

INCENERITORI E DIOSSINA: EVOLUZIONE DEI SISTEMI DI ABBATTIMENTO E DI MONITORAGGIO DELLE EMISSIONI

Werner Tirlor^{1,*}, Marco Palmitano², Stefano Raccanelli³

¹ eco-research S.r.l. Bolzano.

² eco center S.p.A. Bolzano.

³ Chimico Ambientale, Venezia.

Sommario – I rifiuti e la loro gestione sono una conseguenza dello sviluppo industriale della nostra società. 30 anni fa, bruciare i rifiuti domestici in impianti di incenerimento comportava il rilascio nell'atmosfera di sostanze tossiche, in particolare diossine, che sono sempre prodotte quando si bruciano rifiuti. Una volta che il problema è stato riconosciuto, è stato possibile utilizzare nuove tecnologie che hanno permesso di ridurre al minimo le emissioni nocive. La combinazione di tecnologie spinte di depurazione dei fumi e di sistemi molto efficienti per il monitoraggio delle diossine hanno permesso di rendere gli impianti di incenerimento dei rifiuti compatibili con l'ambiente.

Parole chiave: *inceneritori, diossina, deposimetri, campionatori direzionali, trattamento fumi, POP.*

WASTE INCINERATORS AND DIOXINS: EVOLUTION OF ABATEMENT AND EMISSION MONITORING SYSTEMS

Abstract – Waste and waste management are a consequence of the industrial development of our society. 30 years ago, burning household waste in incineration plants would release toxic substances in the atmosphere. This is particularly true for dioxins; they are always formed when household waste burns. However, once the problem was consciously realized it was possible to set up new technologies that enabled them to minimize harmful emissions. The combination of new flue gas cleaning technology and new, very efficient monitoring systems for dioxins permit an environment compatible use of household waste incineration plants.

Keywords: *waste incineration, dioxins, depositometers, wind selective sampling, abatement technology, POPs.*

1. INTRODUZIONE

I rifiuti ed il loro smaltimento sono un problema essenzialmente legato allo sviluppo industriale e al conseguente benessere per alcuni popoli e per molte categorie di persone.

Il primo impianto d'incenerimento in Germania è stato creato alla fine dell'ottocento per ridurre il volume e la putrescenza/instabilità del rifiuto stesso (Figura 1).



Figura 1 – Inceneritore di Hamburg-Hammerbrook, 1895

A un anno di distanza dal disastro di Seveso avvenuto il 10 luglio 1976, Kees Olie, ricercatore dell'università di Amsterdam, identificò le diossine, nelle polveri dei filtri degli inceneritori di rifiuto solido urbano (Olie et al., 1977). Il termine “diossine” comunemente fa riferimento a due classi di sostanze tossiche, le policloro-dibenzo-p-diossine (PCDD) e i dibenzofurani policlorati (PCDF), denominate in forma breve anche PCDD/F. Una particolare tossicità rivestono i congeneri cloro sostituiti nelle posizioni 2,3,7,8 (Bhavsar et al., 2008). Questa scoperta, dovuta fra l'altro a diverse coincidenze, cambiò in modo drastico l'opinione pubblica sugli inceneritori. Se prima l'incenerimento di rifiuti era visto come soluzione ideale per smaltirli, dopo che questa scoperta venne confermata e diventò di pubblico dominio, nacque un forte movimento contrario all'incenerimento dei rifiuti e diminuì sensibilmente il numero di sostenitori di tale soluzione.

Assodato che la quantità di diossine emesse durante il processo di combustione di rifiuti è anche funzione della tecnica di incenerimento utilizzata, si desume che un problema tecnico potrebbe essere risolto adottando opportune soluzioni tecniche.

* Per contatti: Via Luigi Negrelli, 13, 39100 Bolzano (BZ) Bolzano – Tel. 0471.068624 – W.Tirlor@eco-research.it.

Nel febbraio del 1985 l'Agencia per la Protezione dell'Ambiente Svedese, considerati i livelli di diossine riscontrati nell'ambiente, proclamò una moratoria sull'incenerimento dei rifiuti. La moratoria prevedeva un blocco temporaneo della costruzione di nuovi impianti e l'adeguamento di quelli esistenti per valutare come fosse possibile combinare le esigenze ambientali con quelle produttive (Aslander, 1987; Modig, 1989).

In collaborazione con l'Agencia Nazionale per l'Energia (NEA) è cominciata una analisi sistematica degli impianti in Svezia ed a una serie di ricerche per individuare soluzioni tecniche al fine di ridurre le emissioni non solo di diossine, ma di altri inquinanti quali acido cloridrico, metalli pesanti incluso il mercurio e polveri.

Trascorso un anno è stato valutato che in funzione della tecnologia di abbattimento utilizzata, era possibile ridurre notevolmente le emissioni di inquinanti e la moratoria è stata revocata a luglio 1986, permettendo anche la costruzione di nuovi impianti.

Contestualmente alla fine della moratoria furono introdotti nuovi limiti per gli impianti in emissione e in particolare per la prima volta viene stabilito un limite in emissione per le diossine pari a 0,1 ng (come tossicità equivalente) per metro cubo. Questo limite prevedeva di utilizzare i fattori di tossicità del modello EADON del 1983 (Basvar et al., 2008). Nel 1989 sono stati elaborati i fattori di tossicità I-TEF per la valutazione delle emissioni che sono diventati lo standard a livello europeo ed internazionale tutt'ora in uso nelle emissioni (Basvar et al., 2008).

In Italia uno dei più controversi impianti fu quello di Firenze (San Donnino) deliberato dal Comune nel 1965, funzionante dal 1973 e chiuso nel 1986 a seguito dell'intervento dell'ASL per i livelli di diossina riscontrati (confermati anche agli esperti dell'Istituto Mario NEGRI di Milano e dal Direttore del Laboratorio inquinamenti Atmosferici del CNR del tempo (Liberti, 1982).

Ancora nel 1998 un articolo scientifico evidenziava come una sottostima delle emissioni di diossina da impianto di incenerimento di RSU avesse portato alla contaminazione degli alimenti in Belgio e come in assenza di un campionario in continuo sia difficile stimare correttamente la quantità di PCDD/F annua emessa (De Frè e Wevers, 1998).

Impianti che risultavano a norma nei campionamenti programmati di 8 ore si sono rivelati fuori norma con campionamenti in continuo. È ben noto tuttavia che la massima quota di diossine si ha

in transitori presenza di cambiamenti della temperatura di esercizio e secondo recenti studi oltre il 60% di diossina annualmente prodotta si forma nella sola fase di accensione, o durante malfunzionamenti (Wang et al., 2007; Teijima et al., 2007).

Innegabilmente la contaminazione da POPs (persistent organic pollutants) ed in particolar modo da diossine, è tuttora rilevabile nell'ambiente, negli alimenti e nel latte materno (De Boer e Fiedler 2013).

2. IL CONTESTO ATTUALE

Gli autori concordano nel ritenere che allo stato attuale sia necessario procedere con una continua riduzione dei rifiuti alla produzione degli stessi (esempio tipico gli imballaggi) e perseguire con la raccolta differenziata per il riutilizzo della materia ma sia ancora necessario utilizzare l'incenerimento per la frazione non riutilizzabile.

I moderni inceneritori di rifiuti vengono progettati per effettuare un efficiente recupero energetico: per questo sono spesso definiti termovalorizzatori, in grado cioè di valorizzare l'energia prodotta.

Nell'articolo cercheremo di ripercorrere le fasi evolutive che riteniamo più salienti che hanno permesso tecnicamente di rendere l'incenerimento dei rifiuti una tecnica ambientalmente compatibile e che produce energia elettrica e termica. Resta il fatto che per poterli considerare compatibili con l'ambiente e la salute gli impianti di incenerimento dovranno essere progettati, gestiti ma soprattutto controllati affinché adottino le migliori tecnologie o (Best Available Technology) sia di trattamento dei fumi, sia di recupero energetico che di monitoraggio delle emissioni e delle deposizioni (Giugliano et al., 2002; Grosso et al., 2012).

Tra le sostanze prodotte nella combustione e che possono venire rilasciate nell'ambiente tramite le emissioni ci sono le diossine e altri Persistent Organic Pollutants (POP's) (DeBoer, 2013).

Considerato che:

- i POP tra cui le diossine sono composti organici chimicamente stabili, caratterizzati da una marcata tossicità e da lunghi "tempi di vita" nell'ambiente.
- la Convenzione di Stoccolma ha stabilito che per 12 POPs (Persistent Organic Pollutants), tra cui la diossina, sia vietata la produzione intenzionale e sia ridotta drasticamente quella non intenzionale;
- gli studiosi sono concordi nell'affermare che resta indispensabile continuare il monitoraggio sia nell'ambiente che nella catena alimentare;

rimane imprescindibile l'esigenza di quantificare le emissioni totali di diossine (e altri POPs) dagli impianti di incenerimento e monitorare la concentrazione di queste sostanze in aria, nella catena alimentare e nella popolazione dove i POP's si accumulano (Raccanelli, 2010).

Chi è totalmente contrario agli inceneritori motiva così la propria opposizione:

- 1) pongono un rischio sanitario in quanto alcuni degli inquinanti emessi (diossine, IPA, PCB alcuni metalli) sono composti cancerogeni;
- 2) pongono un rischio ambientale in quanto le sostanze contaminanti emesse da un inceneritore per via diretta o indiretta inquinano l'aria, il suolo e le falde acquifere;
- 3) non eliminano il problema delle discariche in quanto almeno il destino delle ceneri resta attualmente lo smaltimento in discarica per rifiuti speciali;
- 4) non servono a risolvere le emergenze: la costruzione di un impianto di incenerimento richiede diversi anni di lavoro (almeno 4-6 anni);
- 5) richiedono ingenti investimenti economici (circa 80-100 milioni di euro) e necessitano di un apporto di rifiuti giornaliero e continuo, in opposizione ad un criterio di prevenzione della produzione di rifiuti;
- 6) disincentivano la raccolta differenziata: che in media in Italia è pari al 47,5% (ISPRA, 2016);
- 7) non creano occupazione in quanto la costruzione e l'esercizio di un impianto determina un livello occupazionale inferiore al personale impiegato nelle industrie del riciclaggio dei materiali pubbliche e private.

Le ragioni sono in parte motivate, ma è necessario effettuare valutazioni puntuali:

- 1) il rischio sanitario sugli impianti di nuova concezione e tecnologia gestiti correttamente è stato minimizzato se non eliminato; (Domingo et al. 2002; Lonati et al 2006; Cangialosi et al., 2008);
- 2) analogamente negli impianti di nuova concezione/tecnologia gestiti correttamente è stato minimizzato se non eliminato il rischio ambientale (Ragazzi et al., 2013). Effettuando un eco-bilancio mediante modelli di LCA (Life Cycle Analysis) è possibile dimostrare come impianti dotati di efficaci sistemi di abbattimento degli inquinanti abbiano un impatto ambientale sostanziale minore (Damgaards et al., 2010);
- 3) il problema delle discariche rimane, nonostante le tecnologie di inertizzazione lo possano mini-

mizzare. In aggiunta, si deve considerare che nei moderni impianti di incenerimento la combustione dei rifiuti è accompagnata alla produzione di energia elettrica e termica;

- 4) i moderni impianti di incenerimento non servono a risolvere le emergenze ma servono a prevenirle se pianificati e progettati in funzione delle reali necessità dell'insediamento umano;
- 5) gli investimenti economici per la costruzione degli impianti possono essere ammortizzati anche grazie alla produzione di energia, e l'apporto di rifiuti deve essere integrato in una strategia mirata di raccolta differenziata di soli materiali effettivamente riciclabili;
- 6) gli impianti di incenerimento possono servire per ottimizzare la raccolta differenziata: nel caso della plastica, in Italia solo il 40 % di quanto raccolto in modo differenziato è attualmente riciclato, mentre il restante 60% dopo uno o due livelli di costosa separazione torna all'incenerimento o in discarica;
- 7) l'occupazione va sempre valutata in termini di costi/benefici: 10 persone che operano per separare della plastica non riciclabile non creano occupazione ma costi alla società.

Gli inceneritori progettati negli anni '80-'90 e attualmente funzionanti sono tutt'ora oggetto di valutazioni e preoccupazioni. Gli impianti, qualora non fossero state adottate le più efficienti tecnologie, non risulterebbe certo ambientalmente compatibili. Per mezzo del progresso ingegneristico e tecnologico la situazione negli ultimi dieci anni è decisamente cambiata:

- 1) i nuovi sistemi di trattamento dei fumi permettono, allo stato attuale, se non di eliminare almeno di minimizzare le emissioni. Se prendiamo l'esempio delle diossine, il bilancio di massa entrata-uscita, seppur considerate le difficoltà nell'effettuarlo, potrebbe in alcuni casi essere negativo (Abad et al., 2002);
- 2) dal 2000 esistono sistemi di campionamento in continuo per i microinquinanti nelle emissioni che possono permettere di stimare la quantità di massa emessa annualmente al fine di effettuare una mirata valutazione del rischio (Rivera-Austrui et al., 2011);
- 3) dal 2000-2005 sono stati messi a punto sistemi di monitoraggio della qualità dell'aria e delle deposizioni atmosferiche sia per i microinquinanti organici che per le polveri inalabili e respirabili, che permettono di monitorare l'effetto dell'impianto sull'ambiente (Vassura et al., 2011);

- 4) la raccolta differenziata ha permesso di convogliare agli impianti di incenerimento un rifiuto più selezionato ed omogeneo;
- 5) il recupero energetico è aumentato permettendo ai nuovi impianti di produrre energia sia ad alto valore aggiunto come l'elettricità sia usufruibile localmente come il teleriscaldamento fondamentale per migliorare la qualità dell'aria in ambiente urbano;
- 6) il recupero energetico può essere anche utilizzato come teleraffreddamento, tecnologia già utilizzata in Europa (Rescue-project, 2015).

3. STATO DELL'ARTE DELLE MODERNE TECNOLOGIE DI TERMOVALORIZZAZIONE

Sebbene già nel rifiuto urbano possano essere presenti diossine, sono i processi termici della combustione e del raffreddamento che portano alla formazione di quantità elevate di diossine (Abad et al., 2000).

Senza scendere nel dettaglio dei processi di formazione che sono stati studiati da diversi autori (Huang e Buekens, 1995; Hunsinger et al., 2002; Altarawneh et al., 2009), si può affermare che la formazione di diossine che avviene durante l'incenerimento del rifiuto è favorita da una combustione non omogenea e da una distribuzione della temperatura non uniforme. La formazione risulta inoltre favorita dalla presenza di cloro, di rame e di altri metalli che fungono da catalizzatori. Infatti anche nella sezione del recupero del calore (boiler), mentre i fumi si raffreddano, può avvenire una reazione che porta alla (ri)formazione di diossine. La reazione nota anche come "de-novo" sintesi, avviene preferenzialmente tra i 200°C e 400°C, e risulta favorita dalla presenza di rame e di molecole precursori, quali per esempio clorofenoli e clorobenzoni (Trivedi e Majumdar, 2013).

L'evoluzione della tecnologia ha permesso quindi di sviluppare delle soluzioni per ridurre, se non proprio eliminare, il problema delle diossine presenti nelle emissioni degli impianti di incenerimento.

Controllando i parametri di combustione risulta possibile controllare la formazione di diossine: in condizioni di combustione omogenea, con bassi tenori di monossido di carbonio (CO) e con un tempo di residenza maggiore di 1 secondo a temperature di circa 1000 °C è possibile minimizzare la formazione di queste sostanze (Mc Kay, 2002).

Negli anni settanta un inceneritore era generalmente dotato di una camera di combustione relativamente semplice e di un elettrofiltro per abbattere le polveri. Alcuni inceneritori potevano essere attrezzati con un sistema di lavaggio dei fumi a due stadi il primo con acqua per diminuire l'acidità e il secondo con soluzione di soda.

Nonostante questi sistemi di trattamento nelle emissioni si potevano riscontrare concentrazioni di diossine dell'ordine di decine di microgrammi per metro cubo ($\mu\text{g m}^{-3}$) espresse come somma totale dei congeneri rilevati.

Lo sviluppo tecnologico, oltre a ottimizzare la combustione ha permesso di adottare nuovi sistemi di abbattimento sia per i macro (monossido di carbonio (CO) e ossidi di azoto (NOx)) che per i micro inquinati (metalli pesanti). Innegabile che gli inceneritori del passato non erano ambientalmente compatibili: considerata l'evoluzione tecnologica, i sistemi di trattamento fumi, il recupero termico e la produzione di energia elettrica il bilancio ambientale è migliorato (Damgaard et al., 2010).

L'introduzione dei filtri a manica (Hiraoka et al., 1991; Carlson, 1992), l'aggiunta combinata di additivi come la calce, il bicarbonato e il carbone nei fumi prima della filtrazione (Teijima, 1996) e l'uso di catalizzatori DeNOx (Finocchio et al., 2006), che oltre a ridurre gli ossidi di azoto sono risultati efficienti anche per la rimozione delle diossine, hanno portato a una riduzione significativa dei livelli emissivi

Gli inceneritori possono essere dotati di sistemi di monitoraggio in continuo per una serie di parametri: temperatura (T), monossido di carbonio (CO), ossigeno (O₂), diossido di zolfo (SO₂), ossidi di azoto (NOx), ammoniaca (NH₃), acido cloridrico (HCl), mercurio (Hg), carbonio organico totale (COT), portata (Q) e polveri totali.

È possibile rendere disponibile agli enti di controllo e volendo anche alla popolazione la concentrazione dei parametri monitorati praticamente in tempo reale.

Non sono invece disponibili sistemi di monitoraggio in tempo reale di metalli pesanti e i microinquinanti organici (PCDD/F, PCB, IPA).

La quantità di diossina sviluppata durante il processo di incenerimento dipende, come abbiamo già riportato, dai parametri di processo, quali, citando solo i più importanti, la temperatura e l'omogeneità della combustione, la composizione dei rifiuti, il contenuto di ossigeno, (Grosso et al., 2007; Teijima et al., 2007): è stato stimato che oltre il

60% della quantità di diossina annualmente prodotta in un inceneritore si forma nella fase di accensione, o durante i malfunzionamenti (Wang et al., 2007).

Per garantire l'efficienza dei sofisticati sistemi di abbattimento di un termovalorizzatore, oltre ad una rigorosa gestione dell'impianto si rende necessario un efficace controllo delle emissioni: nasce l'esigenza di un controllo in continuo delle emissioni che sostituisca i pochi controlli saltuari previsti da leggi ed autorizzazioni purtroppo ancora in vigore in Italia.

Tecnicamente non è possibile monitorare in continuo la concentrazione delle diossine e dei microinquinanti alle emissioni, ma è possibile campionarle in continuo, in modo che si ottengano dei dati accurati sull'effettivo flusso di massa emesso ed immesso nell'ambiente.

I primi campionatori in continuo sono stati installati in Belgio nel 2000 dopo uno studio condotto sugli inceneritori (De Frè et al., 1998): era stato evidenziato che l'ambiente circostante ad un impianto di incenerimento era pesantemente inquinato da diossine. Nello studio le concentrazioni di diossine rilevate nel suolo ipotizzavano una concentrazione in emissione superiore a 10 ng PCDD/F I-TE Nm⁻³, nettamente in contrasto con i controlli effettuati per un periodo di 8 ore alle emissioni, dai quali risultava che l'impianto emetteva al di sotto del limite di legge dei fissato in 0,1 ng PCDD/F I-TE Nm⁻³.

Nello stesso impianto con un campionatore in continuo sono stati riscontrate concentrazioni comprese tra gli 8,2 e i 12,9 PCDD/F I-TE Nm⁻³: risulta evidente che con poche misure effettuate in discontinuo per periodi di 8 ore è praticamente im-

possibile valutare l'effettivo inquinamento prodotto da un impianto di incenerimento che funziona mediamente 8000 ore/anno). Il Belgio ha reso dal 2000 obbligatoria l'installazione di sistemi di campionamento in continuo per PCDD/F negli impianti di incenerimento, in Francia l'obbligo è in vigore dal 2011.

Sull'esperienza maturata presso l'inceneritore di Vienna, realizzato al centro della città, nel 2003 anche l'inceneritore di Bolzano si è dotato di un campionatore di diossine (e microinquinanti) in continuo, che oltre a garantire un effettivo controllo delle emissioni, permetteva di effettuare un bilancio di massa reale a valutare l'impatto dell'inceneritore stesso sull'ambiente circostante. Grazie alla continuità dei dati ottenuti dai prelievi, è risultato possibile verificare l'efficienza dell'impianto e dei sistemi di trattamento e depurazione delle emissioni (Ragazzi et al., 2013).

La verifica dell'efficacia dei sistemi di trattamento delle emissioni degli inceneritori può essere effettuata non solo con il campionamento in continuo ma monitorando l'aria ambiente con campionatori ad alto volume e con il controllo delle deposizioni.

L'impianto di incenerimento di rifiuti urbani di Bolzano entra in funzione nel 1988: nel 1996 la line di trattamento fumi viene potenziata con un reattore catalitico DeNOx che oltre agli ossidi di azoto riusciva a abbattere la concentrazione di diossine al di sotto di 0,1 ng I-TE/Nm³. Un successivo potenziamento dello stadio di trattamento è stato effettuato nel 2009 installando, a monte del reattore DeNOx, dei filtri a manica a manica con catalizzatore per la rimozione delle diossine: l'efficienza di abbattimento delle diossine

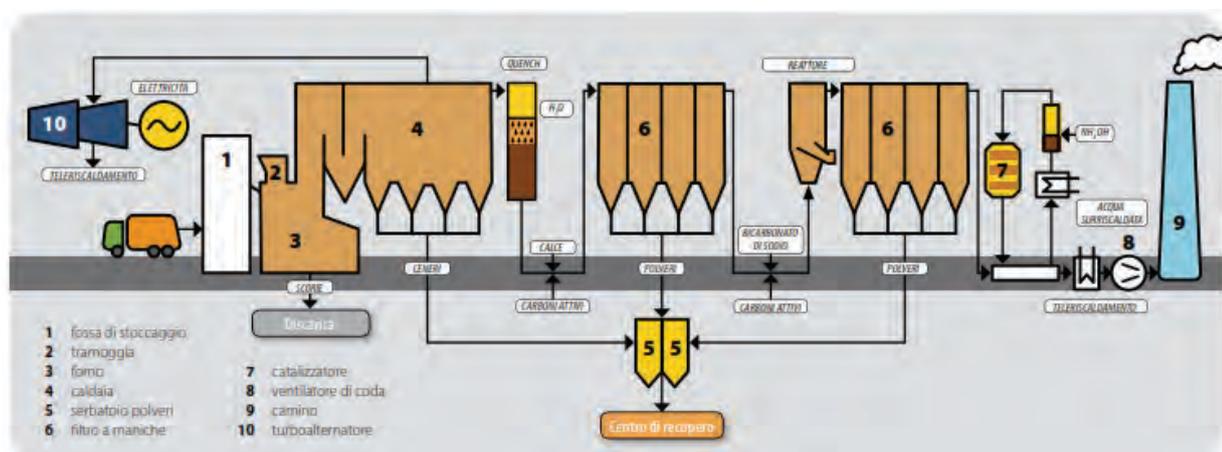


Figura 2 – Schema dell'impianto di incenerimento di Bolzano (Eco-Center, 2013)

con questo sistema di trattamento integrato è risultata dell'ordine del 98 – 99% (Tirler et al., 2010).

Dal luglio 2013 è entrato in esercizio il nuovo impianto di incenerimento di Bolzano, dotato di una linea di trattamento fumi multistadio che, oltre al trattamento a doppia filtrazione o a “doppio secco” con due filtri a maniche, dispone anche di un abbattimento finale con reattore catalitico DeNOx. Lo schema dell'inceneritore in Figura 2 riporta anche le fasi del trattamento fumi.

Sul primo filtro a maniche (punto 6 della Figura 2) inizia la depolverazione, una rimozione dei metalli pesanti e delle diossine e per aggiunta di calce la rimozione dei componenti acidi (HCl, SO₂, HF). Sul secondo filtro a maniche, tramite l'aggiunta di bicarbonato e carbone attivo, viene ulteriormente ridotta la concentrazione dei metalli pesanti, delle diossine e dei componenti acidi.

Il trattamento catalitico (Selective Catalytic Reduction – SCR) (punto 7 della Figura 2) mediante introduzione di ammoniaca effettua la conversione degli ossidi di azoto (NO_x) ad acqua (H₂O) e azoto (N₂): in questo stadio le tracce di microinquinanti organici (PCDD/F e PCB) eventualmente presenti vengono ulteriormente ridotte. Le analisi condotte nel 2015 con campionatore in continuo hanno rilevato una concentrazione media in

emissione di diossine pari a 0,0007 ng I-TE/Nm³ rese pubbliche anche sul sito web di Eco-Center (2016).

4. SISTEMI DI MONITORAGGIO DELL'ARIA AMBIENTE E DELLE DEPOSIZIONI

Secondo l'United Nation Environmental Programme (UNEP, 2007) tra le matrici di rilevanza in cui monitorare micro inquinanti organici (POP, tra cui Diossine e PCB) vengono considerare le emissioni, gli alimenti e i mangimi, ma importante è monitorare l'aria, il latte materno e il sangue umano. È tramite l'aria e dunque l'atmosfera che queste sostanze si muovono “a lungo raggio” senza conoscere confini e nazioni ed è nel sangue e nel latte umano che si accumulano e concentrano.

Considerando che le attuali concentrazioni di PCDD/F in aria risultano in genere comprese, in termini di tossicità equivalente, tra 20 fg WHO-TE/m³ (zona rurale) e 200 fg WHO-TE/m³ (zona industriale), è necessario campionare un quantitativo di aria pari a un centinaio di metri cubi al fine di averne una quantità rilevabile (Biancotto et. al., 2009). Per il monitoraggio della qualità dell'aria può essere utilizzato un campionatore attivo direzionale

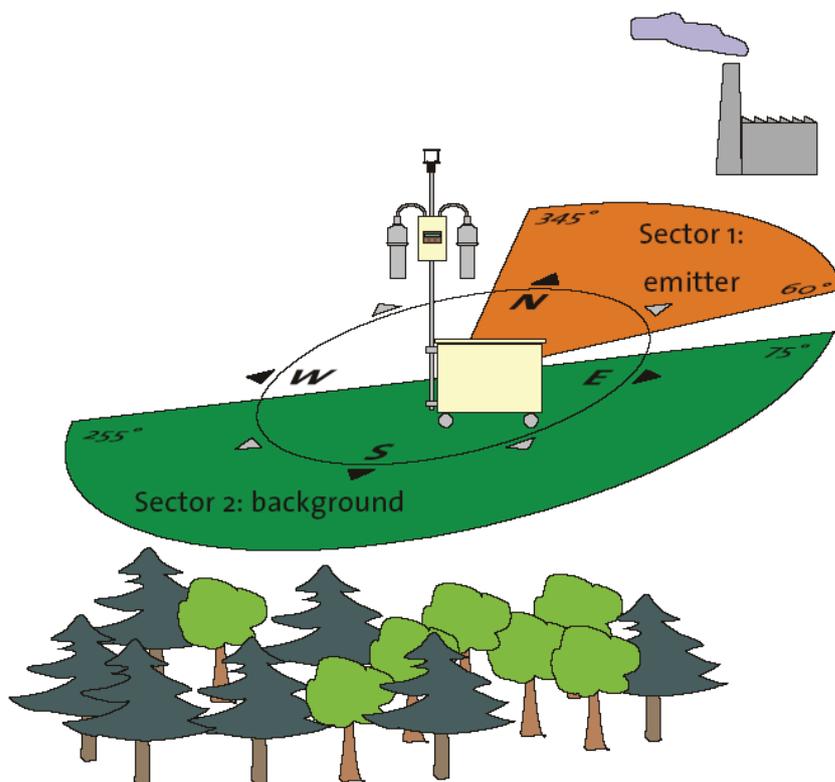


Figura 3 – Schema del campionatore attivo direzionale

ad alto volume, sperimentato durante il progetto europeo di monitoraggio transalpino MONARPOP (Offenthaler et al., 2009), e già utilizzato in alcuni comuni Italiani (Tirler et al., 2007; Giua R. et al., 2009).

Il campionatore attivo direzionale è in grado di campionare su tre distinte cartucce, due delle quali vengono attivate in funzione della direzione del vento, mentre la terza si attiva in calma di vento. Utilizzando questo campionatore è possibile valutare contemporaneamente sia la concentrazione che la direzione di provenienza dei contaminanti organici persistenti come illustrato schematicamente nella Figura 3 (Tirler et al., 2007).

Posizionando uno o più campionatori direzionali in prossimità di una potenziale fonte di emissione e campionando gli inquinanti su diverse cartucce in funzione della direzione e della velocità del vento, sarà possibile individuare la direzione di provenienza di un eventuale flusso di inquinanti nonché discriminare il contributo dovuto ad una sorgente da quello già presente come valore di fondo.

Nello studio effettuato nella “conca” di Bolzano è emerso che la direzione predominante dei venti è da sud a nord e in misura inferiore da nord a sud (Ragazzi et al., 2013). Per questo è stato posizionato un campionatore attivo a nord e uno a sud dell’impianto di incenerimento, in punti che, secondo un modello elaborato dall’università di Trento, è prevedibile la possibilità della maggior ricaduta di inquinati (Ragazzi et al., 2013).

Un campionatore è stato anche posto in centro a Bolzano, in una zona che secondo il modello non era stata individuata come punto di ricaduta delle emissioni dell’inceneritore.

I risultati delle campagne di monitoraggio della concentrazione di diossine in aria ambiente condotti a Bolzano dal 2007 al 2015, eseguiti nella stagione invernale ove si verifica il fenomeno dell’inversione termica con minor rimescolamento dell’aria e concentrazioni più alte (Min et al., 2013), sono riportati nella Tabella 1.

Indipendentemente della direzione e delle velocità del vento (o dalla presenza di calme di vento), negli anni i valori di concentrazione di diossina nell’aria hanno evidenziato un andamento decrescente: mentre nel 2007 i valori medi misurati di PCDD/F erano superiori a 100 fg PCDD/F I-TEQ m⁻³ e nel 2009 erano poco inferiori a 50 fg I-TEQ m⁻³, nel 2010 le concentrazioni medie rilevate sono state poco superiore ai 30 fg I-TEQ m⁻³, per scendere nel 2015 a livelli inferiori a 20 fg I-TEQ m⁻³ (Tirler et al., 2016). Dagli anni 2000 in maniera sistematica sono state introdotte nuove tecnologie di abbattimento di contaminati, non solo negli impianti industriali, ma anche a livello civile come l’uso di filtri catalitici e filtri per il particolato nei mezzi di trasporto, la sostituzione di gasolio e carbone con metano per i riscaldamenti domestici, l’aumento dell’efficienza energetica nonché sono state effettuate delle campagne di sensibilizzazione della popolazione affinché non bruciasse “rifiuti” nella stufa economica (Tirler et al., 2009).

Tabella 1 – Risultati delle campagne di monitoraggio a Bolzano sulle concentrazioni di PCDD/Fs in atmosfera

	Valori in fg PCDD/F I-TEQ/m ³		
	Vento da Nord	Vento da Sud	Calma di vento
Campagna 2007			
Stazione a Nord Impianto	90	79	89
Stazione a Sud Impianto	59	52	84
Stazione in centro Bolzano	155	259	N/D
Campagna 2009			
Stazione a Nord Impianto	25	26	167
Stazione a Sud Impianto	41	40	39
Stazione in centro Bolzano	18	25	45
Campagna 2010			
Stazione a Nord Impianto	28	30	42
Stazione a Sud Impianto	18	24	52
Campagna 2015			
Stazione a Nord Impianto	16	16	24
Stazione a Sud Impianto	16	15	16

Le campagne di monitoraggio hanno permesso di “fotografare” la diminuzione dei livelli di concentrazione di diossine nel tempo: risulta ragionevole supporre che le misure adottate per la riduzione dei contaminati risultino efficaci e supportate dai valori rilevati (Tabella 1).

Le deposizioni atmosferiche e quindi l’impatto dei POPs sul territorio possono essere valutati tramite campionatori bulk, che permettono la raccolta di deposizioni secche e umide permettendo, tramite i flussi medi di deposizione totale, di valutare gli andamenti nel tempo.

Il concetto di riuscire a realizzare mappature nazionali, “fotografie” consolidate e periodiche della situazione, che diano un quadro reale ed evidenzino quali possano essere i trend evolutivi, sta alla base della normativa italiana sulla Valutazione di Impatto Ambientale (VIA, L. 349/86 e DPCM del 24/12/88) e della procedura di valutazione dei rapporti esistenti tra un dato progetto e le conseguenze negative prevedibili sull’Ambiente e derivanti dalla scelta del tipo di opera, dalla sua razionalizzazione e dal suo funzionamento.

Partendo dalla definizione di quello che è l’inquinamento atmosferico (DPR 203/88) inteso come “ogni modificazione della normale composizione o stato fisico dell’aria atmosferica, dovuta alla presenza nella stessa di una o più sostanze in quantità e con caratteristiche tali da alterare le normali condizioni ambientali e di salubrità dell’aria”, e proseguendo con una sempre più ampia presa di coscienza sia a livello europeo (Regolamento CE n. 166/2006) che nazionale del concetto di monitoraggio ambientale, si è sempre più acuita l’esigenza di monitorare le ricadute atmosferiche, soprattutto in prossimità degli impianti industriali e di termodistruzione sia già esistenti sul territorio, sia in fase di costruzione e/o sperimentazione.

Il campionario o deposimetro bulk è un raccogli-tore passivo (non necessita di energia), posizionato a una adeguata altezza rispetto al suolo (~1,5 m), di deposizioni totali (umide e secche) e consiste in una unità di raccolta aperta che convoglia le acque di precipitazione in un apposito contenitore sottostante. La frequenza usuale di campionamento è mensile.

Già dal 1998 sono stati utilizzati deposimetri bulk non solo per monitorare i flussi di deposizione di POP’s nella laguna di Venezia (Guerzoni et al., 2007), ma anche per verificare le ricadute specifiche nella zona industriale di Porto Marghera (Ros-

sini et al., 2005) e sperimentare la compatibilità di nuovi impianti o tipi di combustibili.

La deposizione dei POP’s emessi in atmosfera è probabilmente il meccanismo principale di contaminazione ambientale, anche a lungo raggio, da parte di queste sostanze.

Il controllo delle deposizioni atmosferiche risulta utilizzabile anche per confermare che un impianto progettato e gestito correttamente non produce una rilevante contaminazione del suolo nei dintorni dell’impianto (Vassura et al., 2011).

Altresì qualora un impianto fosse progettato o gestito non correttamente le emissioni porterebbero alla contaminazione del suolo rilevabile solo a fatto compiuto (Evers et al., 1989). La bonifica di suolo contaminato da diossine risulta spesso non attuabile e con dei costi enormi: non risultano invece valutabili i costi relativi alla contaminazione della catena alimentare e della popolazione. Prevenire la contaminazione, utilizzando tutta una serie di tecniche di controllo attualmente disponibili, risulta imprescindibile nonché economicamente vantaggioso anche senza considerare gli eventuali costi sanitari che ne possono derivare.

In merito a quanto sopra si precisa che la Sesta Sezione della Corte di Giustizia della Comunità Europea, con una sentenza del 29 settembre 1999 ha dichiarato che:

“la nozione di scarico di cui all’art. 1 n. 2, lett. D della direttiva del Consiglio 4 maggio 1976, 76/464/CEE, concernente l’inquinamento provocato da certe sostanze pericolose scaricate nell’ambiente idrico della Comunità, deve essere interpretata nel senso che in essa rientra l’emissione di vapori inquinanti che si condensano e cadono su acque di superficie.”

Il monitoraggio delle deposizioni atmosferiche permette di valutare anche questa “condensazione” sulle acque di superficie.

5. CONCLUSIONI

I moderni inceneritori di rifiuti vengono progettati per effettuare un efficiente recupero energetico e per questo sono spesso definiti termovalorizzatori, in grado cioè di valorizzare l’energia prodotta.

Se gli impianti di venti, trenta anni fa hanno contribuito a immettere nell’atmosfera quantità notevoli di diossina (PCDD/F) e POP’s, e probabilmente impianti obsoleti o non gestiti correttamente continuano a farlo, gli impianti attuali

sono in grado di essere ambientalmente compatibili.

Lo sviluppo tecnologico ha permesso di abbattere i contaminati (macro e micro) presenti nei fumi prima che questi vengano immessi nell'atmosfera veicolati dalle emissioni: la condizione "sine qua non" è che gli impianti siano progettati con le migliori tecnologie disponibili (BAT), gestiti correttamente e controllati costantemente ed in modo adeguato (fit for purpose).

Per il controllo dell'esercizio e del corretto funzionamento dei sistemi di abbattimento, esistono tecnologie che permettono sia il controllo all'emissione, consentendo di stimarne la quantità immessa annualmente nell'ambiente (SME, campionatori in continuo per le diossine), sia il controllo delle ricadute nell'ambiente stesso (deposimetri e campionatori attivi direzionali).

I controlli ambientali devono iniziare precedentemente all'entrata in funzione dell'impianto e proseguire per tutto il tempo di attività dell'impianto stesso in modo da permettere una reale valutazione dell'impatto ambientale dell'impianto stesso.

Gli autori concordano nel ritenere che allo stato attuale sia necessario procedere con una continua riduzione dei rifiuti alla produzione degli stessi (esempio tipico gli imballaggi) e perseguire con la raccolta differenziata per il riutilizzo della materia valutandone contestualmente i costi sia economici che ambientali, ma sia ancora necessario utilizzare l'incenerimento per la frazione non riutilizzabile.

Si ribadisce che per poterli considerare compatibili con l'ambiente e la salute, gli impianti di incenerimento dovranno essere progettati, gestiti ma soprattutto controllati affinché adottino le migliori tecnologie (BAT) sia di trattamento dei fumi, sia di recupero energetico che di monitoraggio delle emissioni e delle deposizioni.

6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Abad E., Adralos M.A., Caixach J., Fabrellas B., Rivera J. (2000) Dioxin mass balance in a municipal waste incinerator. *Chemosphere* 40: 1143-1147.
- Abad E., Adrados M.A., Cixach J., Rivera J. (2002) Dioxin abatement strategies and mass balance at a municipal waste management plant. *Environ. Sci. Technol.*, 36, 92-99.
- Altarawneh M., Dlugogorski B.Z., Kennedz E.M., Mackie J.C. (2009) Mechanisms for formation, chlorination, dechlorination and destruction of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans (PCDD/Fs). *Progress in energy and combustion science*, 35, 245-274.
- Aslander O. (1987) The Swedish Dioxine Moratorium. New York: American Society of Civil Engineer, 41-50.
- Biancotto R., Vianello L., Zemello C. (2009) Microinquinanti organici in Provincia di Venezia. ARPAV. Disponibile su: www.arpa.veneto.it/arpav/chi-e-arpav/file-e-allegati/dap-venezia/aria/Indagine_diossine.pdf/view.
- Bhavsar S., Reiner E., Hayton A., Fletcher R., Mac Pherson K. (2008) Converting Toxic Equivalents (TEQ) of dioxin-like compounds in fish from one Toxic Equivalency Factor (TEF) scheme to another. *Environment International*, 34, 915-921.
- Cangialosi F., Intini G., Liberti L., Notarnicola M., Stellacci P. (2008) Health risk assessment of air emissions from a municipal solid waste incineration plant – A case study. *Chemosphere*, 28, 885-895.
- Carlson K.B. (1992) Dioxin destruction in catalysis for NOx reduction (SCR-DeNOx). *Chemosphere*, 25, 135-138.
- Damgaard, A., Riber, C., Fruergaard, T., Hulgaard, T., Christensen, T.H. (2010) Life-cycle-assessment of the historical development of air pollution control and energy recovery in waste incineration. *Waste Management*, 30, 1244-1250.
- De Boer J., Fiedler H. (2013) Persistent organic pollutants. *Trends in Analytical Chemistry*. 46, 70-71.
- De Frè R e Wevers M. (1998) Underestimation in dioxin emission inventories. *Organohalogen Compounds*, 36, 17-20.
- Domingo J.L. (2002) Human health risk of dioxins for population living near modern municipal solid waste incinerators. *Reviews on environmental health*, 17, 135-147.
- Eco-Center, (2013), www.eco-center.it/smarteredit/documents/download/sttermbolzanoit15.pdf.
- Eco-Center, (2016) www.eco-center.it/smarteredit/documents/reports-restmuellverwertungsanlage-bozen-jahresberichte/tabelladecs2015.pdf.
- Evers E.H.G., van Berghem J.W. and Olie K. (1989) Exploratory data analysis of PCDD and PCDF measurements in sediments from industrialized areas. *Chemosphere*, 19, 459-466.
- Finocchio E., Busca G., Notaro M. (2006) A review of catalytic processes for the destruction of PCDD and PCDF from waste gases. *Applied Catalysis B: Environmental*, 62, 12-20.
- Giua R., Menegotto M., Esposito V., Ficocelli S., Nocioni A. e Assennato G. (2009) PCDD/F wind-selective sampling in Taranto area. *Organohalogen Compounds*, 71, 2414-2417.
- Giugliano M., Cernuschi S., Grosso M., Miglio R., Aloigi E. (2002) PCDD/F mass balance in the flue gas cleaning units of a MSW incineration plant. *Chemosphere*, 46, 1321-1328.
- Grosso M., Cernuschi S., Giugliano M., Lonati G., Rigamonti L. (2007) Environmental release and mass flux partitioning of PCDD/Fs during normal and transient operation of full scale waste to energy plants. *Chemosphere*, 67, 118-124.
- Grosso M., Biganzoli L., Rigamonti L., Cernuschi S., Giugliano M., Poluzzi V., Biancolini V. (2012) Experimental evaluation of PCDD/Fs and PCBs release and mass balance of a WTE plant. *Chemosphere*, 86, 293-299.
- Guerzoni S. et al. (2007) POPs in the Lagoon of Venice: budgets and pathways. *Chemosphere*, 67, 1776-1785.

- Hiraoka M., Fujii T., Kashiwabara K., Ieyama K., Kondo M. (1991) The removal efficiency of dioxin in flue gas of MSW incinerator – Comparison of a fabric filter with an electrostatic precipitator. *Chemosphere*, 23, 1439-1444.
- Huang H. and Buekens A. (1995) On the mechanism of dioxin formation in combustion processes. *Chemosphere*, 31, 4099-4117.
- Hunsinger H., Jay K., Vehlow J. (2002) Formation and destruction of PCDD/F inside a grate furnace. *Chemosphere*, 46, 1263-1272.
- ISPRA (2016) Rapporto Rifiuti Urbani - Edizione 2016. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma.
- Liberti A. (1982) L'esperienza di San Donnino per la valutazione delle emissioni negli inceneritori. Atti della giornata di studio 21-24 aprile "Inquinamenti atmosferici, Città e ambiente – SEP Pollution, 229-232.
- Lonati G., Cernuschi S., Giugliano M., Grosso M. (2007) Health risk analysis of PCDD/F emissions from MSW incineration: comparison of probabilistic and deterministic approaches. *Chemosphere*, 67, 334-343.
- McKay G. (2002) Dioxin characterisation, formation and minimisation during municipal solid waste (MSW) incineration: review. *Chemical Engineering Journal*, 86, 343-368.
- Min Y., Lee M., Kim D., Heo J. (2013) Annual and seasonal variation in atmospheric PCDDs/PCDFs and dioxin-like PCBs level in satellite cities of Seoul, Korea during 2003-2009. *Atmospheric Environment*, 77, 222-230.
- Modig S. (1989) The Swedish experience with incineration. *Environ Impact Assess Rev.*, 9, 247-255.
- Offenthaler I., Bassan R., Belis C., Garo-Stach I., Ganz., Iozza S., Jakobi G., Kaiser A., Kirchner, Knoth W., Kräuchi N., Levy W., Moche W., Nurmi-Legat J., Raccanelli S., Schramm K.W., Schröder P., Sedivy I., Simonovic P., Staudinger M., Thanner., Uhl., Vilhar U. e Weiss P. (2009) MONARPOP Technical Report, INTERREG III B Alpine Space Programme www.alpine-space.org/2000-2006/uploads/media/MONARPOP_Technical_Report_EN_2009_edition.pdf.
- Olie K., Vermeulen P.L., Hutzinger O. (1977). Chlorodibenzo-p-dioxins and chlorodibenzofurans are trace components of fly ash and flue gas of some municipal incinerators in the Netherlands. *Chemosphere*, 6, 454-459.
- Raccanelli S. (2010) Monitoraggio dei microinquinanti organici nelle emissioni e in aria ambiente. LAB & Ambiente. Settembre, 42-45.
- Ragazzi M., Tirlir W., Angelucci G., Zardi D., Rada E.C. (2013) Management of atmospheric pollutants from waste incineration processes: the case of Bozen. *Waste Management & Research*, 31, 235-240.
- Rescue project (2015) RENEWABLE Smart Cooling for Urban Europe (RESCUE). Disponibile su: <http://www.rescue-project.eu>.
- REGOLAMENTO (CE) N. 166/2006: «emissione», qualsiasi introduzione di sostanze inquinanti nell'ambiente in seguito a qualsiasi attività umana, volontaria o involontaria, abituale o straordinaria, compresi il versamento, l'emissione, lo scarico, l'iniezione, lo smaltimento o la messa in discarica o attraverso reti fognarie non attrezzate per il trattamento finale delle acque reflue.
- Rivera-Austrui J., Borrajo M.A., Martinez K., Darados M.A., Abalos M., Van Bavel B., Rivera J., Abad E. (2011) Assessment of polychlorinated dibenzo-p-dioxin and dibenzofuran emissions from a hazardous waste incineration plant using long-term sampling equipment. *Chemosphere*, 82, 1343-1349.
- Rossini P., S. Guerzoni, G. Matteucci, M. Gattolin, G. Ferrari, S. Raccanelli (2005) Atmospheric fall-out of POPs (PCDD-Fs, PCBs, HCB, PAHs) around the industrial district of Porto Marghera, Italy. *Science of the Total Environment*, 349, 190-200.
- Teijima H., Nakagawa I., Shinoda T., Maeda I. (1996) *Chemosphere*, 32, 169-175.
- Teijima H., Nishigaki M., Fujita Y., Matsumoto A., Takeda N., Takaoka M. (2007) Characteristics of dioxin emissions at startup and shutdown of MSW incinerators. *Chemosphere*, 66, 1123-1130.
- Tirlir W., Angelucci G., Bedin K., Voto G., Donegà M., Minach L. (2007) Active sampling and Analysis of Dioxins and Polyaromatic hydrocarbons bound to fine particles in the vicinity of a municipal solid waste incinerator. *Organohalogen Compounds*, 69, 2268-2271.
- Tirlir W., Voto G., Donegà M., Mair K. (2009) Home made dioxins: known and less known sources. Vol. 71, *Organohalogen Compounds*, 71, 2537-2540.
- Tirlir W., Mair K., Donegà M., Voto G., De Cari A. (2010) PCDD/F removal with catalytic filters in a municipal solid waste incinerator. *Organohalogen Compounds*, 72, 1561-1564.
- Tirlir W., G. Angelucci G., Basso A., Donegà M., Mair K., Fellin V., Voto G. Tirlir (2016) POP dispersion in the environment: wind selective sampling of different PM fractions up and downstream the prevailing wind line of a potential emission source. *Organohalogen Compounds*, 78, 237-241.
- Trivedi J. and Majumdar D. (2013) Memory effect driven emissions of persistent organic pollutants from industrial thermal processes, their implications and management: A review. *Journal of Environmental Management*, 119, 111-120.
- UNEP (2007) Guidance on the Global Monitoring Plan for Persistent Organic Pollutants, www.klab.ee/wp-content/uploads/2013/05/220.pdf.
- Vassura I., Passarini F., Ferroni L., Bernardi E., Morselli L. (2011) PCDD/F atmospheric deposition fluxes and soil contamination close to a municipal solid waste incinerator. *Chemosphere*, 83, 1366-1373.
- Wang L. C., His H.C., Chang J.E., Yang X.Y., Chang-Chien G.P., Lee W.S. (2007) Influence of start-up on PCDD/F emission of incinerators. *Chemosphere*, 67, 1346-53.

RINGRAZIAMENTI

Ringraziamo Kees Olie, che grazie al suo intuito e la sua perseveranza da ricercatore, è riuscito a portare alla conoscenza che non basta semplicemente “bruciare” per risolvere il problema dei rifiuti, ma bisogna applicare la tecnologia giusta e i sistemi di controllo adeguati.



INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2017 è sostenuta da:



N. 1/2017

fondazione
cariplo

Ledizioni



NUMERO SPECIALE DEDICATO ALL'INCIDENTE DI SEVESO, 40 ANNI DOPO

