

Allegato 4



Scenari a lungo termine e confronto tecnologie per impianto finale



UNIVERSITÀ
DI TRENTO

Dipartimento di
Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica

PAT/RFS504-22/06/2022-0442794 Allegato Utente 1 (A01)



CENTER FOR
SUSTAINABLE ENERGY

Studio preliminare dei processi di conversione energetica dei rifiuti indifferenziati

22/06/2022

Gruppo di lavoro:

Università degli Studi di Trento

Prof. Marco Ragazzi
Prof. Marco Tubino
Ing. Luca Adami
Ing. Marco Schiavon

Con i contributi di:

Prof. Gianni Andreottola
Dott. Pietro Castellani

Fondazione Bruno Kessler

Dott. Luigi Crema
Dott.ssa Eleonora Cordioli



Indice dei contenuti

1. Introduzione.....	1
2. Inquadramento e scenari per la gestione dei rifiuti urbani.....	1
2.1. Scenari 0: Stato di fatto	4
2.2. Scenario 1: Smaltimento dei rifiuti fuori provincia	6
2.3. Scenario 2: Massimizzazione del recupero di materiale.....	7
2.4. Scenari 3: Impianto di conversione energetica locale	8
2.4.1. Scenario 3.1: Impianto locale di conversione energetica dei rifiuti di taglia massima	9
2.4.2. Scenario 3.2: Impianto locale di conversione energetica dei rifiuti con massimizzazione del recupero di materiale ed invio totale a TMB.....	10
2.5. Confronto scenari	11
3. Processi e tecnologie di conversione energetica dei rifiuti	12
3.1. Combustione.....	13
3.1.1. Combustione con moduli produttivi aggiuntivi.....	14
3.2. Gassificazione	14
3.2.1. Confronto gassificazione – combustione per la conversione dei rifiuti ...	17
3.2.2. Utilizzo del syngas in applicazioni Waste-to-Energy	18
3.2.3. Utilizzo del syngas in applicazioni Waste-to-Chemicals	18
3.2.4. Utilizzo del syngas in applicazioni Waste-to-Hydrogen.....	21
3.2.5. Altri utilizzi del syngas	22
3.2.6. Tecnologie commerciali.....	23
4. Aspetti ambientali e autorizzativi	25
4.1. Proposte di integrazioni alla normativa sulle emissioni da trattamento termico dei rifiuti	25
4.1.1. Introduzione.....	25
4.1.2. Il potenziale ruolo del cromo esavalente.....	25
4.1.3. PCDD/F e dl-PCB	31
4.1.4. Proposte di integrazione alla normativa in vigore	32
4.2. Considerazioni sul percorso autorizzativo	34
4.2.1. Finalità	34
4.2.2. Le tipologie progettuali e le soglie dimensionali.....	35



4.2.3.	Fasi della procedura.....	37
4.2.4.	Tempi della procedura.....	38
4.2.5.	Approfondimenti su impianti di combustione dei rifiuti.....	39
4.3.	Considerazioni localizzative	42
4.3.1.	Introduzione.....	42
4.3.2.	Elenco delle aree idonee individuate dal 4° Aggiornamento del Piano provinciale di Gestione dei Rifiuti (sez. Rifiuti Urbani)	43
4.3.3.	Valutazione preliminare delle aree individuate	43
4.4.	Considerazioni sul concetto di <i>End-of-Waste</i>	45
4.5.	Matrici ambientali.....	46
5.	Confronto tra le soluzioni analizzate	48
6.	Conclusioni e raccomandazioni.....	50
	Bibliografia.....	52



Indice delle figure

Figura 1. Quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 0 – 2019.....	5
Figura 2. Quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 0 – 2021.....	6
Figura 3. Quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 1.....	7
Figura 4. Quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 2.....	8
Figura 5. Quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 3.1.	10
Figura 6. Quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 3.2.	11
Figura 7. Schema di processo Waste-to-Chemicals per la produzione di MeOH.	19
Figura 8. Schema di processo Waste-to-Chemicals per la produzione di DME.....	21
Figura 9. Schema di processo Waste-to-Chemicals per la produzione di idrogeno... ..	22



Indice delle tabelle

Tabella 1. Contributi al presente documento: estensore principale.....	1
Tabella 2. Dettaglio dei flussi di rifiuti inviati a smaltimento, a recupero e a impianto di conversione locale o fuori provincia per ciascuno scenario considerato.	3
Tabella 3. Riepilogo degli scenari considerati per la gestione dei rifiuti solidi urbani (valori espressi in t/anno).....	12
Tabella 4. Caratteristiche dell'impianto BioDME (Svezia) per la produzione di DME (Landälv et al., 2014).	21
Tabella 5. Tecnologie Waste-to-Energy, Waste-to-Chemicals e Waste-to-H ₂ disponibili in Europa e fuori Europa a livello commerciale per la conversione termo-chimica dei rifiuti tramite gassificazione.....	24
Tabella 6. Valori limite di concentrazione al camino per impianti di incenerimento dei rifiuti (D.Lgs. 152/2006, aggiornato al 2014).	26
Tabella 7. Frazioni massiche relative agli inquinanti atmosferici tossici e persistenti normati dal D.Lgs. 152/2006 (aggiornamento al 2014) e concentrazioni al camino dei singoli metalli pesanti stimati sulla base dei valori garantiti cumulativi riferiti ad un caso di studio (ARPA Emilia-Romagna, 2011; Rada et al., 2021).....	29
Tabella 8. Valori stimati della massima concentrazione media annua in aria ambiente a livello del suolo, della massima deposizione atmosferica media annua e rispettivi valori di R _c e HI per gli inquinanti tossici persistenti regolati dalla normativa (Rada et al., 2021).....	30
Tabella 9. Dipendenza del rischio cancerogeno cumulato per via inalatoria dal contributo del Cr VI alla concentrazione al camino di cromo totale.	31
Tabella 10. Flussi di massa al camino stimati dallo Studio di Fattibilità relativo all'impianto di trattamento termico dei rifiuti in località Ischia Podetti e stima dei flussi per un impianto equivalente di combustione diretta che riceva in ingresso il quantitativo di rifiuti definito dagli Scenari 3.1 e 3.2.....	41
Tabella 11. Aree individuate dal 4° Aggiornamento del Piano provinciale di Gestione dei Rifiuti (Provincia Autonoma di Trento, 2014) quali interessate dalle destinazioni urbanistiche "discarica", "aree di trattamento dei rifiuti" e "stazione di trasferimento".....	43

1. Introduzione

L'Agenzia Provinciale per la Protezione dell'Ambiente (APPA), la Fondazione Bruno Kessler (FBK) e il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica (DICAM) dell'Università degli Studi di Trento (UniTrento) hanno individuato un'attività di ricerca di comune interesse denominata "Studio preliminare dei processi di conversione energetica dei rifiuti indifferenziati". Lo studio si propone di realizzare un'analisi dei diversi processi di conversione energetica dei rifiuti urbani indifferenziati con riferimento agli impianti di piccola scala, finalizzata sia alla produzione di pubblicazioni scientifiche, sia alla redazione di un documento che potrà essere assunto come riferimento scientifico a supporto dell'Aggiornamento del Piano Provinciale di Gestione dei Rifiuti da parte della Provincia Autonoma di Trento.

L'accordo tra le parti per un'attività di ricerca della durata di sei mesi è stato sottoscritto il 18/10/2021 e il presente documento ne rappresenta il report scientifico collegato. Le parti del report curate rispettivamente da FBK e UniTrento sono evidenziate in Tabella 1.

Tabella 1. Contributi al presente documento: estensore principale.

Capitolo	Autore principale
1. Introduzione	UniTrento
2. Inquadramento e scenari per la gestione dei rifiuti urbani	FBK
3. Processi e tecnologie di conversione energetica dei rifiuti	FBK
4. Aspetti ambientali e autorizzativi	UniTrento
5. Confronto tra le soluzioni analizzate	FBK e UniTrento
6. Conclusioni e raccomandazioni	UniTrento

2. Inquadramento e scenari per la gestione dei rifiuti urbani

Considerando il quadro attuale della gestione dei rifiuti urbani nella Provincia di Trento ed usandolo come riferimento, sono stati definiti degli scenari per lo smaltimento dei rifiuti volti ad analizzare alternative alla situazione attuale che possano offrire la possibilità, da un lato, di ridurre i volumi da inviare a discarica, dall'altro di limitare i volumi inviati fuori provincia, così da evitarne i costi corrispettivi. Tutti i dati considerati sono riferiti all'anno 2019. Si è scelto, infatti, di considerare l'ultimo dato disponibile prima della pandemia COVID-19, perché questa potrebbe avere influenzato in maniera anomala i flussi.

Il quantitativo totale di rifiuti urbani prodotti nella Provincia di Trento è pari a 283.461,00 t/anno, di cui 29.396,5 t/anno di rifiuti classificati come speciali (CER 19 12 12) dopo il pre-trattamento delle raccolte differenziate. Nel 2019, una parte di questi rifiuti speciali (7.463,85 t/anno) veniva inviata a recupero energetico fuori provincia, mentre la restante parte (21.932,60 t/anno) veniva inviata a discarica. Allo stato attuale, invece, l'intero flusso di rifiuti CER 19 12 12 è gestito dalle stesse aziende che si occupano delle operazioni di riciclaggio/recupero di rifiuti da raccolta differenziata, per cui, nel 2021, essi non sono più destinati a discarica (per maggiori informazioni in merito a questo flusso specifico si rimanda al Capitolo 2 del Piano Provinciale

di Gestione dei Rifiuti). Inoltre, nel 2019 era attivo, per il trattamento di parte del residuo urbano, l'impianto di trattamento meccanico-biologico (TMB) sito in Rovereto, attualmente non utilizzato, con le seguenti rese:

- 56,26% di sopravaglio o CSS (combustibile solido secondario), inviato a recupero energetico fuori Trentino;
- 37,05% di biostabilizzato (da trattamento del sottovaglio);
- 6,69% di perdite.

Alla luce delle importanti differenze fra la gestione dei rifiuti urbani al 2019 e quella attuale, sono stati inclusi nel presente studio due scenari base (Scenario 0 – 2019 e Scenario 0 – 2021), che differiscono per la destinazione dei rifiuti speciali CER 19 12 12 e per l'utilizzo o meno dell'impianto di TMB. Si precisa che per gli scenari alternativi a quelli base non si considera il flusso dei CER 19 12 12 come possibile flusso aggiuntivo da inviare a smaltimento in discarica, in quanto rappresenta un flusso che la Provincia attualmente non gestisce né prevede di gestire nei prossimi anni; il flusso di rifiuti trattato dall'impianto di TMB, invece, è attualmente nullo, ma potenzialmente riattivabile qualora la Provincia lo ritenesse opportuno o necessario, ed è perciò stato considerato in alcuni degli scenari alternativi agli scenari base.

Oltre agli Scenari 0, sono stati analizzati tre scenari principali che propongono alternative volte a ridurre i quantitativi di rifiuti da smaltire in discarica, considerando che, visti i volumi disponibili in esaurimento, nel Piano Provinciale di Gestione dei Rifiuti la Provincia ha previsto come obiettivo quello di non conferire in discarica più del 6% del rifiuto urbano totale prodotto. Inoltre, il Decreto Legislativo 36/2003 stabilisce che il rifiuto urbano indifferenziato da destinare allo smaltimento in discarica venga prima stabilizzato qualora presenti una frazione putrescibile maggiore del 15% o un indice respirometrico dinamico maggiore di $1.000 \text{ mg}_{\text{O}_2} \text{ kg}_{\text{SV}}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Per cui si è considerato che l'impianto di TMB possa essere utilizzato per stabilizzare il residuo prima dell'invio a discarica.

Nello specifico, lo Scenario 1 prevede la stabilizzazione, tramite trattamento meccanico-biologico, di tutto il rifiuto indifferenziato prodotto nella Provincia di Trento e lo smaltimento fuori dal territorio provinciale di tutto il CSS (combustibile solido secondario) prodotto da tale trattamento, oltre alla quota di rifiuti già attualmente inviata al termovalorizzatore di Bolzano. Lo Scenario 2 prevede, invece, un tentativo di massimizzazione del recupero di materiale dal rifiuto residuo al fine di diminuire la quantità di rifiuti da conferire a discarica (previa stabilizzazione), con smaltimento fuori provincia del CSS prodotto e della quota di rifiuti attualmente inviata a Bolzano. Lo Scenario 3, suddiviso a sua volta in due sotto-scenari, prevede, invece, la realizzazione a livello locale di un impianto di trattamento dei rifiuti per il recupero energetico o loro conversione in prodotti di alto valore aggiunto.

In Tabella 2 è riportato, per ciascuno scenario considerato, il dettaglio dei flussi di rifiuti da inviare a smaltimento in discarica, a recupero e a impianto di conversione locale o fuori provincia, mentre la descrizione specifica degli scenari è fatta nel seguito.



Tabella 2. Dettaglio dei flussi di rifiuti inviati a smaltimento, a recupero e a impianto di conversione locale o fuori provincia per ciascuno scenario considerato.

SCENARIO	Stato di fatto	A smaltimento [t/anno]		A recupero [t/anno]		Altri contributi [t/anno]		A trattamento termo-chimico [t/anno]			
SCENARIO 0 2019	Stato di fatto con TMB	Biostabilizzato da TMB	3.513,30	Imp. recupero RD	115.139,44	Perdite TMB	634,70	In Trentino	Totale	0,00	
		Residuo da spazzamento	1.030,28	Da imp. tratt. prelim. RD	67.985,35	Inerti RD	974,76	Fuori Trentino	Termovalorizzatore Bolzano	13.380,00	
		Ingombranti non recuperabili	9.879,00	Recupero spazzamento	7.357,72	Totale	1.609,46	0,57%	CSS da TMB	5.335,00	
		Residuo	28.685,00	Ingombranti recuperabili	150,00				CER 19 12 12	7.463,85	
		CER 19 12 12	21.932,60	Totale	190.632,51	67,25%			Totale	26.178,85	9,24%
SCENARIO 0 2021	Stato di fatto senza TMB	Residuo da spazzamento	1.030,28	Imp. recupero RD	115.139,44	Inerti RD	974,76	In Trentino	Totale	0,00	
		Ingombranti non recuperabili	9.879,00	Da imp. tratt. prelim. RD	67.985,35	CER 19 12 12	29.396,45	Fuori Trentino	Termovalorizzatore Bolzano	13.380,00	
		Residuo	28.685,00	Recupero spazzamento	7.357,72	Totale	30.371,21	10,71%	Altro residuo	9.483,00	
				Ingombranti recuperabili	150,00				Totale	22.863,00	8,07%
		Totale	39.594,28	13,97%	Totale	190.632,51	67,25%				
SCENARIO 1	Smaltimento fuori provincia	Biostabilizzato da TMB	14.140,63	Imp. recupero RD	115.139,44	Perdite TMB	2.554,60	In Trentino	Totale	0,00	
		Residuo da spazzamento	1.030,28	Da imp. tratt. prelim. RD	67.985,35	Inerti RD	974,76	Fuori Trentino	Termovalorizzatore Bolzano	13.380,00	
		Ingombranti non recuperabili	9.879,00	Recupero spazzamento	7.357,72	CER 19 12 12	29.396,45	Totale	CSS da TMB	21.472,77	
				Ingombranti recuperabili	150,00	Totale	32.925,81	11,62%	Totale	34.852,77	12,30%
		Totale	25.049,91	8,84%	Totale	190.632,51	67,25%				
SCENARIO 2	Massimo recupero materiale	Biostabilizzato da TMB	10.462,59	Imp. recupero RD	117.139,44	Perdite TMB	1.890,13	In Trentino	Totale	0,00	
		Residuo da spazzamento	1.030,28	Da imp. tratt. prelim. RD	67.985,35	Inerti RD	974,76	Fuori Trentino	Termovalorizzatore Bolzano	13.380,00	
		Ingombranti non recuperabili	9.026,10	Recupero spazzamento	7.357,72	CER 19 12 12	29.396,45	Totale	CSS da TMB	15.887,60	
				Ingombranti recuperabili	1.002,90	Totale	32.261,34	11,38%	Totale	29.267,60	10,33%
		Residuo recuperabile	7.927,68	Totale	201.413,09	71,05%					
SCENARIO 3	SCENARIO 3.1 Impianto locale di taglia massima	Residuo da spazzamento	1.030,28	Imp. recupero RD	115.139,44	Inerti RD	974,76	In Trentino	Residuo	51.548,00	
		Ceneri/char da impianto locale	9.214,05	Da imp. tratt. prelim. RD	67.985,35	CER 19 12 12	29.396,45	Fuori Trentino	Ingombranti non recuperabili	9.879,00	
		Totale	10.244,33	3,61%	Recupero spazzamento	7.357,72	Totale	30.371,21	10,71%	Totale	61.427,00
	SCENARIO 3.2 Impianto locale con massimo recupero materiale	Biostabilizzato da TMB	16.704,64	Imp. recupero RD	117.139,44	Perdite TMB	3.017,80	In Trentino	Ingombranti non recuperabili	9.026,10	
		Residuo da spazzamento	1.030,28	Da imp. tratt. prelim. RD	67.985,35	Inerti RD	974,76	Totale	CSS da TMB	25.366,25	
		Ceneri/char da impianto locale	5.158,85	Recupero spazzamento	7.357,72	CER 19 12 12	29.396,45	Totale	33.389,01	11,78%	
		Totale	22.893,77	8,08%	Ingombranti recuperabili	1.002,90	Totale				
		Residuo recuperabile	4.459,32	Totale	197.944,73	69,83%					

TMB: trattamento meccanico-biologico
RD: raccolta differenziata
CSS: combustibile solido secondario

Risulta opportuno, prima di descrivere nel dettaglio i singoli scenari, definire le ipotesi assunte per la definizione degli stessi:

- nel seguito tutti i quantitativi di rifiuti sono espressi in tonnellate (t) e sono considerati su base annuale, mentre le percentuali riportate sono riferite al totale dei rifiuti urbani prodotti in Trentino;
- la produzione di rifiuti urbani si assume pari a quella dei dati raccolti al 2019 (283.461,00 t) e costante negli anni a seguire;
- la quota di rifiuti proveniente dalla raccolta differenziata e inviata direttamente a impianti di recupero ammonta a 115.139,44 t;
- la quota di rifiuti proveniente dalla raccolta differenziata e trattata in impianti di trattamento preliminare (98.356,56 t) viene integralmente recuperata ad eccezione di una frazione non recuperabile che comprende i rifiuti CER 19 12 12 e la quota di rifiuti inerti; il totale recuperato risulta così pari a 67.985,35 t.

Per alcuni scenari sono state fatte, in aggiunta alle precedenti, delle ipotesi più specifiche:

- fatta eccezione per lo Scenario 3.1, per garantire la stabilità biologica del rifiuto, si ipotizza che tutto il residuo non recuperabile venga trattato nell'impianto di TMB oggi sito in Rovereto, per il quale si considera la capacità massima autorizzata di 57.000 t e la stessa resa del funzionamento del 2019;
- nei casi in cui si prevede lo smaltimento fuori provincia di parte dei rifiuti (Scenari 1 e 2), si considera possibile l'invio al termovalorizzatore di Bolzano fino a 13.380,00 t di rifiuti urbani, pari alla quota attuale;
- per lo Scenario 2 si considera la possibilità di recuperare fino al 16% del rifiuto residuo, raggiungibile tramite un potenziamento della raccolta differenziata e l'attivazione della raccolta dei tessili sanitari;
- per lo Scenario 3.2 si considera la possibilità di recuperare fino al 9% del rifiuto residuo, raggiungibile tramite un potenziamento della raccolta differenziata (senza l'attivazione della raccolta dei tessili sanitari);
- per alcuni scenari (Scenari 2 e 3.2) si considera la possibilità di recuperare il 10% dei rifiuti ingombranti (1.002,90 t);
- per alcuni scenari (Scenari 2 e 3.2) si considera la possibilità di migliorare le rese del recupero della raccolta differenziata, ossia di conferire ulteriori 2.000,00 t del rifiuto residuo a impianti di recupero della raccolta differenziata;
- nei casi in cui è contemplata la realizzazione di un impianto di conversione locale dei rifiuti (Scenari 3.1 e 3.2), si ipotizza che almeno il 50% del residuo solido (ceneri) in uscita dall'impianto possa essere impiegato nei settori civile e stradale e, quindi, non conferito a discarica.

2.1. Scenari 0: Stato di fatto

Come accennato, sono stati considerati due scenari base, che rappresentano la gestione dei rifiuti solidi urbani al 2019 e al 2021, viste le importanti differenze tra i due anni relativamente al flusso di rifiuti CER 19 12 12 derivante dalla raccolta differenziata e all'utilizzo dell'impianto di TMB. In entrambi questi scenari si considera che la Provincia di Trento produca annualmente 283.461,00 t di rifiuti urbani (dati della gestione rifiuti 2019, pre-COVID), di cui 190.632,51 t (67,25%) sono recuperate direttamente dalla raccolta differenziata o da altro, i.e. impianto di trattamento preliminare della raccolta differenziata, spazzamento stradale, ingombranti. Ci

sono poi 974,76 t di inerti recuperati dalla raccolta differenziata, ma non gestiti direttamente dalla Provincia.

Nel 2019 (Scenario 0 – 2019) sono inviate a smaltimento in discarica 65.040,18 t (22,95% dei rifiuti urbani prodotti), che comprendono il residuo urbano (28.685,00 t), il residuo da spazzamento stradale non recuperabile (1.030,28 t), gli ingombranti non recuperabili (9.879,00 t), il biostabilizzato dell'impianto di TMB (3.513,30 t) e una parte dei rifiuti CER 19 12 12 derivanti dalla raccolta differenziata (21.932,60 t). Nel 2021 (Scenario 0 – 2021), invece, mancando i flussi del biostabilizzato e dei rifiuti CER 19 12 12, sono inviate a smaltimento in discarica 39.594,28 t (13,97%). Per quanto riguarda i flussi di rifiuti urbani inviati fuori provincia, nello Scenario 0 – 2019 si hanno 26.178,85 t (9,24%), comprendenti 13.380,00 t inviate al termovalorizzatore di Bolzano, 5.335,00 t di CSS prodotto dall'impianto di TMB e inviato ad Aviano e a Venezia, e 7.463,85 t di CER 19 12 12 provenienti dalla raccolta differenziata. Al 2021, invece, sono inviati fuori provincia i rifiuti già destinati al termovalorizzatore di Bolzano nel 2019, e il rifiuto residuo che nel 2019 era trattato presso l'impianto di trattamento meccanico-biologico (9.483,00 t), per un totale di 22.863,00 t (8,07%). Mentre i CER 19 12 12 sono gestiti interamente dalle aziende che si occupano del recupero di rifiuti da raccolta differenziata.

Si osserva che sia nello Scenario 0 – 2019 (Figura 1) sia nello Scenario 0 – 2021 (Figura 2), viene conferito a discarica un quantitativo di rifiuti urbani considerevolmente maggiore del limite del 6% definito nel Piano Provinciale di Gestione dei Rifiuti (22,95% e 13,97%, rispettivamente). Nel seguito si delineano, perciò, alcuni scenari che prevedono misure per la riduzione della quota di rifiuti da conferire a discarica, con invio fuori provincia oppure a un impianto locale di nuova realizzazione per la conversione energetica dei rifiuti sul territorio provinciale. Sono state inoltre considerate, per alcuni scenari, misure di miglioramento delle rese dalla raccolta differenziata e di massimizzazione del recupero di materiale, anch'esse volte a diminuire la quota di rifiuti urbani da destinare a smaltimento.

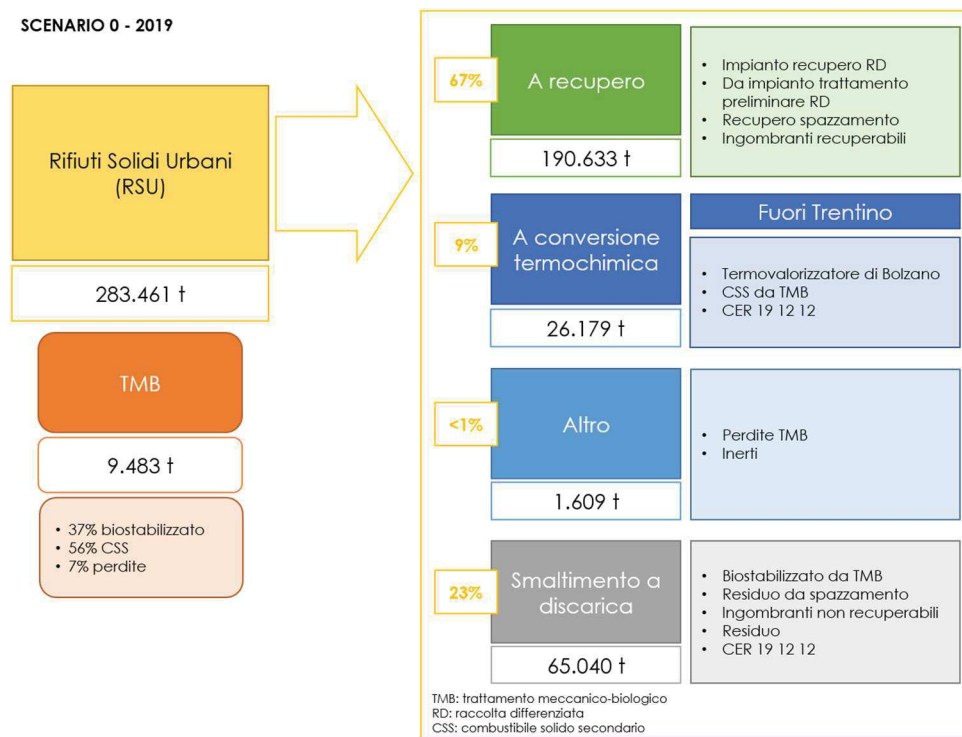


Figura 1. Quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 0 – 2019.

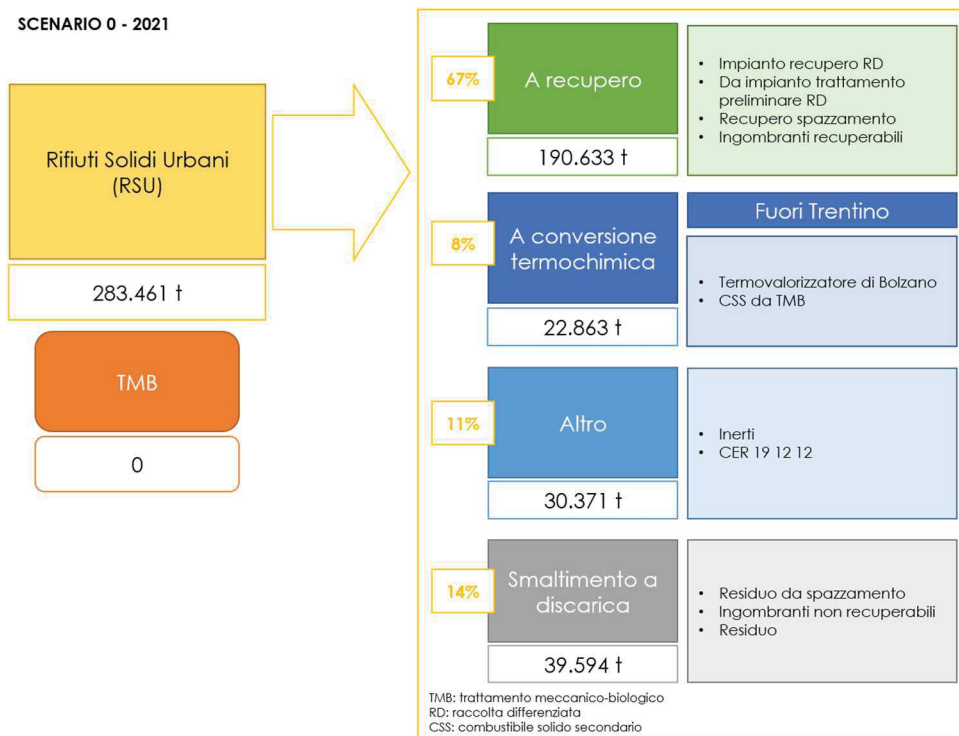


Figura 2. Quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 0 – 2021.

2.2. Scenario 1: Smaltimento dei rifiuti fuori provincia

Lo Scenario 1 prevede la stabilizzazione del residuo urbano indifferenziato, come richiesto dal Decreto Legislativo 36/2003, e lo smaltimento fuori provincia (a impianti di recupero energetico) non solo della quota attualmente già conferita al termovalorizzatore di Bolzano (13.380,00 t), ma anche del CSS prodotto dal TMB. L'obiettivo principale è quello di ridurre al minimo la quantità di rifiuti indifferenziati da gestire e smaltire localmente, così da evitare la saturazione dei volumi di discarica a disposizione. Vista la necessità di stabilizzare il rifiuto residuo, la quota totale di rifiuti da inviare a TMB comprende la quota già prevista nello Scenario 0 - 2019 (9.483,00 t) e il restante residuo indifferenziato (28.685,00 t), per un totale di 38.168,00 t (13,46%). Il biostabilizzato (sottovaglio opportunamente trattato) prodotto dall'impianto di TMB deve poi essere smaltito in discarica (14.140,63 t), mentre il CSS prodotto (21.472,77 t), utilizzabile come combustibile, è inviato fuori provincia. Così facendo, il rifiuto totale a discarica, comprendente il biostabilizzato, il residuo da spazzamento stradale e la frazione non recuperabile degli ingombranti, ammonta a 25.049,91 t (8,84%). Il totale inviato per lo smaltimento fuori provincia risulta invece pari a 34.852,77 t (12,30%).

In Figura 3 si riporta un quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 1. Stante la situazione attuale per quanto riguarda la quantità di rifiuti urbani prodotti, la resa della raccolta differenziata ed il residuo già conferito fuori provincia, lo Scenario 1, rispetto allo stato di fatto, comporta una riduzione della quantità di rifiuti da conferire a discarica (superando comunque il limite del 6% definito nel Piano Provinciale di Gestione dei Rifiuti), ma prevede anche il conferimento di una consistente quota di rifiuti fuori dal territorio provinciale. Ciò comporta innanzitutto la necessità di ricercare disponibilità maggiori sia a quelle del 2019 sia a quelle del 2021 per il conferimento di tutto il CSS prodotto dall'impianto di TMB, ma anche di considerare il costo di tale operazione. Si osserva, inoltre, che anche i costi di gestione

dell'impianto di trattamento meccanico-biologico possono diventare onerosi qualora vi si trattino considerevoli quantità di rifiuti e devono quindi essere accuratamente valutati per ulteriori considerazioni di carattere economico.

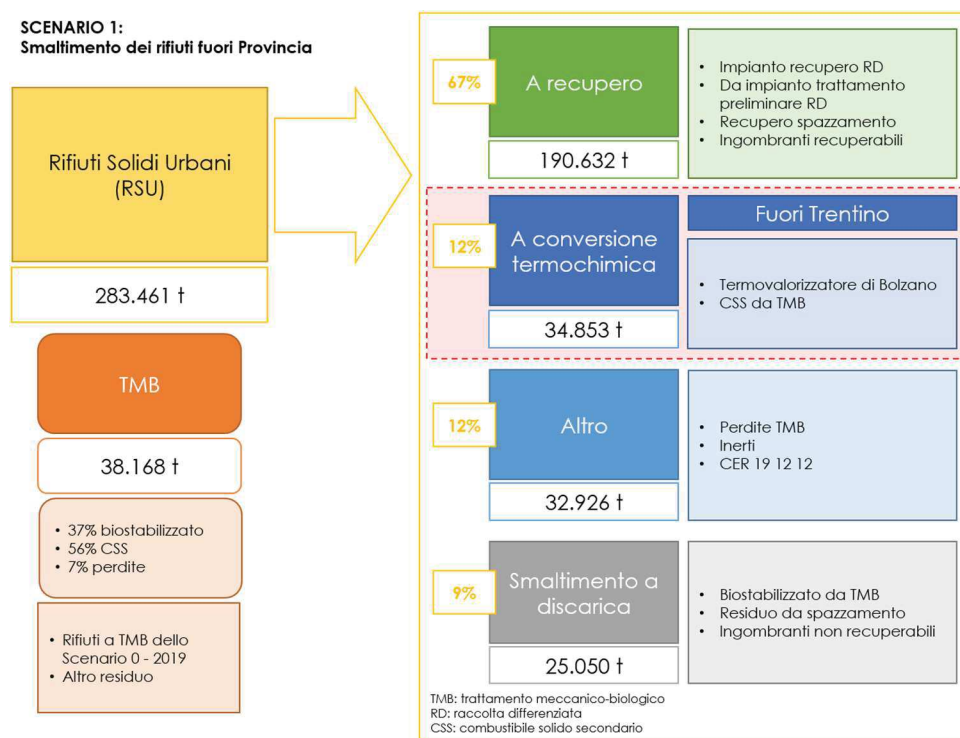


Figura 3. Quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 1.

2.3. Scenario 2: Massimizzazione del recupero di materiale

Lo Scenario 2 considera la possibilità di massimizzare il recupero di materiale sia dalla raccolta differenziata sia dal rifiuto residuo raccolto. In particolare, si ipotizza:

- il miglioramento delle rese di raccolta differenziata, con un aumento del recupero di 2.000,00 t su base annuale, per un totale di 117.139,44 t, con conseguente riduzione del rifiuto residuo;
- il recupero del 16% del residuo totale raccolto (7.927,68 t), raggiungibile tramite un potenziamento della raccolta differenziata e l'attivazione della raccolta dei tessuti sanitari;
- il recupero del 10% dei rifiuti ingombranti (1.002,90 t).

Ipotizzando queste migliorie a livello locale, il totale di rifiuti recuperati ammonterebbe a 201.413,09 t (71,05%), mentre i rifiuti da smaltire a discarica risulterebbero pari a 20.518,97 t (7,24%), tenendo conto che il rifiuto indifferenziato non recuperabile venga stabilizzato e che oltre a questo flusso si abbiano anche il residuo da spazzamento stradale e gli ingombranti non recuperabili. Vengono quindi inviati a TMB, oltre alla quota di residuo già considerata nello Scenario 0 - 2019 (9.483,00 t), anche 18.757,32 t di rifiuto indifferenziato, per un totale di 28.240,32 t (9,96%).

È utile osservare che la massimizzazione del recupero di materiale non è triviale considerando che già il 67,25% dei rifiuti urbani prodotti viene recuperato (Scenari 0), e che lo Scenario 2

deve prevedere investimenti non irrilevanti che consentano azioni sul territorio per incentivare ulteriormente la raccolta differenziata e/o la messa in funzione di un impianto di selezione sul residuo raccolto. In particolare, l'attivazione della raccolta differenziata per i tessili sanitari, nonché la realizzazione di un impianto apposito per il trattamento degli stessi, possono avere un impatto considerevole sui costi di gestione. Tuttavia, in questo modo, si raggiungerebbe una quota di residuo da conferire a discarica del 7,24%, molto vicina al limite del 6%, con una quantità di rifiuto da smaltire fuori provincia ridotta rispetto allo Scenario 1, ma comunque importante sia per i volumi, trattandosi di 29.267,60 t (10,33%), sia, conseguentemente, per i costi. Questi quantitativi, che comprendono la quota di rifiuti inviata all'inceneritore di Bolzano e il CSS prodotto dal TMB (15.887,60 t) rivelano i limiti di un'azione mirata esclusivamente ad un miglioramento della resa della raccolta differenziata e la necessità di valutare scenari alternativi che consentano di ridurre la quantità di residuo da smaltire senza la necessità di trovare ulteriore disponibilità per lo smaltimento all'esterno del territorio provinciale. In Figura 4 si riporta un quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 2.

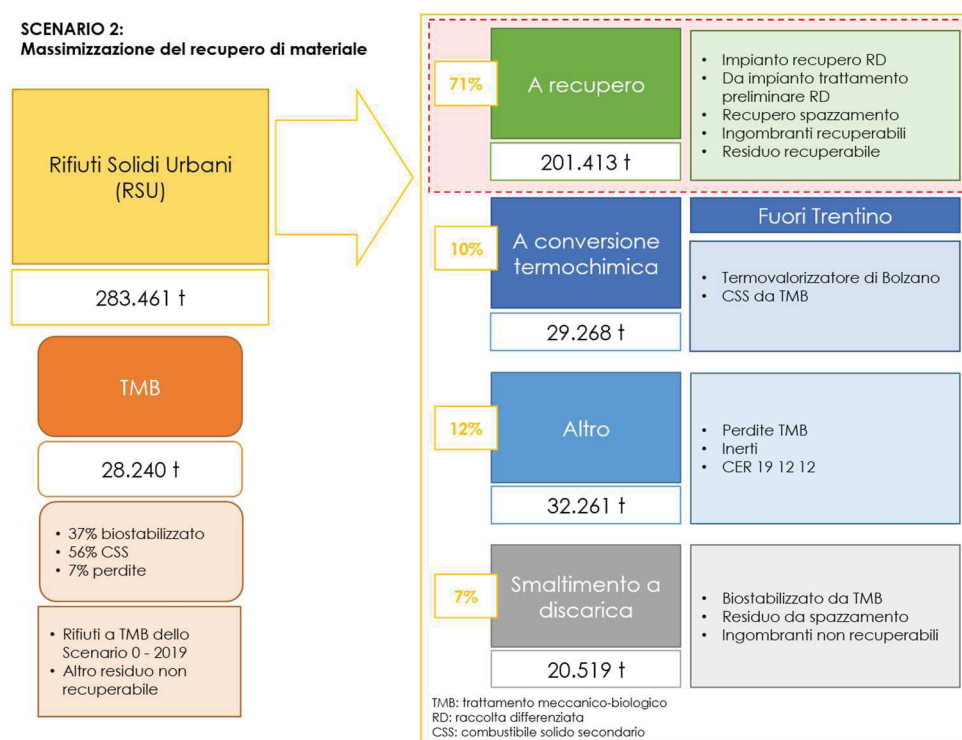


Figura 4. Quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 2.

2.4. Scenari 3: Impianto di conversione energetica locale

Gli Scenari 3 considerano la realizzazione di un impianto da localizzare nella Provincia di Trento per lo smaltimento dei rifiuti tramite loro conversione energetica, nell'ottica sia di evitare il conferimento fuori provincia del rifiuto residuo da smaltire, sia di minimizzare il conferimento a discarica locale per rientrare nei limiti del 6% stabilito dal Piano Provinciale di Gestione dei Rifiuti. Si considera, quindi, che anche la quota di rifiuti oggi inviata al termovalorizzatore di Bolzano venga gestita completamente a livello locale.

Risulta inoltre importante osservare che questi scenari intendono porre come obiettivo quello di valutare alternative di conversione energetica del rifiuto urbano che portino benefici a

livello locale. Da un lato la realizzazione di un impianto locale per lo smaltimento dei rifiuti consentirebbe un maggior livello di autonomia per quanto riguarda la gestione dei rifiuti, dall'altro le tecnologie di impianto di conversione energetica dei rifiuti prevedono la produzione di energia e/o prodotti chimici di varia natura, e quindi la valorizzazione del rifiuto urbano, nonché la possibilità di aprirsi a nuovi mercati strategici per la transizione energetica. Si ricorda che per entrambi i sotto-scenari qui di seguito considerati (Scenario 3.1 e Scenario 3.2) si ipotizza che almeno il 50% del residuo solido (ceneri/char) in uscita dall'impianto possa essere impiegato nei settori civile e stradale e, quindi, non conferito a discarica.

Le tecnologie disponibili per la conversione energetica dei rifiuti sono invece discusse nel Capitolo 3 del presente documento.

2.4.1. Scenario 3.1: Impianto locale di conversione energetica dei rifiuti di taglia massima

Lo Scenario 3.1 prevede la realizzazione, a livello locale, di un impianto di conversione energetica dei rifiuti di taglia massima, ovvero si suppone di non inviare alcun rifiuto all'impianto di trattamento meccanico-biologico e di trattare direttamente tutto il rifiuto urbano residuo in questo impianto di nuova costruzione. Si ipotizza, quindi, che le caratteristiche del rifiuto urbano, in particolare in termini di potere calorifico, siano tali da garantirne un corretto funzionamento. Il rifiuto considerato come feedstock comprende tutto il residuo, perciò anche quello che negli scenari base è inviato al termovalorizzatore di Bolzano e quello che nel 2019 era destinato all'impianto di TMB, nonché gli ingombranti non recuperabili, per un totale di 61.427,00 t (21,67% dei rifiuti urbani prodotti).

In questo modo risulta nulla la quota di rifiuti urbani da inviare per lo smaltimento fuori provincia (a cui corrisponde la completa autonomia nella gestione dei rifiuti) e minimizzata la quota di rifiuti inviata a discarica, che comprenderebbe solamente il residuo da attività di spazzamento stradale e la frazione non recuperabile del residuo solido (ceneri e/o char) dell'impianto locale di conversione energetica, per un totale di 10.244,33 t, pari al 3,61% del totale di rifiuti urbani prodotti, inferiore al limite del 6% indicato dalla Provincia.

La costruzione ed il mantenimento di un impianto di conversione energetica dei rifiuti per la gestione di oltre 60.000 t di rifiuti quale quello previsto in questo scenario potrebbe richiedere un investimento economico importante, che dipende innanzitutto dal tipo di impianto selezionato. Tuttavia, si osserva che in tal modo verrebbero azzerati completamente i costi di smaltimento dei rifiuti fuori provincia; inoltre, alcuni tipi di impianto, consentendo la produzione di prodotti chimici o combustibili strategici, potrebbero consentire tempi di ritorno dell'investimento soddisfacenti e vantaggiosi. Un'analisi economica approfondita sarebbe comunque indispensabile qualora questa opzione venisse considerata. Si osserva, infine, che, utilizzando il rifiuto tal quale come feedstock dell'impianto di conversione energetica, il trattamento meccanico-biologico per la stabilizzazione del residuo non sarebbe più necessario e si azzererebbero quindi anche tutti i costi di gestione relativi al TMB.

In Figura 5 si riporta un quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 3.1.

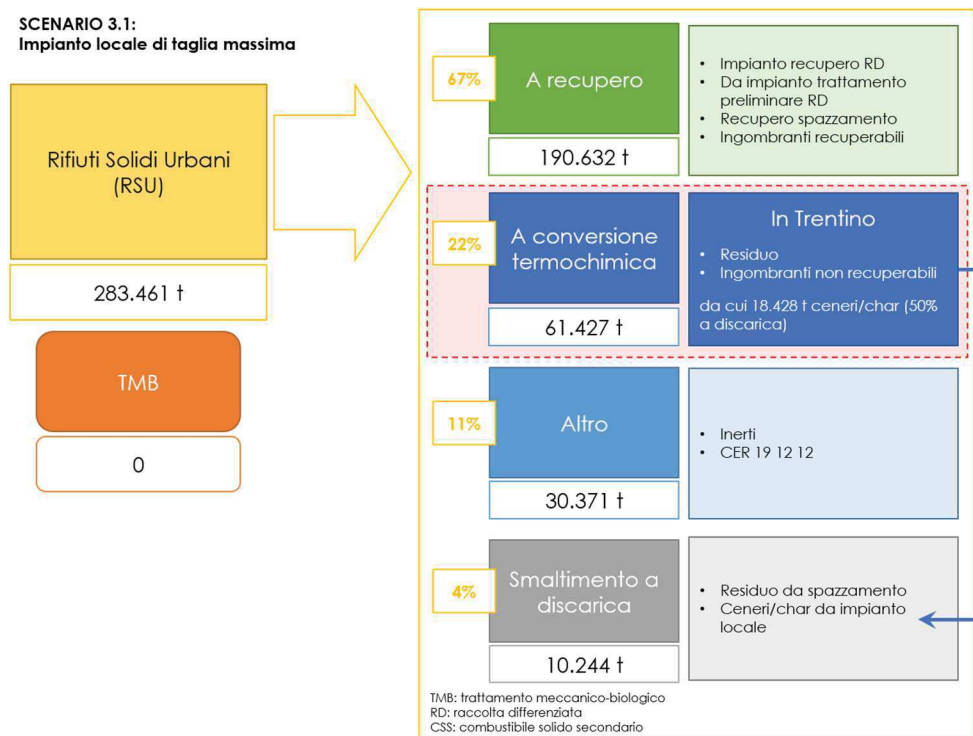


Figura 5. Quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 3.1.

2.4.2. Scenario 3.2: Impianto locale di conversione energetica dei rifiuti con massimizzazione del recupero di materiale ed invio totale a TMB

È stato considerato un ultimo Scenario, 3.2, che prevede la realizzazione di un impianto di conversione energetica dei rifiuti previo invio a TMB di tutto l'indifferenziato non recuperabile, e con miglioramenti del recupero di materiale. In particolare, si considera:

- il miglioramento delle rese di raccolta differenziata, con un aumento del recupero di 2.000,00 t su base annuale, per un totale di 117.139,44 t, con conseguente riduzione del rifiuto residuo;
- il recupero del 9% del residuo totale raccolto (4.459,32 t), senza l'attivazione della raccolta dei tessili sanitari;
- il recupero del 10% dei rifiuti ingombranti (1.002,90 t).

Si considerano perciò le migliorie al recupero come nello Scenario 2, ma con un recupero inferiore del residuo indifferenziato (9% anziché 16%), perché si ipotizza che prevedendo la costruzione di un impianto locale per la conversione energetica dei rifiuti la quota del residuo afferente ai tessili sanitari possa esservi conferita direttamente insieme al residuo indifferenziato. Tutto ciò consentirebbe di recuperare 197.944,73 t (69,83%) di rifiuti e comporterebbe un totale di 45.088,68 t (15,91%) da sottoporre a trattamento meccanico-biologico, da cui 25.366,25 t di CSS da usare come combustibile per l'impianto locale di conversione energetica. A quest'ultimo verrebbero conferiti anche gli ingombranti non recuperabili, per un totale di 34.392,35 t (12,13% dei rifiuti urbani prodotti). A discarica verrebbero conferiti, invece, il biostabilizzato prodotto dall'impianto di TMB, il residuo da spazzamento stradale, e le ceneri dell'impianto locale di conversione energetica, ossia

22.893,77 t (8,08%). In Figura 6 si riporta un quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 3.2.

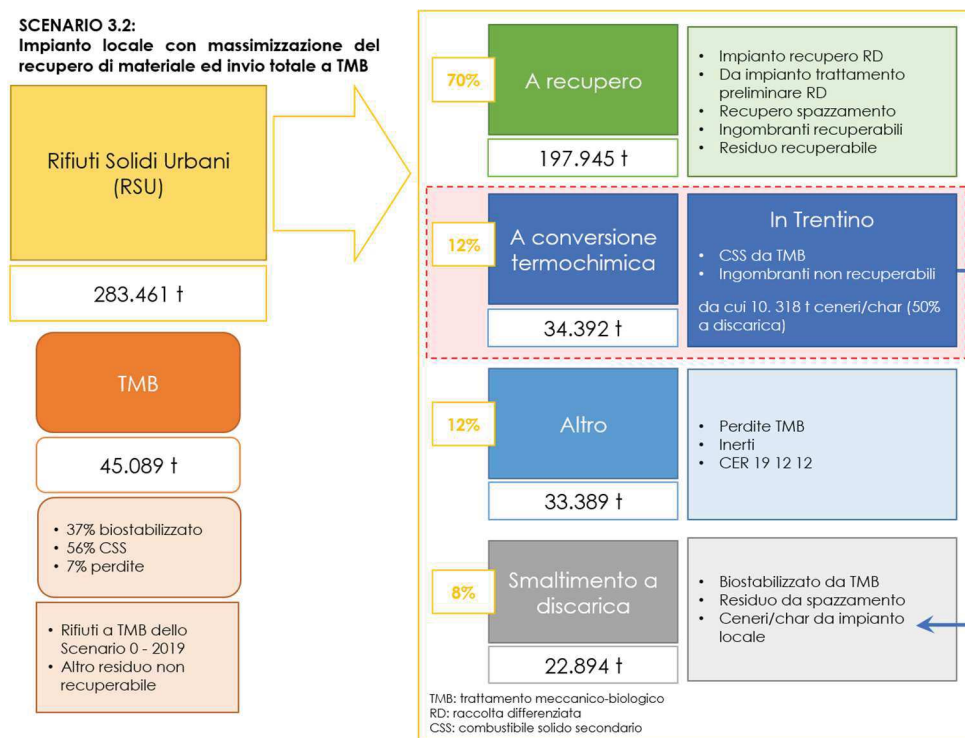


Figura 6. Quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 3.2.

2.5. Confronto scenari

In Tabella 3 sono riepilogati i dati principali degli scenari considerati. In particolare, vengono riportati:

- la quantità di rifiuti recuperati tramite raccolta differenziata ed eventuale selezione sul residuo raccolto;
- ove considerato, la quantità di rifiuti da inviare all'impianto di conversione energetica dei rifiuti di nuova realizzazione;
- la quantità di rifiuti da stabilizzare in impianto di trattamento meccanico-biologico;
- la quantità di rifiuti da smaltire in discarica;
- la quantità di rifiuti da conferire fuori dal territorio provinciale.

I numeri percentuali indicano la quota rispetto al totale di rifiuti urbani prodotti in Trentino (283.461,00 t/anno). Si fa presente che tutti gli scenari futuri, ad eccezione dello Scenario 3.1, tengono conto che esiste ed è ri-attivabile in Trentino un impianto di TMB che può essere valorizzato per una gestione dei flussi, valutandone, tuttavia, anche i costi di gestione. Il ricorso al TMB può essere utilizzato anche per aumentare il PCI (Potere Calorifico Inferiore) dei rifiuti da destinare a trattamenti termici o termochimici ove dovesse risultare utile alle caratteristiche del processo a cui verrebbero destinati (non si tratta di produzione di energia, bensì di concentrazione di parte dell'energia presente nei rifiuti in una minore massa, tramite un

processo di trasformazione che richiede comunque un certo quantitativo di energia). Si osserva che solo nello Scenario 3.1 la quota dei rifiuti urbani inviati a discarica risulta inferiore al limite del 6% del Piano Provinciale di Gestione dei Rifiuti.

Tabella 3. Riepilogo degli scenari considerati per la gestione dei rifiuti solidi urbani (valori espressi in t/anno).

	Recupero materiali	Impianto locale	Rifiuti a TMB	Rifiuti a discarica	Smaltimento fuori provincia
Scenario 0 – 2019	190.632,51 (67,25%)	No	9.483,00 (3,35%)	65.040,18 (22,95%)	26.178,85 (9,24%)
Scenario 0 – 2021	190.632,51 (67,25%)	No	No	39.594,28 (13,97%)	22.863,00 (8,07%)
Scenario 1	190.632,51 (67,25%)	No	38.168,00 (13,46%)	25.049,91 (8,84%)	34.852,77 (12,30%)
Scenario 2	201.413,09 (71,05%)	No	28.240,32 (9,96%)	20.518,97 (7,24%)	29.267,60 (10,33%)
Scenario 3.1	190.632,51 (67,25%)	61.427,00 (21,67%)	No	10.244,33 (3,61%)	No
Scenario 3.2	197.944,73 (69,83%)	34.392,35 (12,13%)	45.088,68 (15,91%)	22.893,77 (8,08%)	No

Si precisa che la quantità di rifiuti identificata come da inviare all'impianto locale di conversione energetica (Scenari 3.1 e 3.2), seppur dandone indicazione, non può corrispondere alla taglia dell'impianto stesso. Infatti, il dimensionamento di un eventuale impianto di trattamento dei rifiuti richiede innanzitutto la caratterizzazione dettagliata del contenuto energetico (potere calorifico) dei rifiuti da utilizzare come feedstock, che può variare considerevolmente in funzione della tipologia dei rifiuti stessi, in modo da determinare la potenza termica dell'impianto. Inoltre, il dimensionamento deve tenere in considerazione che l'impianto deve avere una capacità tale da gestire anche i fermi impianto (programmati e non), eventuali picchi nella produzione di rifiuti urbani, o altre situazioni emergenziali per cui è necessario trovare collocazione a flussi di rifiuti non previsti. Un impianto di conversione energetica costituito da più moduli (linee) in parallelo può destinare uno di questi alla gestione di queste situazioni specifiche ed eventualmente sfruttare la capacità in eccesso per il trattamento termico di rifiuti già stoccati presso discariche del territorio provinciale (e.g., rifiuti stoccati in balle presso la discarica di Taio).

3. Processi e tecnologie di conversione energetica dei rifiuti

Gli Scenari 3.1 e 3.2 hanno come obiettivo quello di valutare la realizzazione, a livello locale, di un impianto di conversione energetica dei rifiuti come alternativa allo smaltimento in discarica o fuori provincia, senza dare indicazione specifica della tipologia di impianto. Le tecnologie disponibili al giorno d'oggi sono diverse e fra loro molto differenziate, perché

consentono di ottenere dai rifiuti solidi urbani non solo energia elettrica/termica, ma anche prodotti chimici ad alto valore aggiunto (combustibili, reagenti, ...), e ciascuna necessita della propria specifica componentistica.

La scelta di una tecnologia piuttosto che di un'altra può dipendere da diversi fattori:

- le caratteristiche chimico-fisiche del rifiuto solido raccolto e conferibile all'impianto (pezzatura, potere calorifico, contenuto di ceneri e contenuto di umidità);
- la tipologia di prodotto finale che si vuole ottenere dalla conversione energetica dei rifiuti (energia termica/elettrica, combustibili, reagenti chimici);
- la necessità o intenzione di sviluppare a livello locale una piattaforma di conversione energetica dei rifiuti in prodotti chimici di valore e combustibili strategici.

Il processo più comune di conversione energetica dei rifiuti è sicuramente la combustione, altresì detta incenerimento, ma esistono anche altre tipologie di trattamento termico a temperature più o meno elevate, quali la pirolisi o la gassificazione, che consentono il recupero energetico dei rifiuti tramite processi in assenza di ossigeno o di ossidazione parziale. Le differenze fra questi processi verranno meglio descritte e confrontate nel seguito.

3.1. Combustione

La combustione (o incenerimento) è un processo di ossidazione completa e controllata che trasforma i rifiuti in una miscela gassosa contenente principalmente anidride carbonica e vapore acqueo, e in un residuo solido (ceneri). Il calore generato dalle reazioni di combustione può essere ulteriormente convertito in energia elettrica, così da valorizzare il rifiuto e il suo smaltimento, tramite un impianto costituito da una turbina a vapore alimentata dal vapore generato e surriscaldato dal processo di combustione. L'energia termica in eccesso, inoltre, può essere recuperata per il teleriscaldamento o per altri processi che lo richiedano. Si parla dunque di impianto cogenerativo (produzione combinata di energia elettrica e termica) e di termovalorizzazione dei rifiuti, poiché dal loro smaltimento si ottiene come risultato non solo quello di ridurre notevolmente il volume e la massa originali e di renderli quindi più gestibili ai fini dello smaltimento in discarica, ma anche quello di produrre energia da destinarsi ad altri usi, a partire da prodotti di scarto.

Le problematiche associate a questo tipo di conversione energetica dei rifiuti sono di carattere principalmente ambientale. Gli effluenti gassosi del processo di combustione dei rifiuti sono infatti diossine e furani, particolato, cloro, zolfo e altri prodotti derivanti da combustione incompleta o poco omogenea, oltre agli ossidi di azoto (NO_x) che si formano alle temperature elevate raggiunte durante la combustione. Tutti questi inquinanti richiedono di essere trattati/rimossi adeguatamente prima di rilasciare i fumi di combustione in atmosfera tramite il camino.

A livello impiantistico e di processo un impianto di termovalorizzazione dei rifiuti completo deve comprendere, oltre alla camera di combustione dei rifiuti, una caldaia dove avviene (o si completa) la generazione di vapore da inviare a turbina, la turbina a vapore stessa con un alternatore per la produzione di energia elettrica, un sistema di recupero del calore per la fornitura all'utenza termica, e un sistema multi-stadio di trattamento per la pulizia dei fumi di combustione prima della loro espulsione in atmosfera tramite il camino. Per quanto riguarda il sistema di pulizia dei fumi a valle della combustione, si tratta in genere di elettrofiltri e/o filtri a maniche, che, anche grazie ad additivi, trattengono le particelle solide e permettono di

rimuovere metalli pesanti (mercurio, cadmio, ...) e diossina. Si trovano poi assorbitori o reattori catalitici per la rimozione o abbattimento di altri inquinanti presenti nei fumi.

Per quanto riguarda i residui solidi del processo, le ceneri derivanti dal trattamento di pulizia dei reflui gassosi, definite leggere o volanti, costituiscono circa il 3 – 6% in peso del rifiuto in ingresso e sono rifiuti pericolosi, per cui devono essere adeguatamente stoccate e inviate a smaltimento o a trattamento. Le scorie o ceneri pesanti, costituite dal residuo non combustibile dei rifiuti, dai residui metallici e dal materiale organico incombusto, invece, possono costituire fino al 20 – 30% in peso del rifiuto in ingresso (a seconda della composizione dello stesso) e sono considerate rifiuti speciali non pericolosi, per cui, previo trattamento, se ne può prevedere l'utilizzo nel settore edilizio o dei cementifici. I residui metallici presenti nelle ceneri possono essere separati e recuperati.

3.1.1. Combustione con moduli produttivi aggiuntivi

Nell'ottica di creare ulteriore valore aggiunto, si può considerare di integrare in questo tipo di sistemi di valorizzazione dei rifiuti, dei moduli aggiuntivi che sfruttino i prodotti o sottoprodotti del processo. In particolare, si citano le seguenti possibili soluzioni:

- utilizzo dell'energia elettrica prodotta dalla turbina per la produzione di idrogeno (H_2) e di ossigeno (O_2) dall'elettrolisi dell'acqua. L'idrogeno, quale vettore energetico, può essere successivamente utilizzato in loco o inviato ad una rete di utilizzo esterno dedicata; mentre l'ossigeno può essere impiegato nella caldaia quale agente ossidante per la combustione dei rifiuti in seguito a opportuni bilanci che non compromettano il funzionamento ottimale in termini energetici ed ambientali;
- cattura e stoccaggio della CO_2 presente nei fumi di combustione e suo utilizzo per la produzione di combustibili (e.g., conversione catalitica per la sintesi di CO, metanolo o idrocarburi).

Si tratta, tuttavia, di soluzioni che comportano complessità ulteriori non irrilevanti, giustificabili solo se integrabili in una rete di utilizzo di questi prodotti aggiuntivi già prevista o sviluppata, visto che i prodotti principali della conversione dei rifiuti rimarrebbero comunque l'energia termica ed elettrica generate dal sistema cogenerativo. Inoltre, specificatamente per quanto riguarda l'utilizzo della CO_2 per la sintesi di combustibili, le tecnologie disponibili non sono ancora sufficientemente mature per garantire un ritorno economico dell'investimento.

3.2. Gassificazione

La gassificazione è il processo mediante il quale un materiale solido viene convertito in un gas combustibile tramite ossidazione parziale con un agente ossidante, tipicamente aria, aria arricchita con ossigeno, ossigeno puro, oppure vapore. L'agente ossidante viene fornito in quantità sub-stechiometrica, ossia inferiore a quella necessaria per bruciare in maniera completa il combustibile (tipicamente 20 – 30% della quantità stechiometrica), così da convertirlo in idrogeno (H_2) e monossido di carbonio (CO), anziché ossidarne completamente convertendolo in diossido di carbonio (CO_2) e acqua (H_2O). Il gas prodotto, denominato gas di sintesi o *syngas*, è una miscela di gas costituita principalmente da H_2 , CO, con quantità inferiori e variabili di CH_4 , CO_2 e, nel caso in cui sia utilizzata aria come agente ossidante, N_2 . Il processo di gassificazione con ossigeno è esotermico, quindi non richiede energia termica

fornita dall'esterno, e può raggiungere temperature di 800 – 1.200 °C. Nel caso di gassificazione con vapore acqueo, invece, il processo è endotermico, per cui è necessario fornire calore dall'esterno del reattore affinché avvengano le reazioni di gassificazione.

Esistono diverse tipologie di gassificatori attualmente disponibili a livello commerciale, le più comuni sono:

- Gassificatore a letto fisso, costituito da un letto fisso di combustibile, il quale viene immesso dall'alto. La configurazione può essere contro-corrente (o *updraft*) se l'agente ossidante, immesso nella parte bassa del reattore, risale il reattore in contro-corrente rispetto al combustibile ed il syngas viene estratto dalla parte alta; oppure equi-corrente (o *downdraft*) se la direzione del gas di sintesi è la stessa di quella del combustibile e l'estrazione avviene dalla parte bassa del reattore. In entrambe le configurazioni la conversione è molto efficiente e le scorie (ceneri anidre) sono estratte dalla parte inferiore del reattore. Il syngas prodotto risulta più pulito nel caso equi-corrente perché passa attraverso il letto caldo di *char* (il prodotto solido della gassificazione del rifiuto) favorendo la decomposizione dei composti più pesanti, ma potrebbe richiedere una fonte di calore esterna per mantenere temperature elevate, poiché il combustibile in ingresso non viene preriscaldato dal syngas in uscita come avviene invece nella configurazione contro-corrente.
- Gassificatore a letto fluido, in cui il combustibile risulta sospeso in una corrente ascendente di gas con eventuale aggiunta di materiale inerte fluidizzante (per esempio sabbia) per aumentare lo scambio termico, garantendo una distribuzione molto uniforme della temperatura nella zona di gassificazione, un aumento della velocità di reazione e una maggiore resa complessiva del syngas.
- Gassificatore a letto trascinato, simile al gassificatore a letto fluido, ma in cui non viene utilizzato alcun agente fluidizzante e il combustibile si muove in equi-corrente con l'agente ossidante. Questa tipologia consente di raggiungere temperature molto elevate (1.200 – 1.500 °C) e di ottenere un syngas molto pulito, ma richiede elevate quantità di ossidante e sofisticati dispositivi di controllo che ne aumentano l'onerosità economica.

La composizione del gas di sintesi ottenuto e, conseguentemente, il suo contenuto energetico (potere calorifico) dipendono, oltre che dalla tipologia di reattore, anche dalle caratteristiche del materiale trattato, dall'agente ossidante utilizzato e dalle condizioni operative. Utilizzando come agente gassificante ossigeno commerciale, anziché aria, si otterrà, per esempio, un gas combustibile molto più concentrato, poiché privo di azoto, che, essendo inerte, diluisce il syngas abbassandone notevolmente il potere calorifico. In ogni caso, il syngas può successivamente essere utilizzato sia come combustibile in generatori di vapore, turbine a gas e motori a combustione interna per la produzione di energia elettrica e termica, sia come prodotto intermedio per la sintesi di combustibili e prodotti chimici. Questo aspetto non solo rende il processo di gassificazione particolarmente interessante per la sua versatilità e la possibilità di immagazzinare energia in forme diverse, ma consente anche, se necessario, di separare la produzione del syngas dal suo utilizzo, delocalizzandone la combustione o conversione in prodotti chimici di valore.

Relativamente al suo utilizzo per la sintesi di prodotti chimici, il syngas in uscita dal reattore di gassificazione, dopo opportuni trattamenti di pulizia e raffinamento, può essere utilizzato per produrre:

- Metano, metanolo (MeOH), dimetil etere (DME), etanolo (EtOH), diesel (tramite processo Fischer-Tropsch);
- Idrogeno;
- Gas naturale sintetico (SNG) via metanazione.

La pulizia del gas di sintesi è fondamentale per rimuovere componenti che potrebbero renderne problematico l'utilizzo: particolato, composti acidi (HCl, H₂S, acidi organici) e alcalini (NH₃), e soprattutto i *tar*. Questi ultimi sono composti di idrocarburi pesanti condensabili che possono formare depositi di sostanze viscosi e oleose durante il raffreddamento del gas (già a temperature intorno ai 250 – 300 °C), sporcando e intasando superfici e componenti del sistema a valle del reattore di gassificazione. A seconda del suo utilizzo finale, il gas di sintesi necessita di un determinato grado di pulizia, che può richiedere l'impiego di filtri e torri di lavaggio (scrubber). La concentrazione di *tar* può anche essere ridotta preventivamente, operando il gassificatore ad alte temperature o aumentando il tempo di residenza del gas nel gassificatore, ma anche mediante l'utilizzo di catalizzatori che ne consentano la decomposizione a più basse temperature (anche inferiori a 800 °C).

Oltre al gas di sintesi, la gassificazione comporta la produzione di un residuo solido chiamato *char* (fino al 30% circa del materiale in ingresso), che è composto principalmente da carbonio e inerti, e le cui caratteristiche chimico-fisiche, nonché la quantità prodotta, dipendono dalla matrice combustibile utilizzata e dalle condizioni operative del processo. Si è detto che le temperature di gassificazione arrivano fino a 1.200 °C circa; tuttavia, esistono delle configurazioni particolari per cui nella parte inferiore del reattore di gassificazione, dove vengono raccolte le scorie prodotte, si fa in modo di raggiungere e mantenere temperature molto più alte, anche fino a 2.000 °C, così da vetrificare il residuo solido inerte. Sottoposte alle alte temperature, le frazioni inerti si fondono e la colata viene convogliata in un bagno d'acqua di raffreddamento, dove solidifica formando granuli vetrificati che potrebbero essere impiegati, per esempio, per sottofondi stradali o conglomerati cementizi.

Nell'ambito della gassificazione, per completare la descrizione dei processi termo-chimici di conversione dei rifiuti, si cita anche la pirolisi. Si tratta di un processo di decomposizione termica, simile alla gassificazione per quanto riguarda la tipologia di prodotti ottenuti, ma che avviene in totale assenza di un agente ossidante e per il quale è necessario fornire calore dall'esterno (processo endotermico). Le temperature di processo, inoltre, sono inferiori rispetto a quelle che si raggiungono in un reattore di gassificazione, tipicamente intorno a 500 – 550 °C e fino a 800 °C, ed il prodotto primario del processo non è tanto il syngas, quanto il prodotto liquido (olio di pirolisi), utilizzabile come combustibile o come prodotto intermedio destinato a successivi processi chimici. Come per la gassificazione, anche con la pirolisi si ha la produzione di un residuo carbonioso solido (*char*), ma in quantitativi molto maggiori. Questo, se possiede determinate caratteristiche fisico-chimiche, può essere ulteriormente trattato ed utilizzato come sostituto del carbone attivo in particolari applicazioni catalitiche o di adsorbimento. La distribuzione dei prodotti gassoso (syngas), liquido (olio pirolitico) e solido (*char*) dipende notevolmente, oltre che dalle caratteristiche del feedstock utilizzato per la pirolisi, dalle condizioni operative di processo, in particolare temperatura, tempo di residenza nel reattore e heating rate (velocità di riscaldamento). Limitazioni di carattere tecnico e soprattutto economico (il processo di pirolisi richiede l'apporto di un'importante quantità di energia termica dall'esterno del reattore) hanno ostacolato lo sviluppo e la diffusione a livello commerciale di tecnologie di questo tipo, e l'utilizzo della pirolisi come processo per la produzione di combustibili o prodotti chimici è ancora molto limitato.

3.2.1. Confronto gassificazione – combustione per la conversione dei rifiuti

La principale caratteristica che differenzia il processo di gassificazione da quello di combustione è il prodotto primario del processo. Questo comporta che se da un lato la combustione dei rifiuti necessita di un impianto in cui a valle della produzione di energia elettrica/termica i gas di combustione vengono rilasciati, dopo opportuno trattamento, al camino, nel caso della gassificazione il syngas prodotto può essere utilizzato in un secondo momento e non necessariamente nello stesso impianto di produzione, e, a meno che il syngas non venga utilizzato direttamente come combustibile, non è necessario alcun camino per il processo in sé. Sono tuttavia necessari trattamenti del syngas che possono prevedere comunque rilasci in atmosfera e/o in soluzione acquosa che dipendono dalla tipologia specifica di processo considerata.

Qualora si considerasse l'utilizzo del syngas per la produzione di energia elettrica e termica, si deve tenere in conto che la sua combustione comporterebbe emissioni di inquinanti simili a quelle derivanti dalla combustione diretta del rifiuto solido.

La combustione diretta dei rifiuti comporta l'emissione di diossine e furani, particolato, cloro, zolfo e altri prodotti derivanti dalla combustione incompleta del feedstock, ma anche la produzione di ossidi di azoto (NOx) termici, ossia formati a causa delle temperature elevate determinate dalla combustione. Nel processo di gassificazione, invece, gli NOx da combustibile, ossia quelli formati dall'azoto presente nel combustibile di partenza, grazie all'atmosfera riducente della gassificazione vengono convertiti in N₂ e NH₃, e gli NOx termici sono prodotti in quantità inferiori viste le temperature generalmente più basse rispetto alla combustione. Il processo di gassificazione in sé, quindi, comporta dei vantaggi, a livello di emissioni, rispetto alla combustione, ma la combustione successiva del syngas può comunque causare la produzione di diossine, furani e NOx. Sia nel caso della combustione diretta, sia nel caso della gassificazione, la produzione di inquinanti dipende comunque molto dal tipo di reattore scelto. In generale, però, si osserva che la combustione omogenea in fase gassosa, quindi quella del syngas, è più efficiente della combustione del residuo solido, che è invece più complessa e difficile da operare e mantenere. Il syngas, inoltre, è di più facile gestione rispetto al rifiuto solido, che è invece molto eterogeneo, ma trattandosi di un gas richiede particolare attenzione in termini di sicurezza e sofisticati sistemi di controllo.

Al di là della combustione, il principale punto di forza della gassificazione è sicuramente la versatilità del syngas prodotto, perché oltre a poter essere usato esso stesso come combustibile, può essere convertito in prodotti chimici o combustibili che possono essere stoccati, trasportati e utilizzati in altre applicazioni, creando un mercato di prodotti ad alto valore aggiunto e trasformando i rifiuti in una risorsa a tutto tondo. È vero che sono necessari sofisticati sistemi di pulizia del syngas anche molto costosi ed energivori, ma si osserva anche che, a parità di feedstock introdotto, soprattutto nel caso in cui si usi ossigeno commerciale (anziché aria), utilizzando molto meno ossidante rispetto alla combustione, gli impianti e i sistemi di clean-up hanno ingombri molto minori, perché il gas è molto meno diluito.

Per quanto riguarda le scorie residue, infine, la quantità prodotta dalla combustione è minore, perché si ha una resa di conversione del rifiuto più elevata, ma il char da gassificazione, se possiede determinate caratteristiche, può essere anch'esso valorizzato.

3.2.2. Utilizzo del syngas in applicazioni Waste-to-Energy

Come accennato, il gas prodotto dalla gassificazione dei rifiuti può essere utilizzato come combustibile per la produzione di energia elettrica ed energia termica in turbine a vapore, turbine a gas o motori a combustione interna, in maniera analoga a quanto avviene per un qualunque altro combustibile gassoso. Si parla, in questo caso, di *Waste-to-Energy*, proprio perché la conversione del rifiuto consente di produrre energia elettrica e/o termica, così come avviene in un termovalorizzatore dalla combustione diretta del rifiuto, anche se con differenze in termini di efficienza della combustione e di emissioni. Prima dell'invio al sistema cogenerativo, il syngas deve essere opportunamente trattato tramite appositi sistemi di filtrazione a secco o a umido per rimuovere residui acquosi e contaminanti quali HCl, metalli pesanti, particolato, composti di zolfo e composti di azoto, così da ridurre adeguatamente le emissioni espulse al camino. Il livello di pulizia del syngas richiesto dipende innanzitutto dalla qualità dello stesso all'uscita del gassificatore, che dipende a sua volta dal feedstock utilizzato, dalla tipologia di reattore e dalle condizioni di processo, e dalla qualità richiesta dall'utenza finale. Qualora il syngas fosse destinato a combustione in una turbina a gas, per esempio, dovrà contenere livelli molto bassi di contaminanti per evitare il danneggiamento delle pale. Sono inoltre da considerare gli aspetti ambientali per quanto riguarda le emissioni al camino, a cui è dedicato un capitolo specifico del documento. Anche la composizione del syngas e il suo contenuto energetico devono essere adeguati, ma nel caso di combustione del syngas, a differenza di altre sue applicazioni, generalmente non vi sono restrizioni particolari e non sono richieste specifiche quantità di H₂ o di CO per il corretto funzionamento dell'impianto cogenerativo, purché le efficienze di produzione di energia elettrica e termica siano a livelli soddisfacenti.

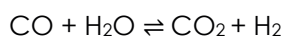
3.2.3. Utilizzo del syngas in applicazioni Waste-to-Chemicals

L'altra principale applicazione del syngas è quella delle tecnologie *Waste-to-Chemicals*, ossia quelle tecnologie che prevedono la conversione del syngas prodotto dalla gassificazione dei rifiuti in prodotti chimici ad alto valore aggiunto o combustibili, quali metanolo, etanolo, dimetil etere (DME). Il syngas, dopo il trattamento necessario per rimuovere i contaminanti in esso contenuti, viene sottoposto ad una serie di processi che ne modificano la composizione, aumentandone per esempio il contenuto di H₂ e riducendone quello di CO a seconda di quanto richiesto dall'utilizzo finale, per poi essere convertito nel prodotto desiderato.

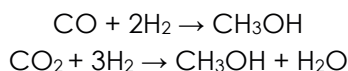
Produzione di metanolo

Il metanolo (MeOH) è il più semplice degli alcoli, utilizzato principalmente per la produzione di formaldeide, precursore di resine, materie plastiche, adesivi e polioli, e per la produzione di acido acetico, anch'esso utilizzato nell'industria chimica per materie plastiche e altri prodotti. Il metanolo può inoltre essere utilizzato per la produzione di additivi per benzine, come il metil-t-butil etere (MTBE), che consente di ottenere carburanti più efficaci e con minor impatto ambientale, e per la produzione di DME, utilizzabile nei combustibili per jet e nel diesel, oltre che come solvente o liquido refrigerante.

Per la sintesi di MeOH il syngas, dopo opportuno lavaggio e filtrazione, viene inviato ad un reattore di Water Gas Shift (WGS), in cui si ha la riduzione di CO e l'aumento della frazione di H₂ secondo la reazione:



Questa operazione consente di raggiungere rapporti H_2/CO di circa 2:1, come richiesto per la sintesi di metanolo. Successivamente, dopo la rimozione della CO_2 e dell'acqua residua, in un altro reattore catalitico ad alta temperatura ed alta pressione, dal syngas viene prodotto il metanolo (formula bruta: CH_3OH) per idrogenazione degli ossidi di carbonio, secondo le seguenti reazioni esotermiche:



Come catalizzatori per la sintesi di MeOH vengono generalmente utilizzati ossidi di rame, zinco e alluminio, ed il processo avviene a pressioni di 35 – 55 bar e temperature nell'intervallo 200 – 300 °C (Tijm et al., 2001). La frazione di syngas che non viene convertita a MeOH può essere ricircolata nel reattore tal quale oppure dopo il passaggio per una unità di PSA (Pressure Swing Adsorption), attraverso la quale viene recuperato il solo idrogeno. La frazione non ricircolata è gas di spurgo (purge) da rilasciare in atmosfera, inviare a torcia o utilizzare come co-combustibile in caldaia per produrre, per esempio, calore utile ai processi di trattamento del syngas). Il metanolo in uscita dal reattore catalitico contiene una certa quantità di acqua derivante dalla conversione della CO_2 , etanolo e alcoli superiori (e.g., propanolo, butanolo), che possono essere separati dal metanolo utilizzando colonne di distillazione, che da un lato aumentano la purità del prodotto finale, dall'altro aumentano i costi di investimento e operativi. In Figura 6 è riportato lo schema di processo tipico per la produzione di metanolo a partire dalla gassificazione del rifiuto solido urbano.

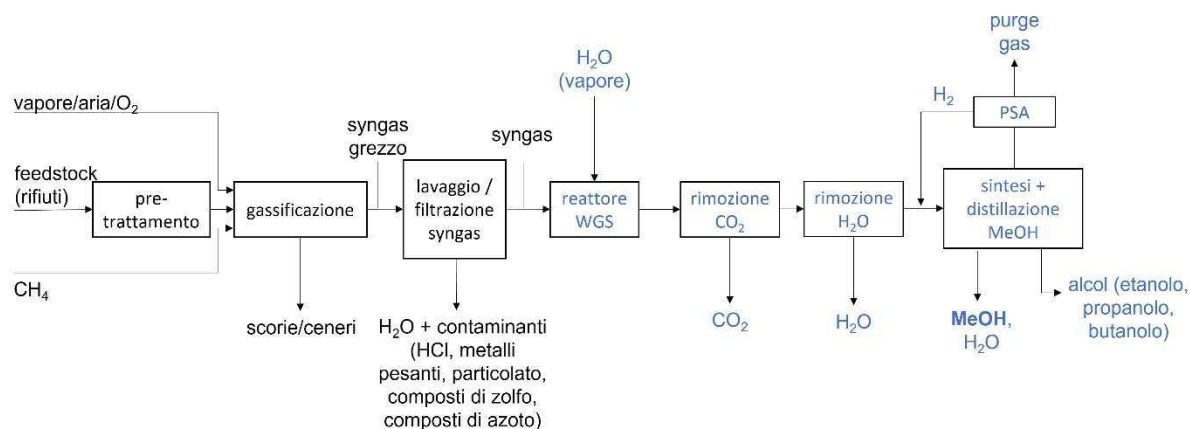


Figura 7. Schema di processo Waste-to-Chemicals per la produzione di MeOH.

Per quanto riguarda la resa e i costi di un impianto di produzione di MeOH, si stima che da un impianto da circa 200.000 t/anno di rifiuti si possano ottenere circa 0,3 – 0,6 tonnellate di metanolo per tonnellata di rifiuto e che il costo totale di impianto sia di circa 330 – 390 Mio EUR.

Produzione di etanolo

L'etanolo ($EtOH$) è un alcol utilizzabile come combustibile in motori a combustione interna o come additivo per benzine, ma anche come intermedio importante per la produzione di componenti chimici e solventi per l'industria automobilistica o farmaceutica.

La produzione di $EtOH$ da syngas può avvenire per via diretta, tramite l'utilizzo di catalizzatori quali Rh-Mn o Cu-Co; per via indiretta attraverso la sintesi di metanolo dal syngas e la sua carbonilazione catalitica con produzione di acido acetico, convertito successivamente in

etanolo tramite idrogenazione; per via indiretta attraverso la sintesi di DME dal syngas e la sua carbonilazione catalitica con produzione di acetato di metile, convertito successivamente in etanolo tramite idrogenazione. Esiste un'ulteriore tecnologia di conversione, di tipo biologico, che consiste nella fermentazione del syngas per opera di batteri specifici che producono etanolo anche a basse temperature. LanzaTech ha recentemente commercializzato un sistema che utilizza il batterio acetogenico *Clostridium autoethanogenum* per la conversione da syngas a etanolo, con impianti dimostrativi pre-commerciali in Cina che producono fino a 300 t/anno di etanolo (Trevethick et al., 2012; Ciliberti et al. 2020; Daniell et al., 2012).

In generale, si tratta di tecnologie ancora poco mature, che richiedono l'utilizzo di catalizzatori molto costosi oppure che hanno rese molto basse e scarsa selettività. Si stima che il costo totale di un impianto di produzione di EtOH da circa 200.000 t/anno di rifiuti sia di circa 360 – 420 Mio EUR.

Produzione di DME

Il dimetil etere (DME) è il più semplice etere alifatico, si presenta in forma gassosa a temperatura ambiente, ma può essere liquefatto a pressioni relativamente basse (circa 6 bar), rendendolo facilmente trasportabile. Può essere utilizzato come combustibile in sostituzione al diesel, ma anche nell'industria chimica come intermedio per la sintesi di altri composti organici, come catalizzatore nei processi di polimerizzazione, come propellente o come solvente. Il processo di produzione di DME da syngas è in parte lo stesso di quello descritto per la produzione del metanolo. Infatti, si può produrre DME (formula bruta: CH₃OCH₃) dal metanolo in un ulteriore step catalitico in cui avviene la disidratazione del metanolo, secondo la reazione:



Oppure direttamente dal syngas, combinando in un'unica unità di processo sia la sintesi che la disidratazione del metanolo. In Figura 7 è riportato lo schema di processo tipico per la produzione di DME a partire dalla gassificazione del rifiuto solido urbano.

Numerosi studi e progetti hanno testato impianti di gassificazione con produzione di DME a scala pilota o industriale¹. Si cita a tal proposito il progetto BioDME², realizzato all'interno del Settimo Programma Quadro Europeo (2007 – 2013), che tra il 2011 e il 2016 ha testato in maniera continuativa (per un totale di 16.000 ore operative accumulate) un impianto a scala industriale (TRL 8) in Svezia, costituito da un reattore di gassificazione ad aria da black liquor (biomassa di scarto della lavorazione della cellulosa) e un impianto di conversione da syngas a DME, da utilizzare come combustibile per veicoli pesanti. In Tabella 4 sono riportate le principali caratteristiche dell'impianto.

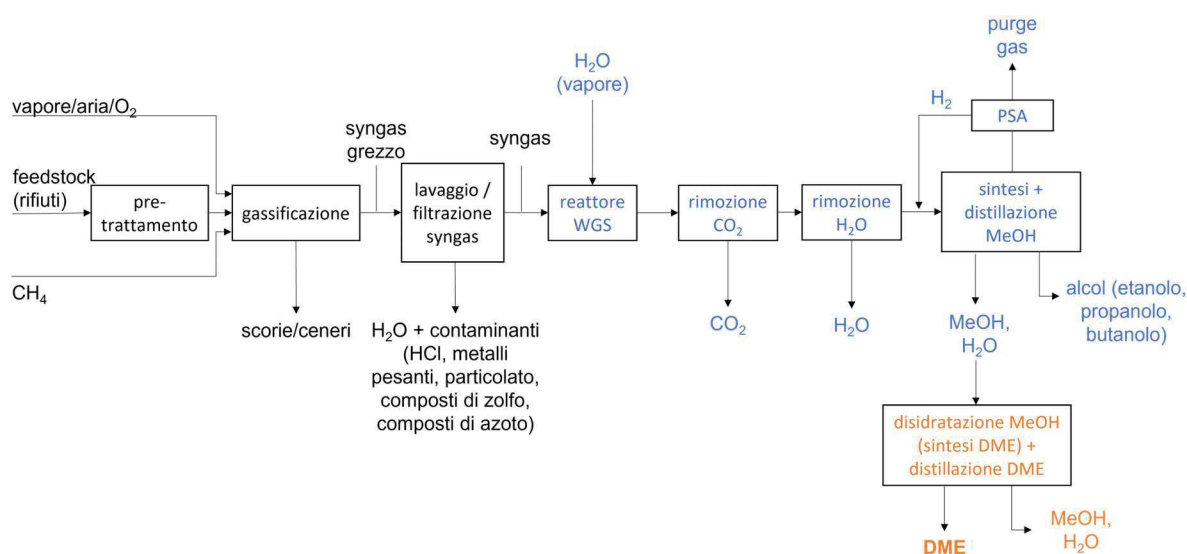
Per quanto riguarda la resa ed i costi di un impianto di produzione di DME, si stima che per un impianto di conversione da rifiuti a DME di capacità pari a 20.000 tonnellate di rifiuti/anno (circa 8 MW), si possano ottenere circa 15 t/giorno di DME, con costi di installazione e operativi inferiori a 25 Mio EUR e 2 Mio EUR, rispettivamente. Per impianti di taglia maggiore si ipotizza esistere una economia di scala.

¹ https://www.etipbioenergy.eu/index.php?option=com_content&view=article&id=279

² <http://www.biodme.eu/>

Tabella 4. Caratteristiche dell'impianto BioDME (Svezia) per la produzione di DME (Landälv et al., 2014).

Feedstock	3.000 t black liquor/anno (20 t/giorno, 3 MW)
PCI feedstock	13 MJ/kg
Capacità impianto	600 t DME/anno (4 t/giorno)
CapEx	Gassificazione da black liquor: 45 Mio EUR Pulizia syngas, sintesi MeOH e DME: 30 Mio EUR
Operatività complessiva	16.000 ore 1.050 t DME


Figura 8. Schema di processo Waste-to-Chemicals per la produzione di DME.

3.2.4. Utilizzo del syngas in applicazioni Waste-to-Hydrogen

Se l'obiettivo finale della conversione energetica dei rifiuti è quello di produrre idrogeno, viene utilizzato, come per il processo di produzione di MeOH, un reattore WGS che consente di aumentare la frazione di H₂ nel syngas, a cui viene fatto seguire, dopo il sequestro della CO₂, un'unità PSA, in cui, tramite un processo di assorbimento ad alta pressione, si può catturare il solo idrogeno, aumentandone la purezza fino al 99,99%. In Figura 8 è riportato lo schema di processo tipico per la produzione di idrogeno a partire dalla gassificazione del rifiuto solido urbano.

Si stima che per un impianto di conversione da rifiuti a idrogeno di capacità pari a 20.000 tonnellate di rifiuti/anno (8 MW), si possano ottenere circa 3 – 4 t/giorno di idrogeno, con costi di installazione e operativi inferiori a 20 Mio EUR e 2 Mio EUR, rispettivamente. Per impianti di taglia maggiore, di capacità pari a 200.000 tonnellate di rifiuti/anno, si raggiungono costi totali di impianto pari a circa 300 – 330 Mio EUR.

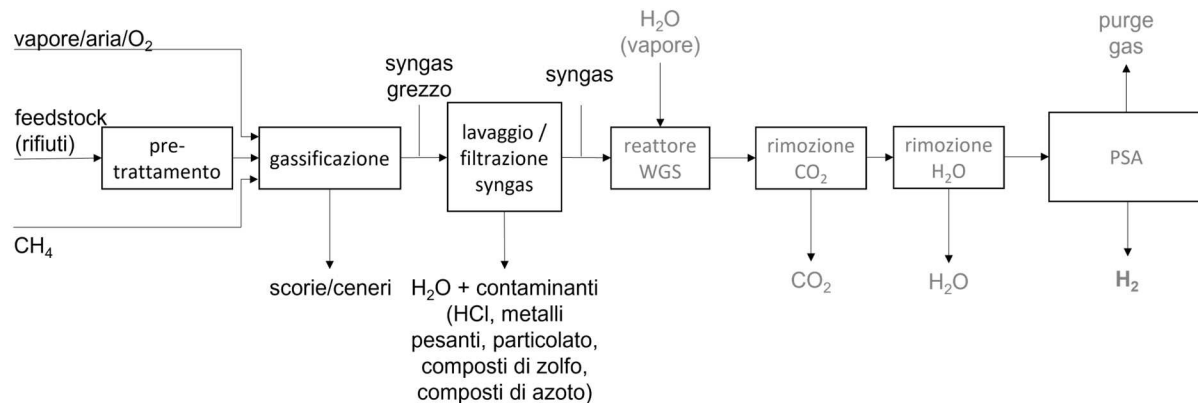
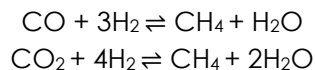


Figura 9. Schema di processo Waste-to-Chemicals per la produzione di idrogeno.

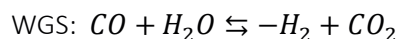
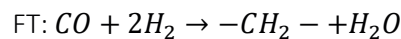
3.2.5. Altri utilizzi del syngas

Tramite metanazione il syngas può essere convertito in appositi reattori catalitici in gas sintetico naturale (SNG), composto principalmente da metano (CH4), secondo le reazioni di conversione del monossido di carbonio e dell'anidride carbonica con idrogeno:



con passaggi intermedi dedicati alla rimozione dell'acqua residua e della CO2.

Infine, tramite il processo di Fischer-Tropsch (FT), è possibile convertire il syngas in idrocarburi liquidi a catena lunga. In particolare, in un reattore catalitico (con cobalto, ferro, molibdeno o rutenio utilizzati come catalizzatori) si realizza la reazione di idrogenazione di CO a temperature di 150 – 300 °C e pressioni di 5 – 60 bar. Si ottengono così prodotti idrocarburici grezzi successivamente sottoposti ad un processo di raffinazione (*upgrading*) che porta alla produzione di diesel (C9 – C22) o benzine (C5 – C11). Per la produzione specifica di diesel si utilizzano processi a 200 – 250 °C (Low Temperature Fischer-Tropsch, LTFT) e catalizzatori a base di cobalto o ferro. Le condizioni operative (temperatura, pressione, rapporto H2/CO), il tipo di catalizzatore e di reattore utilizzati, influenzano la lunghezza delle catene idrocarburiche che si formano nel processo. Oltre a queste, i principali sottoprodotti della sintesi FT sono acqua e/o anidride carbonica, quest'ultima derivante dalla reazione di water gas shift (WGS):



La scalabilità della tecnologia per la produzione di bio-combustibili tramite Fischer-Tropsch è stata provata a livello commerciale solo per la conversione a partire da carbone o da gas naturale, ma sono numerosi i progetti, anche a livello Europeo, che hanno previsto o prevedono l'installazione di impianti commerciali o dimostrativi/pilota a partire dalla gassificazione di biomasse e rifiuti.



3.2.6. Tecnologie commerciali

Le tecnologie disponibili a scala commerciale per la conversione del syngas sono molteplici e collaudate; sono infatti le stesse tecnologie impiegate per la produzione di metanolo, DME, H₂, etc. dal reforming del metano contenuto nel gas naturale. Tuttavia, in Europa, nonostante l'interesse crescente in questa direzione, attualmente non esistono ancora impianti Waste-to-Chemicals o Waste-to-H₂ che producano i prodotti chimici citati o idrogeno a partire dalla gassificazione del rifiuto solido urbano, se non a livello di impianti pilota. In ambito extra-europeo, invece, sono nate e sono state sperimentate nuove tecnologie che combinano la gassificazione dei rifiuti con processi di conversione del syngas in prodotti ad alto valore aggiunto. Come feedstock vengono utilizzati rifiuti indifferenziati, ma anche residui plastici e industriali, e gli impianti ne trattano quantitativi molto elevati, anche 100.000 t o più annualmente. Sono tuttavia operative o in fase di sperimentazione anche soluzioni modulari di taglia ridotta, con più linee in parallelo che trattano ciascuna fino a 20.000 t annue di rifiuti.

In Tabella 5 sono state raccolte alcune tecnologie con impianti di scala commerciale di interesse per il presente studio (Waste-to-Energy, Waste-to-Chemicals o Waste-to-Hydrogen), con indicazione della tipologia di processo impiegata, la destinazione d'uso del syngas prodotto dalla gassificazione e la taglia tipica degli impianti realizzati e installati (lo stesso non è stato fatto per tecnologie di combustione in quanto già note). Si vuole precisare che le tecnologie di gassificazione implementabili sono varie e possono differire molto fra loro in termini di input termici ed elettrici richiesti. Infatti, il mantenimento della temperatura di processo e la pulizia del syngas per la rimozione di tar e contaminanti possono richiedere quantità non irrilevanti di combustibile (es. gas naturale) e di energia elettrica. Inoltre, in alcuni casi, può essere necessario un pre-trattamento del rifiuto per ridurre il contenuto di umidità o la pezzatura.



Tabella 5. Tecnologie Waste-to-Energy, Waste-to-Chemicals e Waste-to-H₂ disponibili in Europa e fuori Europa a livello commerciale per la conversione termochimica dei rifiuti tramite gassificazione.

Azienda	Paese	Tecnologia	Tipologia processo	Feedstock	Prodotti	Sottoprodotti	Impianti operativi	Taglia impianti
Ebara Corporation	Giappone	TwinRec	Gassificazione a letto fluido	RSU	Syngas per produzione energia elettrica	Riciclo metalli; ceneri vetrificate	Giappone	Impianti da 19.000 – 165.000 t/anno rifiuti
Enerkem	Canada		Gassificazione a letto fluido bollente (<i>bubbling fluidized bed</i>)	RSU	Syngas per produzione MeOH, EtOH		Canada	Impianti da 100.000 t/anno rifiuti
Entech	Australia	ENTECH-WtGas-REST TM	Gassificazione a bassa/alta temperatura	RSU, CSS, rifiuti industriali	Syngas per produzione H ₂ , combustibili, energia elettrica		Polonia, Malesia, Taiwan, Singapore, Corea	Impianti da 72 t/giorno rifiuti
Eppm ag	Svizzera	TWO	Gassificazione a letto fisso a bassa temperatura	RSU, rifiuti industriali	Syngas per produzione energia elettrica/termica		Stati Uniti, Austria, Svizzera	Moduli da 15 – 150 t/giorno rifiuti
JFE + Johnson Matthey, Lanzatech (MyRechemical)	Giappone	Thermoselect	Gassificazione a letto fluido o a letto fisso	RSU, plasmix	Syngas per produzione energia elettrica/termica; MeOH; EtOH	Residuo solido vetrificato	Giappone	Moduli da 150 t/giorno rifiuti; impianti da 100.000 t/anno rifiuti
Kew Technology	Regno Unito	SEC Technology	Gassificazione a letto fluido pressurizzato	RSU, CSS	Syngas per produzione H ₂ , DME, MeOH, jet fuel		Regno Unito (impianti pilota full-scale)	Moduli da 20.000 t/anno rifiuti pretrattati. Output: 3.500 kg/giorno H ₂ ; 5.000 kg/giorno DME; 300 L/giorno jet fuel
OMNI Conversion Technologies + KP Engineering	Canada	OMNI200 TM	Gassificazione al plasma (gassificazione + raffinamento gas tramite forcia al plasma)	RSU, residui plastici, cippato di legno e biomasse legnose	Syngas per produzione H ₂ , combustibili, prodotti chimici, SNG, energia elettrica	OmniRock TM (residuo vetrificato); recupero acqua; recupero calore	Canada	Moduli da 67.000 t/anno rifiuti. Output: 5.000 t/anno H ₂

4. Aspetti ambientali e autorizzativi

4.1. Proposte di integrazioni alla normativa sulle emissioni da trattamento termico dei rifiuti

4.1.1. Introduzione

Negli ultimi decenni, l'Unione Europea ha imposto agli Stati Membri norme sempre più restrittive sulle emissioni di inquinanti atmosferici dal settore della termovalorizzazione dei rifiuti. L'introduzione delle migliori tecnologie disponibili (BAT – *Best Available Techniques*) (JRC, 2019) e di valori limite sempre più cautelativi di concentrazione al camino di impianti di combustione dei rifiuti ha determinato una sostanziale riduzione degli impatti del settore rifiuti sulla salute pubblica negli ultimi anni (Costa et al., 2019). Una delle principali conseguenze di queste migliorie è la riduzione delle emissioni di diossina osservate in impianti moderni (Nadal et al., 2019). I risultati raggiunti in termini di contenimento delle emissioni di diossina, che si traducono in una riduzione degli impatti a scala locale, ha posto in secondo piano questa famiglia di composti rispetto ad altri composti, che richiedono quindi particolare attenzione al fine di rendere sempre più compatibile la gestione dei rifiuti con l'ambiente e la salute pubblica. Nello specifico, tra gli inquinanti atmosferici di particolare interesse dal punto di vista del potenziale rischio per la salute, emergono i metalli pesanti, la cui presenza nei fumi rilasciati da impianti di incenerimento dei rifiuti era già nota, ma che sono stati considerati di secondo piano quando il tema della diossina ed il nesso con la combustione di rifiuti è emerso prepotentemente nel corso degli anni '90.

4.1.2. Il potenziale ruolo del cromo esavalente

4.1.2.1. Aspetti rilevanti dell'attuale assetto normativo

Il controllo dei metalli pesanti emessi da impianti di incenerimento dei rifiuti segue le prescrizioni della Direttiva Europea 75/2010/UE, che, recepito a livello nazionale dal D.Lgs. 46/2014, va ad integrare il D.Lgs. 152/2006 (Allegato 1 al titolo III-bis alla Parte Quarta) e stabilisce complessivamente tre valori limite per metalli pesanti:

- un valore limite di concentrazione al camino specifico per il mercurio;
- un valore limite di concentrazione al camino per la somma di cadmio e tallio;
- un valore limite di concentrazione al camino per la somma di un gruppo ampio di composti (antimonio, arsenico, cromo totale, cobalto, piombo, manganese, nichel e vanadio).

In Tabella 6, si riportano i valori limite di concentrazione al camino per i diversi contaminanti considerati dal D.Lgs. 152/2006 (aggiornato al 2014).

Tabella 6. Valori limite di concentrazione al camino per impianti di incenerimento dei rifiuti (D.Lgs. 152/2006, aggiornato al 2014).

Composto	Concentrazione limite al camino	Unità di misura
Polveri sospese totali	10	mg/Nm ³
Carbonio organico totale	10	mg/Nm ³
Composti inorganici del cloro	10	mg/Nm ³
Composti inorganici del fluoro	1	mg/Nm ³
Ossidi di zolfo	50	mg/Nm ³
NO _x	200	mg/Nm ³
CO	50	mg/Nm ³
NH ₃	30	mg/Nm ³
Mercurio	0,05	mg/Nm ³
Cadmio e Tallio	0,05	mg/Nm ³
Antimonio, Arsenico, Cobalto, Cromo totale, Manganese, Nichel, Piombo, Vanadio	0,5	mg/Nm ³
Idrocarburi policiclici aromatici	0,01	mg/Nm ³
Diossine e furani	0,1	ng _{TEQ} /Nm ³
Policlorobifenili (diossina simili)	0,1	ng _{TEQ} /Nm ³

Nel caso dei metalli pesanti, uno schema di prescrizioni siffatto, che prevede valori limite cumulativi per gruppi di contaminanti, comporta una approssimazione nella stima dell'impatto sul territorio situato nei pressi di un impianto di trattamento termico dei rifiuti. Con l'eccezione della prescrizione specifica per il mercurio, infatti, le rimanenti due prescrizioni coinvolgono gruppi più o meno allargati di metalli pesanti caratterizzati da diversi livelli di tossicità/cancerogenicità e con effetti di tipo molto diverso sulla salute (Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro, 2021; US EPA, 2019). La normativa attuale, pertanto, fornisce un valore limite cumulativo per otto metalli pesanti, senza considerazioni specifiche del livello di tossicità/cancerogenicità di ciascuno di essi. Potenzialmente, un impianto che rispetti i limiti per i gruppi di metalli riportati in Tabella 6 potrebbe emettere solo cadmio e Cr VI. Come si vedrà al paragrafo 4.1.2.3, tale situazione, pur se virtuale, può potenzialmente rivelarsi incompatibile con il territorio nei pressi di un impianto e quindi è opportuno integrare l'approccio previsto dalla normativa, che rimarrebbe comunque confermata nel suo complesso.

4.1.2.2. Meccanismo di interazione con l'organismo umano

Se combinato con potassio o sodio in forma di cromati, il Cr VI diviene rapidamente solubile in acqua (US EPA, 2019; Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro, 2021). Questa caratteristica, combinata con la sua tossicità, rende il Cr VI un contaminante di interesse per la risorsa idrica in prossimità di sorgenti di tale inquinante (Tiwari et al., 2019). Tuttavia, mentre l'ingestione di acqua o cibo contaminato è ancora considerato un percorso di esposizione secondario, l'inalazione di Cr VI è risultata essere un percorso primario (Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro, 2021; Sun et al., 2015).

La recente Direttiva Europea 2398/2017/UE evidenzia quanto sia rilevante il ruolo del Cr VI in termini di potenziali impatti sulla salute: la norma riduce infatti il valore limite sugli ambienti di lavoro per la concentrazione di Cr VI in aria ambiente a 0,005 mg/m³ (cfr. paragrafo 4.1.2.3).

Storicamente associato ad altre tipologie di impianti industriali, quali attività di verniciatura e di rivestimento di superfici metalliche, cementifici, industrie chimiche e ceramiche, industrie automobilistiche, l'industria del cuoio e raffinerie (Saha et al., 2011), negli ultimi anni la letteratura scientifica ha dimostrato che gli impianti di trattamento termico dei rifiuti possono essere una sorgente non trascurabile di Cr VI (Miyake et al., 2017; Rada et al., 2021). Secondo la letteratura, la fonte principale di Cr VI in inceneritori di rifiuti è l'ossidazione del triossido di dicromo (Cr_2O_3) ad opera dell'ossido di calcio (CaO) a temperature di poco superiori a $500\text{ }^\circ\text{C}$. Il Cr_2O_3 è un comune costituente dei forni per il trattamento termico dei rifiuti, che è ampiamente impiegato per la sua elevata resistenza alla corrosione (Nath et al., 2018). È bene perciò che il Cr VI sia oggetto di un monitoraggio integrativo rispetto a quanto richiesto convenzionalmente.

4.1.2.3. Esempio numerico

La metodologia di valutazione del rischio per la salute

La stima del rischio per la salute da inquinanti atmosferici è convenzionalmente svolta attraverso una metodologia a più step, nota come l'analisi di rischio per la salute e si riferisce agli inquinanti tossici persistenti. Nel caso dell'incenerimento di rifiuti, con riferimento al D.Lgs. 152/2006 (aggiornamento 2014), gli inquinanti tossici persistenti sono individuati dai metalli pesanti, da diossine e furani (PCDD/F), dai policlorobifenili diossina-simili (dl-PCB) e dagli idrocarburi policiclici aromatici (IPA).

Il primo step di questa metodologia consiste nella caratterizzazione delle emissioni, ossia nel reperimento di informazioni esaustive sulla composizione dell'effluente gassoso rilasciato da ciascuna fonte, sulla sua temperatura, il suo flusso di massa, la velocità di uscita al camino e i periodi di funzionamento della sorgente di emissione durante l'anno.

Una volta caratterizzate le emissioni, queste sono simulate applicando opportuni modelli meteorologici e di dispersione in atmosfera degli inquinanti emessi su base annua, intervallo minimo per svolgere una valutazione di rischio per la salute. Il risultato consiste in mappe di concentrazioni in aria ambiente e di deposizioni al suolo degli inquinanti simulati, che rappresentano informazioni fondamentali per poter condurre analisi di rischio cancerogeno e tossico (non cancerogeno).

Il successivo step consiste nella caratterizzazione dei percorsi di esposizione prevalenti a cui può essere soggetta la popolazione insediata nell'area della sorgente emissiva. I contaminanti atmosferici possono infatti penetrare nell'organismo umano direttamente per inalazione, per contatto dermico con suolo e colture esposte a deposizione atmosferica dei contaminanti, per ingestione accidentale di suolo (percorso rilevante per i bambini), per ingestione di cibo contaminato e consumo di prodotti derivati da cibo contaminato (Schiavon et al., 2019). In via cautelativa, nelle analisi di rischio si assume che la popolazione *target* consumi esclusivamente alimenti prodotti nella zona soggetta alle emissioni delle attività considerate. Per facilitare l'individuazione dei percorsi di esposizione, si ricorre generalmente a mappe di uso del suolo, che sono in grado di indicare le colture principalmente presenti nell'area. Integrando queste informazioni con statistiche sul consumo di alimenti della popolazione *target*, diviene possibile ricostruire il percorso espositivo relativo alla dieta locale. Sulla base dei percorsi di esposizione individuati, delle abitudini della popolazione locale e dei risultati dell'approccio modellistico, è possibile, attraverso l'applicazione di formulazioni consolidate

negli anni e relative all'analisi di rischio (APAT, 2008), effettuare una stima del rischio per la salute in termini di effetti cancerogeni e tossici non cancerogeni.

Nel primo caso, il rischio cancerogeno per l' i -esimo contaminante e per il j -esimo percorso di esposizione ($R_{C,i,j}$) è definito come segue:

$$R_{C,i,j} = SF_i \cdot EM_j \cdot C_i$$

dove:

- SF_i è il cosiddetto *slope factor*, ossia il rischio incrementale di cancro riferito ad una dose unitaria dell' i -esima sostanza cancerogena assunta per tutta la vita;
- EM_j è la portata di esposizione (unità di misura diverse a seconda del percorso considerato), ossia la quantità di matrice contaminata che penetra nell'organismo per massa corporea nell'unità di tempo attraverso il j -esimo percorso di esposizione;
- C_i è la concentrazione dell' i -esimo contaminante nella matrice considerata (unità di misura diverse a seconda della matrice).

Il rischio cancerogeno complessivo del singolo contaminante ($R_{C,i}$) si ottiene sommando i contributi $R_{C,i,j}$ lungo ciascun percorso di esposizione considerato. Il rischio cancerogeno cumulato (RC) si ottiene invece sommando i rischi complessivi di tutti i contaminanti. Secondo il D.Lgs. 4/2008, il valore di $R_{C,i}$ non deve eccedere il valore di 10^{-6} , mentre il valore di RC non deve superare il valore di 10^{-5} . Si sottolinea, tuttavia, che, nel caso del bando di gara per il termovalorizzatore di Ischia Podetti del 2009, andato deserto, venne richiesto il rispetto di un valore di RC pari a 10^{-7} .

Nel caso della valutazione degli impatti tossici non cancerogeni, il livello di rischio si definisce tramite il cosiddetto *Hazard Index (HI)*, ovvero il rapporto tra la dose di contaminante assunta e una dose di riferimento al di sotto della quale non si osservano effetti negativi sulla salute nell'arco della vita, in seguito a esposizione continuativa dell'individuo. Per l' i -esimo contaminante e il j -esimo percorso di esposizione, l'*Hazard Index* è definito come segue:

$$HI_{i,j} = \frac{EM_j \cdot C_i}{RfD_i}$$

dove RfD_i è la dose di riferimento per l' i -esimo contaminante, intesa come la dose al di sotto della quale la sostanza non induce apprezzabili effetti negativi sull'organismo umano nel lungo periodo.

L'*Hazard Index* complessivo di ciascun contaminante si ottiene sommando i contributi lungo ciascun percorso di esposizione, considerando le concentrazioni/deposizioni in prossimità del punto di massima ricaduta delle emissioni dall'impianto. In base al D.Lgs. 4/2008, l' HI_i di ciascun contaminante non deve eccedere il valore di 1.

Si fa presente che, a differenza degli inquinanti non cancerogeni, per i quali vale il confronto con la RfD_i , il rischio indotto dall'esposizione ad inquinanti cancerogeni non è mai nullo. Vi è sempre, infatti, la probabilità che la sostanza cancerogena, pur in concentrazioni relativamente basse, possa arrecare un danno permanente al materiale genetico delle cellule e trasformarsi nel tempo in una patologia tumorale. Nel caso di rischio cancerogeno, si considera, infatti, un livello di rischio accettabile quale riferimento normativo (D.Lgs. 4/2008), ossia i valori di 10^{-6} per il rischio cancerogeno indotto dal singolo inquinante e 10^{-5} per il rischio cancerogeno cumulato.

Stima quantitativa del potenziale rischio connesso al Cr VI

Al fine di cogliere l'entità della problematica connessa alla definizione dei valori limite per la concentrazione al camino dei metalli pesanti emessi da impianti di trattamento termico dei rifiuti, si propone il risultato di un lavoro recentemente pubblicato (Rada et al., 2021), basato su un caso di studio reale. Lo studio fa riferimento ad una proposta di impianto di termovalorizzazione situato in contesto vallivo, caratterizzato dalla presenza di centri abitati e aree agricole a prevalenza di vigneti e meleti. L'impianto in questione emette fumi con una portata di 100.000 Nm³/ora e caratterizzati dai valori garantiti di concentrazione di metalli pesanti riportati in Tabella 7. Per questo impianto di riferimento, è stata effettuata un'analisi di rischio che ha permesso di stimare i valori di R_c e H_i indotti sulla popolazione locale.

Poiché la normativa non impone valori limite per i singoli metalli pesanti (ad eccezione del mercurio), si sono considerate le frazioni massiche ricavate dalla speciazione effettuata su impianti di incenerimento dei rifiuti da parte di ARPA Emilia-Romagna, grazie alla quale si sono stimati i corrispondenti valori garantiti per i singoli metalli (ARPA Emilia-Romagna, 2011).

Come si osserva, il cromo totale risulta il contaminante più abbondante all'interno del più vasto gruppo di metalli pesanti considerati dalla normativa. Tuttavia, questa non distingue tra Cr III e Cr VI, quest'ultimo caratterizzato da un'elevata tossicità cancerogena rispetto agli altri metalli pesanti. Dal punto di vista del rischio per la salute, si rivelerebbe necessaria una speciazione del cromo totale per valutare il rischio associato nell'area di influenza di un tale impianto. In assenza di specifiche prescrizioni sul Cr VI, in una prima fase di questo esempio numerico, in via estremamente cautelativa, si considera che il cromo totale sia composto interamente da Cr VI.

Con riferimento al caso di esempio, si è svolta pertanto l'analisi di rischio, sulla base dei risultati della modellazione di dispersione, che ha consentito di stimare il rischio specifico per singolo metallo pesante e il rischio cumulato per tutti i contaminanti considerati. I risultati sono riportati in Tabella 8.

Tabella 7. Frazioni massiche relative agli inquinanti atmosferici tossici e persistenti normati dal D.Lgs. 152/2006 (aggiornamento al 2014) e concentrazioni al camino dei singoli metalli pesanti stimati sulla base dei valori garantiti cumulativi riferiti ad un caso di studio (ARPA Emilia-Romagna, 2011; Rada et al., 2021).

Contaminante	Frazione massica al camino [-]	Valori garantiti di concentrazione al camino (per gruppo) [mg/Nm ³]	Valori garantiti di concentrazione al camino (derivati per singolo metallo pesante) [mg/Nm ³]
Cadmio	0,907	0,025	0,022675
Tallio	0,093		0,002325
Mercurio	-	0,025	0,025
Antimonio	0,109		0,02725
Arsenico	0,003		0,00075
Cromo (totale)	0,684		0,171
Cobalto	0,003	0,25	0,00075
Piombo	0,075		0,01875
Manganese	0,058		0,0145
Nichel	0,034		0,0085
Vanadio	0,034		0,0085
IPA	-	0,01	0,01
PCDD/F	-	2,50E-08	2,50E-08
dI-PCB	-	1,00E-07	1,00E-07

Tabella 8. Valori stimati della massima concentrazione media annua in aria ambiente a livello del suolo, della massima deposizione atmosferica media annua e rispettivi valori di $R_{c,i}$ e HI_i per gli inquinanti tossici persistenti regolati dalla normativa (Rada et al., 2021).

Contaminante	Massima concentrazione media annua in aria ambiente [mg/m ³]	Massima deposizione media annua [mg m ⁻² anno ⁻¹]	$R_{c,i}$	HI_i
Antimonio	2,20E-08	7,16E-10	0,00E+00	4,54E-04
Arsenico	6,04E-10	1,97E-11	2,17E-10	1,87E-04
Cadmio	1,83E-08	5,96E-10	2,23E-08	6,87E-03
Cromo (totale)	1,38E-07	4,49E-09	8,62E-06	5,70E-03
Cobalto	6,04E-10	1,97E-11	0,00E+00	4,68E-04
Piombo	1,51E-08	4,93E-10	0,00E+00	5,10E-06
Manganese	1,17E-08	3,81E-10	0,00E+00	9,58E-04
Mercurio	2,01E-08	6,57E-10	0,00E+00	2,52E-04
Nichel	6,85E-09	2,23E-10	1,31E-09	3,12E-04
Tallio	1,87E-09	6,11E-11	0,00E+00	2,01E-04
Vanadio	6,85E-09	2,23E-10	0,00E+00	2,81E-04
IPA	8,06E-09	2,63E-10	1,09E-08	1,02E-05
PCDD/F	2,01E-14	6,57E-16	5,18E-10	1,89E-06
dI-PCB	8,06E-14	2,63E-15	2,07E-10	7,59E-07
		TOTALE	8,66E-06	

Disponendo dei risultati di una modellazione di dispersione su un impianto di termovalorizzazione di rifiuti urbani, è possibile stimare in prima approssimazione le massime ricadute attese da un impianto simile situato in un'area che presenti caratteristiche morfologiche e meteo-climatiche paragonabili a quelle del caso di riferimento. Ciò è possibile attraverso l'impiego del cosiddetto "fattore di diluizione", che rappresenta il rapporto tra la massima concentrazione media annua a livello del suolo o il massimo valore medio annuo di deposizione atmosferica di un contaminante (o di un gruppo di contaminanti) ed il rispettivo flusso di massa al camino. In questo modo, l'applicazione del fattore di diluizione per un dato inquinante (o per un gruppo di inquinanti) al rispettivo flusso di massa in uscita da un impianto simile, di cui si vuole stimare l'impatto, consente di valutare le massime concentrazioni e deposizioni medie annue indotte da questo. Nel caso specifico, i fattori di diluizione ricavati dal caso di riferimento vengono qui applicati ai singoli metalli pesanti, al fine di stimare gli impatti dell'impianto al variare della concentrazione di Cr VI, che potenzialmente può contribuire più di tutti i metalli pesanti al rischio cancerogeno.

La forte approssimazione che vede il cromo totale interamente composto da Cr VI comporta un valore di R_c che, seppur compatibile con il valore considerato accettabile di 10^{-5} (D.Lgs. 4/2008), risulta quasi due ordini di grandezza superiore al valore indicato nel già citato bando di gara del 2009, contribuendo, nel caso preso ad esempio, al 99,5% del rischio cancerogeno cumulato. Si tratta certamente di un'ipotesi estremamente cautelativa, che richiede di prendere in considerazione anche altri scenari più realistici.

All'interno dello stesso studio citato (Rada et al., 2021), è stata condotta un'analisi di sensibilità per stimare l'influenza del contenuto di Cr VI nel cromo totale sul rischio cancerogeno cumulato indotto dall'impianto considerato a titolo di esempio. Essendo il Cr VI un composto cancerogeno per via inalatoria, in Tabella 9 si riporta il risultato dell'analisi di sensibilità sul rischio cancerogeno inalatorio indotto al variare del contenuto di Cr VI all'interno del parametro cromo totale. Come si può vedere, il Cr VI merita comunque un'attenzione particolare.

Tabella 9. Dipendenza del rischio cancerogeno cumulato per via inalatoria dal contributo del Cr VI alla concentrazione al camino di cromo totale.

Contenuto di Cr VI nel cromo totale [%]	R _c inalatorio [-]	Contributo del Cr VI all'R _c inalatorio [%]
0	3,11E-08	0,00
10	8,93E-07	96,52
20	1,76E-06	98,23
30	2,62E-06	98,81
40	3,48E-06	99,11
50	4,34E-06	99,28
60	5,21E-06	99,32
70	6,07E-06	99,49
80	6,93E-06	99,55
90	7,79E-06	99,60
100	8,65E-06	99,64

4.1.3. PCDD/F e dl-PCB

Benché le emissioni di PCDD/F e dl-PCB dal settore dei trattamenti termici dei rifiuti si siano ridotte negli ultimi decenni, grazie all'introduzione delle BAT (Best Available Technologies) di settore e all'imposizione di limiti di concentrazione al camino più restrittivi, tali inquinanti richiedono comunque attenzione. Se da un lato contaminanti come il Cr VI rivestono particolare importanza dal punto di vista del rischio cancerogeno per via inalatoria, PCDD/F e dl-PCB tendono ad accumularsi nei grassi animali e vegetali, comportando rischi dal punto di vista della contaminazione della catena alimentare. I percorsi tipici degli inquinanti atmosferici di interesse per la catena alimentare comprendono inizialmente la deposizione al suolo o sulla superficie di colture destinate all'alimentazione umana o colture foraggere. Il trasferimento all'interno dell'organismo umano può avvenire tramite il consumo diretto delle colture contaminate o tramite il consumo di pesci o carni di animali esposti alla contaminazione per via inalatoria, tramite la dieta o l'ingestione di suolo contaminato. Un ulteriore contributo può giungere dal consumo di alimenti derivati, quali uova o prodotti caseari (Schiavon et al., 2013, 2016).

Nell'ultimo decennio, la tematica è stata sviluppata dal Gruppo di ricerca in Ingegneria Sanitaria-Ambientale del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica dell'Università degli Studi di Trento ed ha portato a definire nuovi strumenti per affrontare il potenziale problema legato alle emissioni di PCDD/F e dl-PCB, non solo dal settore rifiuti, ma anche da altri settori che possono svolgere un ruolo chiave nell'emissione di queste sostanze, quali la produzione di acciaio e la combustione di biomasse.

In particolare, si segnala una metodologia per il controllo della dose di diossina calibrata sulla dieta di una popolazione target, basata sulla definizione di un valore massimo tollerabile di deposizione di diossina al suolo specifico per l'area oggetto di studio (Schiavon et al., 2013). Si segnalano, inoltre, le potenzialità del monitoraggio della deposizione al suolo di diossina, che è in grado di fornire diverse tipologie di informazioni utili al controllo di questa famiglia di composti: innanzitutto, il monitoraggio continuo in punti individuati dall'applicazione di modelli di dispersione, consente di valutare il rispetto del valore guida "locale" di deposizione al suolo nelle aree di incidenza di sorgenti di emissione di tali composti; inoltre, il confronto tra i profili dei congeneri di PCDD/F e dl-PCB rilevati al camino di sorgenti note e nelle deposizioni al suolo consente di individuare le attività responsabili dei livelli di tali inquinanti nei punti di

monitoraggio (Rada et al., 2014); analoghe finalità si raggiungono con la caratterizzazione dei sedimenti di corpi d'acqua a debole ricambio (stagni e laghi) che, oltre a fornire indicazioni sui contributi da diverse attività, consentono anche di ricostruire l'andamento storico delle deposizioni nel punto di campionamento (Argiriadis et al., 2014).

4.1.4. Proposte di integrazione alla normativa in vigore

4.1.4.1. Metalli pesanti

Allo stato attuale, la letteratura scientifica risulta carente di studi sulla speciazione del cromo nelle emissioni dal settore rifiuti. L'Agenzia per l'Ambiente del Regno Unito ha stimato in 1,41% il massimo contenuto di Cr VI nel cromo totale al camino di impianti di incenerimento di rifiuti (UK Environment Agency, 2017). Un altro studio (Świetlik et al., 2014) ha stimato valori più elevati, compresi tra 6,5% e 12,7%. Diverrebbe quindi importante introdurre un valore limite dedicato almeno al cromo totale, accoppiato ad un controllo periodico sulla concentrazione di Cr VI al camino in impianti di trattamento termico dei rifiuti.

Sulla base del valore più elevato individuato finora da Świetlik et al. (2014), in via cautelativa si può assumere un contenuto di Cr VI pari al 20%. Pertanto, durante il percorso autorizzativo di un eventuale nuovo impianto, si suggerisce la seguente procedura integrativa rispetto alla normativa attuale:

- calcolare la concentrazione di Cr VI che fornisce il valore accettabile di R_c (o un valore più restrittivo eventualmente riportato all'interno del bando di gara);
- calcolare la concentrazione di cromo totale corrispondente, dividendo la concentrazione di Cr VI calcolata al punto precedente per un coefficiente 0,20 che deriva da una prima ipotesi, cautelativa, che consideri un contenuto di Cr VI nel cromo totale del 20%;
- adottare la concentrazione di cromo totale calcolata al punto precedente come valore garantito di concentrazione al camino per la procedura di autorizzazione dell'impianto;
- prevedere sanzioni in caso di mancato rispetto del valore garantito della concentrazione al camino di cromo totale.

Si tratterebbe di un approccio facilmente implementabile, in quanto il monitoraggio del cromo totale fa già parte dei sistemi di monitoraggio convenzionali al camino. Si propone, tuttavia, un secondo approccio restrittivo, che richiederebbe uno sforzo maggiore dal punto di vista analitico, in quanto basato sulla speciazione del cromo totale:

- calcolare la concentrazione di Cr VI che fornisce il valore accettabile di R_c (o un valore più restrittivo eventualmente riportato all'interno del bando di gara);
- stabilire una frequenza per l'analisi del Cr VI al camino;
- adottare il valore di concentrazione di Cr VI calcolato al primo punto come valore garantito di concentrazione al camino per la eventuale procedura di autorizzazione di un impianto;
- prevedere sanzioni in caso di mancato rispetto del valore garantito della concentrazione al camino di Cr VI.

Benché più complesso dal punto di vista analitico rispetto al cromo totale, il monitoraggio del Cr VI può essere svolto attraverso spettrometria di emissione atomica (ICP-AES) seguita da cromatografia ionica (US EPA, 1996a; US EPA, 1996b; Shah et al., 2012; Miyake et al., 2017).

Le procedure proposte sin qui potrebbero rappresentare un transitorio verso un passaggio ulteriore, ossia la prescrizione di un valore limite per il solo Cr VI. A tal proposito, vale la pena ricordare che, nel 2009, lo Studio di Fattibilità relativo alla progettazione, realizzazione e gestione di un impianto di trattamento termico da localizzarsi in località Ischia Podetti, promosso dalla PAT, ha proposto l'adozione di un valore limite di concentrazione al camino specifico per il Cr VI pari a $1 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ su media annua, scelto in base a considerazioni sul valore da garantire per il cadmio ($25 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$) e sui potenziali cancerogeni dei due contaminanti. Lo stesso documento ha proposto di considerare il Cr VI nell'analisi di rischio relativa ad un nuovo impianto, sottolineando che, pur non essendo un inquinante normalmente rilevante per il settore dei rifiuti urbani, il Cr VI deve essere tenuto sotto controllo in virtù della sua elevata cancerogenicità (superiore a quella del cadmio).

In aggiunta al Cr VI, lo Studio di Fattibilità ha proposto di considerare per l'analisi di rischio anche altri metalli (cadmio, nichel e arsenico) e il benzo[a]pirene, oltre a PCDD/F e PCB, già di norma valutati nelle analisi di rischio. Sulla base della cancerogenicità dei suddetti contaminanti, il Terzo Aggiornamento del Piano Provinciale di Smaltimento dei Rifiuti di Trento (Provincia Autonoma di Trento, 2006), ripreso dallo Studio di Fattibilità citato, ha stabilito che un tale impianto debba garantire un rischio per la salute dei cittadini sempre inferiore a 10^{-7} . Poiché le considerazioni espresse sul Cr VI dallo Studio di Fattibilità del 2009 fanno riferimento al caso specifico di Ischia Podetti, qualora si considerassero altri siti (o diverse modalità di rilascio per lo stesso sito), il valore da garantire al camino per tale contaminante deve essere aggiornato sulla base del rispetto del rischio cancerogeno massimo di 10^{-7} per i siti considerati. Gli impatti a livello del suolo, infatti, oltre che dalle caratteristiche delle sorgenti di emissione, dipendono fortemente anche dalle condizioni meteo-climatiche specifiche e dall'orografia dell'area. Tuttavia, occorre tenere presente i limiti delle metodologie analitiche attuali per valutare concentrazioni di microinquinanti: nel corso del monitoraggio condotto nel 2009 su campioni di polveri totali in aria ambiente, i cui risultati sono riportati all'interno del suddetto Studio di Fattibilità, il limite di rilevabilità del Cr VI era pari a $2 \text{ ng}/\text{m}^3$. Applicando le formulazioni per la stima del rischio cancerogeno per via inalatoria (US EPA, 2005, 2011, 2017), per rispettare il valore di rischio cancerogeno di 10^{-7} , con riferimento al solo contributo del Cr VI, la concentrazione in aria ambiente di quest'ultimo dovrebbe risultare $< 3,4 \text{ pg}/\text{m}^3$, ossia tre ordini di grandezza inferiore al limite di rilevabilità. Pertanto, non sarebbe possibile misurare l'effettivo rispetto del valore di rischio cancerogeno di 10^{-7} tramite monitoraggi sul territorio. Ci si dovrebbe basare solo sulla modellazione di dispersione che richiede una particolare attenzione nella produzione/disponibilità di dati locali per la caratterizzazione della meteorologia della zona di un eventuale impianto.

Per garantire il rispetto di uno specifico valore limite al camino per il Cr VI, per gli impianti di trattamento termico dei rifiuti potrebbe rendersi necessaria l'adozione di sistemi di controllo delle emissioni più efficienti, ad esempio tramite upgrading delle tecnologie normalmente impiegate (a secco o ad umido). Data l'elevata solubilità del Cr VI, l'adozione di tecnologie ad umido ne permette la rimozione controllata (es. torri di lavaggio ad acqua, scrubber Venturi o scrubber-cycloni). Il successivo trattamento dei reflui liquidi generati da tali tecnologie può essere effettuato tramite tecniche sviluppate di recente per la rimozione del Cr VI da soluzioni acquose o da acque reflue, basate sull'adsorbimento (Huang et al., 2017;

Yao et al., 2020), la catalisi (Bano et al., 2020; Wang et al., 2020) e processi biologici (Pradhan et al., 2017). Per questioni gestionali, la tendenza del settore è quella di preferire soluzioni a secco, per cui, nell'ipotesi di lasciare aperta tale opzione è importante introdurre un controllo dei valori emissivi come discusso sopra.

Verificato il ruolo del Cr VI e valutata l'introduzione di un valore limite di concentrazione al camino per questa sostanza, si ritiene auspicabile anche l'introduzione di un valore limite specifico per il cadmio, il cui ruolo è stato evidenziato all'interno dello Studio di Impatto Ambientale relativo al progetto del termovalorizzatore di Trento (2002). È auspicabile, inoltre, un adeguamento generale dei valori limite di concentrazione ai miglioramenti tecnologici raggiunti nel settore in termini di controllo delle emissioni.

4.1.4.2. PCDD/F e dl-PCB

Per quanto riguarda i due gruppi di inquinanti organici tossici e persistenti potenzialmente più impattanti, si propongono:

- il monitoraggio in continuo di PCDD/F al camino, come proposto nello Studio di Fattibilità per l'impianto di trattamento termico dei rifiuti in località Ischia Podetti (2009);
- il monitoraggio sistematico delle deposizioni atmosferiche di PCDD/F e dl-PCB, quale strumento di controllo dell'esposizione della popolazione.

Il monitoraggio periodico al camino come previsto dalla normativa, infatti, potrebbe non rivelarsi esaustivo per spiegare i potenziali impatti sul territorio. Il monitoraggio delle deposizioni atmosferiche, ad integrazione del monitoraggio in continuo al camino, dovrebbe essere svolto in prossimità di luoghi sensibili e nei punti di massima ricaduta di un eventuale impianto in aree agricole e in presenza di allevamenti. Quale valore di controllo, si suggerisce di utilizzare un valore di deposizione di PCDD/F pari a $1,91 \text{ pg}_{\text{TEQ}} \text{ m}^{-2} \text{ giorno}^{-1}$, stimato come tollerabile per il Trentino (Schiavon et al., 2013). Un sistema di monitoraggio basato su questo approccio consentirebbe di ricavare informazioni più compatibili con le caratteristiche e le modalità di rilascio di questi composti, che, ad eccezione di incidenti, sono prevalentemente responsabili di effetti cronici in seguito ad esposizioni di lungo periodo.

4.2. Considerazioni sul percorso autorizzativo

4.2.1. Finalità

La Valutazione di Impatto Ambientale (VIA) dei progetti è regolamentata a livello nazionale dal D. Lgs.152/2006 e s.m.i. e disciplinata per la Provincia di Trento dalla seguente normativa specifica:

- Legge Provinciale 17 settembre 2013 n. 19 "Disciplina provinciale della valutazione dell'impatto ambientale. Modificazioni della legislazione in materia di ambiente e territorio e della Legge Provinciale 15 maggio 2013 n. 9 [...]";
- Decreto del Presidente della Provincia 20 luglio 2015, n. 9-23/Leg;
- Legge provinciale n. 6 del 19 settembre 2019 di modifica della L.P. 19/2013 con introduzione del provvedimento autorizzatorio unico provinciale (PAUP)

Il procedimento di VIA ha la finalità di valutare se il progetto determina potenziali impatti ambientali significativi e negativi e, a seconda della complessità e di specifiche soglie dimensionali, segue procedure diverse. In particolare, per nuovi progetti:

- verifica di assoggettabilità (*screening*);
- consultazione preliminare volta a definire i contenuti dello studio di impatto ambientale e del progetto definitivo (*scoping*);
- valutazione dell'impatto ambientale (VIA).

4.2.2. Le tipologie progettuali e le soglie dimensionali

La L.P. n. 19/2013 e s.m. non individua direttamente le tipologie progettuali dei progetti da assoggettare alle procedure di VIA, ma fa riferimento agli allegati III e IV alla parte II del D. Lgs. 152/2006". In particolare:

- l'allegato III del D. Lgs. n. 152/2006 individua l'elenco dei progetti di competenza delle regioni e delle Province Autonome di Trento e di Bolzano che sono soggette direttamente a procedura di VIA.

Per quanto concerne la possibilità di un procedimento di VIA nel caso di impianto di smaltimento e recupero di rifiuti non pericolosi, si fa riferimento ai seguenti commi dell'allegato III del D. Lgs. 152/2006 e s.m.:

n) Impianto di smaltimento e recupero di rifiuti non pericolosi, con capacità superiore a 100 t/giorno, mediante operazioni di incenerimento o di trattamento di cui all'allegato B, lettere D9, D10 e D11, ed allegato C, lettera R1, della parte quarta del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152.

o) Impianti di smaltimento dei rifiuti non pericolosi mediante operazioni di raggruppamento o ricondizionamento preliminari e deposito preliminare, con capacità superiore a 200 t/giorno (operazioni di cui all'allegato B, lettere D13 e D14, della parte quarta del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152).

q) Impianti di smaltimento di rifiuti non pericolosi mediante operazioni di deposito preliminare, con capacità superiore a 150.000 m³ oppure con capacità superiore a 200 t/giorno (operazioni di cui all'allegato B, lettera D15, della parte quarta del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152).

- L'allegato IV del D. Lgs. n. 152/2006 individua l'elenco dei progetti sottoposti a verifica di assoggettabilità (*screening*) di competenza delle regioni e delle Province Autonome di Trento e di Bolzano. Tale elenco è suddiviso in 8 macrotipologie, all'interno delle quali sono state poi inserite le varie tipologie progettuali:

1. *agricoltura;*
2. *industria energetica ed estrattiva;*
3. *lavorazione dei metalli e dei prodotti minerali;*
4. *industria dei prodotti alimentari;*
5. *industria dei tessuti, del cuoio, del legno e della carta;*
6. *industria della gomma e delle materie plastiche;*
7. *progetti di infrastrutture;*

8. *altri progetti.*

Per quanto concerne la possibilità di un procedimento di verifica di assoggettabilità a VIA nel caso di impianto di smaltimento e recupero di rifiuti non pericolosi, si fa riferimento ai seguenti commi del punto 7 (progetti di infrastrutture) dell'allegato IV del D. Lgs. 152/2006 e s.m.:

r) impianti di smaltimento di rifiuti urbani non pericolosi, mediante operazioni di incenerimento o di trattamento, con capacità complessiva superiore a 10 t/giorno (operazioni di cui all'allegato B, lettere D2 e da D8 a D11, della parte quarta del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152); impianti di smaltimento di rifiuti non pericolosi, mediante operazioni di raggruppamento o di ricondizionamento preliminari, con capacità massima complessiva superiore a 20 t/giorno (operazioni di cui all'allegato B, lettere D13 e D14 del decreto legislativo 152/2006);

s) impianti di smaltimento di rifiuti speciali non pericolosi, con capacità complessiva superiore a 10 t/giorno, mediante operazioni di incenerimento o di trattamento (operazioni di cui all'allegato B, lettere D2 e da D8 a D11, della parte quarta del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152);

t) impianti di smaltimento di rifiuti speciali non pericolosi mediante operazioni di deposito preliminare con capacità massima superiore a 30.000 m³ oppure con capacità superiore a 40 t/giorno (operazioni di cui all'allegato B, lettera D15 della parte quarta del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152);

z.b) Impianti di smaltimento e recupero di rifiuti non pericolosi, con capacità complessiva superiore a 10 t/giorno, mediante operazioni di cui all'allegato C, lettere da R1 a R9, della parte quarta del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152, ad esclusione degli impianti mobili volti al recupero di rifiuti non pericolosi provenienti dalle operazioni di costruzione e demolizione, qualora la campagna di attività abbia una durata inferiore a novanta giorni, e degli altri impianti mobili di trattamento dei rifiuti non pericolosi, qualora la campagna di attività abbia una durata inferiore a trenta giorni. Le eventuali successive campagne di attività sul medesimo sito sono sottoposte alla procedura di verifica di assoggettabilità a VIA qualora le quantità siano superiori a 1.000 m³ al giorno³.

Sono sottoposti alla procedura di verifica di assoggettabilità a VIA di competenza nazionale:

- i progetti elencati nell'allegato II-bis alla Parte Seconda del D. Lgs.152/2006;
- i progetti elencati nell'allegato II alla Parte Seconda del D. Lgs.152/2006, che servono esclusivamente o essenzialmente per lo sviluppo ed il collaudo di nuovi metodi o prodotti e non sono utilizzati per più di due anni;
- le modifiche o le estensioni dei progetti elencati negli allegati II o II-bis, alla parte seconda del D. Lgs.152/2006, la cui realizzazione può generare potenziali impatti

³ lettera così modificata dall'art. 35, comma 1, lettera l-bis), della legge n. 108 del 2021.

ambientali significativi e negativi, ad eccezione delle modifiche o estensioni che risultino conformi agli eventuali valori limite stabiliti nell'allegato II.

4.2.3. Fasi della procedura

4.2.3.1. Verifica di assoggettabilità (screening)

Il procedimento di verifica di assoggettabilità è attivato allo scopo di valutare se un progetto può avere un impatto significativo e negativo sull'ambiente e se pertanto deve essere assoggettato al procedimento di VIA. La procedura di verifica di assoggettabilità si applica ai seguenti casi:

- nel caso di nuovi progetti di opere, impianti o interventi, le cui dimensioni superano quelle fissate dall'allegato IV della parte II del D. Lgs. n. 152/2006;
- per progetti di modifica o ampliamento di opere, impianti o interventi che presentano soglie dimensionali al di sotto di quelle indicate dall'allegato IV della parte II del D. Lgs. n. 152/2006 nel rispetto dei criteri definiti dal D.M. n. 52/2015;
- nel caso di progetti di modifica o ampliamento sostanziali di opere, impianti o interventi già autorizzati o realizzati o in fase di realizzazione indipendentemente dalle soglie dimensionali previste dall'allegato III e IV della parte II del D. Lgs. n. 152/2006, accertata dal Servizio Autorizzazioni e Valutazioni Ambientali la significatività dell'impatto.

Nel caso in cui le opere dovessero ricadere, anche parzialmente, all'interno di aree geografiche sensibili, le soglie dimensionali previste dall'allegato IV sono ridotte del 50%.

Il Servizio Autorizzazioni e Valutazioni Ambientali, entro sette giorni dal deposito, accerta la completezza della documentazione, e se risulta incompleta o carente chiede al proponente le opportune integrazioni documentali fissando il termine per la presentazione. Decorso inutilmente il termine assegnato non avvia il procedimento e ne dà comunicazione al proponente.

Chiunque può prendere visione della documentazione, ed entro il termine di 45 giorni dalla data di pubblicazione all'Albo elettronico della Provincia, è possibile presentare osservazioni. Qualora ritenuta opportuna, in relazione a valutazioni o verifiche di particolare complessità, il Servizio può indire una conferenza di servizi per l'esame istruttorio del progetto sottoposto a procedura di verifica.

Il Servizio, sulla base dei contenuti della richiesta, delle osservazioni del pubblico, dei pareri espressi anche in conferenza di servizi e delle valutazioni tecniche sulla base dei criteri di selezione di cui all'allegato A della legge provinciale si pronuncia in merito alla sottoposizione o meno del progetto alla procedura di VIA entro 25 giorni dalla scadenza dei termini per presentare osservazioni.

Il Servizio comunica il contenuto integrale della decisione al proponente e ai soggetti tenuti al controllo degli adempimenti ed al monitoraggio ambientale e ne cura la pubblicazione integralmente all'Albo elettronico della Provincia e per estratto nel Bollettino ufficiale della Regione.

4.2.3.2. Valutazione di Impatto Ambientale (VIA)

La procedura di Valutazione di Impatto Ambientale comprende, nel provvedimento positivo di valutazione dell'impatto ambientale adottato dalla Giunta provinciale, tutte le autorizzazioni e pareri per la sua realizzazione.

L'istruttoria di VIA prevede il coinvolgimento delle varie strutture (Servizi ed Agenzie) della Provincia di Trento alle quali viene richiesto un parere di merito sulle opere, nonché il coinvolgimento degli Enti locali competenti per territorio. Un elenco completo delle strutture si può trovare presso il sito web dell'Agenzia Provinciale per la Protezione dell'Ambiente⁴.

L'istruttoria prevede una fase obbligatoria di partecipazione pubblica. L'avviso di deposito del progetto su un quotidiano locale e la pubblicazione sull'Albo elettronico della Provincia di Trento determinano l'avvio della fase di partecipazione.

La normativa vigente prevede che chiunque possa accedere e visionare la documentazione depositata. Allo scopo di facilitare la consultazione è possibile fare riferimento alla sintesi non tecnica. Essa rappresenta il documento di accompagnamento del progetto e dello studio di impatto ambientale finalizzato a raccogliere e sintetizzare le informazioni presenti nello studio con linguaggio non tecnico.

4.2.4. Tempi della procedura

Le procedure di Verifica di Assoggettabilità (*screening*), di consultazione preliminare (*scoping*) e di VIA hanno tempi definiti per legge o da specifiche deliberazioni della Giunta provinciale. In particolare, le procedure devono essere concluse entro i seguenti tempi massimi:

- verifica di assoggettabilità (*screening*): entro 70 giorni dal deposito;
- consultazione preliminare (*scoping*): entro 60 giorni dal deposito;
- VIA: entro 140 giorni dal deposito della domanda e contestuale pubblicazione su un giornale e sul sito internet provinciale.

Le tempistiche sopra indicate sono relative ai tempi massimi di conclusione dei procedimenti, in assenza di sospensioni volte a integrare la documentazione depositata.

La L.P. n. 6/2019 "Modificazioni della legge provinciale sulla valutazione d'impatto ambientale 2013, concernenti il procedimento per il rilascio del provvedimento autorizzatorio unico provinciale, di disposizioni connesse e della legge provinciale sulle foreste e sulla protezione della natura 2007", in relazione ai tempi e al processo autorizzativo del procedimento di Valutazione di Impatto Ambientale, ha introdotto il Provvedimento Autorizzatorio Unico Provinciale (PAUP). Il PAUP prevede i seguenti tempi procedurali, fissati agli artt. 9 e seguenti della L.P. 19/2013:

- verifiche preliminari, pubblicazione e comunicazione agli enti interessati: entro 15 giorni dalla presentazione della domanda (art. 9, comma 4);
- verifiche degli enti interessati riguardo l'adeguatezza della documentazione: entro 25 giorni dalla comunicazione prevista dal comma 4 (art. 9, comma 5);
- richiesta al proponente di integrazioni della domanda e della documentazione presentata: entro 30 giorni dalla comunicazione prevista dal comma 4 (art. 9, comma 6); la presentazione delle integrazioni da parte del proponente ha un tempo

⁴ http://www.valutazioneambientale.provincia.tn.it/valutazioni_ambientali/VIA/-VIA/pagina50.html

- perentorio di 30 giorni dalla comunicazione di richiesta di integrazioni oltre i quali, in caso di mancato deposito, la domanda si considera ritirata (art. 9, comma 6);
- osservazioni: entro 60 giorni dalla data di pubblicazione dell'avviso al pubblico (art. 10, comma 2);
 - conferenza dei Servizi: convocazione entro 30 giorni dalla scadenza del termine di presentazione delle osservazioni o dalla data di ricevimento di eventuali integrazioni; conclusione dei lavori entro 120 gg dalla data di convocazione (art. 12);
 - adozione del PAUP da parte della Giunta provinciale: entro 20 giorni dalla conclusione della Conferenza dei servizi.

4.2.5. Approfondimenti su impianti di combustione dei rifiuti

Nel caso non si ricorresse alla valorizzazione ex situ del rifiuto tramite produzione di syngas ed eventuali altri prodotti (es., idrogeno, etanolo, metanolo), le alternative impiantistiche consisterebbero in:

- un impianto a combustione diretta dei rifiuti;
- un impianto di gassificazione dei rifiuti e combustione in loco del syngas a fini energetici.

In questi casi, l'impianto darebbe sicuramente luogo ad emissioni in atmosfera e risulterebbe soggetto ai valori limite di concentrazione al camino riportati all'interno del D. Lgs. 152/2006 per l'incenerimento di rifiuti, opportunamente ridotti in fase di autorizzazione. Trattandosi di processi di combustione, le portate di gas esausto in uscita dal camino risulterebbero nell'ordine di 10^4 – 10^5 Nm³/ora. Ad esempio, lo Studio di Fattibilità per il termovalorizzatore di Trento (2009), a fronte di una portata di rifiuti da trattare di 103.000 t/anno, ha considerato una portata dei fumi di 109.000 Nm³/ora. Mantenendo questa proporzione tra portata di rifiuti in ingresso e portata dei fumi e considerando le medesime ore di funzionamento assunte nello Studio di Fattibilità (7.800 ore/anno), un impianto di combustione diretta dei rifiuti dimensionato sulla base dei quantitativi di rifiuti definiti dagli Scenari 3.1 e 3.2 produrrebbe una portata dei fumi rispettivamente di 65.000 e 36400 Nm³/ora. Adottando, a titolo di esempio, i valori di concentrazione da garantire al camino riportati nello Studio di Fattibilità per il termovalorizzatore di Trento (2009), a seconda della taglia dell'impianto, si stimano i flussi di massa al camino massimi riportati in Tabella 10.

È bene notare che i valori qui presentati devono intendersi a puro titolo indicativo, in quanto ogni impianto ha caratteristiche proprie. Le emissioni massime stimate, inoltre, potrebbero differire da quelle qui riportate nel caso di combustione indiretta (gassificazione del rifiuto e successiva combustione in loco del syngas). Per quest'ultimo caso, infatti, ci si attende un miglioramento per quanto riguarda i valori di concentrazione al camino di alcune sostanze. L'impiego di un gas combustibile, anziché di un combustibile solido eterogeneo, infatti, permette di ottenere un processo di combustione più omogeneo ed efficiente. Trattandosi tuttavia sempre di un processo di combustione, le portate in gioco e, di conseguenza, i flussi emissivi di inquinanti atmosferici, sebbene inferiori per alcuni parametri, risultano, in genere, paragonabili (come ordine di grandezza) a quelli di un processo di combustione diretta dei rifiuti. Per una più verosimile caratterizzazione delle emissioni, è opportuno fare riferimento alle specifiche tecnologie e ai singoli produttori. Nella stessa Tabella 10 si riporta in versione

definitiva un confronto con l'inventario delle emissioni provinciali, relativo al 2015 (Provincia Autonoma di Trento, 2019). Si può osservare come, nel caso di ossidi di zolfo, ossidi di azoto e ammoniacca, i flussi massimi stimati dagli impianti relativi agli scenari considerati siano in tutti i casi inferiori alle emissioni annue totali a livello provinciale. Il confronto tuttavia è solo parziale, in quanto solo una minima parte delle sostanze considerate in Tabella 10 è effettivamente conteggiata dagli inventari delle emissioni regionali e provinciali.

Se, da un lato, una riduzione della taglia dell'impianto comporta portate dei fumi minori, che si traducono in flussi di massa degli inquinanti proporzionalmente inferiori, dall'altro lato è opportuno porre particolare attenzione alle modalità di rilascio dei fumi. In particolare, la dispersione dei fumi e dei contaminanti rilasciati è influenzata dalle seguenti variabili:

- altezza della quota di rilascio;
- temperatura dei fumi in uscita;
- velocità dei fumi in uscita.

Considerando le medesime condizioni meteorologiche e morfologiche dell'area, maggiori sono i valori delle precedenti variabili, maggiore è il grado di dispersione degli inquinanti atmosferici e minori risultano gli impatti attesi a livello del suolo. Lo Studio di Impatto Ambientale relativo al progetto del termovalorizzatore di Trento (2002) ha evidenziato l'importanza di considerare una quota di rilascio di 100 m, dettata dalla taglia dell'impianto considerata all'epoca. Nonostante l'elevata quota di rilascio ed una velocità di uscita dei fumi prossima a valori che potrebbero richiedere una valutazione di impatto acustico *ad hoc* (20 m/s), la modellazione di dispersione e l'analisi di rischio hanno evidenziato un rischio individuale massimo di $4,4 \cdot 10^{-7}$ per i contributi cumulati di cadmio e PCDD/F attraverso i seguenti percorsi di esposizione: inalazione, contatto dermico, ingestione accidentale di suolo e dieta. Si fa presente che il percorso dieta considerava il solo consumo di mele. Inoltre, l'analisi di rischio valutava esclusivamente i contributi di cadmio e PCDD/F. Considerando la successiva prescrizione emersa all'interno del Terzo Aggiornamento del Piano Provinciale di Smaltimento dei Rifiuti (Provincia Autonoma di Trento, 2006) circa il valore accettabile di rischio cancerogeno per la popolazione (massimo rischio individuale composto da tutti gli inquinanti di interesse), stabilito in 10^{-7} , l'impianto considerato nel 2002 non sarebbe in grado di rispettare tale criterio. Bene quindi che negli anni la raccolta differenziata sia aumentata riducendo i flussi attuali di rifiuti di interesse per una valorizzazione energetica. Rispetto al progetto preliminare del 2002, lo Studio di Fattibilità del 2009 introduce tuttavia elementi di novità che consentirebbero di ridurre il rischio indotto sul territorio, a parità di parametri quali la quota di rilascio (100 m, scelta che era dipesa fortemente dal sito e dalle dimensioni dell'impianto), la velocità (20 m/s) e la temperatura dei fumi (140 °C, secondo il progetto preliminare del 2002). Tra questi si segnala la taglia considerata nello Studio di Fattibilità del 2009, che viene ridotta a meno della metà rispetto al 2002, l'aggiornamento dei valori di concentrazione da garantire al camino ai valori riportati in Tabella 10 e l'introduzione di limiti specifici per alcune sostanze. Rimane comunque da valutare se, in seguito all'introduzione di questi criteri aggiuntivi, il rischio di un impianto, una volta definito e potenzialmente localizzato, risulti effettivamente inferiore al valore di 10^{-7} .



Tabella 10. Flussi di massa al camino stimati dallo Studio di Fattibilità relativo all'impianto di trattamento termico dei rifiuti in località Ischia Podetti e stima dei flussi per un impianto equivalente di combustione diretta che riceva in ingresso il quantitativo di rifiuti definito dagli Scenari 3.1 e 3.2.

Sostanza	Concentrazione garantita al camino [mg/Nm ³]	Termovalorizzatore di Trento (SIA 2002)	Flusso di massa stimato [t/anno]**		Confronto con emissioni a livello provinciale
			Scenario 3.1	Scenario 3.2	
Polveri sospese totali	1,5	1,28	0,76	0,43	0,01 – 0,02%
Carbonio organico totale	10	8,50	5,07	2,83	0,01 %
Composti inorganici del cloro	2	1,70	1,01	0,57	n.d.
Composti inorganici del fluoro	0,25	0,21	0,13	0,07	n.d.
Ossidi di zolfo	10	8,50	5,07	2,83	0,61 – 1,10%***
Ossidi di azoto	40	34,01	20,28	11,36	0,15 – 0,27%
Monossido di carbonio	50	42,51	25,35	14,19	0,04 – 0,08%
Ammoniaca	10	8,50	5,07	2,83	0,13 – 0,23%
Mercurio	0,025	0,02	0,01	0,01	n.d.
Cadmio e Tallio	0,025	0,02	0,01	0,01	n.d.
Altri metalli (eccetto Cr VI)	0,25	0,21	0,13	0,07	n.d.
Diossine e furani*	3,00E-08	2,55E-08	1,52E-08	8,51E-09	n.d.
Benzo[a]pirene	1,00E-04	8,50E-05	5,07E-05	2,83E-05	n.d.
Cr VI	1,00E-03	8,50E-04	5,07E-04	2,83E-04	n.d.

* Massa espressa in TEQ.

** Si è considerato un tenore di ossigeno medio dell'11%.

*** Valore riferito al solo biossido di zolfo.

L'adozione di taglie di impianti inferiori rispetto a quella considerata nello Studio di Fattibilità del 2009, quali quelle compatibili con gli scenari analizzati nel presente studio, consentirebbe di ridurre ulteriormente gli impatti. Questo non ipotizzando però interventi sulla quota di rilascio. Se si prevedesse di realizzare l'impianto presso Ischia Podetti e si volesse considerare un abbassamento della quota di rilascio, alla luce delle taglie ridotte delle alternative analizzate negli Scenari 3.1 e 3.2, occorrerebbe effettuare valutazioni approfondite sulla dispersione degli inquinanti in atmosfera, con un conseguente allungamento dei tempi del percorso autorizzativo. Si precisa che tali valutazioni sarebbero comunque necessarie qualora si consideri una localizzazione diversa da Ischia Podetti, per la quale erano state compiute attività di monitoraggio e di modellazione approfondite nel 2002 con quota di rilascio a 100 m. Un'ulteriore opzione per ridurre le ricadute al suolo degli inquinanti potrebbe riguardare la riduzione del recupero termico. Ciò consentirebbe di rilasciare i fumi ad una temperatura più elevata, che favorirebbe l'innalzamento del pennacchio e la dispersione degli inquinanti. Tuttavia, occorre considerare il risvolto negativo legato ad un limitato recupero termico in zona, in quanto l'energia non recuperata dall'impianto continuerebbe ad essere prodotta tramite i vettori energetici attualmente in uso, che includono combustibili di origine fossile. Recentemente (Adami et al., 2020), con riferimento ad ambiti rurali, si è suggerito un approccio alternativo basato sul concetto di riscaldamento elettrico, che potrebbe essere alimentato dall'energia elettrica prodotta da un impianto di conversione energetica dei rifiuti. Tale approccio però richiede interventi strutturali alla rete elettrica che risultano più compatibili con aree rurali e meno densamente abitate rispetto ad aree urbane. Per approfondimenti si rimanda al citato lavoro. Si sottolinea peraltro che un rilascio a temperatura più elevata andrebbe contro il principio di minimizzare gli impatti sul microclima locale.

Si fa presente che la valorizzazione ex situ del syngas con eventuali prodotti derivanti dalla sua trasformazione potrebbe comunque essere associata a rilasci secondari in loco da trattamento del syngas stesso. Ovviamente, nel caso ciò potesse avvenire (in funzione della tecnologia scelta), sarebbe necessario approfondire l'impatto locale di tale scenario. Per approfondimenti, si rimanda al Capitolo 5.

4.3. Considerazioni localizzative

4.3.1. Introduzione

Nella presente sezione si riporta, come ragionamento puramente tecnico, un inquadramento preliminare di alcune delle potenziali aree che potrebbero ospitare un eventuale impianto di trattamento termochimico dei rifiuti non recuperabili individuati dagli Scenari 3.1 e 3.2. Le aree considerate corrispondono alle aree idonee individuate dal 4° Aggiornamento del Piano provinciale di Gestione dei Rifiuti (sez. Rifiuti Urbani). Tali localizzazioni vengono qui discusse dal punto di vista dei potenziali impatti ambientali legati sia al trasporto dei rifiuti verso le aree individuate sia all'attività di un eventuale impianto di trattamento termico dei rifiuti situato presso una di esse. Ciò è stato fatto per supportare i decisori che dovessero trovarsi nella necessità di promuovere uno studio comparativo tra siti. Quanto qui scritto non sostituisce uno specifico studio per l'individuazione del sito più idoneo in provincia per la ubicazione di un eventuale impianto.

4.3.2. Elenco delle aree idonee individuate dal 4° Aggiornamento del Piano provinciale di Gestione dei Rifiuti (sez. Rifiuti Urbani)

L'Allegato 9 al 4° Aggiornamento del Piano Provinciale di Gestione dei Rifiuti (Provincia Autonoma di Trento, 2014) individua le aree che saranno interessate dalle destinazioni urbanistiche "discarica", "aree di trattamento dei rifiuti" e "stazione di trasferimento". L'elenco delle aree è visualizzabile in Tabella 11.

Tabella 11. Aree individuate dal 4° Aggiornamento del Piano provinciale di Gestione dei Rifiuti (Provincia Autonoma di Trento, 2014) quali interessate dalle destinazioni urbanistiche "discarica", "aree di trattamento dei rifiuti" e "stazione di trasferimento".

Denominazione sito/Destinazione d'uso	Comune	Località
Impianto di confezione di C.S.S.-combustibile di Trento	Trento	Ischia Podetti
Impianto di recupero della discarica "Isclè" di Taio con produzione di C.S.S.-combustibile e Centro Integrato	Taio	Isclè
Centro Integrato di Monclassico – Presso la discarica di Monclassico	Dimaro Folgarida	Monclassico
Centro Integrato di Pergine Valsugana	Pergine Valsugana	Vigalzano
Centro Integrato di Rovereto – Presso la discarica di Rovereto	Rovereto	Lizzana
Centro Integrato di Scurelle – Presso la discarica di Scurelle	Scurelle	Scurelle
Centro Integrato di Trento	Trento	Ravina
Centro Integrato di Vigo di Fassa	Vigo di Fassa	Vigo di Fassa
Centro Integrato di Zuclò – Presso la discarica di Zuclò	Zuclò	Zuclò

Accanto alle aree individuate dal 4° Aggiornamento del Piano Provinciale di Gestione dei Rifiuti, si segnala un'ulteriore area che potrebbe essere valutata comparativamente per la possibile localizzazione di un impianto per il trattamento termico dei rifiuti urbani non recuperabili individuati dagli Scenari 3.1 e 3.2. Si tratta dell'area che ospiterà, a lavori conclusi, l'impianto di depurazione "Trento Tre", situato nei Comuni di Trento, Calliano e Besenello e che quindi avrebbe potenzialmente bisogno di calore per l'essiccamento dei fanghi. Si segnala infine che, presso la discarica di Rovereto, è attivo un impianto di trattamento meccanico-biologico di rifiuti, finalizzato alla produzione di CSS.

4.3.3. Valutazione preliminare delle aree individuate

Essendo destinato a trattare, nelle ipotesi degli Scenari 3.1 e 3.2, i rifiuti urbani non recuperabili dell'intero territorio provinciale, l'eventuale impianto dovrà preferibilmente essere situato in fondo valle al fine di minimizzare gli impatti legati al trasporto dei rifiuti. Così facendo, infatti, si eviterebbe il trasporto di rifiuti verso una ipotetica destinazione finale situata in quota. Se la destinazione finale (se unica) fosse situata in quota, infatti, i veicoli percorrerebbero a pieno carico un itinerario in salita e, privi di carico, un itinerario in discesa. Selezionando una destinazione in fondo valle, al contrario, si limiterebbe il trasporto dei rifiuti ai soli percorsi di discesa dai bacini di raccolta montani. In questo caso, i veicoli viaggerebbero a pieno carico solo su percorsi di discesa verso la destinazione finale. A parità di lunghezza percorsa, infatti, gli itinerari a pendenza positiva (in salita) comportano maggiori consumi e, di conseguenza, emissioni di inquinanti in atmosfera. Ubicare un impianto in un contesto di fondo valle quali la Val d'Adige o la Vallagarina potrebbe risultare strategico anche alla luce dei maggiori quantitativi di rifiuti prodotti in questi territori. Secondo le analisi merceologiche relative al 2019,

infatti, i bacini di raccolta di Trento, Rovereto⁵, Vallagarina e Valle dell'Adige contribuiscono da soli al 42% del rifiuto residuo prodotto a livello provinciale.

Limitando in questo lavoro la discussione solo a tre ambiti territoriali, le potenziali alternative di interesse per un ragionamento tecnico sono le seguenti aree:

- Ischia Podetti (Comune di Trento), presso l'attuale sito di discarica;
- Lizzana (Comune di Rovereto), presso l'impianto di trattamento meccanico-biologico;
- Trento Tre (Comuni di Trento, Calliano e Besenello), presso il futuro nuovo depuratore.

Si sottolinea nuovamente che il presente lavoro non sostituisce un più approfondito studio sul tema scelta del sito, qualora la PAT decidesse di intraprendere la strada del recupero energetico da rifiuti urbani residui in un nuovo impianto.

Nel caso si consideri un impianto di produzione del syngas da rifiuti e di conversione di questo in prodotti di valore, senza combustione locale del syngas, dal punto di vista delle emissioni in atmosfera, le aree indicate appaiono potenzialmente di interesse per ospitare un siffatto impianto. Il processo non darebbe luogo ad emissioni confrontabili con quelle di impianti a combustione diretta o indiretta dei rifiuti, essendo presumibilmente le emissioni eventualmente legate al solo processo di purificazione del syngas. Per questo motivo, anche altre aree potrebbero risultare idonee ad ospitare un tale impianto.

Nel caso si consideri invece un impianto di incenerimento o di gassificazione dei rifiuti con sfruttamento locale del syngas mediante combustione e rilascio di fumi, l'analisi diverrebbe più complessa e strettamente legata alla specifica area considerata, oltre a richiedere maggiori e presumibilmente più lunghi approfondimenti.

L'area di Ischia Podetti è stata considerata idonea ad ospitare un impianto di termovalorizzatore dei rifiuti nel 2° e nel 3° Aggiornamento del Piano Provinciale di Gestione dei rifiuti. Tuttavia, l'area presenta criticità, evidenziate nello Studio di Impatto Ambientale del 2002, in merito alla scelta di una quota di rilascio degli inquinanti inferiore a 100 m, che richiederebbe ulteriori valutazioni dal punto di vista della meteorologia locale. D'altra parte, una altezza di camino elevata, per un impianto di piccola taglia risulterebbe atipica e paesaggisticamente impattante.

L'area presso l'impianto di trattamento meccanico-biologico di Rovereto risulterebbe di interesse per il caso dello Scenario 3.2, che prevede di sottoporre il rifiuto residuo a biostabilizzazione e di utilizzare il CSS prodotto come input all'impianto di trattamento termico. In questo caso, si minimizzerebbe la distanza tra luogo di produzione di CSS e luogo di conversione energetica dello stesso.

L'area del futuro depuratore "Trento 3" potrebbe risultare logisticamente compatibile con un impianto di trattamento termico dei rifiuti nel caso si valutasse l'opportunità di trattare anche i fanghi essiccati prodotti in loco, utilizzando per l'essiccamento, sia pure per una frazione limitata, il calore prodotto dall'impianto di trattamento termico. Tuttavia, la presenza della parete rocciosa sul lato est potrebbe risultare critica in termini di dispersione dei fumi in atmosfera e amplificare le ricadute a livello del suolo.

Per tutte le soluzioni, si richiede comunque una caratterizzazione approfondita della meteorologia locale, incluso il sito di Ischia Podetti nel caso di altezza del camino inferiore a 100 m. Tale caratterizzazione richiederebbe almeno una campagna di monitoraggio estiva

⁵ Si ricorda per completezza che in occasione della proposta di impianto del 2002 la PAT aveva escluso la localizzazione a Rovereto. Le considerazioni seguenti hanno valenza tecnica e non politica.

ed una invernale. Come riportato al paragrafo 4.2, inoltre, tutte le soluzioni che prevedano tecnologie di combustione comporterebbero una durata del percorso autorizzativo fino a 240 giorni, che va considerata nell'ottica di gestire il transitorio tra la situazione attuale e la situazione ad impianto operativo. Inoltre, il valore di accettabilità del rischio cancerogeno emerso dallo Studio di Fattibilità del 2009 (10^{-7}) comporterebbe una duplice difficoltà:

- 1) la compatibilità delle tecnologie di abbattimento impiegabili nella linea fumi con i valori da garantire al camino risultanti dall'analisi di rischio volta a garantire il rispetto del massimo rischio cancerogeno di 10^{-7} ;
- 2) la valutazione stessa del rispetto del rischio cancerogeno di 10^{-7} tramite monitoraggi sul territorio (come discusso al paragrafo 4.1).

Per coerenza con il già citato Studio di Fattibilità del 2009, l'impianto di combustione dovrebbe essere inoltre dotato di un sistema di misurazione in continuo di PCDD/F e prevedere la caratterizzazione periodica del Cr VI al camino.

Una strategia di mitigazione degli impatti locali potrebbe riguardare l'adozione di un approccio modulare sugli impianti, ossia l'ubicazione di più moduli di trattamento termico dei rifiuti in diverse aree che fossero dimostrate idonee ad ospitarli. Ciò comporterebbe di suddividere il carico emissivo su più aree, riducendone gli impatti al suolo, alla condizione, però, che la modalità di rilascio rimanga invariata (o migliorativa) rispetto alla soluzione con unico impianto. Ovviamente ciò avrebbe senso nel caso di utilizzo di una tecnologia compatibile con taglie di impianti particolarmente piccole, in grado di garantire (come nel caso di soluzione ad impianto centralizzato) una sostenibilità economica nella gestione dei flussi, una affidabilità gestionale dell'approccio, con disponibilità (da esperienze pregresse) di dati emissivi non autoreferenziali, ma validati da enti terzi.

4.4. Considerazioni sul concetto di *End-of-Waste*

Il trattamento termico dei rifiuti produce residui solidi quali ceneri e scorie. I residui vetrificati prodotti da un impianto di gassificazione possono essere avviati al riutilizzo e, quindi, essere considerati prodotto e non più rifiuto se:

- Rispondono alle condizioni fissate dall'art. 184-ter del D.Lgs. 152/2006 per poter attribuire al materiale vetrificato la caratteristica di *end-of-waste*:
 - a) la sostanza o l'oggetto sono destinati a essere utilizzati per scopi specifici;
 - b) esiste un mercato o una domanda per tale sostanza od oggetto;
 - c) la sostanza o l'oggetto soddisfa i requisiti tecnici per gli scopi specifici e rispetta la normativa e gli standard esistenti applicabili ai prodotti;
 - d) l'utilizzo della sostanza o dell'oggetto non porterà a impatti complessivi negativi sull'ambiente o sulla salute umana.

In particolare, con riferimento al punto c) il materiale vetrificato potrà essere riutilizzato in opere edili, stradali e ambientali se rispetta gli standard tecnici definiti nella Circolare del Ministero dell'Ambiente N. 5205 del 15/07/2005 "Indicazioni per l'operatività nel settore edile, stradale e ambientale, ai sensi del decreto ministeriale 8 maggio 2003, n. 203", che riporta nell'allegato C le caratteristiche prestazionali per l'impiego nelle opere civili e stradali. In analogia a quanto già applicato in impianti che producono

aggregati riciclati il materiale vetrificato dovrà anche essere soggetto a test di cessione di cui all'allegato 3 al D.M. 05/02/98 e s.m.i. Si fa notare che i materiali vetrosi possono essere riciclati fino a un massimo del 15% in peso negli aggregati riciclati destinati ai rilevati e ai sottofondi stradali.

- Sono prodotti in impianti che recuperano o riciclano i rifiuti e dai quali usciranno materiali non più considerabili come rifiuti. La conformità degli impianti sarà valutata "caso per caso", in base a quanto stabilito dal comma 3 ter dell'art. 184 ter. In base a tale articolo, modificato di recente dalla legge 128 del 02 novembre 2019, si stabilisce che ISPRA o l'ARPA/APPA, territorialmente competente e comunque delegata da Ispra, rilasci le autorizzazioni agli impianti che producono "end-of-waste". Gli impianti autorizzati verranno assoggettati a controlli a campione, effettuati da ISPRA o dall'agenzia da essa delegata, per verificare la conformità delle modalità operative e gestionali, i rifiuti in ingresso, i processi di recupero e le sostanze o oggetti in uscita. L'esito positivo dei controlli è parte essenziale della conservazione della qualifica di "end-of-waste" dei materiali vetrificati prodotti dall'impianto.

Nel 2020 il Servizio Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA) ha approvato e pubblicato le "Linee guida del sistema nazionale per la protezione dell'ambiente per l'applicazione della disciplina "end-of-waste" di cui all'art. 184 ter del D.lgs. n° 152/2006". Il documento illustra le modalità con cui avverranno i controlli sugli impianti autorizzati a recuperare i rifiuti secondo la disciplina "end-of-waste".

Si precisa che gli impianti di combustione diretta di rifiuti possono già oggi destinare le scorie prodotte a riciclo in impianti (generalmente centralizzati) dedicati al recupero di inerte e metalli. L'attivazione o meno di tale opzione dipende spesso da una verifica economica della convenienza rispetto allo smaltimento in discarica.

4.5. Matrici ambientali

Gli studi specialistici che dovranno valutare l'alternativa progettuale scelta dovranno avere i contenuti minimi nel seguito descritti. Inoltre, dovrà essere approfondito lo stato ambientale dell'alternativa zero, descrivendone le condizioni ambientali delle matrici ambientali e valutandone eventuali criticità rispetto alla vigente normativa provinciale, nazionale ed europea in materia.

- Impatti sull'atmosfera
 - Emissioni in atmosfera generate dalla realizzazione del progetto (emissioni convogliate, diffuse e diffuse ed emissioni odorigene)
 - Mitigazioni
 - Compensazioni ambientali

- Impatti sull'ambiente Idrico
 - Acque superficiali
 - Uso della risorsa
 - Qualità dell'acqua
 - Mitigazioni
 - Compensazioni ambientali

- Acque sotterranee
 - o Aumento della vulnerabilità dell'acquifero
 - o Alterazione della morfologia della risorsa
 - o Contaminazione delle acque sotterranee
 - o Utilizzo della risorsa
 - o Mitigazioni
 - o Compensazioni ambientali
- Impatti sul suolo e sottosuolo
 - Suolo
 - o Modificazione assetto geomorfologico
 - o Sottrazione di suolo
 - o Contaminazione del suolo
 - o Mitigazioni
 - o Compensazioni ambientali
 - Sottosuolo
 - o Sottrazione di sottosuolo
 - o Contaminazione del sottosuolo
 - o Mitigazioni
 - o Compensazioni ambientali
- Impatti sulla vegetazione
 - Flora
 - Fauna
 - Mitigazioni
 - Compensazioni ambientali
- Impatti sugli ecosistemi e sul clima
 - Gas ad effetto serra
 - Bilancio CO₂
 - Mitigazioni
 - Compensazioni ambientali
- Impatti sulla popolazione e rischi per la salute umana, il patrimonio culturale, il paesaggio o l'ambiente
 - Rischi da contaminazione dell'aria
 - Rumore
 - Incidentalità stradale
 - Mitigazioni
 - Compensazioni ambientali
- Impatti derivanti da rumore e vibrazioni, nonché da luce, calore, radiazioni
 - Effetti dell'opera
 - Mitigazioni

- Compensazioni ambientali
- Impatti sul paesaggio, sul patrimonio culturale e agroalimentare e sui beni materiali
 - Mitigazioni
 - Compensazioni ambientali
- Impatti derivanti dall'emissione di inquinanti, luce, calore, radiazioni, dalla creazione di sostanze nocive e dallo smaltimento dei rifiuti
 - Mitigazioni
 - Compensazioni ambientali
- Impatti derivanti dall'utilizzazione delle risorse naturali, in particolare del territorio, del suolo, delle risorse idriche e della biodiversità, tenendo conto, per quanto possibile, della disponibilità sostenibile di tali risorse
 - Mitigazioni
 - Compensazioni ambientali
- Impatti derivanti dalla vulnerabilità del progetto ai rischi di gravi incidenti e/o calamità che sono pertinenti per il progetto in questione
 - Mitigazioni
 - Compensazioni ambientali
- Impatti derivanti dal cumulo con gli effetti derivanti da altri progetti esistenti e/o approvati, tenendo conto di eventuali criticità ambientali esistenti, relative all'uso delle risorse naturali e/o ad aree di particolare sensibilità ambientale suscettibili di risentire degli effetti derivanti dal progetto
 - Mitigazioni
 - Compensazioni ambientali

5. Confronto tra le soluzioni analizzate

Da un punto di vista strettamente quantitativo, tutti gli scenari analizzati come alternative alla situazione attuale, considerando la necessità, imposta a livello legislativo, di stabilizzare il rifiuto residuo da smaltire in discarica, comportano una riduzione del rifiuto da inviare a smaltimento. Anche nei casi in cui non si consideri la realizzazione di un impianto di conversione energetica dei rifiuti a livello locale, si riesce a scendere al di sotto del 10% dei rifiuti prodotti, o aumentando la quota di rifiuti da smaltire fuori provincia o massimizzando il recupero di materiale dalla raccolta differenziata. Si osserva, tuttavia, che solo nello Scenario 3.1, che prevede la realizzazione di un impianto locale di taglia massima, si rientra nel limite del 6% identificato come obiettivo dalla Provincia. Nello Scenario 3.2, pur realizzando un impianto di conversione termo-chimica dei rifiuti, inviando tutto il rifiuto residuo a TMB per migliorare la qualità del combustibile da inviare all'impianto, si avrebbe una produzione consistente di

biostabilizzato da smaltire in discarica (16.893,77 t), che porterebbe allo smaltimento in discarica di oltre l'8% dei rifiuti totali prodotti.

Si possono dedurre delle considerazioni importanti dai risultati mostrati, che non vogliono proporre una soluzione ottimale, ma solamente portare all'attenzione che la realizzazione di un impianto di conversione energetica dei rifiuti in Trentino, consentirebbe di avere l'autonomia completa sulla gestione del rifiuto residuo urbano, perché non vi sarebbe necessità di smaltire rifiuti fuori provincia, come invece avviene oggi o risulta necessario negli altri scenari considerati, anche nella prospettiva di massimizzare il recupero di materiale. Il miglioramento delle rese della raccolta differenziata sarebbe di per sé sufficiente a garantire una diminuzione dei flussi di residuo a discarica, ma a fronte dell'invio fuori provincia di volumi di rifiuti maggiori rispetto a quelli attuali, per cui bisognerebbe trovare disponibilità che al momento non ci sono e tenere in conto i significativi oneri economici che questa operazione richiederebbe. L'impatto ambientale di un nuovo impianto e l'investimento necessario per la sua realizzazione sono comunque aspetti da non sottovalutare, anzi da valutare con attenzione considerando i potenziali benefici sul medio-lungo periodo.

Dal punto di vista degli impatti ambientali, le soluzioni che prevedono la gassificazione e l'utilizzo ex situ del syngas o la conversione del syngas in prodotti chimici di valore aggiunto sono sicuramente preferibili alla luce delle considerazioni espresse nei capitoli precedenti. Non realizzandosi uno sfruttamento del syngas tramite combustione in loco, si avrebbero rilasci locali di inquinanti atmosferici significativamente inferiori rispetto ad impianti di combustione locale del rifiuto o di combustione del syngas. L'impiego di processi di gassificazione ha a suo tempo incontrato il parere favorevole dell'Associazione Italiana di Epidemiologia, che inquadra la gassificazione come un processo più adatto a bacini di utenza piccoli e virtuosi dal punto di vista del recupero dei rifiuti (Associazione Italiana di Epidemiologia, 2008).

Tuttavia, una valutazione completa degli impatti richiede una comprensione dettagliata dei processi di trattamento del syngas per consentirne la compatibilità con l'uso finale. Sia che si tratti di combustione che di conversione in altri prodotti, il processo di gassificazione produce scorie e ceneri (cfr. paragrafo 4.4). Inoltre, il syngas in uscita dalla gassificazione deve essere sottoposto a processi depurativi preliminari al fine di rimuovere impurità come idrogeno solforato (H_2S), solfuro di carbonile (COS), acido cloridrico (HCl), polveri ed ammoniaca. Tali impurità, se non gestite correttamente, potrebbero comportare problemi di corrosione e di usura nelle fasi successive di sfruttamento del syngas o l'avvelenamento di catalizzatori nel caso di utilizzo di processi catalitici per la depurazione e/o la conversione (Zhang et al., 2012). Il syngas grezzo contiene inoltre ammoniaca in concentrazioni che dipendono dall'input alla gassificazione. L'ammoniaca rappresenta il precursore degli ossidi di azoto in caso di combustione del syngas. I metodi più utilizzati per rimuovere le polveri prevedono l'utilizzo di cicloni o filtri a candela. I processi più comunemente impiegati per la rimozione di composti a base di zolfo (H_2S e COS), gas acidi (HCl e anidride carbonica) e ammoniaca si basano invece sull'utilizzo di scrubber, in pressione e non. L'impiego di processi ad umido comporta la produzione di acqua reflua contaminata dalle impurità rimosse, che deve essere smaltita. Al fine di recuperare i solventi utilizzati nel processo di lavaggio, sono previsti processi di strippaggio che danno luogo ad un effluente gassoso concentrato nelle specie rimosse (Woolcock & Brown, 2013). Al fine di evitare rilasci in atmosfera dei composti rimossi, è opportuno introdurre uno step di purificazione aggiuntiva (es., biofiltrazione, adsorbimento su carboni attivi, adsorbimento su ossidi metallici o trattamenti termici/catalitici, a seconda della concentrazione) oppure recuperare composti di valore commerciale (es., zolfo) (Zhang et al.,

2012; Woolcock & Brown, 2013). Per ovviare agli inconvenienti di un processo ad umido, è preferibile optare per processi a secco a base di filtri catalitici e/o adsorbimento su composti quali carbonati di sodio, potassio e calcio o calce viva (con formazione di sali di cloro e/o zolfo) (Marcantonio et al., 2021). Si tratta di processi favoriti dalle alte temperature di uscita del syngas dalla gassificazione, che quindi non richiedono uno step intermedio di raffreddamento (Asadullah, 2014; Marcantonio et al., 2021).

Il syngas pretrattato, se non utilizzato come combustibile, è successivamente sottoposto a trattamenti che dipendono dal prodotto finale desiderato. Nel caso di produzione di metanolo e dimetil etere (DME), ad esempio, il percorso prevede un processo di Water Gas Shift (WGS), per arricchire il contenuto di idrogeno, e passaggi di rimozione di anidride carbonica e acqua. È previsto poi un processo di sintesi e distillazione del metanolo, che produce un flusso di sottoprodotti di distillazione (etanolo, butanolo e propanolo). Inoltre, viene solitamente utilizzato un processo del tipo Pressure Swing Adsorption (PSA) per recuperare idrogeno dallo step precedente. Avviene infine il rilascio in atmosfera del gas di spurgo, che potrebbe contenere come inquinanti tracce di monossido di carbonio (se non completamente convertito in metanolo) e di ogni altra specie non completamente rimossa, convertita o intercettata negli step precedenti. Nel caso di produzione di DME, viene effettuata una disidratazione del metanolo, che viene impiegato per la sintesi e distillazione del DME.

Nel complesso, il trattamento del syngas può prevedere rilasci in atmosfera ed in soluzione acquosa che dipendono da scelte progettuali legate ai processi di trattamento (ad umido o a secco), all'efficienza di questi, ai processi di recupero e alle rese di conversione nei prodotti finali.

6. Conclusioni e raccomandazioni

Punto di partenza della presente attività di ricerca è stata la condivisione tra enti, promossa dalla PAT, dei dati quali-quantitativi relativi al settore dei rifiuti urbani. Su indicazione della Provincia i rifiuti speciali CER 19 12 12 provenienti dal trattamento dei rifiuti urbani non sono stati considerati tra i flussi di rifiuti a recupero o a smaltimento in discarica. Attualmente, infatti, essi sono gestiti dalle aziende che si occupano delle operazioni di riciclaggio/recupero di rifiuti da raccolta differenziata e si lascia, quindi, ai decisori politico-amministrativi l'opportunità di eventualmente integrare le valutazioni effettuate con i rifiuti speciali.

Il settore dei rifiuti urbani risente del periodo di pandemia, per cui si è ritenuto opportuno far riferimento ai dati del 2019, con la raccomandazione di aggiornare la situazione una volta che il contesto ritorni alla normalità; ciò anche perché una informazione aggiornata permetterà di calibrare meglio il dimensionamento di qualunque opzione di trattamento dovesse essere scelta. Peraltro, in fase di discussione, è emerso da informazioni messe a disposizione dalla PAT, che negli ultimi anni, a fronte di un obiettivo di riduzione del 5% della produzione di rifiuti urbani, si è invece notato un aumento di circa 1% all'anno. Un possibile obiettivo di lunga scadenza potrebbe essere quindi il mantenimento del quantitativo 2019.

Gli scenari oggetto della presente ricerca sono caratterizzati da una contrapposizione tra discarica di rifiuti pretrattati e recupero energetico. In questa dicotomia si inserisce una

indicazione della Unione Europea che pone come obiettivo il conferimento a discarica di non più del 10% dei rifiuti urbani prodotti entro il 2035, nonché l'obiettivo del Piano Provinciale di Gestione dei Rifiuti di non conferire in discarica più del 6%. Qualunque sia l'opzione che dovesse essere scelta, sempre dall'Unione Europea arriva una indicazione in chiave economica: il recupero di materia è prioritario, ma deve tener conto di una sostenibilità economica delle scelte. Al riguardo si sottolinea che tale aspetto non fa parte dei contenuti del presente lavoro.

Con riferimento al contesto trentino, è particolarmente utile l'informazione prodotta dalla PAT in periodo pre-COVID (2019 e inizio 2020) circa la composizione dei rifiuti urbani indifferenziati in Trentino. Dai dati è possibile ricavare la percentuale di materiali riciclabili ancora presenti nei rifiuti urbani indifferenziati. Tali dati evidenziano che con un ulteriore incremento dell'efficienza della raccolta differenziata, anche introducendo una rivisitazione dei flussi di materiali di interesse, ci si può avvicinare al limite di cui sopra.

A livello decisionale si prospettano due macro-scenari:

- a) chiudere il ciclo con una discarica (aumentando quindi nel tempo i volumi disponibili) accettando la possibilità di non rispettare l'obiettivo del 6% previsto dal Piano;
- b) chiudere il ciclo con una opzione di recupero energetico dei rifiuti.

Il presente lavoro ha approfondito, su indicazione della Provincia, il secondo macro-scenario. Al riguardo va segnalato che, nel caso la decisione politico-amministrativa fosse questa:

- la scala dell'impianto sarebbe ridotta, con conseguente orientamento tecnologico verso sistemi diversi dalla combustione diretta in impianto dedicato (che risente maggiormente di un effetto scala);
- andrebbe comunque verificata la possibilità di gestire parte del flusso di rifiuti urbani indifferenziati in ambito regionale (come consentito dalla normativa) vista la presenza dell'inceneritore di Bolzano a distanza utile.

Inoltre, nel caso di orientamento verso un impianto dedicato da localizzarsi in Trentino, va segnalato che:

- dovrà necessariamente essere caratterizzato, con adeguato dettaglio, il contenuto energetico dei rifiuti previsti in ingresso all'impianto, in modo da ottimizzarne il dimensionamento, tenendo in conto che il dato può variare in funzione della tipologia di rifiuti inviati a recupero energetico; allo stato attuale, in prima approssimazione, si può considerare un potere calorifico dei rifiuti in input pari a 13 MJ/kg;
- andrebbe valutato se puntare ad una soluzione che chiuda il trattamento con un recupero energetico in loco oppure con la generazione di prodotti (es., metanolo, dimetil etere, ecc.) da utilizzare non in loco o da commercializzare;
- andrebbe individuato (mediante studio comparativo) un sito idoneo per la ubicazione dell'impianto, curando che la disponibilità di dati meteorologici locali sia adeguata ad avere un input affidabile per una modellazione di dispersione e deposito degli inquinanti emessi in atmosfera (nel caso l'impianto non fosse a emissioni zero, in atmosfera).

Nel presente lavoro sono riportate anche indicazioni specifiche per una integrazione della normativa esistente in merito all'impatto ambientale, che tengono conto delle ultime

risultanze della ricerca in tale settore. È stata inoltre inserita una nota relativa alle potenzialità dell'end-of-waste come opzione virtuosa ad integrazione del recupero energetico da rifiuti.

Bibliografia

- Adami, L., Schiavon, M., Rada, E.C., 2021. Potential environmental benefits of direct electric heating powered by waste-to-energy processes as a replacement of solid-fuel combustion in semi-rural and remote areas. *Sci. Tot. Eviro.* 740, 140078.
- Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro, 2021. List of Classifications - IARC Monographs on the identification of carcinogenic hazards to humans. <https://monographs.iarc.fr/list-of-classifications/>
- APAT – Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici, 2008. Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati.
- ARPA Emilia-Romagna, 2011. Le emissioni degli inceneritori di ultima generazione. <https://www.arpae.it/it/documenti/pubblicazioni/le-emissioni-degli-inceneritori-di-ultima-generazione>
- Asadullah, M., 2014. Biomass gasification gas cleaning for downstream applications: A comparative critical review. *Ren. Sust. Energy Rev.* 40, 118–132.
- Associazione Italiana di Epidemiologia, 2008. Trattamento dei rifiuti e salute: Posizione dell'Associazione italiana di epidemiologia. *Epidemiol. Prev.* 32, 183–187.
- Bano, M., Khan, I., Ahirwar, D., Khan, F., 2020. *React. Funct. Polym.* 150, 104545. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104545>
- CET Società Cooperativa, 2010. Studi di Impatto Ambientale – Impianto di Depurazione “Trento Tre”.
- Ciliberti, C., Biundo, A., Albergo, R., Agrimi, G., Braccio, G., de Bari, I., Pisano, I., 2020. Syngas derived from lignocellulosic biomass gasification as an alternative resource for innovative bioprocesses. *Processes*, 8(12), 1–38.
- Costa, J., Santos, R.R., Virgolino, A., Reis, M.F., 2019. Solid Waste Incinerators: Health Impacts, in: Nriagu, J. (Ed.), *Encyclopedia of Environmental Health (Second Edition)*. Elsevier, pp. 771–784.
- Daniell, J., Köpke, M., Simpson, S. D., 2012. Commercial biomass syngas fermentation. In *Energies* (Vol. 5, Issue 12).
- Huang, D., Wang, G., Shi, Z., Li, Z., Kang, F., Liu, F., 2017. Removal of hexavalent chromium in natural groundwater using activated carbon and cast iron combined system. *J. Clean. Prod.* 155, 667–676.
- JRC – Joint Research Centre, 2019. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration. https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-01/JRC118637_WI_Bref_2019_published_0.pdf
- Landälv, I., Gebart, R., Marke, B., Granberg, F., 2014. Two Years Experience of the BioDME Project — A Complete Wood to Wheel Concept, *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 33, no. 3, pp. 676–680, 2014.
- Marcantonio, V., Müller, M., Bocci, E., 2021. A Review of Hot Gas Cleaning Techniques for Hydrogen Chloride Removal from Biomass-Derived Syngas. *Energies* 14, 6519.



- Miyake, Y., Tokumura, M., Iwazaki, Y., Wang, Q., Amagai, T., Horii, Y., Otsuka, H., Noboru, T., Kobayashi, T., Oguchi, M., 2017. Determination of hexavalent chromium concentration in industrial waste incinerator stack gas by using a modified ion chromatography with post-column derivatization method. *J. Chromatogr. A*, 1502, 24–29.
- Nadal, M., Mari, M., Schuhmacher, M., Domingo, J.L., 2019. Monitoring dioxins and furans in plasma of individuals living near a hazardous waste incinerator: Temporal trend after 20 years. *Environ. Res.* 173, 207–211.
- Nath, M., Song, S., Garbers-Craig, A.M., Li, Y., 2018. Phase evolution with temperature in chromium-containing refractory castables used for waste melting furnaces and Cr(VI) leachability. *Ceram. Int.* 16, 20391–20398.
- Provincia Autonoma di Trento, 2006. Piano Provinciale di Smaltimento dei rifiuti. Terzo Aggiornamento: Rifiuti Urbani.
http://www.appa.provincia.tn.it/pianificazione/Piano_smaltimento_rifiuti
- Provincia Autonoma di Trento, 2014. 4° Aggiornamento del Piano provinciale di Gestione dei Rifiuti – Sezione Rifiuti Urbani. Assessorato alle infrastrutture e all'ambiente.
<https://adep.provincia.tn.it/content/download/12107/224041/version/1/file/01.+QUARTO+AGGIORNAMENTO+PIANO+GESTIONE+RIFIUTI+-+SEZIONE+RIFIUTI+URBANI.pdf>
- Provincia Autonoma di Trento, 2019. Inventario delle emissioni della Provincia Autonoma di Trento - Anno 2015.
[http://www.appa.provincia.tn.it/binary/pat_appa_restyle/tutela_aria/PR38500000000000000000093120.1589874756.pdf](http://www.appa.provincia.tn.it/binary/pat_appa_restyle/tutela_aria/PR385000000000000000093120.1589874756.pdf)
- Pradhan, D., Sukla, L.B., Sawyer, M., Rahman, P.H.S.M., 2017. Recent bioreduction of hexavalent chromium in wastewater treatment: A review. *J. Ind. Eng. Chem.* 55, 1–20.
- Rada, E.C., Schiavon, M., Torretta, V., 2021. A regulatory strategy for the emission control of hexavalent chromium from waste-to-energy plants. *J. Clean Prod.* 278, 123415.
- Schiavon, M., Ragazzi, M., Rada, E.C., 2013. A proposal for a diet-based local PCDD/F deposition limit. *Chemosphere* 93, 1639–1645.
- Schiavon, M., Torretta, V., Rada, E.C., Ragazzi, M., 2016. State of the art and advances in the impact assessment of dioxins and dioxin-like compounds. *Environ. Monit. Assess.* 188, 57.
- Schiavon, M., Rada, E.C., Adami, L., Fox, F., Ragazzi, M., 2019. Integrated methodology for the management of human exposure to air pollutants. *WIT Trans. Ecol. Environ.* 236, 287–296.
- Shah, P., Strezov, V., Nelson, P.F., 2012. Speciation of chromium in Australian coals and combustion products. *Fuel* 102, 1–8.
- Sun, H., Brocato, J., Costa, M., 2015. Oral Chromium Exposure and Toxicity. *Curr. Environ. Health Rep.* 2, 295–303.
- Świetlik, R., Trojanowska, M., Łożyński, M., Molik, A., 2014. Impact of solid fuel combustion technology on valence speciation of chromium in fly ash. *Fuel* 137, 306–312.
- Tijm, P. J. A., Waller, F. J., & Brown, D. M., 2001. Methanol technology developments for the new millennium. *Applied Catalysis A: General*, 221 (1–2), 275–282.
- Tiwari, A.K., Orioli, S., De Maio, M., 2019. Assessment of groundwater geochemistry and diffusion of hexavalent chromium contamination in an industrial town of Italy. *J. Contam. Hydrol.* 225, 103503.
- Trevethick S.R.; Bromley, Jason; Carl, Simpson; Sean, D., 2012. *United States Patent* (Patent No. US8178330B2).
- UK Environment Agency, 2017. Releases from municipal waste incinerators - Guidance to applicants on impact assessment for group 3 metals stack.



- https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/532474/LIT_7349.pdf
- US EPA, 1996a. Method 0060 – Determination of metals in stack emissions. United States Environmental Protection Agency.
- US EPA, 1996b. Method 0061 – Determination of hexavalent chromium emissions from stationary sources. United States Environmental Protection Agency.
- US EPA, 2005. Human Health Risk Assessment Protocol for Hazardous Waste Combustion Facilities. https://rais.ornl.gov/documents/2005_HHRAP.pdf
- US EPA, 2011. Exposure Factors Handbook (Final Report). <https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=236252>
- US EPA, 2017. Users' Guide and Background Technical Document for USEPA Region 9's Preliminary Remediation Goals (PRG) Table. <https://semspub.epa.gov/work/02/103453.pdf>
- US EPA, 2019. Regional Screening Level (RSL) Subchronic Toxicity Supporting Table November 2019. <https://semspub.epa.gov/work/HQ/199660.pdf>
- Wang, H., Cui, H., Song, X., Xu, R., Wei, N., Tian, J., Niu, H., 2020. Facile synthesis of heterojunction of MXenes/TiO₂ nanoparticles towards enhanced hexavalent chromium removal. *J. Colloid Interface Sci.* 561, 46–57.
- Woolcock, P.J., Brown, R.C., 2013. A review of cleaning technologies for biomass-derived syngas. *Biomass and Bioenergy* 52, 54-84.
- Yao, B., Liu, M., Gao, Y., Liu, Y., Cong, S., Zou, D., 2020. Removal of hexavalent chromium in aqueous solution using organic iron-based composites synthesized and immobilized by natural dried willow leaves. *J. Clean. Prod.* 247, 119132.
- Zhang, W., Liu, H., Ul Hai, I., Neubauer, Y., Schröder, P., Oldenburg, H., Seilkopf, A., Kölling, A., 2012. Gas cleaning strategies for biomass gasification product gas. *Int. J. Low-Carbon Technol.* 7, 69-74.