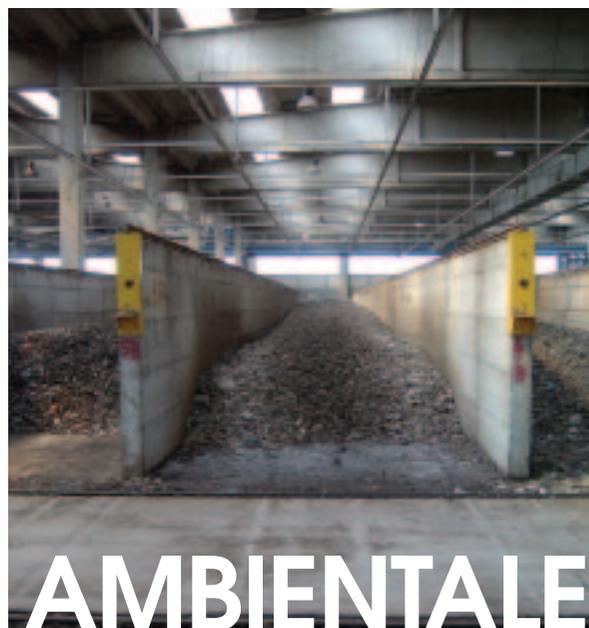


*Luciano Morselli, Fabrizio Passarini,  
Ivano Vassura, Monia Bertacchini  
Dipartimento di Chimica Industriale  
e dei Materiali  
Università di Bologna  
vassura@ms.fci.unibo.it*



## LCA E SISTEMA INTEGRATO DI MONITORAGGIO AMBIENTALE

### Strumenti di valutazione degli impatti associati all'incenerimento dei rifiuti

**Nonostante un notevole miglioramento delle tecnologie del processo di termodistruzione dei rifiuti, gli impianti di incenerimento continuano ad essere considerati da una parte consistente dell'opinione pubblica delle pericolose sorgenti di inquinanti gassosi.**

Sulla base di questa premessa risulta ancora più importante valutare e quantificare gli inquinanti emessi. Al fine di ottenere informazioni complete sull'impatto ambientale di un inceneritore, è proposto un approccio integrato che prevede l'affiancamento di una valutazione del ciclo di vita ad un sistema integrato di monitoraggio ambientale.

In un Sistema Integrato di Gestione dei rifiuti secondo quanto fissato dalla Comunità Europea e recepito dalla normativa italiana attraverso il D.Lgs. 22/97, il processo di incenerimento (termodistruzione) dei rifiuti rappresenta un'opzione necessaria prima della loro messa in discarica che, in un quadro gerarchico di azione, si applica quando siano già state praticate tutte le operazioni volte alla minimizzazione della produzione, al riuso, al

riciclo dei materiali e al trattamento biologico (compostaggio).

I vantaggi dell'incenerimento consistono sia nella riduzione del volume e del peso del rifiuto sia nella distruzione di materiale organico pericoloso e/o putrescibile. Inoltre, al fine di sfruttare la frazione energetica delle componenti del rifiuto con potere calorifico opportuno, i moderni processi di incenerimento sono accompagnati da recupero energetico.

Nonostante una forte innovazione tecnologica al fine di contenere gli impatti ambientali, in particolar modo delle emissioni gassose, gli impianti di termodistruzione incontrano forte diffidenza dell'opinione pubblica e degli Enti locali. Risulta quindi estremamente importante una valutazione complessiva degli impatti ambientali nel contesto più ampio dell'intero sistema integrato di gestione dei rifiuti. Tipologia e quantità di inquinanti emessi da un pro-

cesso di incenerimento, sono strettamente correlate alla quantità ed alle caratteristiche dei rifiuti in ingresso che dipendono dalla configurazione del sistema di gestione dei rifiuti operate a monte di tale processo. A tale scopo, la valutazione del Ciclo di Vita (Life Cycle Assessment, LCA), che è uno strumento metodologico basato su una visione globale del sistema produttivo [1], applicato ai sistemi gestionali può fornire risposte in supporto alle decisioni dei pianificatori e delle aziende che gestiscono i servizi di raccolta, trasporto e smaltimento/riciclaggio rifiuti.

### Il Life Cycle Assessment

Sebbene l'LCA sia nato per seguire i prodotti nell'intero ciclo di vita, in cui tutti i processi e le operazioni che intervengono, dall'estrazione delle materie sino al fine vita vengono analizzati in termini di input ed output abbracciando contemporaneamente le problematiche relative al consumo di

**Tab. 1 - Fattori di emissione di inquinanti nei fumi in uscita dall'inceneritore, per tonnellata di rifiuto incenerito (dati 2001)**

SOx	NOx	CO	HCl	HF	NH <sub>3</sub>	Cd	As	Co	Hg
g	g	g	g	g	g	mg	mg	mg	mg
15	1060	9,0	36	2,0	9,8	2,1	3,2	5,8	92
Mn	Pb	Cr	Ni	Zn	Cu	PCDD	PCB	IPA	Mat. Part.
mg	mg	mg	mg	mg	mg	µg	µg	µg	mg
21	270	80	11	319	47	0,21	123	492	14

risorse e l'inquinamento a valle, la sua applicazione ai processi ed in specifico alla gestione dei rifiuti, può essere considerata come un sistema autonomo e trasversale al ciclo di vita dei prodotti [2]. In questo caso gli input sono costituiti, in primo luogo, dagli scarti delle attività umane e produttive, mentre gli output sono le emissioni nell'ambiente (solide, liquide e gassose) e i prodotti recuperati (materiali riciclati, energia, compost) [3].

In specifico, nell'applicazione dell'LCA al processo di incenerimento, devono essere considerati sia gli inquinanti emessi direttamente o indirettamente nell'edificazione dell'impianto e nelle attività di funzionamento dello stesso, ricercandone l'effetto sia nei comparti ambientali più direttamente investiti, sia l'impatto evitato, ovvero quello che, a parità di energia ottenuta (termica e/o elettrica), verrebbe prodotto da centrali di potenza [4], considerando il mix energetico utilizzato in Italia e quello derivante dall'eventuale riutilizzo di scorie come materiale inerte [5].

### Il sistema integrato di monitoraggio ambientale

Tuttavia, sebbene LCA fornisca dati sull'effetto globale del processo studiato, essendo l'impatto ambientale più rilevante prodotto dalle emissioni gassose e la ricaduta degli inquinanti emessi circoscritta nei pressi dell'impianto ne deriva la necessità dell'applicazione di un Sistema Integrato di Monitoraggio Ambientale (SIMA) al fine di investigare le matrici ambientali più direttamente investite [6]. Dopo la scelta di opportuni indicatori ambientali, quali i metalli pesanti [7], il SIMA segue un approccio metodologico che va dalla caratterizzazione della sor-



gente di contaminazione al campionamento e all'analisi dei recettori ambientali più significativi [8], evidenziando il rapporto di causa-effetto tra emissioni e ricadute, anche mediante strumenti statistici di analisi multivariata [6, 9].

Il caso studio su cui è stata effettuata l'applicazione combinata delle 2 metodologie citate sulla base dei dati raccolti nel periodo che va dal 1997 al 2001, è l'impianto di incenerimento di Coriano (Rimini, Italia) avente una capacità di smaltimento di circa 450 t al giorno di rifiuti solidi urbani. L'energia elettrica prodotta è pari a circa  $75 \times 10^6$  MJ/anno. Per ogni tonnellata di rifiuto incenerito nell'anno 2001 sono stati prodotti circa 8,5 t di fumi umidi, 25 kg di polveri e 308 kg di scorie; in particolare, i fattori di emissione degli inquinanti ed altre specie chimiche presenti nei fumi sono riportati in Tabella 1.

Al fine dello studio di LCA l'impatto dovuto all'intero processo di incenerimento (step 1) viene suddiviso nei contributi determinati da singole fasi: costruzione e demolizione dell'impianto (step 2), impatto diretto (3), trasporto e smaltimento scorie (4), recupero energetico (5), smaltimento ceneri volanti (6), consumo energetico (7), depurazione fumi (8), pre-trattamento generale (9), trattamento acque

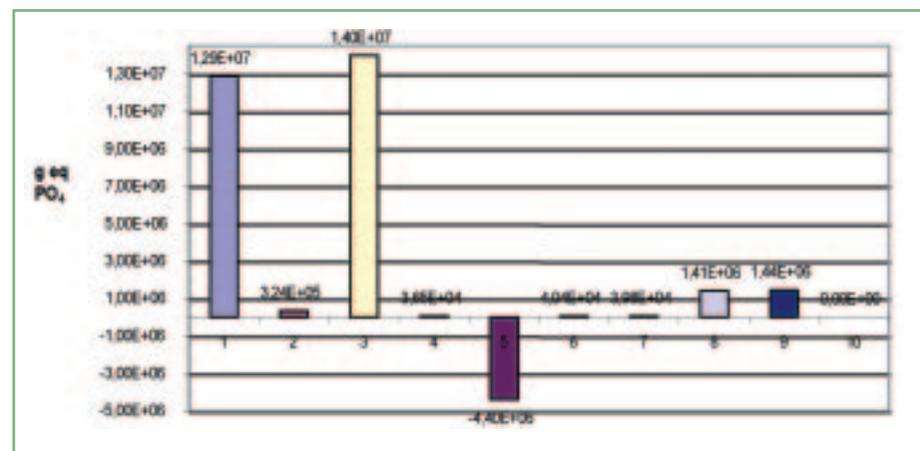


Fig. 1 - Esempio di impatto (globalmente positivo): eutrofizzazione

reflue (10). Il bilancio globale può evidenziare un impatto ambientale positivo (maggiore di zero) oppure negativo (evitato grazie al recupero di energia) per le diverse categorie in cui viene suddiviso (acidificazione atmosferica, eutrofizzazione, consumo di risorse non rinnovabili, riscaldamento globale, ecotossicità acquatica, ecotossicità terrestre, ecotossicità dei sedimenti, tossicità umana, formazione di ossidanti fotochimici, consumo dello strato di ozono stratosferico). È riportata in Tabella 2 la situazione riassuntiva della valutazione degli impatti, evidenziando per ogni singola categoria, il bilancio globale dell'impatto ambientale del

processo di incenerimento, sommando i contributi positivi e negativi dei diversi step. A titolo di esempio l'eutrofizzazione comporta un contributo positivo di impatto (Fig. 1). Si osserva che sul bilancio globale (prima barra dell'istogramma) i maggiori contributi sono determinati dall'impatto diretto del processo (step 3) e dall'impatto evitato mediante recupero energetico (step 5).

Il consumo di risorse non rinnovabili costituisce invece un esempio di contributo negativo di impatto (Fig. 2). In questo caso sul bilancio globale (prima barra dell'istogramma) contribuisce maggiormente l'impatto evitato mediante recupero energetico (step 5), sugli impatti generati a seguito della costruzione e demolizione dell'impianto (step 2), della depurazione dei fumi (step 8) e del pre-trattamento generale (9). Quindi la valutazione dell'impatto ambientale globale generato da un impianto di incenerimento è il risultato di un complesso computo di tutte le attività antropiche connesse al processo stesso ed è fortemente dipendente al tipo di effetto ambientale che si vuole considerare. Nel caso studio considerato, ad esempio, si è

Tab. 2 - Tabella riassuntiva dell'Impact Assessment

	Acidific. atmosf. (g eq H <sup>+</sup> )	Eutrofizzazione (g eq PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	Cons. risorse non rinnov. (fraz. di ris.)	Riscaldamento globale (g eq CO <sub>2</sub> )	Ecotox acq. (g eq 1-4 C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub> )
Totale	<b>-2,86 E+06</b>	1,29 E+07	<b>-1,41 E-08</b>	1,85E+10	<b>-6,57E+12</b>
	Ecotox. terrestre (g eq 1-4 C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub> )	Ecotox. dei sedim. (g eq 1-4 C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub> )	Tox. umana (g eq 1-4 C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub> )	Formaz. ox. fotochimica (g eq C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	Cons O <sub>3</sub> strat. (g eq 1-4 C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub> )
Totale	3,89E+07	<b>-3,24E+12</b>	<b>-7,49E+09</b>	<b>-1,03E+07</b>	<b>-7,64E+03</b>

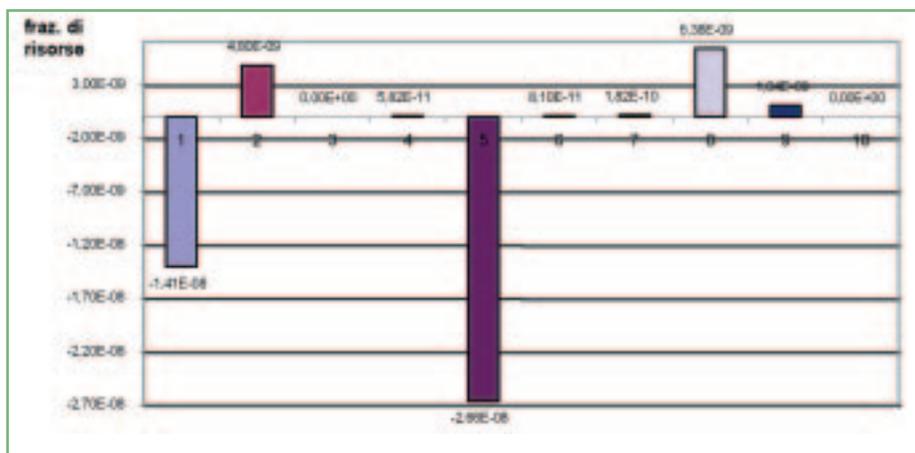


Fig. 2 - Esempio di impatto (globalmente evitato): consumo di risorse non rinnovabili

osservato un impatto evitato semplicemente mediante produzione di energia elettrica dal calore di combustione in 7 categorie di impatto ambientale sulle 10 considerate. Si potrebbe inoltre ipotizzare (ma occorre verificarlo con un'indagine mirata) che il recupero della frazione di energia termica non convertita in energia elettrica, per un'eventuale impianto di teleriscaldamento a favore delle abitazioni civili, potrebbe ulteriormente limitare l'impatto derivante dai processi di produzione di energia tradizionali. Infine, anche il recupero delle scorie ad esempio come materiale di riempimento per sottofondi stradali o per altri utilizzi in campo edilizio dopo eventuali processi preliminari di vaglio ed inertizzazione, può consentire di ridurre l'impatto per ogni singola cate-

goria considerata [10]. Per quanto riguarda il SIMA, in Figura 3 sono riportati i dati dei fattori di emissione (massa di inquinante emesso per unità di massa di rifiuto incenerito) medi annuali per i metalli pesanti in uscita dall'impianto e scelti come indicatori ambientali.

I dati normalizzati in questo modo permettono una facile valutazione dell'efficienza dell'impianto nel corso dei vari anni di funzionamento e i possibili effetti di una marcata variazione nella composizione dei rifiuti inceneriti.

La rete di monitoraggio ambientale è stata strutturata tenendo conto dei risultati di modelli matematici di dispersione degli inquinanti, posizionando i siti di campionamento nelle aree maggiormente e marginalmente (bianco) investite dalle

emissioni dell'impianto. Nei siti identificati sono state stimate le ricadute atmosferiche dei metalli pesanti per mezzo di campionatori wet&dry. Sono state raccolte e valutate separatamente le deposizioni umide, governate dalla rimozione degli inquinanti atmosferici per azione delle precipitazioni meteoriche (pioggia, neve), da quelle secche, la cui rimozione è dipendente dalla precipitazione gravitazionale e dai processi diffusionali. La configurazione della rete di monitoraggio mette in risalto i contributi dell'inceneritore. Ad esempio dallo studio effettuato i flussi di Cd e Hg, metalli pesanti riconducibili all'attività dell'impianto, sono significativamente maggiori nei siti più vicini alla sorgente come indicato dai modelli, mentre il Pb mostra un andamento differente probabilmente dovuto al traffico, che ha apportato un contributo decisivo alla sua diffusione nell'ambiente, almeno fino alla circolazione di veicoli con benzina contenente Pb, e successivamente come polvere riciccolante dal suolo.

Ulteriori informazioni sulle ricadute degli inquinanti nell'area di studio sono state ottenute da campionamento e analisi del suolo superficiale (la parte corticale). Sebbene le concentrazioni di metalli pesanti sono molto basse (estremamente inferiori alle prescrizioni legislative che fissano i limiti per la definizione dei siti contaminati, DM 471/99), i suoli permettono

### **LCA and Integrated Environmental Monitoring System as Impact Assessment Tools of Solid Waste Incineration**

ABSTRACT 

*Despite the significant advances in solid waste incineration process technology, waste incinerators are still considered as great pollutant sources by most part of public opinion, and in particular for their gaseous emission from stacks. It is important to identify and to quantify the pollutants emitted and to evaluate their relative impacts.*

*To obtain complete information about the environmental impacts of a solid waste incinerator, Life Cycle Assessment and an Integrated Environmental Monitoring were both applied in this paper.*

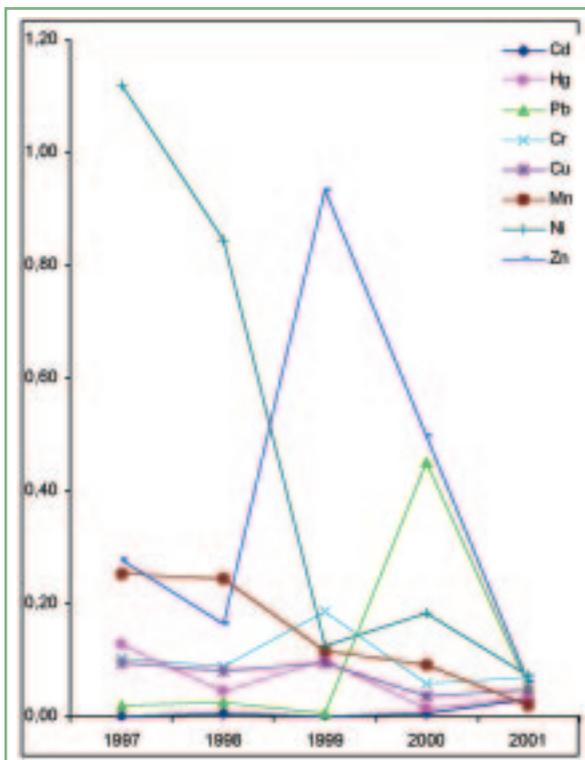


Fig. 3 - Fattori di emissione gassose annuali dei principali metalli analizzati (in g/ton rifiuto)

di dare informazioni delle ricadute nell'area di studio sul lungo periodo. L'elevato numero di dati da gestire e la complessità delle relazioni che possono esistere tra matrici analizzate ed emissioni al camino possono essere esemplificate dall'uso opportuno di strumenti statistici. In Figura 4 sono riportati i diagrammi biplot delle prime due componenti principali relative

gassose sia dei suoli, sono molto ben distinti a seconda dell'anno in cui sono stati raccolti. In particolare si riconosce il contributo dei metalli Pb e Cd soprattutto negli anni 2000 e 2001, mentre Cr, Zn e Cu hanno maggior peso soprattutto nel 1997 e nel 1999.

In definitiva, sono state evidenziate non solo una dipendenza della ricaduta dei

contaminanti dalla distanza rispetto alla fonte, ma anche una similarità nella dispersione dei dati, riscontrata nel confronto tra matrici di processo e quelle naturali.

## Conclusioni

Considerare l'approccio LCA, che è preliminare e può dare indicazioni sui più importanti indicatori di impatto ambientale, unitamente a un Sistema Integrato di Monitoraggio Ambientale, utile per cercare gli effetti di una fonte di contaminazione su scala territoriale, offre un quadro esteso delle ripercussioni globali di carattere ambientale che attività di gestione dei rifiuti, quali l'incenerimento, possono comportare.

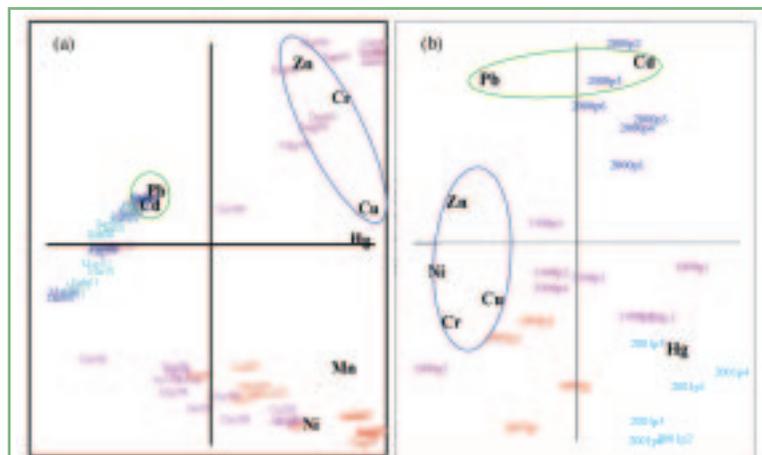


Fig. 4 - Rappresentazione biplot delle prime due componenti principali dei campioni di emissioni gassose dell'impianto (a) e del suolo (b)

## Bibliografia

- [1] ISO 14040, Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, International Organization for Standardisation, Switzerland, 1997.
- [2] G. Finnveden *et al.*, *J. Clean. Prod.*, 1995, **3**(4), 189.
- [3] A. Riva *et al.*, *Ann. Chim.-Rome*, 1998, **88**, 915.
- [4] S. Otoma *et al.*, *Resour. Conserv. Recy.*, 1997, **20**(2), 95.
- [5] L. Morselli *et al.*, Characterisation of incinerator residues for their possible re-use. Proc. of 5<sup>th</sup> World Congress and Envirotech Trade Show, "R'2000", 1113-1118, Toronto, Ontario, Canada, June 5-9, 2000.
- [6] L. Morselli *et al.*, *Waste Manage.*, 2002, **22**(8), 875.
- [7] L. Morselli *et al.*, *Toxicol. Environ. Chem.*, 1993, **37**(3-4), 139.
- [8] L. Morselli *et al.*, *Ann. Chim.-Rome*, 2000, **90**, 723.
- [9] L. Morselli *et al.*, *Sci. Total Environ.*, 2002, **289**(1-3), 177.
- [10] L. Morselli *et al.*, Processes for Hazardous Waste Recycling and Inertization, Proceedings of ISWA 2002 World Congress and Fair, Istanbul, Turkey, vol. 1, pp. 257-262, July 8-12, 2002.