

L'INVENTARIO DELLE EMISSIONI DI METALLI PESANTI IN LOMBARDIA – PARTE II: DATI E RISULTATI¹

A. Marongiu*, S. Caserini**, M. Moretti*, F. Antognazza*, A. Giudici*, E. Angelino*

Sommario – Il lavoro presenta la stima delle emissioni di metalli pesanti (Hg, As, Cr, Cd, Ni e Pb) da diverse tipologie di sorgenti attive in Lombardia nell'anno 2008, realizzata sulla base delle metodologie descritte nella prima parte (Marongiu *et al.*, 2012). La stima si basa sui dati di attività (consumi, produzioni industriali, ecc.) raccolti nell'ambito dell'inventario emissioni della Regione Lombardia su fattori di emissione reperiti nella letteratura internazionale o calcolati a partire dalle emissioni di specifici impianti situati nel territorio regionale. L'approccio dettagliato, che ha preso in considerazione le caratteristiche tecnologiche delle principali sorgenti di emissione in atmosfera nella regione, e la presenza dei diversi sistemi di abbattimento, ha permesso di superare i problemi derivanti dalla grande variabilità nei fattori di emissione disponibili in letteratura.

HEAVY METAL EMISSIONS INVENTORY IN LOMBARDY – PART II: DATA AND RESULTS

Summary – This paper reports the estimation of the atmospheric emissions for heavy metals (Hg, As, Cr, Cd, Ni e Pb) from different sources in Lombardy during 2008 basing on the methodologies described in the previous part (Marongiu *et al.*, 2012). The calculation is based on activity data (fuel consumption, industrial productions, etc.) collected in the framework of the of Lombardy Region emission inventory and on emission factors taken from the international literature or estimated from emissions of specific industrial plants located in the regional territory. The detailed approach, which considers the regional characteristics and the technologies of the main atmospheric emission sources, has allowed solving the problems due to the high variability of emission factors reported in the literature.

Parole chiave: metalli pesanti, emissioni, Lombardia, inventari.

Keywords: heavy metals, emissions, Lombardy, inventory.

1. DEFINIZIONE DI INDICATORI E FATTORI DI EMISSIONE

Ai fini del presente lavoro, fornire una stima delle emissioni complessive di metalli pesanti per la Lombardia, sono state considerate le

tipologie di sorgenti, indicate dalla letteratura come principali fonti per questi inquinanti, presenti sul territorio regionale: combustioni (per la produzione di energia, di calore o negli autoveicoli), processi ad alta temperatura (produzione cemento, fertilizzanti, vetro, produzione di ceramica), fusione, lavorazione e nobilitazione metalli (operazioni di metallurgia primaria e secondaria, produzione di acciaio), nonché smaltimento rifiuti (incenerimento di rifiuti solidi urbani ed industriali).

1.1 Indicatori

Gli indicatori (produzioni industriali, consumi di combustibili, ecc.) sono stati raccolti nell'ambito dei lavori dell'inventario emissioni della Regione Lombardia; i dati derivano sia da indagini di dettaglio effettuate presso i principali grandi impianti industriali (dati impianti puntuali), sia da fonti statistiche provinciali e regionali o da associazioni di categoria. I dati utilizzati, affiancati da un indice che rappresenta l'affidabilità del dato stesso, sono riportati in Tabella 1.1.

I dati relativi ai consumi in grandi impianti industriali hanno un'affidabilità elevata in quanto derivanti dalle dichiarazioni delle aziende; mentre i consumi di gas naturale derivano da dati sulle forniture su scala locale, i consumi in ambito residenziale di olio e gasolio, derivando da statistiche regionali o nazionali e sono affetti da maggiori margini di incertezza. Per i consumi di legna ad uso domestico è stata effettuata una specifica indagine campionaria che ha permesso una stima dettagliata dei consumi in ambito comunale (Pastorello *et al.*, 2009).

Il dato di consumo di carburanti deriva dalle statistiche sulle vendite provinciali ai distributori della rete urbana, extraurbana ed autostradale.

1.2 Fattori di emissione

I fattori di emissione utilizzati nell'inventario derivano da quattro diverse metodologie di stima:

1) dati medi provenienti da misure effettuate in Lombardia;

* Dott. ing. Alessandro Marongiu, dott. Marco Moretti, ing. Federico Antognazza, dott. Angelo Giudici, dott. Elisabetta Angelino; ARPA Lombardia, Settore ARIA – Viale F. Restelli, 1 – 20124, Milano – ARPA Lombardia, Settore Monitoraggi Ambientali – Via Rosellini, 17 – 20124, Milano – Tel. 02.69666728, e-mail: a.marongiu@arpalombardia.it.

** Prof. Stefano Caserini; Politecnico di Milano, DIAR Sez. Ambientale – Piazza Leonardo da Vinci, 32 – 20133, Milano – E-mail: stefano.caserini@polimi.it.

¹ La prima parte del presente articolo è stata pubblicata su *IA Ingegneria Ambientale* n. 5/2012, pagg. 374-385.

Tab. 1.1 – Indicatori di attività, suddivisi per codice SNAP, considerati nell'inventario dei metalli pesanti della Lombardia nell'anno 2008

SNAP	Sorgente di emissione	Indicatore	u.m.	affidabilità	Fonte
01.01.01	Caldaie con potenza termica ≥ 300 MW – olio	119	kt di combustibile	ALTA	Impianti puntuali
01.01.04	Turbine a gas	4.727	kt di combustibile	ALTA	Impianti puntuali
01.02.03	Caldaie con potenza termica < 50 MW – rifiuti solidi urbani	6	kt di combustibile	ALTA	Impianti puntuali
01.03.02	Caldaie con potenza termica ≥ 50 e < 300 MW – olio	33	kt di combustibile	ALTA	Impianti puntuali
01.03.06	Forni di raffinaria – olio	119	kt di combustibile	ALTA	Impianti puntuali
02.02.06	Camino aperto tradizionale a legna	315	kt di combustibile	BASSA	Elab dati regionali
02.02.07	Stufa tradizionale a legna	379	kt di combustibile	BASSA	Elab dati regionali
02.02.08	Camino chiuso o inserto a legna	682	kt di combustibile	BASSA	Elab dati regionali
03.01.02	Caldaie con potenza termica ≥ 50 e < 300 MW – rifiuti di legna	228	kt di combustibile	MEDIA	Impianti puntuali
03.01.03	Caldaie con potenza termica < 50 MW – legna	376	kt di combustibile	MEDIA	Elab dati regionali + Impianti puntuali
03.03.03	Fonderie di ghisa e acciaio	385	kt di prodotto	ALTA	Impianti puntuali
03.03.07	Produzione di piombo di seconda fusione	75	kt di prodotto	ALTA	Impianti puntuali
03.03.08	Produzione di zinco di seconda fusione	51	kt di prodotto	ALTA	Impianti puntuali
03.03.09	Produzione di rame di seconda fusione	448	kt di prodotto	ALTA	Impianti puntuali
03.03.10	Produzione di alluminio di seconda fusione	738	kt di prodotto	ALTA	Impianti puntuali
03.03.11	Cemento – petcoke	404	kt di combustibile	MEDIA	Impianti puntuali
03.03.15	Contenitori di vetro – gas naturale	51	kt di combustibile	MEDIA	Impianti puntuali
03.03.19	Laterizi e piastrelle	1.777	kt di prodotto	MEDIA	Elab dati regionali + Impianti puntuali
03.03.20	Materiale di ceramica fine	195	kt di prodotto	MEDIA	Elab dati regionali + Impianti puntuali
03.03.25	Produzione di smalto – gas naturale	2	kt di combustibile	MEDIA	Impianti puntuali
04.02.07	Acciaio (forno elettrico)	10.383	kt di prodotto	ALTA	Impianti puntuali
04.02.08	Laminatoi	9.036	kt di prodotto	ALTA	Impianti puntuali
04.03.02	Ferroleghie	106	kt di prodotto	ALTA	Impianti puntuali
04.03.07	Galvanizzazione	477	kt di prodotto	MEDIA	Impianti puntuali
04.03.10	Estrusione di metalli	182	kt di prodotto	MEDIA	Impianti puntuali
04.04.07	Fertilizzanti composti (NPK)	210	kt di prodotto	MEDIA	Impianti puntuali
04.04.14	Fertilizzanti a base di fosforo	85	kt di prodotto	MEDIA	Impianti puntuali
09.02.01	Incenerimento di rifiuti solidi urbani	1.806	kt di rifiuti	ALTA	Impianti puntuali

2) dati stimati sulla base della tipologia di sistemi di abbattimento utilizzati nello specifico settore;

3) dati medi reperiti nella letteratura scientifica;

4) dati medi utilizzati in altri inventari.

1.2.1 Fattori di emissione stimati da sorgenti puntuali in Lombardia

Nell'ambito dei lavori per l'inventario delle emissioni INEMAR, gestito da ARPA Lombardia, sono disponibili dati misurati presso alcune tipologie specifiche di impianti. Le emissioni di queste sorgenti puntuali sono state stimate secondo la relazione (1).

Per alcune attività (es: attività 09.02.01 inceneritori di rifiuti solidi urbani) le misure disponibili permettono di determinare completamente l'emissione del settore ed è possibile determinare i valori medi dei fattori di emissione, secondo la relazione:

$$\overline{FE}_{i,attività} = \frac{1}{n} \sum_k^n \frac{E_{i,k}}{A_k} \quad (6)$$

dove :

$E_{i,k}$ = emissione del metallo i dall'impianto k per una determinata attività;

A_k = indicatore di attività dell'impianto k ;

$\overline{FE}_{i,attività}$ = fattore di emissione medio del metallo i per una determinata attività.

Per altre attività, pur se sono disponibili numerose misure, i dati non permettono di determinare l'emissione totale sulla base dei dati misurati. È però possibile determinare un valore dei fattori di emissione medi per attività sulla base di dati disponibili, combustibile impiegato ed eventualmente tecnologia di abbattimento presente.

I fattori di emissione considerati possono essere utilizzati per effettuare un confronto con i fattori di emissione di altri inventari, identifican-

do un grado medio di implementazione delle tecnologie di abbattimento in Lombardia. Sulla scorta di questo confronto, è stato possibile caratterizzare le attività di cui le fonti bibliografiche presentavano elevati gradi di variabilità o non presentavano alcun tipo di informazione.

1.2.2 Fattori di emissione stimati sulla base dei sistemi di abbattimento utilizzati

La scelta e l'aggiornamento dei fattori di emissione non può non tenere conto della reale implementazione delle tecnologie di abbattimento delle polveri in Lombardia. Nell'ambito delle certificazioni per l'autorizzazione integrata ambientale (AIA, D.Lgs 59/05 e modifiche) è stato possibile ottenere informazioni sulla diffusione dei sistemi di depolverazione impiegati negli impianti delle principali sorgenti di emissione in Lombardia, mostrato in Figura 1.1 (dati ARPA Lombardia, AIA).

Nel campo della fusione secondaria dei metalli non ferrosi le tecnologie di controllo dell'emissione più utilizzate risultano essere i filtri a tessuto ed sistemi di lavaggio tipo venturi. I filtri a tessuto sono anche largamente impiegati

negli impianti di trattamento dei gas esausti nelle combustioni per la produzione di energia e calore e nell'incenerimento dei rifiuti. In quest'ultimo settore, si evidenzia per la Lombardia l'ampio impiego di sistemi ad iniezione di carboni attivi.

L'efficienza media di abbattimento dei metalli pesanti per ciascuna attività può essere stimata utilizzando il grado di implementazione delle differenti tecnologie riportato in Figura 1.1 e la relazione (4).

Le efficienze medie di depolverazione per attività in Lombardia nel 2008, sono riportate in Tabella 1.2. Il range di valori è ottenuto utilizzando le efficienze medie di depolverazione stimate negli UE-27 riportate in Figura 3.1 ed dati sulla diffusione delle tecnologie in Lombardia di Figura 1.1. I valori massimi e minimi sono ottenuti in funzione del possibile miglioramento di una determinata tecnologia, per esempio nell'incremento dei wFGD dai valori di media a quelli di alta efficienza.

La capacità di abbattimento di Hg presenta una maggiore variabilità, confermando le differenti caratteristiche chimico-fisiche di que-

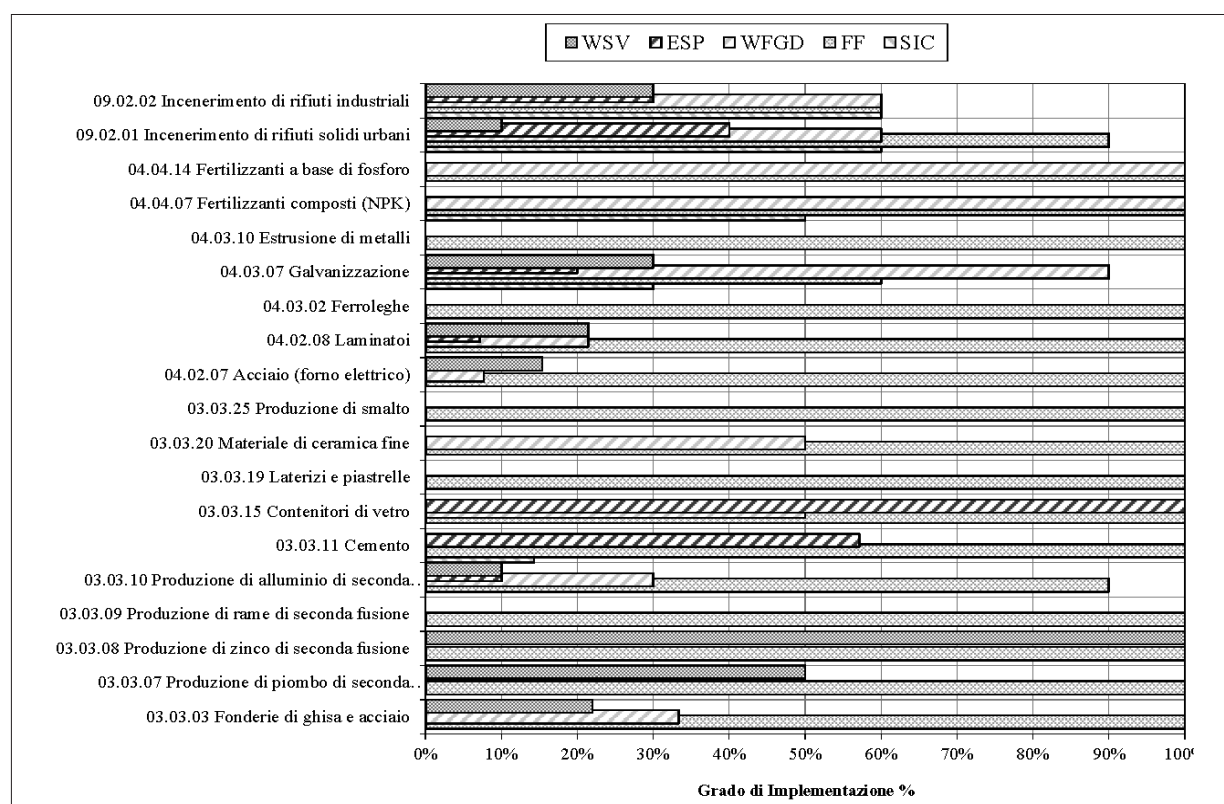


Fig. 1.1 – Gradi di implementazione delle principali tecnologie di depolverazione in Lombardia per il 2008 (Dati ARPA Lombardia, AIA). ESP (Precipitatore elettrostatico), FF (Filtri a tessuto), SIC (Sistemi di iniezione di carboni attivi), WFGD (Deacidificazione ad umido dei gas esausti), WSV (Sistemi venturi ad umido)

Tab. 1.2 – Rendimenti di abbattimento per le principali sorgenti di emissione di metalli pesanti stimati sul grado di implementazione regionale delle differenti tecnologie e relativi intervalli di efficienza

SNAP	Sorgente di emissione	As, Cd, Cr, Ni, Pb		Hg	
03.03.03	Fonderie di ghisa e acciaio	83%	< η < 99,2%	11%	< η < 86%
03.03.07	Produzione di piombo di seconda fusione	95%	< η < 98%	6,0%	< η < 68%
03.03.08	Produzione di zinco di seconda fusione	95%	< η < 97%	6,5%	< η < 53%
03.03.09	Produzione di rame di seconda fusione	96%	< η < 99,99%	5,0%	< η < 98%
03.03.10	Produzione di alluminio di seconda fusione	89%	< η < 99,58%	8,1%	< η < 92%
03.03.11	Cemento	88%	< η < 99,98%	11%	< η < 98%
03.03.15	Contenitori di vetro	88%	< η < 99,93%	7,5%	< η < 97%
03.03.19	Laterizi e piastrelle	96%	< η < 99,99%	5,0%	< η < 98%
03.03.20	Materiale di ceramica fine	78%	< η < 99,83%	13%	< η < 95%
03.03.25	Produzione di smalto	96%	< η < 99,99%	5,0%	< η < 98%
04.02.07	Acciaio (forno elettrico)	90%	< η < 99,27%	8,1%	< η < 87%
04.02.08	Laminatoi	86%	< η < 99,29%	9,6%	< η < 87%
04.03.02	Ferroleghie	96%	< η < 99,99%	5,0%	< η < 98%
04.03.07	Galvanizzazione	70%	< η < 99,25%	23%	< η < 87%
04.03.10	Estrusione di metalli	96%	< η < 99,99%	5,0%	< η < 98%
04.04.07	Fertilizzanti composti (NPK)	73%	< η < 99,85%	23%	< η < 96%
04.04.14	Fertilizzanti a base di fosforo	70%	< η < 99,74%	18%	< η < 94%
09.02.01	Incenerimento di rifiuti solidi urbani	82%	< η < 99,93%	18%	< η < 97%

sto metallo, principalmente emesso allo stato gassoso, rispetto ad As, Cd, Cr, Ni e Pb emessi adsorbiti sul materiale particolato.

1.2.3 Fattori di emissione di letteratura

Numerosi sono i lavori di letteratura contenenti fattori di emissione per i metalli pesanti. Le principali fonti bibliografiche sono rappresentate dal Guidebook EEA (EEA, 2009) e dal database dei fattori di emissione FIRE dell'US-EPA (US-EPA, 2010).

L'ultima versione del Guidebook approvata è stata pubblicata nel 2009 e riporta principalmente fattori di emissione aggiornati per le principali attività emmissive dei metalli pesanti, ottenuti da un rapporto dell'Umweltbundesamt, l'Agenzia per la protezione dell'ambiente tedesca, (Theloke *et al.*, 2008). Quest'ultimo è stato appositamente sviluppato sulla base di analisi statistiche dei dati provenienti dal progetto ESPREME.

I fattori di emissione disponibili nella letteratura scientifica per una medesima tipologia di sorgente presentano significative differenze, che, per alcune tipologie, possono essere di più ordini di grandezza. Questo fatto è riconducibile, come già visto, a diverse cause: fattori di tipo chimico-fisico delle materie prime impiegate, caratteristiche tecnologiche degli impianti di produzione e di controllo delle emissioni, sistema di classificazione delle attività.

I fattori di emissione di metalli pesanti sono influenzati da quattro tipologie di fattori (Pacyna *et al.*, 2009):

- contaminazione delle materie prime da parte dei metalli pesanti;
- proprietà chimico-fisiche dei metalli che ne determinano le caratteristiche durante i processi industriali;
- tecnologie dei processi industriali;
- tipologia ed efficienza dei sistemi di controllo delle emissioni.

Le prime due categorie di fattori determinano una fonte di incertezza relativa al contenuto nelle materie prime o nel combustibile di metalli pesanti. In questo ambito esistono settori quali la combustione dei rifiuti per i quali la definizione di fattori di emissione medi con le metodologie più semplificate risulta di difficile applicabilità, a causa della forte variazione tra gli stati europei della reale composizione del rifiuto. D'altro canto, non sempre sono disponibili fattori di emissione per alcune attività. Ne consegue che le tipologie di stima mediante FE migliori sono quelle basate sul calcolo di fattori di emissione da sorgenti puntuali in Lombardia o da elaborazioni statistiche su studi specifici.

I due ultimi fattori che riguardano le caratteristiche tecnologiche dei processi sono stati affrontati nel paragrafo 1.2.2, dove il grado di incertezza quando possibile viene ridotto dall'implementazione di approccio maggiormente dettagliato inerente al tipo di tecnologia di ab-

battimento impiegata e dal calcolo di fattori di emissione da sorgenti puntuali.

I fattori di emissione disponibili in letteratura o utilizzati in altri inventari, costituiscono in ogni caso un punto di confronto anche per i valori calcolati da emissioni specifiche ed i possibili margini di incertezza possono essere ridotti tramite la scelta dei parametri più appropriata per le caratteristiche delle tecnologie e delle materie prime realmente impiegate.

1.2.4 Fattori di emissione utilizzati in altri inventari

Alcuni fattori di emissione impiegati sono stati ottenuti da altri inventari realizzati sia su scala nazionale che europea, già citati in precedenza. A loro volta questi valori possono essere stati ottenuti da fonti dalla letteratura scientifica, da elaborazioni statistiche dei dati disponibili o comunque in maniera analoga alle procedure illustrate in questo paragrafo.

Tra questi, per dare un esempio, ci sono quei fattori di emissione legati alla presenza degli inquinanti come tracce in combustibili o materie prime, per le quali la determinazione di una corretta composizione oltre che il loro reale grado di impiego risulta particolarmente difficoltoso e con alto grado di incertezza.

Nella classificazione impiegata, le emissioni in atmosfera dall'uso di legna da ardere in piccoli apparecchi di combustione è sicuramente legata al contenuto iniziale di metalli nel combustibile. Questo dato è influenzato, tra gli altri, dalla tipologia e provenienza della legna impiegata che risulta variabile su scala regionale. Ne consegue che i fattori di emissione in questi particolari casi sono definiti sulla base di dati statistici e di apposite misurazioni di laboratorio.

1.2.5 Quadro riassuntivo

I fattori di emissione delle attività più rilevanti per le emissioni di metalli pesanti sono riportati in Tabella 1.3. Per ciascuna sorgente emissiva sono indicati il tipo di metodologia di stima del FE ed un'indicazione sull'affidabilità media, considerando complessivamente As, Cd, Cr, Hg, Ni e Pb. Per la stima delle emissioni da trasporto su strada sono state utilizzate le metodologie previste da COPERT IV e l'utilizzo di fattori di emissione provenienti dal Guidebook EEA (EEA, 2009).

1.2.5.1 Processi di metallurgia secondaria

Queste attività, che come detto in precedenza

sono risultate in numerosi inventari delle emissioni le principali sorgenti di emissione di metalli pesanti, comprendono la produzione di rame, zinco, piombo ed alluminio di seconda fusione. I dati relativi alle emissioni di alcuni impianti di fusione secondaria, come per altri impianti di combustione ed incenerimento dei rifiuti, sono stati dichiarati dai gestori, nell'ambito del piano di monitoraggio dell'AIA. Sono state effettuate operazioni di verifica, validazione dei dati e per il calcolo dei valori medi. In alcuni casi sono state presentate analisi sulle emissioni inferiori al limite di rilevabilità dei metalli pesanti in funzione del metodo e dello strumento di analisi. In questo caso si è proceduto a stimare l'emissione pari al 50% del limite di rilevabilità. Quando la qualità dei dati disponibili può essere considerata sufficientemente rappresentativa, i dati sono stati la base di calcolo per stima di fattori di emissione più appropriati per la scala regionale.

1.2.5.2 Processi di alta temperatura

L'attività di combustione in forni "clinker" per la produzione di cemento e quelle di incenerimento sono state caratterizzate in questo inventario attraverso le emissioni di alcuni impianti dichiarate dai gestori nell'ambito delle AIA e l'implementazione di fattori di emissione medi.

Il valore di questi ultimi è stato ottenuto validando i dati disponibili delle emissioni di alcuni impianti identificandone le caratteristiche tecnologiche prevalenti.

Nei forni di produzione del clinker per il cemento Portland, le emissioni principali sono quelle dovute alla combustione con contatto e le emissioni dipendono fortemente dal contenuto iniziale di metalli pesanti nel combustibile e nelle materie prime. Oltre ad i combustibili fossili convenzionali come il carbone, in questa fase sono impiegati una larga varietà di rifiuti come la gomma dei pneumatici, combustibile derivato da rifiuti, farine animali e residui di raffinazione che possono essere anche miscelati tra loro.

1.2.5.3 Traffico ed usura

Secondo alcune stime effettuate nell'ambito del programma di inventario coordinato europeo per le emissioni di particolato (CEPMEIP) e di altri studi, l'usura dei pneumatici, dei freni e delle strade nell'ambito del settore dei trasporti sarebbe una fonte importante di emissione di ma-

Tab. 1.3 – Fattori di emissione considerati nell'inventario dei metalli pesanti in Lombardia

SNAP	Attività	u.m.	Aff.	As	Cd	Cr	Hg	Ni	Pb
01.01.01	Caldaie con potenza termica >= 300 MW – olio combustibile	mg GJ ⁻¹	BASSA	4,3 ⁽⁴⁾	1,3 ⁽⁴⁾	2,7 ⁽⁴⁾	0,40 ⁽⁴⁾	273 ⁽⁴⁾	4,9 ⁽⁴⁾
01.01.04	Turbine a gas – gas naturale (metano)	mg GJ ⁻¹	BASSA	0,10 ⁽³⁾	0,53 ⁽³⁾	0,68 ⁽³⁾	0,20 ⁽⁴⁾	1,0 ⁽³⁾	0,24 ⁽³⁾
01.02.03	Caldaie con potenza termica < 50 MW – rifiuti solidi urbani	mg GJ ⁻¹	BASSA	4,8 ⁽⁴⁾	19 ⁽⁴⁾	72 ⁽⁴⁾	287 ⁽⁴⁾	19 ⁽⁴⁾	956 ⁽⁴⁾
01.03.02	Caldaie con potenza termica >= 50 e < 300 MW – olio	mg GJ ⁻¹	BASSA	0,57 ⁽⁴⁾	0,55 ⁽⁴⁾	1,2 ⁽⁴⁾	0,18 ⁽⁴⁾	26 ⁽⁴⁾	0,95 ⁽⁴⁾
02.02.06	Camino aperto tradizionale a legna	mg GJ ⁻¹	BASSA	0,50 ⁽⁴⁾	2,0 ⁽⁴⁾	1,0 ⁽⁴⁾	0,40 ⁽³⁾	2,0 ⁽⁴⁾	40 ⁽⁴⁾
02.02.07	Stufa tradizionale a legna – legna e similari	mg GJ ⁻¹	BASSA	0,50 ⁽⁴⁾	2,0 ⁽⁴⁾	1,0 ⁽⁴⁾	0,40 ⁽³⁾	2,0 ⁽⁴⁾	40 ⁽⁴⁾
02.02.08	Camino chiuso o inserto – legna e similari	mg GJ ⁻¹	BASSA	0,50 ⁽⁴⁾	2,0 ⁽⁴⁾	1,0 ⁽⁴⁾	0,40 ⁽³⁾	2,0 ⁽⁴⁾	40 ⁽⁴⁾
03.01.02	Caldaie con potenza termica >= 50 e < 300 MW – rifiuti di legna	mg GJ ⁻¹	BASSA	33 ⁽¹⁾	1,86 ⁽¹⁾	167 ⁽¹⁾	1,86 ⁽¹⁾	21 ⁽¹⁾	3624 ⁽¹⁾
03.01.03	Caldaie con potenza termica < 50 MW – legna e similari	mg GJ ⁻¹	BASSA	33 ⁽¹⁾	1,86 ⁽¹⁾	167 ⁽¹⁾	1,86 ⁽¹⁾	21 ⁽¹⁾	3624 ⁽¹⁾
03.03.03	Fonderie di ghisa e acciaio	mg t prod. ⁻¹	BASSA	300 ⁽³⁾	74 ⁽¹⁾	1738 ⁽¹⁾	40 ⁽³⁾	1061 ⁽¹⁾	305 ⁽¹⁾
03.03.07	Produzione di piombo di seconda fusione	mg t prod. ⁻¹	BASSA	8000 ⁽³⁾	2750 ⁽⁴⁾				31738 ⁽¹⁾
03.03.08	Produzione di zinco di seconda fusione	mg t prod. ⁻¹	BASSA	59 ⁽²⁾	205 ⁽²⁾		1,3 ⁽¹⁾	1,3 ⁽¹⁾	9 ⁽¹⁾
03.03.09	Produzione di rame di seconda fusione	mg t prod. ⁻¹	BASSA	2000 ⁽³⁾		6,16 ⁽¹⁾		11 ⁽²⁾	90000 ⁽⁴⁾
03.03.10	Produzione di alluminio di seconda fusione	mg t prod. ⁻¹	MEDIA	170 ⁽¹⁾	128 ⁽¹⁾	7390 ⁽¹⁾	11 ⁽³⁾	657 ⁽¹⁾	1480 ⁽¹⁾
03.03.11	Cemento – petcoke	mg GJ ⁻¹	MEDIA	0,92 ⁽¹⁾	0,52 ⁽¹⁾	2,1 ⁽¹⁾	1,5 ⁽¹⁾	2,7 ⁽¹⁾	3,5 ⁽¹⁾
03.03.15	Contenitori di vetro – gas naturale (metano)	mg GJ ⁻¹	MEDIA	55 ⁽¹⁾	35 ⁽¹⁾	23 ⁽¹⁾	7,8 ⁽¹⁾	2,3 ⁽¹⁾	401 ⁽¹⁾
03.03.19	Laterizi e piastrelle	mg t prod. ⁻¹	MEDIA						200 ⁽¹⁾
03.03.20	Materiale di ceramica fine	mg t prod. ⁻¹	BASSA						6000 ⁽¹⁾
03.03.25	Produzione di smalto	mg GJ ⁻¹	BASSA		815 ⁽¹⁾				
04.02.07	Acciaio (forno elettrico)	mg t prod. ⁻¹	ALTA	45 ⁽¹⁾	22 ⁽¹⁾	195 ⁽¹⁾	34 ⁽¹⁾	110 ⁽¹⁾	527 ⁽¹⁾
04.02.08	Laminatoi	mg t prod. ⁻¹	MEDIA	3,2 ⁽¹⁾	0,65 ⁽¹⁾	4,1 ⁽¹⁾	0,38 ⁽¹⁾	0,32 ⁽¹⁾	104 ⁽¹⁾
04.03.07	Galvanizzazione	mg t prod. ⁻¹	MEDIA			18 ⁽¹⁾		44 ⁽¹⁾	
04.04.07	Fertilizzanti composti (NPK)	mg t prod. ⁻¹	BASSA	2,9 ⁽¹⁾	2,9 ⁽¹⁾	5,9 ⁽¹⁾	2,9 ⁽¹⁾	852 ⁽¹⁾	2,9 ⁽¹⁾
04.04.14	Fertilizzanti a base di fosforo	mg t prod. ⁻¹	MEDIA		500 ⁽⁴⁾				
09.02.01	Incenerimento di rifiuti solidi urbani – rifiuti solidi urbani	mg t rif. ⁻¹	ALTA	3,5 ⁽¹⁾	5,5 ⁽¹⁾	5,3 ⁽¹⁾	24 ⁽¹⁾	7,7 ⁽¹⁾	78 ⁽¹⁾

DESCRIZIONE DELLA FONTE
⁽¹⁾ dati medi provenienti da elaborazione statistica di misure effettuate in Lombardia;
⁽²⁾ dati stimati sulla base della tipologia di sistemi di abbattimento utilizzati;
⁽³⁾ dati medi reperiti nella letteratura scientifica;
⁽⁴⁾ dati medi utilizzati in altri inventari.

teriale particolato caratterizzato da numerosi metalli pesanti tra cui Pb e Cu (CEPMEIP, 2003; Rauterberg-Wulff, 1999; Hulschotte *et al.* 2006). Queste emissioni hanno una distribuzione granulometrica difficilmente quantificabile, perché nel caso per esempio dell'usura dei freni almeno metà delle particelle ricade sulla strada o rimane intrappolata nelle parti meccaniche del mezzo (Sanders *et al.*, 2003). Tale considerazione da una parte riconduce al problema dell'ancora elevato grado di incertezza sui metodi di stima per la risospensione del ma-

teriale particolato come sorgente primaria (EEA, 2009) e suggerisce dall'altra di prestare grande attenzione alla definizione dei profili di speciazione in termini di metalli pesanti delle polveri sottili provenienti da queste sorgenti. Tutte le emissioni generate dal traffico veicolare sono state calcolate con l'impiego della metodologia COPERT IV e l'utilizzo di fattori di emissione provenienti dalla letteratura scientifica.

1.2.5.4 Altre sorgenti di emissione

Per le sorgenti di emissione quali la produzione

Tab. 2.1 – Emissioni di metalli pesanti in (kg/anno) suddivise per codice SNAP e combustibile in Lombardia nel 2008

SNAP	Sorgente di emissione	min	As	max	min	Cd	max	min	Cr	max	min	Hg	max	min	Ni	max	min	Pb	max
01.01.01	Caldaie con potenza termica >= 300 MW – olio combustibile	7	21	59	2	6	18	5	13	37	1	2	5	468	1324	3744	8	24	67
01.01.04	Turbine a gas – gas naturale (metano)	8	23	64	44	124	350	56	158	446	16	46	131	84	236	668	20	56	159
01.02.03	Caldaie con potenza termica < 50 MW – rifiuti solidi urbani	< 1	< 1	1	< 1	1	3	2	4	13	6	18	51	< 1	1	3	21	60	170
01.03.02	Caldaie con potenza termica >= 50 e < 300 MW – olio combustibile	< 1	1	2	< 1	1	2	1	2	4	< 1	< 1	1	124	351	992	< 1	1	4
01.03.06	Forni di raffinaria – olio combustibile	20	57	160										160	456	1286			
03.01.02	Caldaie con potenza termica >= 50 e < 300 MW – legna e similari	2	5	14	< 1	< 1	1	9	24	69	< 1	< 1	1	1	3	9	187	530	1498
03.01.02	Caldaie con potenza termica >= 50 e < 300 MW – rifiuti di legna	17	50	140	1	3	8	101	248	608	1	3	8	11	31	86	2197	5381	13180
03.01.03	Caldaie con potenza termica < 50 MW – legna e similari	45	157	544	3	9	30	227	785	2719	2	8	35	37	159	674	2935	12453	52836
03.03.03	Fonderie di ghisa e acciaio	26	106	424	9	26	75	219	620	1752	16	64	256	134	380	1075	42	118	332
03.03.07	Produzione di piombo di seconda fusione	213	602	1702	73	207	585										464	929	1857
03.03.09	Produzione di rame di seconda fusione	30	102	355	10	29	81	1	4	14				2	6	25	959	3837	15350
03.03.10	Produzione di alluminio di seconda fusione	46	130	368	33	93	262	2728	5457	10913	2	8	34	243	485	971	410	1159	3277
03.03.11	Cemento – petcoke	6	12	25	4	7	14	14	28	57	17	49	138	19	37	74	24	48	96
03.03.15	Contenitori di vetro – gas naturale (metano)	68	136	272	44	88	175	29	58	116	10	19	39	3	6	11	496	992	1984
03.03.19	Laterizi e piastrelle				51	145	409	51	145	409	51	147	414	51	145	409	85	362	1537
03.03.20	Materiale di ceramica fine																293	1173	4691
03.03.25	Produzione di smalto – gas naturale (metano)				22	62	175												
04.02.07	Acciaio (forno elettrico)	192	384	768	98	197	394	811	1622	3243	132	264	528	456	912	1824	2266	4531	9062
04.02.08	Laminatoi	10	28	79	2	6	17	13	36	102	1	3	10	1	3	8	318	900	2545
04.03.02	Ferroleghe	< 1	1	2	< 1	1	2	< 1	1	2	17	47	133	< 1	1	3	3	10	27
04.03.10	Estrusione di metalli	1	3	8	1	2	7							60	172	486	94	268	754
04.04.07	Fertilizzanti composti (NPK)	< 1	1	2	< 1	1	2	1	1	3	< 1	1	2	73	179	438	< 1	1	2
04.04.14	Fertilizzanti a base di fosforo				15	43	120												
07.07.0	Trasporto su strada – usura	15	42	119	6	18	50	467	1335	3738				76	217	609	1270	3630	10163
09.02.01	Incenerimento di rifiuti solidi urbani – rifiuti solidi urbani	3	6	12	4	8	17	5	11	21	22	45	90	9	18	35	59	118	236
	Altre sorgenti di emissione	23	67	188	60	172	482	181	517	1448	37	106	298	285	814	2280	487	1391	3894
	TOTALE EMISSIONI	734	1933	5306	483	1248	3280	4919	11069	25715	333	832	2173	2296	5936	15711	12639	37969	123720

di energia o la trasformazione dei combustibili, studiate nei progetti europei già precedentemente citati, i fattori di emissione provengono generalmente dalla letteratura scientifica o da altri inventari. Per l'incenerimento dei rifiuti, ed i processi di metallurgia secondaria sono stati utilizzati dei fattori di emissione calcolati da emissioni misurate su impianti in Lombardia.

2. RISULTATI

Le emissioni in atmosfera di metalli pesanti in atmosfera in Lombardia sono state stimate con riferimento all'anno 2008 e sono riportate in Tabella 5.1. Figura 2.1 mostra i contributi percentuali all'emissione di As, Cd, Cr, Hg, Ni e Pb per ciascuna sorgente. La principale emissione di metalli pesanti è quella di Pb che ammonta in Lombardia a poco meno di 38 t/anno; considerando l'intervallo di incertezza della stima rimanda ad un valore massimo di 124 t/anno ed un minimo di 13 t/anno.

Le emissioni di Ni e Cr sono stimate in 6 e 11 t/anno con corrispondenti intervalli di incertezza di 2 – 15 e 5 – 26 t/anno. Le emissioni

totali stimate per il mercurio non raggiungono una tonnellata (0,8 t/anno) e sono inferiori a quelle di As e Cd, pari a 1,9 e 1,2 t/anno.

Considerando i grafici di Figura 2.2, è possibile verificare che il principale settore di emissione, comune a tutti i metalli, è costituito dai processi di combustione con contatto nell'industria, in particolare dalla fusione secondaria di metalli non ferrosi. È rilevante anche il contributo alle emissioni, comune a tutti i metalli, dei processi di produzione dell'acciaio tramite forno elettrico. La combustione di olio in caldaie, seppur molto diminuita negli ultimi anni rispetto ai livelli degli anni '80 e '90, risulta ancora contribuire in percentuale rilevante al totale delle emissioni di nichel.

Le differenti metodologie di stima delle emissioni e dei fattori di emissione influenzano in modo differente la stima delle emissioni dei differenti metalli pesanti. In generale il peso percentuale delle emissioni ottenute da misurazioni dirette sugli impianti in Lombardia è ridotto (Figura 2.2), mentre è possibile verificare come sia rilevante nelle stime l'utilizzo di dati provenienti da linee guida per la compilazione degli

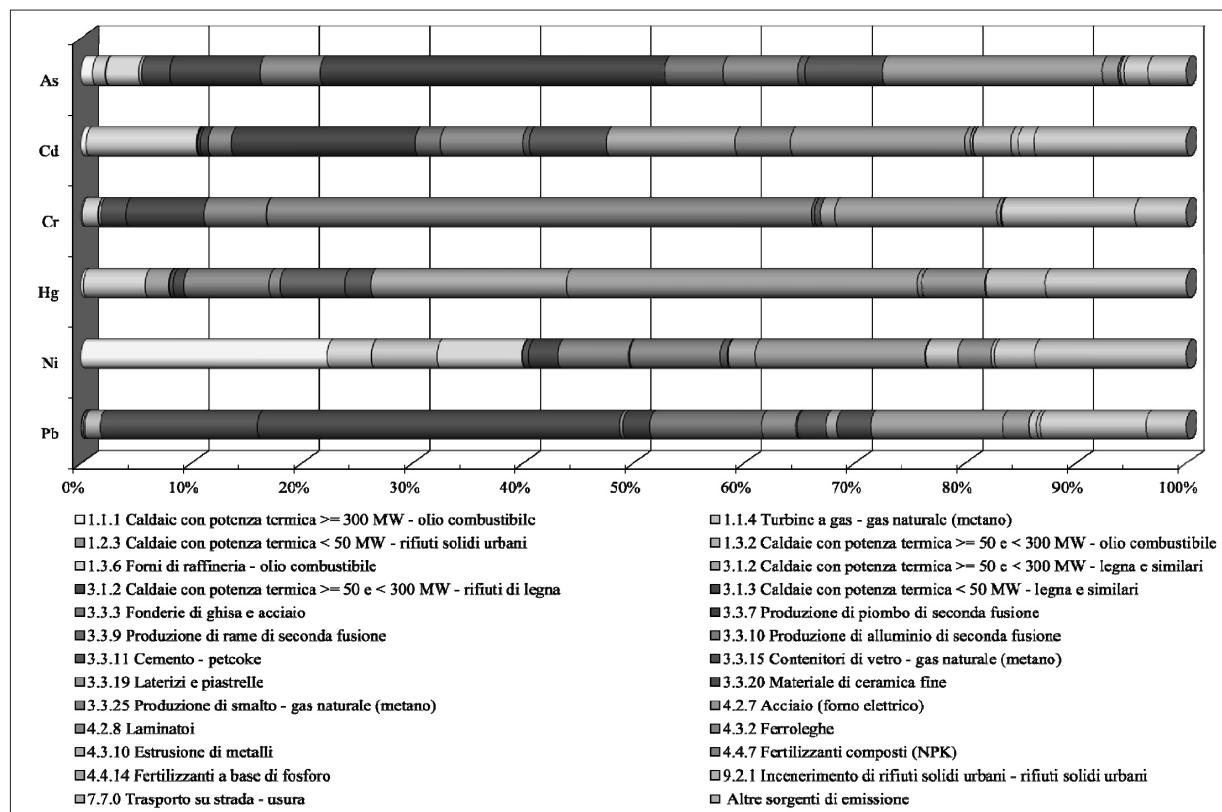


Fig. 2.1 – Contributi per attività SNAP all'emissione di metalli pesanti in Lombardia nel 2008

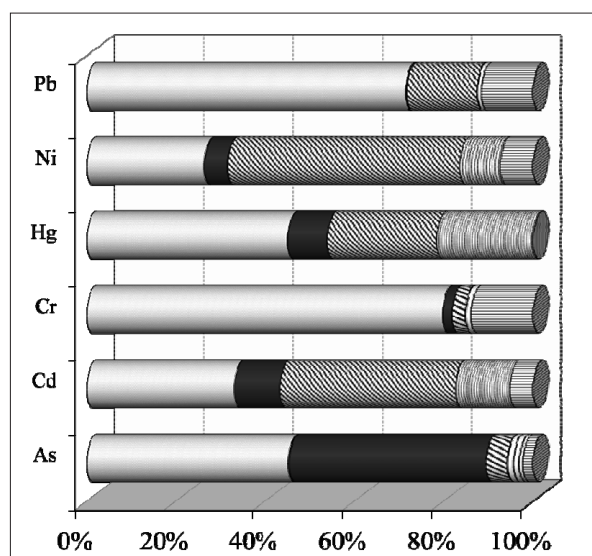


Fig. 2.2 – Contributo sul totale delle emissioni della metodologia di stima alle emissioni di ciascun inquinante, INEMAR 2008. (□ – dati medi provenienti da misure effettuate in Lombardia; ▨ – dati stimati sulla base della tipologia di sistemi di abbattimento utilizzati; ■ – dati medi reperiti nella letteratura scientifica; ▤ – dati medi utilizzati in altri inventari; ▥ – stima emissioni da traffico mediante COPERT IV; ▧ – dati provenienti da misure dirette su impianti in Lombardia)

inventari e l'estensione tramite fattori di emissione medi di misure specifiche in Lombardia. Queste misure dirette, pur avendo un peso limitato, offrono la possibilità di definire dei fattori di emissione medi di importanza rilevante nel quadro generale dell'inventario delle emissioni di metalli pesanti per la Lombardia nel 2008.

BIBLIOGRAFIA

- CEPMEIP**, (2003) Co-ordinated European Programme on Particulate Matter Emission Inventories. Projections and Guidance, www.air.sk/tno/cepmeip/.
- EEA** (2009) EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook — 2009 www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009.
- HELCOM** (2006) Atmospheric supply of nitrogen, lead, cadmium, mercury and lindane to the Baltic Sea over the period 1996–2000. Helsinki Commission, Baltic Marine Environment Protection Commission. Baltic Sea Environment Proceedings No. 101, Helsinki, Finland, www.helcom.fi.
- Hulskotte, J.H.J.; Schaap, M.; Visschedijk, A.J.H.** (2006) Brake wear from vehicles as an important source of diffuse copper pollution, 10th Int. Specialised Conference on Diffuse Pollution and Sustainable Basin Management, Sep. 18-22, 2006 Istanbul (Turkey).

Marongiu A. et al. (2012) L'inventario delle emissioni di metalli pesanti in Lombardia. Parte I: metodologia. Ingegneria Ambientale.

Pacyna, J.M.; Pacyna, E.G.; Aas, W. (2009) Changes of emissions and atmospheric deposition of mercury, lead, and cadmium. *Atmospheric Environment* 43, 117-127.

Pastorello, C.; Dilara, P. (2009) Estimation of residential wood combustion in the Lombardy Region (2009). Collaborative Research Project for Air Pollution Reduction in Lombardia (2006- 2010); JRC.

Rauterberg-Wulff, A. (1999) Determination of Emission Factors for Tire Wear Particles by Tunnel Measurements, 8th International Symposium 'Transport and Air Pollution', June 2002, Graz, Austria.

Sanders, P.G.; Xu, N.; Dalka, T.M.; Maricq, M. (2003) Airborne brake wear debris, size distributions, composition, and a comparison of dynamometer and vehicle tests *Environ. Sci. Technol.*, vol 37, pp. 4060-4069.

Theloke, J. (2008) Überarbeitung der Schwermetallkapitel im CORINAIR Guidebook zur Verbesserung der Emissionsinventare und der Berichterstattung im Rahmen der Genfer Luftreinhaltekonvention, Umweltbundesamt, Agenzia per la protezione dell'ambiente tedesca: www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3662.pdf.

US-EPA (2010) Versione on-line del database su fattori di emissione dell'US-EPA www.epa.gov/ttn/chief/software/fire/index.html.

CURRICULA

Alessandro Marongiu – Si è laureato in Ingegneria Chimica al Politecnico di Milano dove ha poi conseguito il Dottorato di Ricerca con una tesi sulla decomposizione termica dei polimeri. Per alcuni anni ha vissuto in Germania dapprima collaborando a differenti progetti di ricerca nel campo della pirolisi di biomasse presso il KIT di Karlsruhe e quindi occupandosi di soluzioni tecnologiche per lo scambio termico nell'ambito dell'industria chimica, alimentare e farmaceutica. È autore di pubblicazioni nel campo della pirolisi di polimeri e biomasse e degli inventari delle emissioni. Dal 2010 è dipendente di ARPA Lombardia dove collabora ai lavori dell'inventario emissioni Inemar.

Stefano Caserini – Laureatosi in Ingegneria Civile per la Difesa del Suolo e la Pianificazione Territoriale, ha conseguito il Dottorato di Ricerca in Ingegneria Sanitaria al Politecnico di Milano, ove attualmente è docente di Mitigazione dei Cambiamenti Climatici. Svolge attività di ricerca scientifica nel settore dell'inquinamento dell'aria, della stima e riduzione delle emissioni in atmosfera e dei cambiamenti climatici. Svolge attività di consulenza in materia di inquinamento atmosferico, inventari delle emissioni, impatto dei sistemi di trasporto e valutazioni di impatto ambientale. Per ARPA Lombardia coordina gli sviluppi del database Inemar. È autore di numerose pubblicazioni scientifiche e ha pubblicato nel 2008 il libro "A qualcuno piace caldo", e nel 2009 "Guida alle leggende sul clima che cambia", entrambi per Edizioni

Ambiente. È coordinatore del Comitato Scientifico del sito www.climalteranti.it.

Marco Moretti – Si è laureato in Fisica nel 1997 presso l'Università degli Studi di Milano, con una tesi di fisica ambientale sulle emissioni da impianti termici civili e da traffico autoveicolare. Dal 1997 al 1998 ha svolto un lavoro di approfondimento della tesi con contratto di consulenza professionale. Dal 1999 al 2003 ha avuto un incarico di collaborazione con la Fondazione Lombardia per l'Ambiente nell'ambito del "Piano Regionale di Qualità dell'Aria (PRQA)" per la realizzazione dell'Inventario Emissioni Aria in Lombardia dell'anno 1997 e per lo sviluppo del database INEMAR. Dal 2003 collabora presso ARPA Lombardia alla realizzazione dell'Inventario Emissioni Aria in Lombardia, continuando l'attività di sviluppo di INEMAR. È autore di 28 pubblicazioni.

Antognazza Federico – Ha conseguito nel 2008 presso il Politecnico di Milano la laurea magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio (indirizzo Tecnologie di risanamento ambientale), con una tesi sull'incertezza delle emissioni di gas serra da discariche. Da luglio 2008 a dicembre 2011 ha collaborato con Arpa Lombardia alla realizzazione dell'inventario INEMAR, con focus su emissioni da attività agroforestali e carbon sink. Attualmente collabora presso la UO Qualità dell'aria di ARPA Lombardia.

Angelo Giudici – Dopo la laurea in Chimica Industriale conseguita nel 1973, dal 1975 al 2002 ha svolto in Regione Lombardia, funzioni di istruttore tecnico per le autorizzazioni degli impianti industriali in particolare nei settori energetico, petrolchimico, chimica di base e farmaceutica, alimentare e cartotecnico, facendo parte del gruppo tecnico di supporto al CRIAL (Comitato Regionale Inquinamento Aria Lombardia). È stato rappresentante della Regione Lombardia in commissioni Ministeriali per la classificazione delle industrie insalubri, per il recepimento direttive U.E., autorizzazioni e VIA per grandi impianti. Dal 1997 al 2001 Project Leader del PRQA (Piano Regionale Qualità dell'Aria) della Regione Lombardia. Dal 2002 al 2011 è stato Direttore del settore Aria ed Agenti Fisici presso la sede centrale di ARPA Lombardia.

Elisabetta Angelino – Laureatasi in Fisica all'Università degli Studi di Milano, svolge sin dal 1990 attività del settore dell'inquinamento atmosferico, occupandosi di modelli meteorologici, di emissione e di dispersione, analisi dei dati di qualità dell'aria, reportistica ambientale. È attualmente responsabile della U.O. Modellistica Atmosferica del Settore Aria e Agenti Fisici di ARPA Lombardia, coordinandone le attività che comprendono l'applicazione di modelli meteo-dispersivi su scala regionale finalizzata all'analisi di scenari a supporto delle policy e alla ricostruzione dell'andamento spazio-temporale degli inquinanti, la gestione ed aggiornamento dell'inventario regionale, l'elaborazione di proiezioni delle emissioni di inquinanti. Ha partecipato a diversi progetti di ricerca regionali, nazionali ed europei. È membro di gruppi di lavoro regionali e nazionali, nell'ambito dei quali ha collaborato alla stesura di documenti di linee guida e rassegne nel settore della modellistica atmosferica e degli inventari di emissioni. La sua attività è documentata da diverse pubblicazioni scientifiche, rapporti e presentazioni a congressi.