche se non reali (misura percorsi effettivi).

Nel comune è attivo la raccolta differenziata porta a porta effettuata, dall'azienda incaricata (coop 29 giugno) tre giorni a settimana con giri dedicati alle tre aree.

Il percorso dei mezzi è stato monitorato con rilevazioni GPS. I risultati sono nella figura e nella tabella seguenti.

Sono stati inoltre ipotizzati diversi scenari con i possibili impianti di destinazione:

- industriale di compostaggio: caso attuale Masse D'Albe (AQ)= 150 km + cicli di raccolta

- industriale di BIOMAN: caso attuale per Roma, Maniago (PN) = 600 km + cicli di raccolta
- impianto locale a Montevirginio: distanza 0 km + cicli di raccolta
- impianto di comunità/autocompostaggio a Prati Lunghi: distanza 0 km nessuna raccolta (autoconferimento)

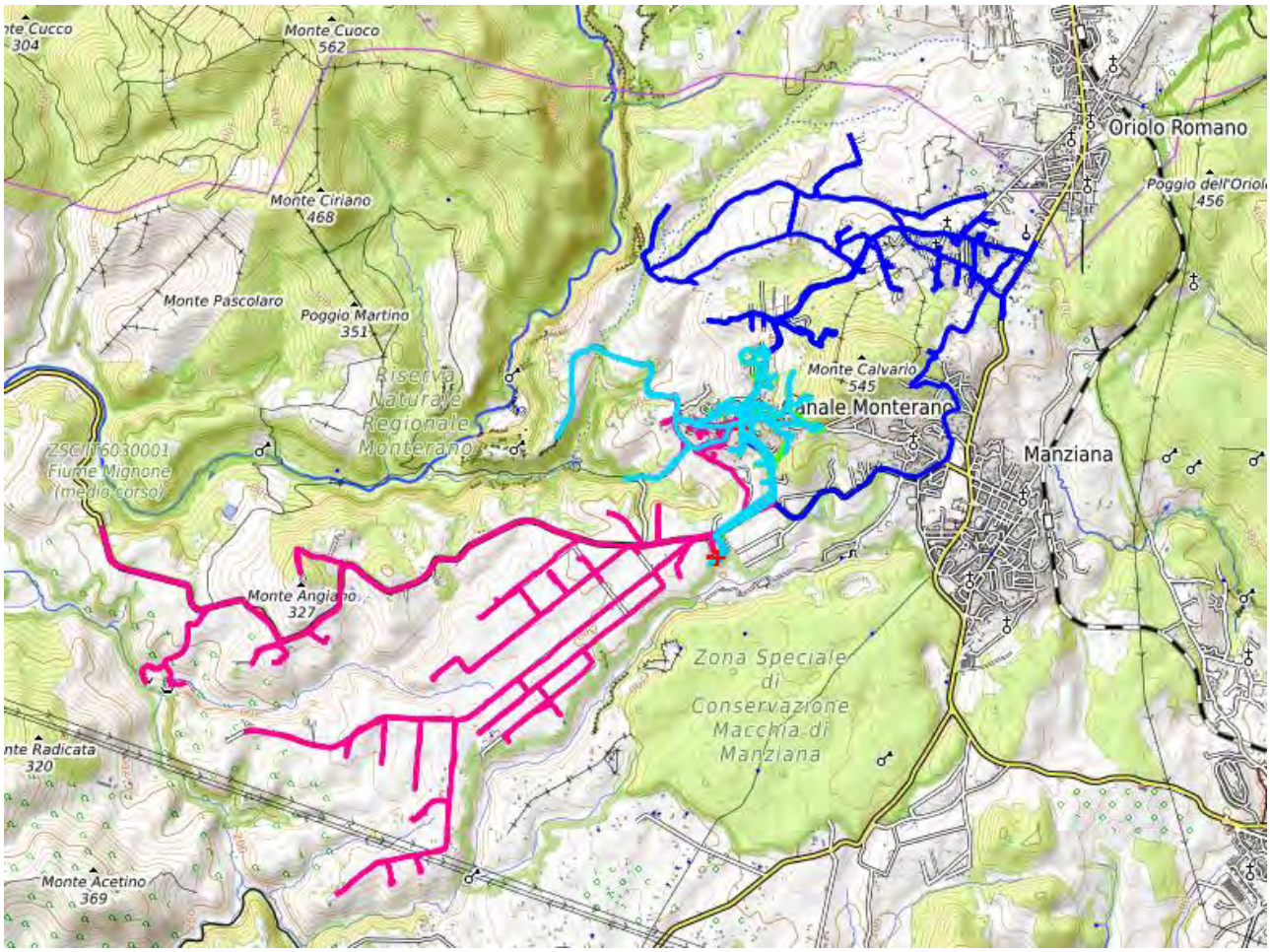

Figura 10: L'area analizzata e percorsi mezzi:Comune di Canale Monetrano

Tabella 12: percorso mezzi per i giri di raccolta, km percorsi e tonnellate raccolte

Area	Utenze	Rifiuti	Giro	giri/anno	Percorrenza	Raccolti
	%	t/anno	Km	n.	km/anno	t/giro
Centro storico	30	314,9916	38	156	5928	2,0
Monte Virginio	40	419,9888	42	156	6552	2,7
Prati lunghi	30	314,9916	63	156	9828	2,0
Totale	100	1049,972	143	156	22308	6,7

Un ciclo di raccolta è quindi composto da 3 giri (uno per area).
Si ipotizza che il rifiuto venga inviato ad impianti con camion da 25 t di carico.
Quindi, per esempio, essendo raccolte 6,7 tonnellate/ciclo in, mediamente 25/6,7=3.73 cicli prima di inviare il camion ad un impianto. In un anno i km percorsi saranno quelli dei cicli più quelli per giungere agli impianti. Naturalmente la situazione è diversa se si ipotizza la soppressione della raccolta a Prati Lunghi.

Per autocompostaggio di seguito si intende che tutta l'area di Prati Lunghi pratichi il compostaggio domestico.
Per compostaggio locale si intende un impianto locale a servizio di Monte Virginio (MV). In questo caso il percorso è solo quello della raccolta e non quello per l'impianto remoto.
Nel caso che non si ricorra all'autocompostaggio si ipotizza che la percentuale di raccolta differenziata sia la stessa attualmente raggiunta e quindi il restante organico vada in discarica con il secco residuo (22% del secco residuo).

La distanza della discarica ipotizzata è quella attualmente utilizzata 73 km (Porcari).

Sono stati ipotizzati i seguenti sei scenari alternativi:

1. Tutto a impianto compostaggio: l'intera raccolta viene portata all'impianto di compostaggio di Massa D'albe (attuale destinazione) a 150 km di distanza
2. Tutto Biodigestore: l'intera raccolta viene portata all'impianto di biodigestione. Non essendo attualmente il comune servito da impianto di biodigestione è stato assunta l'attuale principale destinazione per Roma Capitale ossia l'impianto della BIOMAN a Maniago (PD) distante 600 km.
3. Compost locale MV + impianto: invio a impianto compostaggio remoto (150 km) solo per Prati Lunghi e Centro Storico. Monte Virginio (MV) servito da raccolta e compostaggio locale
4. Compost locale MV+ Biodigestore: invio a impianto biodigestione (600 km) solo per Prati Lunghi e Centro Storico.Monte Virginio (MV) servito da raccolta e compostaggio locale
5. Compost Locale + autocompostaggio + impianto: invio a impianto compostaggio remoto (150 km) solo per Centro Storico. Monte Virginio (MV) servito da raccolta e compostaggio locale e Prati Lunghi in autocompostaggio (senza quindi ciclo di raccolta).
6. Compost Locale + autocompostaggio + Biodigestore:invio a impianto di biuodigestione remoto (600 km) solo per Centro Storico. Monte Virginio (MV) servito da raccolta e compostaggio locale e Prati Lunghi in autocompostaggio (senza quindi ciclo di raccolta).

Poichè WARM non considera aree separate gli scenari per WARM sono composti considerando le singole aree e sommando poi i risultati per ottenere l'intero paese.
In particolare sono stati utilizzati i seguenti dati:

Tabella 13: dati di produzioni utilizzati in WARM

	Discarica	Impianto	Impianto Locale	Biodigestore	Autocompostaggio	Totale
Scenario	T/anno	T/anno	T/anno	T/anno	T/Anno	T/anno
Tutto a impianto compostaggio	425,0	624,1	0,0	0,0	0,0	1049
Tutto Biodigestore	425,0	0,0	0,0	624,1	0,0	1049
Impianto (Centro+Prati)	425,0	374,5	0,0	0,0	0,0	799
Bodigestione (Centro+Prati)	425,0	0,0	0,0	374,5	0,0	799
Compost locale MV	0,0	0,0	249,6	0,0	0,0	250
Compost locale MV + impianto	425,0	374,5	249,6	0,0	0,0	1049
Compost locale MV+ Biodigestore	425,0	0,0	249,6	374,5	0,0	1049
Autocompostaggio Prati Lunghi	0,0	0,0	0,0	0,0	187,2	187
Compost Locale + autocompostaggio +	425,0	187,2	249,6	0,0	187,2	1049
Compost Locale + autocompostaggio +	425,0	0,0	249,6	187,2	187,2	1049

Si noti che nella tabella 799+250= 1049 t/anno.

Calcolando le distanze degli impianti e quelle dei cicli di raccolta necessari, si ottiene la tabella seguente dove, per compatibilità con WARM, le distanze sono espresse in miglia.

Tabella 14: distanze considerate in WARM

	Distanze			
	Compostaggio	Biodigestore	Autocompostaggio	Discarica
Scenario	Miglia			
Tutto impianto compostaggio	648	NA	NA	600
Tutto Biodigestore	NA	928	NA	600
Compost Locale Monte Virginio (CL)	26	NA	NA	NA
Autocompostaggio Prati Lunghi	NA	NA	0	NA
Centro+Prati a impianto	420	NA	NA	600
Centro+Prati a Biodigestore	NA	699	NA	600
Centro a impianto	585	NA	0	600
Centro a Biodigestore	NA	864	0	600

WARM stima emissioni di anidride carbonica (CO2), Carbonio (C), e la richiesta energetica (BTU).
I risultati migliori dipendono dal parametro da minimizzare nel confronto (CO2,C,BTU) degli scenari.
I primi due parametri (CO2,C) forniscono come migliore soluzione la soluzione a livello più elevato di integrazione tra le possibili soluzioni: impianto locale a Monte Virginio, Autocompostaggio a Prati Lunghi e avvio all'impianto industriale di compostaggio per l'area Centro Storico.

Tabella 15: OUTPUT WARM in termini di Emissioni e Energia richiesta

Scenario	CO2	C	Million BTU
Tutto a impianto compostaggio	192,75	52,57	1238,61
Tutto Biodigestore	301,67	82,27	401,18
CL + impianto	153,21	41,79	725,94
CL + Biodigestore	218,43	59,58	223,22
CL + autocompostaggio + impianto	70,21	32,39	827,18
CL + autocompostaggio + Biodigestore	135,43	50,18	324,46
CL=Compost Locale			

Se si considera invece il parametro energetico BTU la soluzione migliore è quella che utilizza il compostaggio locale a Monte Virginio e avvia al biodigestore la restante raccolta.

3 Conclusioni

È stata valutata l'applicabilità delle Nature Based Solutions (NBS), cioè di strategie e tecnologie per il drenaggio urbano sostenibile, per la riduzione del picco di portata e, allo stesso tempo, la limitazione del carico inquinante indirizzato al corpo idrico ricettore. In ogni configurazione analizzata risulta evidente come l'utilizzo di tecnologie verdi NBS sia in grado di ridurre significativamente i volumi e gli inquinanti inviati al corpo idrico ricettore, ponendosi come soluzioni ad elevata rilevanza idraulica e ambientale, e offrendo così differenti possibili strategie per migliorare la sicurezza urbana rispetto a eventi meteorici estremi rendendo le città più resilienti.
In merito al settore degli impianti di depurazione delle acque reflue, le attività condotte hanno permesso di definire e validare una metodologia di classificazione ed assegnazione di etichette energetiche (*labelling*) agli impianti in base ai loro consumi energetici. L'applicazione della metodologia a casi reali ha permesso di individuare i potenziali margini di ottimizzazione dei consumi e consente di indirizzare i gestori verso interventi di tipo gestionale o di modifica strutturale in ottica di sostenibilità economica ed ambientale.
Relativamente alla gestione e valorizzazione del rifiuto organico è stato sviluppato un modello del processo di compostaggio in compostatore elettromeccanico finalizzato a stimare consumi elettrici, tempi ed

emissioni a fronte delle scelte gestionali operate sulla macchina. L'analisi del ciclo di vita del processo ha permesso il confronto con scenari alternativi in impianti industriali e/o di biodigestione e le valutazioni di compatibilità del processo nella diversa scala di impianto. In particolare, nell'applicazione in un caso pilota (Canale Monterano,RM) l'LCA ha evidenziato l'importanza della preferibilità di soluzioni integrate

4 Riferimenti bibliografici

1. OECD 2008, Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide. Joint Research Centre-European Commission - 2008
2. Campanelli M., Foladori P., Vaccari M., 2013. Consumi elettrici ed efficienza energetica del trattamento delle acque reflue. Maggioli Editore
3. UNI CEI EN 16247-3:2014 Parte 3: Processi;
4. ISO 50002:2014 Titolo : Energy audits -- Requirements with guidance for use