



ANPA

Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente

**OSSERVATORIO DEI MODELLI SU SMOG
FOTOCHIMICO E OZONO TROPOSFERICO**

RTI CTN_ ACE 1/2001

ANPA

Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente

Dipartimento Stato dell'Ambiente, Controlli e Sistemi Informativi

Osservatorio dei modelli su smog fotochimico e ozono troposferico

Marco Deserti, ARPA Emilia – Romagna
Luca Spagli, ARPA Toscana
Gioia Bini, ARPA Toscana
Vanes Poluzzi, ARPA Emilia – Romagna
Luigi Minach, APPA Bolzano
Roberta de Maria, ARPA Piemonte
Gabriele Zanini, ENEA
Gianni Vialetto, ENEA
Giuseppe Brusasca, ENEL
Elisabetta Angelino, PMIP Milano
Francesca Liguori, ARPA Veneto

Responsabile di progetto ANPA
Franco Desiato



Responsabile CTN_ ACE
Gianfranca Galliani

Informazioni legali

L'Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente o le persone che agiscono per conto dell'Agenzia stessa non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in questo rapporto.

Informazioni aggiuntive sull'argomento sono disponibili nel sito Internet (<http://www.sinanet.ansa.it>).

Supervisione editoriale a cura di:

Daniele Violetti, in collaborazione con Francesca Fini (ARPA Emilia - Romagna).

Riproduzione autorizzata citando la fonte.

Stampato in Italia.

Stampato su carta ecologica.

Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente
Dipartimento Stato dell'Ambiente, Controlli e Sistemi Informativi
Via Vitaliano Brancati, 48
00144 Roma

Sommario

È stata realizzata una rassegna dell'applicazione di modelli fotochimici in Italia riferita all'anno 1999. La rassegna ha evidenziato come il maggior numero di studi sia stato eseguito nell'Italia settentrionale, considerando diversi episodi di inquinamento da ozono avvenuti in Lombardia ed Emilia - Romagna. Altri studi sono stati realizzati in Liguria, Lazio, Piemonte, Toscana, Puglia e Campania. La maggioranza di questi studi risulta tuttavia ancora preliminare. Alcune regioni stanno applicando modelli fotochimici nell'ambito dei Piani Regionali di Risanamento della Qualità dell'Aria, ma studi conclusivi non sono ancora disponibili per le decisioni politiche. Il modello fotochimico più largamente utilizzato in Italia è CALGRID. Sono stati inoltre utilizzati i codici UAM e STEM, assieme a vari altri modelli di dispersione per inquinanti non reattivi chimicamente. Gli aspetti critici della maggior parte degli studi sono in generale legati alla carenza di verifica e validazione dei modelli impiegati ed alla difficoltà nel reperire dati di emissione e meteorologici di buona qualità. Alcune campagne sperimentali sono state realizzate in Lombardia (sottoprogetti LOOP e SATURN del progetto EUROTRAC-2) e in Emilia - Romagna (progetto MOTAP realizzato dalle ARPA) allo scopo di ottenere dati utili alla verifica e validazione dei risultati delle applicazioni di modelli fotochimici.

Summary

A review of dispersion model applications in Italy was made in 1999 evidencing that larger number of investigations have been performed in Northern Italy considering different ozone episodes occurred in Lombardia and Emilia - Romagna. Other studies have been conducted in Liguria, Lazio, Piemonte, Toscana, Puglia and Campania region; nevertheless most of them are still preliminary. Some Regions are also applying photochemical models in the frame of Regional Air Quality Assessment and Planning, but conclusive studies are still unavailable for policy making. CALGRID is the more widely photochemical code used in Italy, UAM and STEM models have been also applied together with non reactive dispersion models. The critical aspects of these studies are generally related to the lack of model validation and verification, suitable emission data and good quality meteorological information. To provide proper data to be used to verify and to validate models results, experimental campaigns have been conducted in Lombardia (subprojects LOOP and SATURN in the frame of EUROTRAC-2 project) and in Emilia - Romagna (MOTAP Ozone Monitoring in the Po Valley, performed by regional environmental protection agencies).

Indice

SOMMARIO	I
SUMMARY	I
1. INTRODUZIONE	1
2. DETERMINAZIONE DELLE RELAZIONI PRESSIONI - STATO E CONTRIBUTO DELLA MODELLAZIONE	2
2.1 ASPETTI FENOMENOLOGICI	2
2.2 IL CONTRIBUTO DELLA MODELLAZIONE	3
3. RASSEGNA DI ESPERIENZE	3
3.1 ESPERIENZE NAZIONALI	4
3.1.1 <i>Carattere dell'applicazione</i>	4
3.1.2 <i>Area interessata</i>	4
3.1.3 <i>Modelli utilizzati</i>	4
3.1.4 <i>Attività svolte</i>	7
3.1.5 <i>Aspetti critici delle esperienze</i>	7
3.1.6 <i>Obiettivi / Utilizzo risultati</i>	9
3.1.7 <i>Considerazioni sulle esperienze nazionali</i>	11
3.2 ALCUNE ESPERIENZE IN EUROPA.....	12
4. INCERTEZZE	14
4.1 DATI DI INPUT - EMISSIONI E METEOROLOGIA	14
4.2 PROCESSORI METEOROLOGICI	14
4.3 DISAGGREGAZIONE SPAZIALE E RISOLUZIONE DEL DOMINIO	14
4.4 MODELLI CHIMICI	15
4.5 PROFILI DI SPECIAZIONE DEI COV.....	15
4.6 INCERTEZZE COMPLESSIVE.....	15
5. RISULTATI DELLE RETI OSSERVATIVE E DELLE CAMPAGNE SPERIMENTALI	16
5.1 LE RETI OSSERVATIVE	16
5.2 LE CAMPAGNE DI MISURA	17
5.2.1 <i>Le campagne di misura intensive</i>	17
BIBLIOGRAFIA	21

1. Introduzione

Questo documento rappresenta il risultato dell'attività relativa all'obiettivo del Centro Tematico Nazionale Atmosfera Clima Emissioni in Aria (CTN-ACE), denominato "Osservatorio dei modelli su smog fotochimico e ozono troposferico".

L'obiettivo specifico dell'attività è il seguente:

rassegna delle applicazioni e degli studi di validazione dei modelli finalizzati alla determinazione delle relazioni pressione - stato sull'inquinamento fotochimico; rassegna dei risultati più significativi delle campagne sperimentali e, più in generale, delle reti osservative; prima sintesi degli elementi conoscitivi che si possono derivare dalle due rassegne, finalizzata all'elaborazione di strategie di controllo e abbattimento dell'inquinamento, mettendo in rilievo le peculiarità dei fenomeni sul nostro territorio.

Il documento si compone di una parte di rassegna, finalizzata a rappresentare sinteticamente il quadro nazionale delle esperienze nel campo dell'applicazione, prova e validazione di modelli fotochimici, e da una parte di considerazioni e spunti di riflessione tratti dall'esame della rassegna di esperienze e della letteratura rilevante sull'argomento.

La rassegna è stata condotta attraverso la distribuzione del lavoro tra vari soggetti operanti nel settore della modellazione e dello studio dei processi fotochimici, ed interpellando in alcuni casi gli organismi regionali di riferimento per le informazioni sulla qualità dell'aria, già individuati dal CTN-ACE. Sono state descritte anche due esperienze straniere, "Ozon Aktionsprogramm und Massnahmenplan" e "Auto Oil II", che risultano significative sia per gli obiettivi che si pongono, sia per la dimensione dell'impegno, ed esemplificano in modo efficace la metodologia per l'applicazione di una catena di modelli complessi a supporto della pianificazione ambientale.

Si propone quindi un'analisi d'insieme del materiale raccolto, che vuol fare emergere soprattutto gli aspetti legati all'accuratezza dei modelli impiegati, alle attività di validazione, alla definizione di politiche di contenimento delle emissioni. Attenzione particolare è rivolta all'individuazione delle incertezze presenti nelle applicazioni modellistiche. La relazione è corredata da un'ampia bibliografia, contenente anche i riferimenti ai siti web di documentazione e da quattro appendici tecniche, disponibili in formato elettronico sul sito web SINANET di ANPA, nella sezione documenti relativi alla Qualità dell'aria (<http://www.sinanet.anpa.it/aree/atmosfera/qaria/Doc.asp>).

L'appendice 1 riporta integralmente le schede descrittive delle esperienze esaminate. La parte che contiene le considerazioni e gli spunti di riflessione è stata redatta sulla base di contributi individuali dei partecipanti ed è perciò riportata separatamente nelle appendici da 3 a 4.

L'appendice 2 (Tamponi e Bellasio, 1999) descrive con maggior dettaglio un esempio applicativo di modellazione fotochimica in Lombardia che fornisce spunti di riflessione per la formulazione di strategie di controllo, poi approfondite nell'appendice 3.

Nell'appendice 3 (Deserti, 1999) vengono presi in esame gli elementi, deducibili dalle esperienze esaminate, per la formulazione di possibili strategie di controllo e abbattimento dell'inquinamento fotochimico.

Nell'appendice 4 (Tamponi e Bellasio, 1999) vengono infine passati in rassegna i risultati delle reti osservative e delle campagne sperimentali, formulando alcune indicazioni preliminari per l'utilizzo di dati provenienti da campagne di misura e dalle reti ai fini della validazione, verifica e taratura dei modelli fotochimici.

2. Determinazione delle relazioni pressioni-stato e contributo della modellazione

Esistono molteplici evidenze di un aumento della concentrazione dell'ozono nella troposfera e, al momento, la situazione appare lontana dall'essere sotto controllo (Borrell, 1999). Alle medie latitudini dell'emisfero nord il livello dell'ozono è aumentato dal secolo scorso di 3-4 volte in superficie e nella libera troposfera (Voltz e Kley, 1988; Sandroni ed Anfossi, 1995). Inoltre, a partire dagli anni '50, le medie giornaliere misurate in aree rurali dell'Europa continentale mostrano un aumento dell'1 - 2% per anno, con un raddoppio alla fine degli anni '80 dei livelli di ozono da 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Staehelin et al., 1994).

All'incremento dei valori medi si accompagnano, durante la stagione estiva, episodi di accumulo nello strato rimescolato, con un aumento del numero, della durata e dell'estensione di episodi di inquinamento da ozono. Durante tali episodi la concentrazione dell'ozono facilmente raggiunge valori fino a 200-400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Crutzen (1973) ha mostrato che l'ozono è generato all'interno della troposfera per l'ossidazione, promossa dalla radiazione solare, dei composti atmosferici reattivi di carbonio, ossido di carbonio, metano ed altri idrocarburi e composti organici (COV, Composti Organici Volatili o anche, ROG, "Reactive Organic Gases") in presenza di ossidi di azoto, NO ed NO₂ (NO_x, ossidi di azoto). Questo meccanismo si è rafforzato nel tempo per le crescenti immissioni in troposfera di precursori (COV e NO_x) ed i modelli oggi stimano che il 90% circa del flusso di O₃ in troposfera (il 100% circa nello strato rimescolato) sia da attribuire alla sorgente fotochimica e solo per il 10% al trasporto dalla stratosfera (Restelli, 1999).

2.1 Aspetti fenomenologici

Nella libera troposfera l'O₃ è generato dalla foto - ossidazione dell'ossido di carbonio e del metano e dagli altri COV reattivi e più persistenti in atmosfera emessi alla superficie, in presenza di ossidi di azoto, NO_x, prodotti dai fulmini o trasportati dalla bassa troposfera attraverso composti azotati "serbatoio", prodotti dalla chimica dello strato rimescolato inquinato (Restelli e Zanderighi, 1997).

Nella libera troposfera il limite al processo di generazione dell'ozono è dato dal livello degli NO_x, insufficienti a sostenere una produzione netta di O₃ in ampie zone della troposfera (Crutzen, 1995).

Nella bassa troposfera, alla foto - ossidazione di CO e CH₄ si aggiunge quella degli idrocarburi reattivi, di origine antropica e naturale, che reagiscono all'interno dello strato rimescolato; sulle aree continentali abitate, il livello dei NO_x è in genere sufficiente alla generazione di O₃ (Sillman, 1999).

I processi di combustione ad alta temperatura sono sorgenti importanti di NO_x; nelle aree urbane e suburbane il traffico auto veicolare ha, in genere, un peso predominante (Seinfeld e Pandis, 1998). Il circuito del carburante (produzione, distribuzione ed uso), l'industria e l'impiego dei solventi organici sono le sorgenti principali dei COV (Derwent et al. 1996; Leggett, 1996; Borrell, 1999). In alcune aree, l'emissione di idrocarburi dalla vegetazione rappresenta un contributo che può essere confrontabile o addirittura predominante rispetto a quello delle emissioni antropiche (Guenther, 1995; Simpson et al., 1995; Maffei et al., 1999).

Le trasformazioni chimico-fisiche che portano alla produzione di ossidanti fotochimici risultano articolate, non lineari e fortemente accoppiate (Sillman, 1990). Questa complessità si manifesta anche nella struttura tridimensionale del fenomeno dovuta ai trasporti orizzontali e verticali di masse d'aria di origini diverse, indotti dai flussi regolari di quantità di moto media e dai flussi

turbolenti di energia cinetica che caratterizzano la circolazione a scala sinottica, a mesoscala e a microscala dell'area in esame (Millan et al., 1996).

2.2 *Il contributo della modellazione*

La complessa struttura spaziale e la natura fortemente non lineare dei processi che portano alla produzione di ozono comportano l'utilizzo di modelli euleriani 3D fotochimici. Questi modelli negli Stati Uniti rivestono un ruolo molto importante anche dal punto di vista giuridico. Infatti, con l'emanazione del CAAA-90 (Clean Air Act Amendments of 1990), per le aree di non rispetto dei NAAQS (National Ambient Air Quality Standard) per l'ozono e classificate come "serious", "severe" ed "extreme" è richiesta l'applicazione di modelli fotochimici a griglia, quali UAM (Urban Airshed Model).

Apposite simulazioni verificano a priori le misure proposte di controllo delle emissioni atmosferiche e il raggiungimento del rispetto degli NAAQS (Saylor et al., 1999). Questo ruolo è dovuto anche al fatto che i modelli euleriani fotochimici forniscono un quadro "teorico" apparentemente coerente nell'individuazione dei fattori limitanti nella produzione di ozono e quindi, in principio, possono fornire delle indicazioni su come orientare le strategie di riduzione delle emissioni, scegliendo ad esempio una strategia "NO_x oriented" piuttosto che "VOC oriented" (Sillman, 1999).

Anche in Europa, con il protocollo di Goteborg, vengono fissati per la prima volta dei tetti di riduzione delle emissioni basati sugli effetti che sono stati quantificati attraverso l'utilizzo di un modello di valutazione integrata. In questo modo il modello di valutazione viene a costituire una metodologia standardizzata convenzionale per lo stesso protocollo. Inoltre la Direttiva 96/62/CE prevede l'utilizzo di modelli matematici nella valutazione preliminare della qualità dell'aria in sostituzione e/o a integrazione delle misure nella valutazione della qualità dell'aria, qualora le concentrazioni degli inquinanti siano al di sotto di valori di riferimento prefissati. In questi casi la modellistica euleriana può rappresentare lo strumento principale per la costruzione di mappe di inquinamento e seguirne l'evoluzione temporale, tenendo conto dei carichi emissivi e delle condizioni meteorologiche.

3. Rassegna di esperienze

La raccolta delle informazioni è stata effettuata mediante la distribuzione di una "scheda" finalizzata a raccogliere ed evidenziare i caratteri salienti delle esperienze italiane. Il contenuto della scheda è riportato in Tabella 1.

Le Agenzie Regionali per la Protezione dell'Ambiente (ARPA), le organizzazioni di ricerca pubblica o privata e gli uffici regionali o provinciali con competenze in materia di inquinamento atmosferico sono stati i compilatori diretti della scheda o hanno indicato i soggetti impegnati, permettendo un'analisi estesa a tutto il territorio nazionale.

Sono state descritte anche due esperienze straniere, "Ozon Aktionsprogramm und Massnahmenplan" e "Auto Oil II", che risultano significative sia per gli obiettivi che per la dimensione dell'impegno, ed esemplificano in modo efficace la metodologia per l'applicazione di una catena di modelli complessi in funzione della pianificazione.

Sono state compilate in totale 24 schede descrittive di progetti, presentate in dettaglio nell'appendice 1. Nel seguito viene presentata un'analisi sintetica dei risultati della rassegna.

Tabella 1: Scheda descrittiva di modello, progetto od esperienza di applicazione e validazione di modelli.

Titolo del progetto/attività
Carattere dell'applicazione
Valutazione preliminare/analisi di scenari/comunicazione al pubblico

Obiettivi
Periodo/durata
Partecipanti
Area interessata
Attività svolte
Quale modello è stato scelto e perché
Confronto e validazione
Principali criticità incontrate
Principali risultati ottenuti
Utilizzo dei risultati
Conoscenza/descrizione di altre applicazioni

Riferimenti bibliografici ed eventuali siti internet

3.1 Esperienze nazionali

Nella Tabella 2 sono elencate le esperienze di cui sono state raccolte le informazioni, e vengono riportate, per ciascuna di esse, il tipo di esperienza, l'area esaminata ed i modelli utilizzati.

3.1.1 Carattere dell'applicazione

Le iniziative sono frutto di intese fra Amministrazioni Pubbliche ed Enti di Ricerca o Università oppure sono svolte nell'ambito di collaborazioni internazionali. Significativa la presenza di società private che agiscono per conto di un committente pubblico; esse si segnalano soprattutto per la complessità degli interventi a testimonianza di un alto livello di competenza.

Il baricentro delle attività è decisamente il nord del Paese, in particolare molte esperienze sono state realizzate in Lombardia. Occorre sottolineare il carattere propedeutico o preliminare all'effettivo utilizzo di modelli fotochimici di alcune delle applicazioni segnalate: si tratta soprattutto di esperienze finalizzate alla diagnosi/prognosi di situazioni meteorologiche favorevoli agli episodi di smog fotochimico, oppure di attività finalizzate a comprendere le risposte fornite da un particolare meccanismo chimico ed il suo possibile utilizzo ottimale.

3.1.2 Area interessata

I domini di simulazione sono sempre dell'ordine di decine di chilometri quadrati, mentre la simulazione a microscala viene effettuata innestando più modelli in sequenza fino al dettaglio di una o più singole arterie stradali.

3.1.3 Modelli utilizzati

Il numero di modelli fotochimici utilizzati in Italia è ridotto. La comunità nazionale, nonostante la carenza di indicazioni e standards, utilizza alcuni modelli fotochimici allo stato dell'arte, che

vengono generalmente ritenuti consolidati, accessibili (in termini di acquisizione) e ben documentati: è il caso dei modelli più diffusi, CALMET e CALGRID.

La simulazione dei campi di vento e dei principali parametri meteorologici è effettuata con modelli idrostatici a conservazione di massa, e a partire da misure al suolo e profili verticali in pochi punti (anche uno solo) all'interno del dominio; solo in poche situazioni sono utilizzati modelli non idrostatici.

Decisamente isolato l'impiego di un modello a box, noto per la relativa semplicità dell'input, a cui vengono preferiti modelli di gran lunga più complessi, come gli euleriani a griglia o quelli a particelle.

I modelli fotochimici sono, salvo un'eccezione, con chimica in fase gassosa e secca.

Tabella 2: Esperienze in Italia: tipo di esperienza, area esaminata e modelli utilizzati (il numero tra parentesi indica il riferimento alle schede di appendice 1).

TITOLO DEL PROGETTO	CARATTERE APPLICAZIONE	AREA INTERESSATA	MODELLI UTILIZZATI
Qualità dell'aria nell'area metropolitana torinese (1)	Valutazione/validazione di un modello diagnostico anemologico	Dominio di 60 km ² centrato su Torino	MINERVE
Applicazione di un modello fotochimico a box su siti costieri (2)	Analisi degli scenari	Ravenna e Valle dell'Esino (AN)	PBM (Photochemical Box Model)
Inquinamento atmosferico nelle Valli della P.A. di Bolzano (3)	Ricostruzione campi di vento; validazione modello dinamico; creazione di una rete meteorologica	Le principali valli della Provincia Autonoma di Bolzano	TVM, MCCM. CALMET in previsione di CALPUFF e CALGRID
Redazione piano di risanamento e tutela Q.A. Regione Liguria (4)	Piano di risanamento, ricerca, applicazione modelli	Aree Metropolitane di Genova, La Spezia, Savona	ISC3 (Short and long term), CALMET, SAFE-AIR, OCS, CALGRID
INTERREG2 (5)	Valutazione preliminare, analisi degli scenari	Provincia di Livorno	DALAM, MINERVE, SPRAY, HERMES
Studio conoscitivo su condizioni meteo ed inquinamento chimico (6)	Ricerca, analisi degli scenari, comunicazione al pubblico	Province di Prato, Pistoia, Firenze	DALAM, MINERVE, SPRAY, HERMES
Validazione del modello LAM (7)	Valutazione del modello meteo come pre-processore	Venezia	LAMBO
Modellistica chimica dell'atmosfera (8)	Ricerca	Regione Lombardia, Pianura Padana	RAMS, CALGRID, STEMII, STEMIII, MAPS
Ottimizzazione di prodotti petroliferi nel rispetto dell'ambiente (9)	Ricerca	Regione Lombardia	CALMET, CALGRID
Valutazione delle strategie di abbattimento dell'inquinamento da traffico (10)	Ricerca, applicazione di un sistema di modelli	Dominio di 40 km ² centrato su Milano	CALMET, CALGRID
Modellistica chimica dell'atmosfera nell'area metropolitana milanese (11)	Ricerca/applicazione modelli	Dominio di 100 km ² centrato su Milano	CALMET, CALGRID
Modellistica chimica dell'atmosfera per la Lombardia (12)	Ricerca/applicazione modelli	Regione Lombardia: dominio 240x232 km ²	MINERVE, CALMET, CALGRID, STEMII

Tabella 2 (continuazione): Esperienze in Italia: tipo di esperienza, area esaminata e modelli utilizzati.

TITOLO DEL PROGETTO	CARATTERE APPLICAZIONE	AREA INTERESSATA	MODELLI UTILIZZATI
SATURN (13)	Ricerca, applicazione e validazione modelli, simulazione di scenari, attività sperimentali	Regione Lombardia; dominio 240x232 km ²	CALMET, CALGRID
MOTAP (14)	Valutazione preliminare, analisi degli scenari, comunicazione al pubblico	Emilia - Romagna, Pianura Padana	CALMET, CALGRID
Modellistica ambientale nell'area metropolitana di Bologna(15)	Valutazione Q.A., analisi degli scenari, pianificazione	Area metropolitana di Bologna	CALMET, CALGRID, PBM
Ambito Progetti POP – Regione Puglia (16)	Valutazione Q.A.	Regione Puglia	RAMS, CALMET, CALGRID
Piano regionale di risanamento Q.A. Regione Lazio (17)	Piano di risanamento	Regione Lazio	Microscala: CALINE3, CALINE4, ISC, OCD; Mesoscala: CALMET, CALGRID
Inquinamento fotochimico Regione Campania (18)	Valutazione preliminare, analisi degli scenari, ricerca processi fotochimici	Regione Campania	Parallel Naples Airshed Model (PNAM)

La successiva Tabella 3 riporta sinteticamente le attività svolte in ciascuna applicazione, i principali aspetti critici segnalati dai compilatori della tabella e gli obiettivi finali per i quali le attività sono state condotte.

3.1.4 Attività svolte

La maggior parte delle applicazioni vede la messa a punto di uno o più modelli, la simulazione di episodi di inquinamento o di particolari condizioni dinamiche, il confronto con dati misurati da reti di misura e la successiva messa a punto dei modelli per la loro applicazione sull'area di interesse. In pochi casi vengono condotte simultaneamente campagne sperimentali finalizzate alla verifica delle simulazioni modellistiche, mentre nella quasi totalità delle applicazioni si utilizzano per la verifica dati già disponibili in letteratura o in basi di dati.

3.1.5 Aspetti critici delle esperienze

Un discorso a parte meritano le criticità evidenziate nell'analisi delle esperienze che per semplicità possiamo ascrivere a due grandi categorie:

- criticità esterne al modello, rappresentate dai problemi legati alla difficoltà di reperire i dati per l'input (quali ad esempio le emissioni), alla complessa preparazione dell'input meteorologico o alla difficile scelta delle stazioni di misura su cui effettuare la verifica delle prestazioni del modello;

- criticità interne al modello, che risultano principalmente legate agli aspetti teorici relativi al modo in cui viene formulata la trattazione dei fenomeni chimico - fisici rilevanti ai fini della applicazione specifica all'interno del modello utilizzato.

Criticità esterne

L'elemento comune alle esperienze esaminate è rappresentato dalla complessa preparazione dei dati di ingresso necessari all'applicazione di un modello fotochimico. Le modalità in cui sono state risolte le problematiche connesse alla preparazione dei dati di ingresso sono assai varie ed in ciascuna realtà sono state studiate soluzioni diverse. Questa carenza di basi comuni rappresenta un elemento che rende poi difficilmente confrontabili tra loro le varie esperienze.

Le maggiori difficoltà riguardano il reperimento delle informazioni meteorologiche alla scala e con l'accuratezza dettate dalle applicazioni modellistiche e la mancanza di disponibilità di dati di emissione che coprano la scala spaziale necessaria (mesoscala) e che siano sufficientemente dettagliati nello spazio e nel tempo, in grado di fornire tutte le specie chimiche richieste (speciazione).

In entrambi i casi è evidente che nelle fonti di dati meteorologici ed emissivi ordinariamente disponibili nulla è pensato per il successivo utilizzo in un modello. Se la diagnosi meteorologica alla scala locale o alla mesoscala è ormai un'attività molto diffusa anche nel nostro Paese, per quanto riguarda invece gli inventari delle emissioni il panorama è più problematico.

Gli inventari infatti, salvo rare eccezioni, non hanno il dettaglio spazio - temporale necessario ai modelli e non considerano alcuna speciazione degli idrocarburi.

Per quest'ultima solitamente ci si affida alla letteratura, mentre sarebbe corretto avere anche composizioni esemplari per siti caratteristici del nostro Paese.

Ulteriori elementi di difficoltà sono inoltre legati al reperimento delle informazioni iniziali ed al contorno sotto forma di campi 3D di tutte le specie chimiche richieste, nonché alla carenza di studi di validazione e verifica, in particolare appare evidente come le reti di monitoraggio, alle quali ci si riferisce nelle fasi di verifica delle applicazioni modellistiche, non essendo disegnate per tali scopi, non forniscano spesso i dati necessari sia in termini di specie chimiche rilevate, sia in termini di localizzazione delle stazioni (si veda al proposito l'appendice 4).

Criticità interne

Queste criticità riguardano principalmente la formulazione utilizzata all'interno del modello per trattare i processi fisico - chimici che risultano più rilevanti ai fini della descrizione dei fenomeni studiati. Ciascun modello utilizza in genere uno specifico meccanismo chimico condensato, che tratta in modo semplificato le complesse trasformazioni fisico - chimiche che avvengono nell'atmosfera reale e che coinvolgono centinaia di specie chimiche diverse e dipendono, talvolta in modo stringente, dalle caratteristiche dell'atmosfera locale. Alcuni processi fotochimici, quali le reazioni in fase acquosa o eterogenea, potrebbero ad esempio risultare particolarmente rilevanti in alcune aree del nostro Paese, quali la Pianura Padana o le zone costiere, caratterizzate da condizioni di elevata umidità e presenza di particolato. Altri processi fortemente dipendenti dalle condizioni locali sono quelli legati a particolari emissioni biogeniche, tipiche delle vegetazioni presenti nelle differenti zone climatiche. A rigore quindi, nell'utilizzazione di un particolare schema chimico si dovrebbe valutare con attenzione l'opportunità di un'applicazione a condizioni molto diverse da quelle per le quali è stato messo a punto il modello applicato. I modelli finora più diffusi in Italia (CALGRID, UAM) utilizzano ad esempio meccanismi chimici messi a punto negli USA, che modellano i processi in fase gassosa ed atmosfera secca.

Un ulteriore punto che occorre considerare è che la valutazione delle eccedenze dei livelli di riferimento per la qualità dell'aria richiede, per soddisfare la normativa di riferimento, che le valutazioni vengano condotte su una scala temporale almeno annuale; gli studi passati in rassegna si

limitano invece a simulazioni di alcuni giorni, in quanto le attuali caratteristiche dei modelli fotochimici applicati rendono onerosa o difficoltosa l'esecuzione di simulazioni di lunga durata.

3.1.6 Obiettivi / Utilizzo Risultati

La vocazione dichiarata dalla gran parte delle applicazioni è di fornire indicazioni a sostegno di politiche di riduzione delle emissioni entro il dominio considerato.

Tabella 3: Esperienze in Italia, attività svolte in ciascuna applicazione, i principali aspetti critici segnalati dai compilatori della tabella e gli obiettivi finali con i quali le attività sono state condotte (il numero tra parentesi indica il riferimento alle schede di appendice 1).

TITOLO DEL PROGETTO	ATTIVITÀ SVOLTE	CRITICITÀ INCONTRATE	OBIETTIVI / UTILIZZO RISULTATI
Qualità dell'aria nell'area metropolitana torinese (1)	Campagne SODAR, analisi sensibilità modello, validazione con dati SODAR	Elevata complessità orografica del sito	Indicazioni propedeutiche per l'utilizzo modelli di dispersione
Applicazione di un modello fotochimico a box su siti costieri (2)	Messa a punto del modello, analisi di sensibilità all'input, raccolta dati meteo ed emissioni	n.d.	Definizione di zone "VOC o NO _x limited"; la ricerca è in corso
Inquinamento atmosferico nelle Valli della P.A. di Bolzano (3)	Campagna SODAR, rete meteo con 10 stazioni; simulazioni con i modelli; campagna ozono	n.d.	Ricerca in corso; analisi degli scenari meteorologici per prognosi inquinamento
Redazione piano di risanamento e tutela Q.A. Regione Liguria (4)	Utilizzo modelli nelle aree urbane; verifica performances mediante confronto con dati rete	Disponibilità di inputs meteorologici	Definizione di politiche; scelta dei modelli, definizione struttura dati meteo
INTERREG2 (5)	Applicazione dei modelli per accoppiamento scenari meteo e scenari emissivi	n.d.	Ricostruzione campi di vento, ricostruzione mappe di concentrazione, definizione mappe di rischio ambientale
Studio conoscitivo su condizioni meteo e inquinamento chimico (6)	Ricostruzione campi di vento, previsione meteo, ricostruzione di mappe SO _x , campagne RASS e SODAR	Oneroso il reperimento dei dati di input necessari	Divulgazione dei risultati delle previsioni meteo a 24, 48, 72 ore tramite web

Tabella 3 (continuazione): Esperienze in Italia, attività svolte in ciascuna applicazione, i principali aspetti critici segnalati dai compilatori della tabella e gli obiettivi finali con i quali le attività sono state condotte.

TITOLO DEL PROGETTO	ATTIVITÀ SVOLTE	CRITICITÀ INCONTRATE	OBIETTIVI / UTILIZZO RISULTATI
Validazione del modello LAM (7)	Validazione del modello LAM mediante confronto di misure meteo	Selezione stazioni meteorologiche	Propedeutico per un sistema di previsione dell'inquinamento atmosferico
Modellistica chimica dell'atmosfera (8)	Messa a punto STEMII confronto STEMII CALGRID, applicazione modulo aerosol(STEMIII o MAPS)	Tempi di calcolo dilatati dalla fase gassosa; interfaccia complessa con modelli meteorologici	Introduzione della fase liquida e del trattamento aerosol nei modelli fotochimici; ricerca in corso
Ottimizzazione dei prodotti petroliferi nel rispetto dell'ambiente (9)	Applicazione dei modelli e ricostruzione di un episodio di smog fotochimico	Comprensione del meccanismo chimico	Determinazione di scenari attendibili sulla relazione qualità carburanti - concentrazioni d'ozono
Valutazione delle strategie di abbattimento dell'inquinamento da traffico (10)	Predisposizione catena modelli, riproduzione di episodio di smog fotochimico, analisi di sensibilità al variare delle emissioni	n.d.	Ricerca in corso; valutazione delle politiche sull'inquinamento fotochimico nell'area milanese
Modellistica chimica dell'atmosfera nell'area metropolitana milanese (11)	Messa a punto del sistema di modelli, simulazione di un episodio, valutazione degli interventi di controllo emissioni	Scelta del dominio di calcolo e delle condizioni al contorno; sovrastima consumo notturno di ozono	Metodo di disaggregazione spazio-temporale e speciazione emissioni; riconoscimento della responsabilità dei VOC negli episodi acuti
Modellistica chimica dell'atmosfera per la Lombardia (12)	Messa a punto di un processore emissioni e di STEMII, simulazione di un episodio, valutazione degli interventi sulle emissioni	Inventari delle emissioni, condizioni iniziali ed al contorno	Individuazione di diversi regimi: zona VOC limited per l'area milanese e NO _x limited per la regione prealpina

Tabella 3 (continuazione): Esperienze in Italia, attività svolte in ciascuna applicazione, i principali aspetti critici segnalati dai compilatori della tabella e gli obiettivi finali con i quali le attività sono state condotte.

TITOLO DEL PROGETTO	ATTIVITÀ SVOLTE	CRITICITÀ INCONTRATE	OBIETTIVI / UTILIZZO RISULTATI
SATURN (13)	Misure ozono, aldeidi, VOC in verticale, misure turbolenza e profili meteo, simulazione episodio, definizione scenari	Carenza di finanziamenti per le campagne di misura	Conoscenza dei profili verticali, migliore parametrizzazione della turbolenza in sito urbano
MOTAP (14)	Misure ozono rurali e verticali, applicazioni di modelli meteorologici e fotochimici	Scelta del dominio di calcolo, condizioni al contorno, emissioni non dettagliate	Comunicazione al pubblico, disegno della rete, set di dati per la valutazione dei modelli
Modellistica ambientale nell'area metropolitana di Bologna (15)	Applicazione dei modelli	Scelta del dominio di calcolo, condizioni al contorno, emissioni non dettagliate	Ricerca in corso
Ambito progetti POP – Regione Puglia (16)	Inventario delle emissioni, messa a punto di modelli per non reattivi e processori meteo	Speciazione degli idrocarburi	Ricerca in corso, orientata alla formazione di personale per ARPA Puglia e approfondimento tematico
Piano regionale di risanamento Q.A. Regione Lazio (17)	Inventario delle emissioni, sistema cartografico, moduli sistema informativo	n.d.	Attività in corso; pianificazione degli interventi sulle emissioni
Inquinamento fotochimico Regione Campania (18)	Raccolta di dati territoriali, test di alcuni schemi chimici, parallelizzazione dei codici di calcolo	Difficoltà nella simulazione meteorologica e nella preparazione dell'inventario delle emissioni	Ricerca in corso; individuazione di 10 scenari per razionalizzare il trasporto; approfondimento

3.1.7 Considerazioni sulle esperienze nazionali

Dalla rassegna effettuata risulta quanto il panorama delle esperienze nazionali sia vivo, nonostante l'esiguità dei finanziamenti, la frantumazione degli sforzi e l'oneroso lavoro di preparazione necessario all'applicazione di modellistica fotochimica. In alcuni casi, quando le esperienze sono ripetute sullo stesso territorio e si prolungano con continuità per alcuni anni, si è in grado di formulare con ragionevole accuratezza politiche di gestione della qualità dell'aria ed in particolare dei fenomeni di inquinamento fotochimico.

Tra le iniziative esaminate, nessuna tuttavia ha finora condotto come risultato finale alla formulazione di un piano di azioni effettivamente utilizzato per elaborare politiche di gestione della qualità dell'aria.

È evidente l'esigenza di disporre di dati sperimentali e reti di rilevamento, dati territoriali, inventari delle emissioni e dati meteorologici orientati all'utilizzo di modelli di dispersione e trasformazione chimica in atmosfera. Si raccomanda quindi che il disegno delle reti di rilevamento, l'organizzazione dei dati territoriali, la raccolta dei dati di emissione e la fornitura di dati meteorologici tengano in considerazione il possibile utilizzo di modelli di dispersione e trasformazione chimica degli inquinanti.

È inoltre auspicabile una maggiore organicità nella realizzazione di esperienze di applicazione di modelli, tenendo in considerazione sia gli aspetti strettamente modellistici che fenomenologici e sperimentali. Le esperienze dovrebbero essere condotte a scale sufficientemente estese per la simulazione dei fenomeni a mesoscala. Per la realizzazione di studi modellistici di fenomeni complessi come l'inquinamento fotochimico sono inoltre richieste risorse adeguate sia dal punto di vista finanziario che tecnico - scientifico.

Infine, si riscontra la necessità di promuovere uno sforzo comune per colmare il divario rispetto ad altri Paesi europei e per incorporare progressivamente nella modellistica le problematiche di frontiera quali la modellazione del particolato fine e l'introduzione della fase liquida e degli aerosol.

Per esemplificare questi concetti e considerato che, da quanto emerge dai risultati della rassegna, in Lombardia nell'ultimo decennio si è svolta l'attività più intensa e continuativa a livello italiano (Lozej, 1999; Silibello et al., 1998; Angelino et al., 1998; De Martini et al., 1998; Quaranta et al., 1998), in appendice 2 viene descritta una delle esperienze di modellazione più recenti condotte in tale regione.

3.2 Alcune esperienze in Europa

Come è già stato osservato precedentemente, la rassegna condotta ha evidenziato che, tra le iniziative nazionali, nessuna finora (dati riferiti al 1999) ha portato come risultato finale alla formulazione di un piano di azioni effettivamente utilizzato per elaborare politiche di gestione della qualità dell'aria. Sono state quindi prese in esame alcune esperienze europee esemplificative di un approccio che utilizza i modelli fotochimici allo scopo di formulare politiche di gestione della qualità dell'aria. Tra queste ne sono state selezionate due, un programma tedesco, "Ozon aktionsprogramm und Massnahmenplan" ed un programma della Comunità Europea, "AUTO OIL II", che vengono qui descritte a scopo esemplificativo. Le Tabelle 4 e 5 sintetizzano gli elementi caratteristici delle due esperienze analizzate; entrambe le attività sono dedicate alle analisi di scenario su aree metropolitane vaste, ed in ciascuna vengono impiegati modelli ampiamente documentati nella letteratura scientifica, anche se applicati su domini di diverse dimensioni.

Tabella 4: Esperienze in Europa: tipo di esperienza, area esaminata e modelli utilizzati.

TITOLO DEL PROGETTO	CARATTERE APPLICAZIONE	AREA INTERESSATA	MODELLI UTILIZZATI
Ozon aktionsprogramm und Massnahmenplan (19)	Analisi scenari	Aree metropolitane di Berlino, Dresda e Francoforte (D)	EURAD, REM3, CALGRID
AUTO OIL II (20)	Analisi scenari	10 aree metropolitane in Europa	Street canyon: OSPM, microCALGRID; scala locale: UAM IV, UAM V, CALGRID; mesoscala: EUAM

Il Programma tedesco finanziato dal Governo Federale e realizzato da un consorzio fra Università e società di ingegneria, ha messo a punto uno schema modellistico basato sui modelli EURAD, REM3 e CALGRID, come indicato in Tabella 4. Nel corso del programma le prestazioni dei modelli sono state verificate mediante il confronto con i dati di stazioni di monitoraggio della rete nazionale tedesca, giungendo ad indicare le misure locali di riduzione delle emissioni, classificandole in base alla loro efficacia nel ridurre i picchi di ozono. Gli scenari emissivi considerati sono stati formulati in conformità a quanto previsto dalla legislazione europea e nazionale, con la prevista evoluzione fino al 2005.

Dallo studio emerge lo scarso rilievo delle azioni locali, soprattutto se temporanee, nella mitigazione degli episodi acuti di ozono. Di gran lunga più efficaci le misure strutturali che consentono una riduzione di NO_x e VOC a livello nazionale. La classificazione dei provvedimenti fornita dal programma tedesco costituisce uno strumento di orientamento per le azioni degli Amministratori locali che possono scegliere un pacchetto di misure sulla base della valutazione della sua maggiore o minore efficacia.

Il Programma AUTO OIL II, realizzato su iniziativa della DG XI, si articola su diverse tematiche, di cui quella prettamente ambientale è l'evidente sintesi. L'obiettivo, indicato sinteticamente in Tabella 5, è stato perseguito attraverso un utilizzo intenso ed esteso di una ampia gamma di modelli che vanno dai modelli di simulazione delle emissioni associate a diversi sistemi e modalità di trasporto stradale ai modelli di diffusione e trasformazione chimica degli inquinanti in atmosfera, fino all'utilizzo di modelli per il calcolo dei costi da sopportare per la messa in opera delle politiche di riduzione.

Il programma AUTO OIL si è occupato di valutare l'impatto sulla qualità dell'aria di 10 città del continente (Helsinki, Lione, Berlino, Colonia, Atene, Dublino, Milano, Utrecht, Madrid e Londra) delle nuove misure previste dalla normativa europea su motori, carburanti e altre misure non tecniche.

Tabella 5: Esperienze in Europa: attività svolte in ciascuna applicazione, i principali aspetti critici e gli obiettivi finali con i quali le attività sono state condotte.

<i>TITOLO DEL PROGETTO</i>	<i>ATTIVITÀ SVOLTE</i>	<i>CRITICITÀ INCONTRATE</i>	<i>OBIETTIVI / UTILIZZO RISULTATI</i>
Ozon aktionsprogramm und Massnahmenplan	Modellistica meteorologica e fotochimica	n.d.	Determinazione dell'efficacia di misure di riduzione delle emissioni nella riduzione dei picchi di ozono
AUTO OIL II	Modellistica meteorologica, fotochimica, analisi costi - benefici	Raccolta e integrazione informazioni dai domini; selezione episodi e stazioni di misura per la validazione	Definire quali politiche su motori e carburanti possono condurre i 10 domini urbani entro gli obiettivi di qualità dell'aria nel 2010

Il programma AUTO OIL è stato utilizzato come base per l'emanazione di una serie di direttive che hanno introdotto le nuove marmitte, eliminato il piombo dalle benzine e imposto nuovi e più stringenti limiti alle emissioni da motori per auto-trazione, indicando quindi una metodologia con la quale definire le politiche della qualità dell'aria a livello comunitario.

Questo fatto, al di là delle discussioni sulla maturità dei modelli, indica l'esigenza anche a livello nazionale di uno sforzo organico per la messa a punto di analoghi strumenti senza i quali il controllo di importanti decisioni comunitarie, che possono avere profonde ripercussioni sul nostro sistema produttivo ed economico, può essere solo tardivo e scarsamente fondato.

4. Incertezze

Anche i migliori modelli fotochimici euleriani attualmente in uso sono soggetti ad incertezze non trascurabili connesse alla descrizione incompleta di fenomeni chimico - fisici rilevanti (tra cui le cinetiche chimiche), la non adeguata considerazione della formazione degli aerosoli secondari (Jacobson, 1997), le fluttuazioni stocastiche naturali legate alla turbolenza atmosferica (Seinfeld e Pandis, 1998), e le indeterminazioni sui dati di input (Hanna et al., 1998).

4.1 Dati di input – emissioni e meteorologia

L'indeterminazione sui dati di ingresso forniti ai modelli risulta molto rilevante nel determinare l'accuratezza delle simulazioni. Hanna et al. (1998) hanno valutato l'errore sulla concentrazione massima di ozono indotto dall'incertezza su 109 variabili di input (23 variabili legate alle emissioni, alle condizioni meteorologiche e alle condizioni al contorno e 86 variabili legate alle costanti delle reazioni chimiche). Questa valutazione è stata condotta sui calcoli eseguiti applicando il modello UAM sull'area metropolitana estesa di New York nei giorni 7-8 luglio 1988. I risultati mostrano che l'intervallo entro cui ricade il 90% dei possibili valori della concentrazione oraria massima di ozono nel dominio di studio è compreso tra 176 ppb e 331 ppb (confidenza al 95%), mentre la posizione dei massimi di ozono simulati può variare da 100 km sopra vento a Sud- Ovest di New York a 150 km sotto vento a Nord Est di New York. Le maggiori incertezze sono associate alle emissioni areali di composti organici volatili (il cui intervallo di incertezza al 95 % di probabilità è pari a circa la metà del valore medio) ed alle emissioni biogeniche (il cui intervallo di incertezza al 95 % di probabilità è circa il doppio del valore medio).

4.2 Processori meteorologici

Sistla et al. (1996) hanno calcolato l'indeterminazione sulle concentrazioni di ozono e sull'efficacia nell'abbattimento delle concentrazioni dello stesso inquinante per scenari di riduzione delle emissioni "NO_x oriented", piuttosto che "VOC oriented", per l'area metropolitana estesa di New York nei giorni 6, 7 e 8 luglio 1988, dovuta al solo utilizzo di modelli meteorologici e micrometeorologici differenti. In particolare sulla variazione percentuale di ozono si sono riscontrate delle differenze sulle previsioni dell'efficacia delle riduzioni superiori anche al 40%.

4.3 Disaggregazione spaziale e risoluzione del dominio

Ulteriori importanti incertezze sono legate alla disaggregazione spaziale delle emissioni (Loibl et al., 1993) e alla risoluzione del dominio di calcolo come evidenziato ad esempio da Kumar et al. (1996).

Attualmente è in corso il progetto europeo IMPRESAREO (Improving the Spatial Resolution of Air Emission Inventories using Earth Observation Data) il cui principale obiettivo è quello di sviluppare

una metodologia per migliorare la risoluzione spaziale degli inventari delle emissioni atmosferiche utilizzando le osservazioni della Terra da satellite. Una descrizione più approfondita del progetto si può trovare sul sito web della Direzione Generale Tutela Ambientale della Regione Lombardia (<http://www.ambiente.regione.lombardia.it>).

4.4 Modelli chimici

Al momento sono disponibili modelli chimici, quali ad esempio MCM (Master Chemical Mechanism: Derwent et al., 1996; Jenkin et al., 1999) che, per considerare la degradazione di circa 120 tra idrocarburi e composti organici ossigenati, comprendono più di 7100 reazioni chimiche e risolvono poco meno di 2500 equazioni per altrettante specie chimiche.

Meccanismi chimici così dettagliati non possono ancora essere usati nei modelli 3D euleriani a causa delle limitazioni imposte dalle risorse di calcolo. Si riducono pertanto le specie attive, ad esempio utilizzando delle specie surrogate come accade nel modello EMEP MSC-W (Andersson-Skold et al., 1999) o utilizzando delle specie - gruppo ottenute attraverso dei processi di condensazione, come accade nei meccanismi SAPRC di Carter (1990; 1995; 1997).

I risultati forniti dai modelli condensati vengono confrontati con quelli dei modelli dettagliati e con i risultati sperimentali ottenuti nelle “smog chambers”. Le variazioni nella risposta dei modelli fotochimici a mesoscala al variare del meccanismo chimico utilizzato è stata valutata mediamente intorno al 16% nella simulazione della concentrazione massima di ozono, mentre aumenta significativamente per il perossido di idrogeno, 30%, e per il PAN, 40% (Kuhn et al., 1998). Un recente lavoro di Luecken et al., (1999) ha confermato la presenza di notevoli differenze nel simulare i profili di speciazione degli NO_y al variare del meccanismo chimico utilizzato dai modelli fotochimici euleriani.

4.5 Profili di speciazione dei COV

Jiang et al. (1997), studiando l'inquinamento fotochimico della Lower Fraser Valley in Canada, hanno mostrato che possono verificarsi importanti differenze nel calcolo delle costanti di reazione quando nell'utilizzo di schemi chimici condensati quali il COND2243 (Carter, 1990), non venga tenuto nella dovuta considerazione il profilo emissivo specifico del sito di studio.

4.6 Incertezze complessive

In sintesi, al momento, nell'applicazione dei modelli euleriani fotochimici 3D si possono riscontrare i seguenti livelli di indeterminazione:

- il confronto tra i risultati dei modelli e le osservazioni mostra, tipicamente, una differenza di circa il 10% tra valore misurato e calcolato per la concentrazione media oraria massima giornaliera di O₃. L'incertezza sale a un fattore 2 (100%) nella stima delle concentrazioni medie orarie di NO_x e di VOC per un determinato recettore (Hanna et al., 1998);
- l'incertezza sulla riduzione del picco di O₃ può essere pari a circa un fattore 2 per scenari di riduzioni delle emissioni “VOC oriented”. Essa può essere più grande, anche un fattore 10, per scenari “NO_x oriented” (Silman, 1999).

In Italia, alcune esperienze di validazione di modelli euleriani sono state condotte nella regione Lombardia (Silibello et al., 1998; Angelino et al., 1998; De Martini et al., 1998; Lozej, 1999). Tali esperienze, seppure condotte in modo non completamente esaustivo essendosi limitate a considerare solo alcuni inquinanti misurati al suolo, mostrano incertezze dello stesso ordine di quelle indicate

precedentemente. Il raggiungimento di questo risultato richiede comunque un notevole impegno di risorse e particolare sensibilità nella verifica e predisposizione dei dati di ingresso. Attualmente, contributi ulteriori sono attesi dal progetto LOOP di EUROTRAC2 sulla campagna di misura PIPAPO che prevede sia una fase sperimentale sia l'applicazione di modelli. I primi risultati riguardano l'interconfronto tra i modelli utilizzati, mentre la validazione è stata prevista in una fase successiva (si veda il "report working group 3" presentato al "Limitation of Oxidant Production: PAPO/BERLIOZ Workshop, 1999 in Varese" e disponibile sul sito <http://www1.psi.ch/~loop/Varese/varese.html>).

5. Risultati delle reti osservative e delle campagne sperimentali

5.1 Le reti osservative

Fino alla metà degli anni '90, nonostante l'elevato numero di stazioni distribuite sul territorio, la situazione delle reti di misura ai fini della conoscenza dell'inquinamento da ozono ha presentato notevoli aspetti critici legati a due fattori principali (Deserti e Mazzali, 1996):

- le stazioni risultavano localizzate prevalentemente in area urbana, mentre risultavano scarse le stazioni in aree rurali e suburbane dove sono attesi i massimi di concentrazione di ozono;
- le attività di misura sono eseguite da molteplici soggetti, e l'organizzazione dei dati che ne deriva non consente un'analisi complessiva del fenomeno alla scala appropriata. In sostanza viene a mancare la possibilità di tracciare un quadro unitario dell'inquinamento fotochimico che consenta un'analisi alle scale spaziali e temporali appropriate per lo studio del fenomeno.

Si registrava inoltre una carenza di criteri comuni di standardizzazione delle misure e delle modalità di raccolta dati e l'assenza di un programma di controllo di qualità comune tra le varie reti di rilevamento.

Attualmente le reti di rilevamento della qualità dell'aria si stanno estendendo all'intero territorio nazionale e, in alcune realtà, hanno già raggiunto dei discreti livelli di risposta. Si è riconosciuta l'esigenza di specializzare le stazioni di misura e di avviare un sistema di controllo e assicurazione della qualità.

Entro certi limiti si è ampliato il numero degli inquinanti monitorati in continuo, in continuo con la misura del benzene, del toluene, degli xileni e del PM10 e con qualche primo tentativo di misura del PAN. L'introduzione in alcune realtà di sistemi DOAS ha permesso di fare degli approfondimenti sul concetto della rappresentatività delle misure. Tuttavia, al momento (1999), i risultati forniti da questo strumento nelle misure di routine hanno evidenziato una scarsa efficienza complessiva e la presenza di significativi fattori di incertezza nella misura della formaldeide, dell'acido nitroso e del benzene (Löfgren, L., 1992, Brust et al., 1999; si veda il rapporto presentato al "Limitation of Oxidant Production: PAPO/BERLIOZ Workshop, 1999 in Varese" e disponibile sul sito <http://www1.psi.ch/~loop/Varese/varese.html>). Una buona conduzione dello strumento DOAS dovrebbe, tuttavia, permettere delle misure attendibili almeno di ozono, biossido di zolfo e biossido di azoto (EPA, 1998; Balin, 1999).

Recentemente è stata evidenziata l'incertezza connessa con la misura del biossido di azoto fatta con gli strumenti convenzionali presenti nelle attuali reti di rilevamento, che in alcune occasioni porta a una sovrastima superiore al 30%. Infatti, l'analizzatore "sente" in parte la presenza dei nitrati organici e di altri composti azotati (Comunicazioni orali presentate al "Limitation of Oxidant Production: PAPO/BERLIOZ Workshop, 1999 in Varese").

Al momento la rappresentatività chimica delle misure delle reti è molto carente per la descrizione dell'inquinamento fotochimico; inoltre molte delle stazioni attualmente funzionanti non possono fornire una rappresentazione adeguata della qualità dell'aria per l'ozono e il biossido di azoto a causa del loro micro-posizionamento.

In alcune realtà il numero delle stazioni di misura è ridondante, e allo stesso tempo il macro-posizionamento non permette di avere un'adeguata copertura del territorio in relazione ai diversi indici per la protezione della salute della popolazione e la tutela della vegetazione.

È utile approfondire queste problematiche proprio per assecondare le esigenze indicate dalla normativa e, in particolare, dalla stessa direttiva 62/96/CE, così come recepita dal D.lgs 4 agosto 99 n. 351, e dalla sua recente direttiva “figlia” 30/99/CE per gli ossidi di azoto, il biossido di azoto, il biossido di zolfo, il particolato (PM10 e PM2.5) e il piombo. Le reti svolgono un ruolo importante nella documentazione dell'evoluzione storica della qualità dell'aria e, quindi, anche nella verifica degli interventi di riduzione delle emissioni. Inoltre costituiscono il sistema di allerta e controllo della evoluzione di episodi critici.

5.2 Le campagne di misura

Le campagne di misura si possono distinguere schematicamente in due categorie: campagne intensive e campagne indicative.

Per campagne intensive si intendono campagne finalizzate a misurare tutte le grandezze necessarie alla comprensione dei processi fisico – chimici responsabili dell'inquinamento da ozono e della loro corretta simulazione da parte del modello. Queste campagne sono necessarie per la validazione dei modelli e per la comprensione dei regimi che determinano la produzione di ossidanti fotochimici nella bassa troposfera. Durante le campagne intensive vengono misurate sperimentalmente specie chimiche e grandezze meteorologiche normalmente non rilevate dalle reti di monitoraggio.

Per campagne indicative si intendono campagne di misura finalizzate alla verifica sperimentale della struttura del campo di concentrazione (localizzazione spazio – temporale dei massimi al suolo) dei principali inquinanti simulati dai modelli fotochimici, anche in aree normalmente non coperte da stazioni della rete fissa. Queste campagne, meno complesse delle precedenti, sono necessarie per la messa a punto dei modelli euleriani a griglia utilizzati per la simulazione dell'inquinamento fotochimico. Nelle campagne di verifica vengono misurate con maggior accuratezza le specie chimiche e le grandezze meteorologiche normalmente misurate dalle reti di rilevamento.

Tra gli studi passati in rassegna pochi hanno il carattere di vere e proprie campagne di misura intensive. Di seguito vengono descritti alcuni studi sperimentali, con particolare riferimento a due campagne condotte in Italia: la campagna sperimentale intensiva PIPAPO (PIanura PADana Produzione Ozono) e la campagna di verifica MOTAP (Monitoraggio Ozono Troposferico Area Padana).

5.2.1 Le campagne di misura intensive

Negli ultimi anni il numero e l'estensione di queste campagne di misura è cresciuto sensibilmente (Sillman, 1999). Anche in Europa sono state condotte recentemente importanti campagne di misura (Millan et al., 1996; Moussiopoulos, 1999). In particolare, all'interno del progetto LOOP di EUROTRAC-2, BERLIOZ (Rappenglück et al., 1999; Konrad et al., 1999; Boddenberg, 1999; Becker e Schaller, 1999) e PIPAPO (Spirig et al., 1999; Neftel, 1999; Becker et al., 1999; sito

<http://www1.psi.ch/~loop>), che hanno comportato anche un ingente sforzo economico organizzativo.

La prima campagna di misura si è tenuta nell'area metropolitana estesa di Berlino nell'estate del 1998, mentre la seconda si è svolta nell'area metropolitana estesa di Milano nella primavera del 1999. Tali campagne di misura sono caratterizzate dalla disponibilità di dati per vari composti chimici rilevati in diverse posizioni, al suolo e in quota, e da una buona copertura anche delle misurazioni meteorologiche. Di seguito si descriveranno brevemente alcuni elementi relativi alla campagna PIPAPO. Una descrizione più dettagliata può essere trovata nel sito (<http://www1.psi.ch/~loop>). In tale sito, a breve, saranno disponibili anche le "minutes" dei risultati del Workshop di Varese del 13-15 dicembre 1999.

La campagna sperimentale PIPAPO (Pianura PADana Produzione Ozono)

Nell'ambito del progetto LOOP di EUROTRAC2 è stata organizzata la campagna di misura intensiva PIPAPO (Pianura PADana Produzione Ozono) che si è svolta grazie anche al contributo degli altri progetti Europei AEROSOL e SATURN di EUROTRAC2, e dei progetti STAAARTE e VOTALP2 del IV Programma Quadro dell'Unione Europea (Neftel, 1999, Moussiopoulos, 1999; Borrell, 1999; Cadenazzi et al., 1999, Direzione Generale Tutela Ambientale, 1999).

La campagna PIPAPO si è svolta dall'inizio di marzo alla fine di giugno del 1998 in una zona approssimativamente compresa tra le alpi svizzere del Canton Ticino e il bacino del Po, comprendente anche l'intera l'area metropolitana milanese. Lo svolgimento di questa campagna di misura ha visto impegnati complessivamente oltre 120 studiosi appartenenti a 26 Laboratori e Centri di Ricerca provenienti da 8 Paesi Europei, Austria, Francia, Germania, Inghilterra, Italia, Jugoslavia, Svezia e Svizzera.

Sono state misurate numerose variabili ambientali, tra inquinanti fotochimici, loro precursori, aerosol e parametri meteorologici, al suolo e in quota facendo uso intensivo di strumentazione avanzata. In particolare sono stati impegnati due aerei, un Fokker 27 francese e un motoalante svizzero della Metair, un pallone frenato dell'ENEL Polo Ambiente per misurare il profilo verticale degli inquinati nel centro di Milano fino a mille metri di quota, e sono stati lanciati oltre 70 palloni sonda "a perdere" per la misura dell'ozono e dei parametri meteorologici nell'area prealpina. Inoltre sono stati utilizzati 3 LIDAR (Light Detection And Ranging), uno francese, uno svizzero e uno tedesco, che per mezzo di opportuni fasci laser hanno consentito la misura dei profili e delle mappe verticali di ozono. Quattro ulteriori DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) e un Super DOAS dell'Università di Heidelberg si sono aggiunti a quelli già funzionanti della Regione Lombardia per misurare i profili orizzontali di biossido di azoto e di ozono. Il Super DOAS ha permesso di misurare anche l'acido nitroso. Uno Ftür all'infrarosso del Fraunhofer Institut di Garmisch ha permesso la misura dei gas serra presenti sulle Prealpi Lombarde.

L'Università degli Studi di Milano con una strumentazione di precisione ha misurato le concentrazioni del gas radioattivo radon in diverse postazioni lombarde (Landriano, Milano Brera, Seregno, Verzago e Alpe del Vicerè) che hanno permesso di valutare le caratteristiche del rimescolamento degli inquinanti nella bassa troposfera (Facchini et al., 1999). Gli studiosi del Politecnico di Zurigo con due gas massa da campo hanno misurato oltre 50 diversi composti organici volatili a Bresso e a Verzago, e il Centro Comune di Ricerca di Ispra e il Paul Scherrer Institut di Villigen hanno, in contemporanea, effettuato delle misure molto dettagliate per descrivere la formazione, la composizione e la crescita degli aerosoli secondari. I Laboratori Chimici e Fisici dei Presidi di Igiene e Prevenzione e delle Amministrazioni Provinciali della Lombardia hanno misurato le aldeidi e gli inquinanti convenzionali.

I profili verticali e orizzontali del vento sono stati misurati per mezzo di un "windprofiler" a microonde posto nel cuore della Brianza a Seregno, di uno Scidar il cui fascio di luce ha

attraversato il lago di Como da Torno a Moltrasio e di un sistema Sodar collocato a circa mille metri sul livello del mare nel triangolo lariano, in comune di Sormano (a Nord di Erba).

Complessivamente sono state effettuate oltre 1.400.000 misurazioni e il costo complessivo della campagna di misura ha superato i 1.250.000 Euro. Attualmente (dati riferiti al 1999) è disponibile presso il coordinatore del progetto LOOP la seconda versione rivista del CD-Rom contenente il data base con tutte le misure chimiche e meteorologiche effettuate durante PIPAPO. I risultati di questa campagna sono attualmente (1999) in fase di analisi ed elaborazione.

La campagna MOTAP (Monitoraggio Ozono Troposferico Area Padana)

Durante i periodi estivi del 1995 e del 1996 sono state condotte diverse campagne di misura e raccolta di dati provenienti dalle reti di monitoraggio dell'area padana. Le attività sperimentali comprendono: la raccolta ed analisi di serie storiche di dati di ozono ed ossidi di azoto; il monitoraggio di ozono ed ossidi di azoto in stazioni allestite in aree rurali e suburbane; l'esecuzione di misure speciali in mare e con mezzi aerei; l'analisi delle condizioni meteorologiche concomitanti agli episodi di ozono; la determinazione analitica di precursori e prodotti dello smog fotochimico in alcune postazioni di prova.

Per la localizzazione dei punti di misura il territorio è stato suddiviso in domini ipoteticamente omogenei, al fine di localizzare punti di misura della campagna MOTER - MOTAP. I domini meteoroclimatici omogenei sono stati così individuati:

- l'area costiera (dominata dal regime delle brezze di mare, fino a 30-40 km nell'entroterra);
- la fascia pedemontana centrale e occidentale (che risente delle brezze di monte, fino a 10-15 km dai rilievi);
- la fascia pedemontana orientale (situazioni nelle quali si risente della sovrapposizione di entrambi i regimi, brezze di mare e monte);
- la pianura orientale (non soggetta alla circolazione di brezza ma interessata da fenomeni di circolazione da est - nord - est);
- la pianura occidentale (non soggetta alla circolazione di brezza);
- aree collinari e montane (altezze superiori a 300 m.s.l.m.).

Le posizioni di misura all'interno dei domini sono state individuate tenendo conto delle necessità specifiche per le misure di ozono. Il protocollo di misura stabilisce i criteri per la individuazione dei siti e la localizzazione delle sonde di prelievo.

Il principale risultato ottenuto attraverso la campagna MOTER 95 e il progetto MOTAP 96 è la costituzione di un insieme di dati sperimentali omogeneo e di qualità controllata. Sono stati raccolti dati di concentrazione di ozono ed ossidi di azoto del periodo giugno - settembre 1996 relativi a 33 stazioni situate nel territorio della regione Emilia - Romagna, 31 stazioni nel territorio della regione Veneto, 6 stazioni del Friuli Venezia Giulia circa 130 stazioni nel territorio della Regione Lombardia ed 1 stazione nel territorio della regione Piemonte.

La documentazione di ogni stazione contiene la descrizione dell'ambiente locale della stazione, della localizzazione della sonda di prelievo, le caratteristiche del sistema di prelievo, le modalità di acquisizione e trattamento dei dati e la documentazione dei programmi di controllo di qualità ai quali ha partecipato la stazione durante lo svolgimento della campagna. Le stazioni includono sia le stazioni di rilevamento delle reti urbane ed industriali di monitoraggio dell'inquinamento atmosferico, sia stazioni in aree rurali e suburbane appositamente allestite per le campagne MOTER - MOTAP. In base alla documentazione raccolta le stazioni sono state classificate in stazioni primarie e di supporto. Le analisi sono state condotte sulle stazioni primarie, individuate come stazioni particolarmente significative per le misure di ozono. Nella prima fase dell'elaborazione sono state selezionate 52 stazioni primarie distribuite su tutto il bacino padano - adriatico.

Le attività di campionamento ed analisi di idrocarburi e composti carbonilici sono state svolte in 6 stazioni di rilevamento dell'Emilia - Romagna distribuite in aree rurali ed urbane di pianura e di collina. L'obiettivo è di ottenere indicazioni preliminari sulla presenza di precursori speciatati e di prodotti del fotosmog in siti rappresentativi di diverse condizioni meteorologiche.

I voli con aerei equipaggiati con analizzatori automatici di ozono e sistemi di acquisizione dati sono stati eseguiti con lo scopo di studiare la distribuzione verticale ed orizzontale dell'ozono in quota. I voli hanno interessato la pianura, le zone montane, la costa ed il mare. Sono state svolte 29 missioni di volo per un totale di circa 40 ore di volo nel periodo luglio - settembre 1996. L'unità mareografica Daphne della Regione Emilia - Romagna è stata equipaggiata con analizzatori automatici di ozono e ossidi di azoto e sistema di acquisizione dati; le crociere hanno seguito un percorso da Cesenatico a Ravenna fino ad una distanza dalla costa di circa 20 km.

È stata determinata la concentrazione di ozono mediante danno fogliare su piante di tabacco. Sono state utilizzate piante di tabacco Bel W3, sensibile all'ozono, in riferimento a cultivar di tabacco Bel B, resistenti, come controllo. Sono state allestite 17 stazioni di biomonitoraggio nel territorio dell'Emilia - Romagna in area rurale ed urbana. Alcune stazioni di biomonitoraggio sono state affiancate a stazioni automatiche. L'utilizzo delle piante come indicatori dell'inquinamento da ozono consente di ottenere indicazioni sulla risposta degli esseri viventi alle condizioni di inquinamento.

I dati e le analisi meteorologiche a scala di bacino padano - adriatico di supporto alle attività di elaborazione ed analisi dati MOTAP sono forniti dal Servizio Meteorologico Regionale dell'ARPA. In alcune postazioni di rilevamento di inquinanti atmosferici sono disponibili misure meteorologiche locali utilizzate per l'interpretazione dei dati rilevati dalle singole stazioni (Deserti M., Cattani S., Poluzzi V., 1998) www.arpa.emr.it/motap.

Bibliografia

- Andersson - Skold Y., Simpson D., 1999. *Comparison of the chemical schemes of the EMEP MSC-W and IVL photochemical trajectory models*. Atmospheric Environment, 33, pp.1111-1130.
- Angelino E., Simoni P., Pirovano G., Mazzali C., 1998. *Progetto Valtellina. Studio modellistico degli effetti dell'ozono sui sistemi agro - forestali. Terza relazione di avanzamento lavori*. FLA/P.M.I.P. rapporto interno, novembre 1998.
- Balin I., 1999. *Differential optical absorption spectroscopy for air pollution measurements (DOAS)*. <http://dgrwww.epfl.ch/GECOS/CPSE/recherches/mars99/doas.html>
- Becker A., Schaller E., 1999. *3D source attribution for the measurement sites of the BERLIOZ field campaign at the 20th of July 1998 during daytime*. Presentato al: "Scientific results of the BERLIOZ and PIPAPO field campaigns", Varese, 13 – 15 dicembre 1999.
- Becker K.H., Hjorth J., Neftel A., Peruzzo G., Soma R., Spirig C., Visconti M., 1999. "Scientific results of the BERLIOZ and PIPAPO field campaigns", Varese, 13 – 15 dicembre 1999.
- Boddenberg A., Dallmann G., Ligon A.P., Turner W.V. Gäb S., Grossmann D., Moortgat G., Slemr F., Wieprecht W., Moeller D., 1999. *Determination of H₂O₂ in the Berlin city plume during BERLIOZ*. Presentato al: "Scientific results of the BERLIOZ and PIPAPO field campaigns", Varese, 13 – 15 dicembre 1999.
- Borrell P., 1999. *Some current problems in the atmospheric environment; the potential contribution of EUROTRAC-2*. In: *Atti del Convegno "Ossidanti Fotochimici e aerosoli in Lombardia"*, 21-22 giugno 1999, Federazione delle associazioni scientifiche e tecniche (F.a.s.t.), pp. 23 – 28.
- Brust A.S., Becker K.H., Kleffmann J.K., Wiesen P., 2000. *UV absorption cross section of nitrous acid*. Atmospheric Environment, 34, (1), pp.13-19.
- Cadenazzi M., R. Cattaneo, R. Gottardi, G. Lanzani, M. Valore, 1999. *Analisi della distribuzione spaziale e temporale dell'ozono nella regione Lombardia durante la campagna PIPAPO*. In: *Atti del Convegno "Ossidanti Fotochimici e aerosoli in Lombardia"*, 21-22 giugno 1999, Federazione delle associazioni scientifiche e tecniche (F.a.s.t.), pp. 109-120.
- Carter W. P. L., 1994. *Journal of air and waste management association*, 44, pp. 881-889.
- Carter W. P. L., 1995. *Atmospheric Environment*, 29, pp. 2513-2527.
- Carter W.P.L., 1999. *Documentation of the SAPRC - 99 chemical mechanism for VOC reactivity assessment*. Report to California Air Resource Board.
- Carter W.P.L., 1990. *A detailed mechanism for the gas phase atmospheric reactions of organic compounds*. Atmospheric Environment, 24(A), pp. 481-518.
- Carter W.P.L., 1997. *Development and application of an updated photochemical mechanism for VOC reactivity assessment*. Quarterly Report to California Air Resource Board, pp. 1-15.

- Cattaneo R., 1999. *“Analisi fisica ed elaborazioni statistiche di misure di inquinanti fotochimici eseguite con metodi non convenzionali a bordo di aerei”*. Università degli Studi di Milano.
- Crutzen, P.J., 1973. *A discussion of the chemistry of some minor constituents in the stratosphere and troposphere*. Pure Applied Geophysics, 106-108, pp.1385-1399.
- Crutzen, P.J., 1995. *Ozone in the troposphere*. In: *“Composition Chemistry and Climate of the Atmosphere”*, H.B. Singh Ed., Van Nostrand Reinhold, pp. 349-393.
- De Martini A., Pasi F., Maffei G., Longoni M.G., Tamponi M., Graziani G., Lanzani G., 1998. *Modelling a photochemical smog episode in Lombardy: 20 -23 July 1994*. In: *“Proc. of 23rd Nato conference on Air Pollution Modelling and its Application”*. Varna, 41, 1998.
- Derwent R. G., Jenkin M.E., Saunders S.M., 1996. Atmospheric Environment, 30, pp.181-199.
- Derwent R.G., Jenkins M.E., 1991. *Hydrocarbons and the long-range transport of ozone and PAN across Europe*. Atmospheric Environment, 25(A), pp. 1661-1670.
- Deserti M., Mazzali P., 1996. *“Ottimizzazione delle reti di monitoraggio per la rilevazione dell’Ozono Troposferico”*. In: *Atti del Convegno “Il monitoraggio dell’inquinamento atmosferico, controllo e assicurazione di qualità.”*, Modena 13 – 14 novembre 1996.
- Direttiva 96/62/CE del Consiglio Europeo del 27 settembre 1996 in materia di valutazione e di gestione della qualità dell’aria ambiente. G.U.C.E., L. 296 del 21/11/1996.
- Direttiva 1999/30/CE del Consiglio Europeo del 22 aprile 1999, concernente i valori limite di qualità dell’aria ambiente per il biossido di zolfo, il biossido di azoto, gli ossidi di azoto, le particelle e il piombo. G.U.C.E., L 163/41.
- EPA, 1999. *Appendix W to part 51 - Guideline on air quality models*.
- EPA, 1998. *SLAMS/NAMS/PAMS Network review guidance. Revised Final Report*. EPA-454/R-98-003.
- Facchini U., Sesana L., Milesi M., 1999. *Radon as a tracer of atmospheric turbulence: measurements in Milan and in Prealps region*. In: *Atti del Convegno “Ossidanti Fotochimici e aerosoli in Lombardia”*, 21-22 giugno 1999, Federazione delle associazioni scientifiche e tecniche (F.a.s.t.).
- Guenther A., 1995. *Global Model of natural volatile compounds emission* Journal of Geophysics Research, Vol. 10, pp. 8883, 8892.
- Hanna S.R., Chang J.C., Fernau M.E., 1998. *Monte Carlo estimates of uncertainties in predictions by a photochemical grid model (UAM-IV) due to uncertainties in input variables*. Atmospheric Environment, 32, pp. 3619-3628.
- Jacobson M.Z., 1997. Atmospheric Environment, 31, pp. 587-608.
- Jenkin M.E., Hayman G.D., 1999. *Photochemical ozone creation potentials for oxygenated volatile organic compounds: sensitivity to variation in kinetic and mechanistic parameters*. Atmospheric Environment, 33, pp. 1275-1294.

- Jiang W., Singleton D.L., Hedeley M., McLaren R., 1997. *Atmospheric Environment*, 31, pp. 627-638.
- Konrad S., Hofzumahaus A., Holland F., Kurtenbach R., Rappenglück B., Rohrer F., Schäfer J., Volz-Thomas A., 1999. *Comparison of OH radical estimates from VOC decay in the Berlin plume with direct measurements by LIF*. Presentato al: “*Scientific results of the BERLIOZ and PIPAPO field campaigns*”, Varese, 13 – 15 dicembre 1999.
- Kuhn M., Builtjes P.J.H., Poppe D., Simpson D., Stochewell W.R., Andersson-Skold Y., Baart A., Das M., Fiedler F., Kirchner F., Makar P.A., Milford J.B., Roemer M.G.M., Ruhnke R., Strand A., Vogel B., Vogel H., 1998. *Atmospheric Environment*, 32, pp. 693-710.
- Kumar N., Russel A.G., 1996. *Atmospheric Environment*, 30, pp. 1099-1116.
- Leggett S., 1996. *Atmospheric Environment*, 30, pp. 215-226.
- Löfgren, L., 1992. *Determination of benzene and toluene in urban air with differential optical absorption spectroscopy*. *Intern. J. Environ. Anal. Chem.*, 47, pp. 69-74.
- Loibl W., Orthofer R., Winiwarter W., 1993. *Atmospheric Environment*, 27(A), pp. 2575-2590.
- LOOP (Limitation Of Oxidant Production) Database, 1999. Institute of Environmental Protection and Agriculture, Berna 1999.
- Lozej C., 1999. *Lo strumento modellistico*. In: “*L’inquinamento da ozono – Diagnosi e terapie per lo smog del duemila*”, Fondazione Lombardia per l’Ambiente, Milano, pp. 197-205.
- Luecken D.J., Tonnesen G.S., Sickles J.E. II, 1999. *Atmospheric Environment*, 33, pp. 1073-1084.
- Maffei G., Longoni M.G., De Martini A., Tamponi M., 1999. *Emissions estimate of ozone precursors during PIPAPO campaign*. In: *Atti del Convegno “Ossidanti Fotochimici e aerosoli in Lombardia – Il contributo dei progetti europei”*, 21-22 giugno 1999, Federazione delle associazioni scientifiche e tecniche (F.a.s.t.).
- Meng Z., Dabdub D., Seinfeld J.H., 1987. *Chemical coupling between atmospheric ozone and particulate matter*. *Science*, Vol. 277, pp. 116-119.
- Millan M., Salvador R., Mantilla E., Artinano B., 1996. *Atmospheric Environment*, 30, pp.1909-1924.
- Moussiopoulos N., 1999. “*SATURN Project Description*”. EUROTRAC-2 ISS, München.
- Neftel A., 1999. “*LOOP Project Description*”. EUROTRAC-2 ISS, München.
- NRC, 1991, *Committee on Tropospheric Ozone Formation and Measurement. Rethinking the Ozone Problem in Urban and Regional Air Pollution*. National Research Council. National Academy Press.
- Ozone position paper – version 5.0*, 1999. Ad Hoc Working Group on Ozone Directive and Reduction Strategy Development.

- Piano Regionale per la Qualità dell'Aria, 1999: <http://www.ambiente.regione.lombardia.it/> ; <http://flanet.org>.
- Quaranta N., 1999. *Il contributo del sistema informativo regionale NEBULA*. In: *Atti del Convegno "Ossidanti Fotochimici e aerosoli in Lombardia – Il contributo dei progetti europei"*, 21-22 giugno 1999, Federazione delle associazioni scientifiche e tecniche (F.a.s.t.), pp. 15-22.
- Quaranta N., Casati, Macalli, De Martini A., Longoni M.G., Maffei G., Tamponi M., 1998. *Development of a modelling environment in Aurora*. In: *Atti del convegno "5th Workshop on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes"*, Rhodes, Grecia, 1998.
- Rappenglück B., Fabian P., 1999. *Comparison of PAN on O₃ measurements during BERLIOZ*. . Presentato al: *"Scientific results of the BERLIOZ and PIPAPO field campaigns"*, Varese, 13 – 15 dicembre 1999.
- Regione Lombardia, Direzione Generale Tutela Ambientale, Azienda Sanitaria Locale della Provincia di Lecco, 1999. *Il progetto europeo LOOP e lo smog fotochimico in Lombardia*.
- Restelli G., 1999. *Analisi dei processi fotochimici legati all'ozono*. In: *Atti del Convegno "Inquinamento da ozono nella Valle Padana, Fondazione Lombardia per l'Ambiente - Regione Lombardia"* a cura di Bonini L.
- Restelli G., Zanderighi G., 1997. *Chimica dell'ambiente – 1. La chimica dell'atmosfera*, Milano
- Rindone B., 1996. *Introduzione alla chimica ambientale*, Edizioni Città Studi.
- Sandroni, S., Anfossi D., 1995. *Trend of ozone in the free troposphere above Europe*. *Il Nuovo Cimento*, 18, pp. 497-503.
- Saylor R.H., Chameides W.L., Chang, M.E., 1999. *Demonstrating attainment in Atlanta using urban airshed model simulations: impact of boundary conditions and alternative forms of the NAAQS*. *Atmospheric Environment*, 33, pp. 1057-1064.
- Scire J., Insley E., Yamartino R., Fernau M., 1997. *A User's Guide for the CALMET Meteorological Model*, Earth Tech.
- Seinfeld J.H., Pandis R.N., 1998. *Atmospheric Chemistry and Physics*, J. Wiley & Sons.
- Silibello C., Calori G., Brusasca G., Catenacci G., Finzi G., 1998. *Atmospheric Environment*, 32, pp. 2025-2038.
- Sillman S., 1999. *Atmospheric Environment*, 33, pp. 1821-1845.
- Sillman S., Logan J.A., Wofsy S.C., 1990. *Journal of Geophysical Research*, 95, pp. 1837-1851.
- Sillman S., 1995. *The use of NO_y, H₂O₂, and HNO₃ as indicators for ozone-NO_x-hydrocarbon sensitivity in urban locations*. *Journal of Geophysical Research*, 100, pp. 14175-14188.
- Simpson D., Guenther A., Hewitt C.N., Steinbrecher R., 1995. *Biogenic emissions in Europe*. *Journal of Geophysical Research*, 100, pp. 22875-22890.

- Sistla G., Zhou N., Hao W., Ku J.Y., Rao S.T., Bornstein R., Freedman F., Thunis P., 1996. *Atmospheric Environment*, 30, pp. 2011-2025.
- Spirig C., Neftel A., Favaro G., Hjorth J., 1999. *Local analysis of the O₃ production during PIPAPO*. Presentato al: “*Scientific results of the BERLIOZ and PIPAPO field campaigns*”, Varese, 13 – 15 dicembre 1999.
- Staehelin J. et al., 1994. *Trend in ozone concentration at Arosa (Switzerland)*. *Atmospheric Environment*, 28, pp. 75-87.
- Stern R., Yamartino R.J., 1998. *Development and initial application of the micro-calgrid photochemical model for high-resolution studies of urban environments*. In: *23rd NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application*, Varna (Bulgaria), 28 settembre – 2 ottobre 1998.
- Tamponi M., Bellasio R., 1999, “*Inquinamento fotochimico e gestione della qualità dell’aria*”, Rapporto Tecnico Sintetico, comunicazione ad ARPA - Emilia Romagna.
- Volz A., Kley D., 1988. *Evaluation of the Montsouris series of ozone measurements made in the nineteenth century*. *Nature*, 332, pp. 240-242.
- Yamartino R., 1992. *The CALGRID Mesoscale Photochemical Grid Model-I. Model Formulation*, *Atmospheric Environment*, 26(A).
- Zanella G., Balasso A., Borelli P., Rimoldi A.R., 1999. *La qualità dell’aria in Lombardia: l’evoluzione degli indicatori nel periodo 1993 – 1998*. In: *Atti del Convegno “Ossidanti Fotochimici e aerosoli in Lombardia – Il contributo dei progetti europei”*, 21-22 giugno 1999, Federazione delle associazioni scientifiche e tecniche (F.a.s.t.), pp. 1-13.