

**F. ANGELINI, G. MAIO, F. COLAO
S. DI FRISCHIA, M. PISTILLI, A. PALUCCI**

Divisione Tecnologie Fisiche per la Sicurezza e la Salute
Laboratorio Diagnostiche e Metrologia
Centro Ricerche Frascati, Roma

RAPPORTO SULLA STIMA DELLE EMISSIONI DIFFUSE DA EDIFICI INDUSTRIALI MEDIANTE TECNICA LIDAR ELASTICA

RT/2017/24/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

F. ANGELINI, G. MAIO, F. COLAO
S. DI FRISCHIA, M. PISTILLI, A. PALUCCI

Divisione Tecnologie Fisiche per la Sicurezza e la Salute
Laboratorio Diagnostiche e Metrologia
Centro Ricerche Frascati, Roma

RAPPORTO SULLA STIMA DELLE EMISSIONI DIFFUSE DA EDIFICI INDUSTRIALI MEDIANTE TECNICA LIDAR ELASTICA

RT/2017/24/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina <http://www.enea.it/it/produzione-scientifica/rapporti-tecnici>

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

RAPPORTO SULLA STIMA DELLE EMISSIONI DIFFUSE DA EDIFICI INDUSTRIALI MEDIANTE TECNICA LIDAR ELASTICA

F. Angelini, G. Maio, F. Colao, S. Di Frischia, M. Pistilli, A. Palucci

Riassunto

Questo documento riporta la descrizione delle modalità di progettazione, acquisizione ed analisi dei dati da campagne di misura per la stima di emissioni diffuse effettuabili presso stabilimenti industriali con il sistema lidar (radar laser) sviluppato e testato da ENEA FSN-TECFIS-DIM.

Le campagne devono essere progettate previo sopralluogo per individuare le postazioni più opportune per le misurazioni, tenuto conto delle caratteristiche sia dello strumento che degli impianti da osservare. Verranno descritti la tecnica impiegata e gli algoritmi di inversione dei dati, assieme alla procedura di individuazione delle postazioni di misura.

Occorre premettere che le misure lidar di particolato rappresentano stime che sono generalmente riconosciute attendibili entro un 50% di errore relativo. Possibili sorgenti di incertezza e metodi di mitigazione degli errori saranno discussi nel testo.

Parole chiave: Lidar, misure atmosferiche, emissioni industriali, particolati, analisi dati.

Abstract

This document reports the description of the design, acquisition and data analysis collectable from measurement campaigns for the estimation of diffused emissions nearby industrial buildings with the LIDAR system (laser radar) developed and tested at ENEA FSN-TECFIS-DIM.

Monitoring campaigns must be designed with the main purpose to select the most appropriate locations for the measurements, taking into account the characteristics of both the instrument and the plants to be observed. The technique used and the data retrieval algorithms will be described along with the procedure for selecting the measurement stations.

It should be noted that particulate measurements performed by lidar technique are an estimation that generally are recognized as reliable within a 50% of relative error. Possible source of uncertainty and error mitigation methods will be discussed along the text.

Keywords: Lidar, atmospheric measurements, industrial particle emission, data retrieval. .

INDICE

1. Definizioni	7
2. Introduzione	10
2.1. Esperienza ENEA nel monitoraggio di emissioni atmosferiche	10
3. Il sistema lidar	11
4. Il lidar ELIASS	16
4.1. Quantità misurabili	17
4.2. Descrizione dati acquisiti e analisi preliminare	18
5. Metodologia di misura	20
5.1. Analisi dei dati lidar	20
5.2. Analisi qualitativa	20
5.3. Analisi quantitativa	22
6. Calcolo delle emissioni dai dati lidar	23
7. Conclusioni	25
8. Bibliografia di base	27

1. Definizioni

Campionamento di aerosol	Separazione della fase dispersa (particolato) dalla fase continua (aria) attraverso un setto poroso (filtro) permeabile alla fase continua
Campionamento di un segnale	Conversione di una grandezza (segnale) continua in discreta mediante valutazione della sua ampiezza ad intervalli di tempo stabiliti
Campo di vista (FOV)	Porzione di angolo solido (cono) inquadrata dal telescopio ed illuminata dal \rightarrow laser. E' indicato generalmente in mrad, angolo di apertura del cono
Coefficiente di estinzione α	Valore che indica la rapidità di estinzione di una radiazione elettromagnetica in un mezzo, come espresso dalla legge di Lambert-Beer-Bouguer. Ha le dimensioni dell'inverso di una lunghezza e si indica in m^{-1} .
Coefficiente di retrodiffusione β	Valore che indica l'intensità della retrodiffusione da parte del particolato atmosferico. E' dato dalla \rightarrow sezione d'urto differenziale calcolata a 180° . Si esprime in $m^{-1} rad^{-1}$
Depolarizzazione	Rapporto tra il segnale ortogonale e il \rightarrow segnale parallelo e rende conto della non sfericità dei corpi diffusori
Diffusione della luce (o <i>scattering</i>)	Ridistribuzione dell'energia luminosa a causa della presenza di disomogeneità nel mezzo di propagazione. La diffusione elastica avviene alla stessa lunghezza d'onda della radiazione inviata
Emissione diffusa	Emissione di inquinanti da sorgenti non puntuali (lineari, areali)
Emissione fuggitiva	Emissione di inquinanti generata dall'azione del vento
Flusso attraverso una superficie	Prodotto scalare della velocità di spostamento di una sostanza per la normale alla superficie, moltiplicato per la concentrazione della sostanza stessa
Laser	Sorgente luminosa estremamente collimata e monocromatica, spesso polarizzata linearmente
Lidar	Radar ottico che impiega un \rightarrow laser ed un sistema di raccolta e rivelazione, impiegato per

	una vasta serie di applicazioni in atmosfera
Loop	Sequenza di profili ad angoli contigui per costruire una scansione di un certo settore circolare
Modello di aerosol	Insieme di caratteristiche microfisiche (concentrazione numerica, distribuzione dimensionale, indice di rifrazione complesso) che individuano una tipologia di particolato. E' utilizzato all'interno di un \rightarrow <i>modello di diffusione</i> per collegare le proprietà fisiche a quelle ottiche (sezione d'urto differenziale)
Modello di diffusione	Insieme di equazioni che descrivono la \rightarrow <i>diffusione</i> elastica di un'onda piana monocromatica da parte di un corpo. La teoria di Mie è impiegata per sfere dielettriche di dimensioni arbitrarie. La teoria di Rayleigh rappresenta l'approssimazione per diffusori molto piccoli rispetto alla lunghezza d'onda della radiazione
Pozzo	Opposto di una \rightarrow <i>sorgente</i> . Il \rightarrow <i>flusso</i> attraverso una superficie contenente un pozzo è costante e negativo
Profilo lidar	Collezione di valori del \rightarrow <i>campionamento del segnale</i> lidar ad istanti di tempo successivi e che, nota la velocità della luce, illustra l'andamento del segnale a distanze incrementali dallo strumento
RCS (Range-Corrected Signal)	Variabile costruita a partire dal segnale lidar, sottratto del fondo e moltiplicato per il quadrato della distanza corrispondente.
Scan	Somma di più \rightarrow <i>loop</i> successivi
Segnale molecolare	Segnale ricevuto dal \rightarrow <i>lidar</i> a causa della \rightarrow <i>diffusione</i> elastica (di Rayleigh) da parte delle molecole d'aria. Noti i profili di p e T, il segnale molecolare è noto a meno di una costante strumentale
Segnale ortogonale	Segnale ricevuto dal \rightarrow <i>lidar</i> sul piano di polarizzazione ortogonale a quello della radiazione inviata
Segnale parallelo	Segnale ricevuto dal \rightarrow <i>lidar</i> sullo stesso piano di polarizzazione della radiazione inviata
Segnale totale	Somma del \rightarrow <i>segnale parallelo</i> e del \rightarrow <i>segnale ortogonale</i>
Sezione d'urto differenziale	Valore che esprime la frazione di energia diffusa in una certa direzione da un corpo

	investito da un'onda piana monocromatica. E' connessa al \rightarrow <i>coefficiente di retrodiffusione</i>
Sezione d'urto totale	Valore che esprime la frazione di energia diffusa in tutte le direzioni (rimossa quindi dal fascio). E' connessa al \rightarrow <i>coefficiente di estinzione</i>
Sorgente	Si considera sorgente un punto per cui il \rightarrow <i>flusso</i> calcolato attraverso una superficie contenente tale punto è costante e positivo

2. Introduzione

Il problema della quantificazione di emissioni diffuse e fuggitive è un problema tuttora aperto nell'ambito della valutazione di impatto ambientale di una varietà di attività umane (impianti industriali, traffico stradale, traffico aereo). Visto che le caratteristiche dispersive dell'atmosfera giocano un ruolo importante nella propagazione delle polveri, più campagne sono da prevedere in periodi differenti dell'anno per investigare le emissioni sotto diverse condizioni meteorologiche.

Per distanze dell'ordine del km e altezze di edificio dell'ordine dei 100m, la tecnica lidar elastica a depolarizzazione è al momento l'unica in grado di fornire profili della concentrazione di polveri a distanza con sufficiente risoluzione spazio-temporale, seppur con incertezze molto maggiori di quelle ottenibili da misure in situ. E' inoltre necessario che, oltre alla misura della depolarizzazione per la discriminazione del particolato non sferico, lo strumento sia progettato per misure a distanza ravvicinata (centinaio di metri). Questa caratteristica è infatti tutt'altro che banale per i sistemi lidar, in quanto per aumentare le prestazioni generalmente si ricorre a laser molto collimati e campi di vista molto stretti, a discapito però della minima distanza misurabile.

2.1. Esperienza ENEA nel monitoraggio di emissioni atmosferiche

Nel 2008 la Provincia di Brindisi richiese di realizzare con tecnologie innovative un monitoraggio ambientale sul proprio territorio ove sono presenti attività industriali potenzialmente altamente inquinanti, potenziali fonti di elevati livelli di inquinamento riscontrati in misure puntuali già condotte in precedenza. L'origine e la diffusione dell'inquinamento risultano infatti difficili da determinare e seguire, spazialmente e temporalmente, attraverso sistemi di campionamento locali ed analisi puntuali. Lo studio condotto ha mirato ad eseguire un'indagine estesa su territorio utilizzando le tecnologie remote, semi-remote ed in situ appositamente sviluppate presso la sezione FISLAS dell'ENEA. In particolare l'indagine ha riguardato:

1. Le acque marine costiere della provincia, interessate dagli scarichi di reflui industriali e urbani, per fornire indicazioni sull'inquinamento da sostanze organiche e l'eutrofizzazione tramite la tecnica della fluorescenza laser-indotta (LIF Laser Induced Fluorescence);
2. La bassa troposfera nelle zone adiacenti agli impianti industriali della provincia, per la rilevazione delle molecole disperse nell'atmosfera tramite la tecnica del Lidar Atmosferico;
3. I suoli per uso agricolo, per la rilevazione di elementi tossici (metalli e non) dispersi nei primi strati di terreno, tramite l'utilizzo del sistema LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy).

Per quanto riguarda l'analisi atmosferica, tra luglio 2008 e febbraio 2009 il lidar ATLAS, sviluppato all'interno del laboratorio ENEA, ha svolto una campagna invernale di misura dell'inquinamento atmosferico presso la centrale termoelettrica ENEL di Cerano e lo stabilimento petrolchimico ENI di

Brindisi a bordo del laboratorio mobile ENVILAB. Sono state effettuate misure di etilene, vapore acqueo, ammoniaca e carico aerosolico. L'intervallo di misura ha raggiunto 3 km, le risoluzioni spaziale e temporale si sono spinte fino a 15 m e 6 s, rispettivamente.

Successivamente il laboratorio FSN-TECFIS-DIM ha effettuato due campagne di misura per la stima di polveri provenienti da emissioni diffuse presso impianti industriali, utilizzando la tecnica illustrata qui di seguito.

I dati delle campagne di misura sopra citate sono di proprietà dei rispettivi committenti, pertanto non sono stati oggetto di pubblicazioni né di divulgazioni.

3. Il sistema lidar

3.1 La tecnica LiDaR (Light Detection and Ranging): principi generali

La tecnica lidar nasce negli anni '60 subito dopo l'invenzione del laser. Infatti sono le caratteristiche di monocromaticità, collimazione, brillantezza a far sì che il telerilevamento basato sulla diffusione della luce visibile sia possibile e conveniente in una varietà di situazioni.

Tra le varie configurazioni possibili, la tecnica lidar prevede l'invio di una radiazione laser impulsata coassialmente ad un telescopio di ricezione. Le molecole atmosferiche e gli aerosol (gocce, polveri) dispersi lungo il cammino ottico producono un eco che viene misurato dal sistema di ricezione e, dopo una serie di analisi che verranno descritte o accennate più avanti, fornisce il valore della sezione d'urto di retrodiffusione delle polveri rilevate in un certo volume. Utilizzando un modello fisico di diffusione da particelle basato sulla teoria di Mie, è possibile associare alla sezione d'urto rilevata i parametri microfisici dell'aerosol relativi a tale valore (superficie, volume, massa). Questo è ovviamente un processo delicato (richiede la soluzione del cosiddetto problema inverso di scattering, che è un problema mal posto in senso matematico), ed è infatti la fonte principale dell'incertezza del risultato. In letteratura, comunque, esistono stime dell'errore relativo di massa con questo metodo, che possiamo quantificare attorno al 50%.

Il tempo di volo della radiazione laser permette il ranging del bersaglio, in questo caso composto da aerosol e molecole di gas atmosferici. Gli aerosol a loro volta si possono dividere in solidi (polveri) e liquidi (gocce), distinguibili dalla forma. Se infatti la luce inviata è polarizzata linearmente in un piano, le particelle sferiche possono essere discriminate dalla polvere a causa della peculiare caratteristica di non introdurre componenti polarizzate ortogonalmente rispetto alla luce incidente, mentre corpi a geometria più complessa presentano un segnale a polarizzazione ortogonale. Il rapporto tra le sezioni d'urto a polarizzazione ortogonale e parallela è detto rapporto di depolarizzazione dell'aerosol. Dalla vasta letteratura sull'argomento si può

estrapolare un valore indicativo di depolarizzazione fino al 50% per polveri minerali, quando per molecole e gocce si osservano valori inferiori al 2%. In questo modo è possibile separare il contributo delle gocce da quello delle polveri.

Grazie all'analisi temporale del segnale si riesce a ricostruire profili con risoluzione (spaziale) dell'ordine della decina di metri e (temporale) del minuto. Per queste caratteristiche i sistemi lidar a depolarizzazione sono indicati per la quantificazione di polveri in condizioni in cui non sono possibili altre tecniche in situ. Queste, infatti, se generalmente producono misure più precise ed accurate, oltre al limite ovvio della posizionabilità in aree remote pongono il problema della rappresentatività e scalabilità della misura. Gli strumenti di telerilevamento come il lidar, per loro natura, forniscono misure molto rappresentative seppur meno accurate e precise.

Il sistema che verrà impiegato per le stime delle emissioni diffuse prevede un laser Nd:Yag, emettente alle lunghezze d'onda della seconda e terza armonica (532 e 355 nm), un telescopio riflettore da 210 mm di diametro e 2415 mm di focale, movimentabile attraverso una montatura equatoriale motorizzata e due rivelatori a polarizzazione. Il diaframma di campo permette campi di vista confrontabili con la divergenza del fascio laser, permettendo una adeguata reiezione del rumore congiuntamente all'impiego di filtri interferenziali a banda stretta ($< 1\text{nm}$). La strettezza della zona cieca vicino allo strumento è garantita invece dalla coassialità dei percorsi di emissione e ricezione, garantendo quindi le prime misure attendibili entro il centinaio di metri.

3.2. Metodo di inversione dei dati

Il metodo di inversione dati che sarà adottato prevede la calibrazione dei singoli profili lidar rispetto all'eco molecolare, stimato in troposfera libera, e la risoluzione dell'equazione lidar con il metodo classico (Klett, Fernald). E' questo il metodo più diffuso e ampiamente documentato in letteratura. Sebbene la risoluzione dell'equazione del lidar elastico (che non verrà discussa qui) risulti un problema sottodeterminato, si risolve imponendo a priori una relazione tra il contributo all'estinzione e alla retrodiffusione degli aerosol. Tale relazione è generalmente fissata in un rapporto estinzione/retrodiffusione, detto rapporto lidar e rappresenta un nodo fondamentale nella determinazione quantitativa delle caratteristiche degli aerosol a partire da dati lidar elastici. E' ormai ben dimostrato che il rapporto lidar può variare tra 20 e 80 considerando la quasi totalità dei casi possibili.

La calibrazione del profilo permette la separazione del contributo aerosolico da quello molecolare, e necessita di una parte di profilo esente da eco aerosolico. Per raggiungere tale caratteristica è necessario quindi che il percorso sia inclinato quanto basta per raggiungere la troposfera libera (orientativamente al di sopra di 3 km) su un percorso campionato di circa 10 km. Da ciò si deduce che, pensando di calibrare il segnale oltre i 6 km di distanza, l'angolo di elevazione sarà ragionevolmente attorno ai 30° . Sarà da valutare

in campagna la possibilità di esportare la calibrazione a profili differenti e variare a piacere l'angolo di inclinazione per effettuare scansioni arbitrarie.

A valle dell'acquisizione e calibrazione dei profili si inserisce il modulo vero e proprio di quantificazione del particolato. Poiché i sistemi lidar elastici monostatici forniscono per loro natura un dato di sezione d'urto di retrodiffusione, per la determinazione di quantità microfisiche dell'aerosol osservato (concentrazione, volume, massa, superficie) occorre fare riferimento a misure ad hoc e/o modelli di scattering che accoppino le proprietà ottiche alle caratteristiche microfisiche. Sono naturalmente possibili svariati approcci, alcuni dei quali saranno brevemente descritti qui di seguito.

In letteratura sono reperibili molti esempi di impiego del lidar elastico per la quantificazione del PM, a partire dalla fine degli anni '90 (Holmén et al., 1998). La stima dei flussi è effettuata accoppiando le misure lidar con misure di vento sulle sezioni interessate, mediate sullo stesso intervallo temporale della misura lidar. Come riferimento si può leggere l'articolo di Bingham et al., 2009.

Da un punto di vista strumentale sono stati impiegati una gran varietà di strumenti, eventualmente accoppiati con misure ancillari indipendenti (OPC, PM sampler, fotometri solari). I metodi di inversione del segnale lidar e la successiva quantificazione della concentrazione di massa dipendono ovviamente dal sistema utilizzato. Se da un lato è intuibile che maggiore è il numero di parametri misurati, maggiore saranno i vincoli che possono essere posti in fase di inversione, rendendo la misura teoricamente più attendibile, d'altro canto ciò aumenta il rischio che qualche errore sistematico nelle misure o nella fusione dei vari dati si insinuino nella catena di analisi, portando i risultati lontano dal valore vero. Si preferisce quindi adottare un approccio più conservativo, imponendo meno vincoli e avere una misura più accurata seppur a scapito della precisione, cioè un valore medio più certo, a patto di accettare un errore maggiore.

In alcuni lavori sono stati utilizzati lidar elastici automatici (ceilometer), a volte accoppiando il dato lidar con misure fotometriche indipendenti (Munoz and Alcañiz 2012, Munkel et al., 2004). Altrove si è sfruttata la misura della depolarizzazione per discriminare l'aerosol grossolano (frazione coarse, con raggi modali oltre il micron) e con sferico (tipicamente polveri minerali) dalla frazione fine che, date le dimensioni minori, appare sostanzialmente sferica nel visibile e pertanto non produce radiazione depolarizzata (Mamouri and Ansmann, 2014; Royer et al., 2011). In Ansmann et al. 2014 è riportata una rassegna di coefficienti di conversione massa-estinzione pubblicati negli ultimi anni.

E' stato però dimostrato che, in fase di inversione del segnale con il metodo classico, l'errore che si commette sul coefficiente di retrodiffusione è minore che per l'estinzione, proprio a causa della sottodeterminazione dell'equazione del lidar elastico (cfr. Wiegner et al., 2014). Un esempio, tratto da misure di un ceilometer Jenoptik CHM15k, è riportato nella seguente figura.

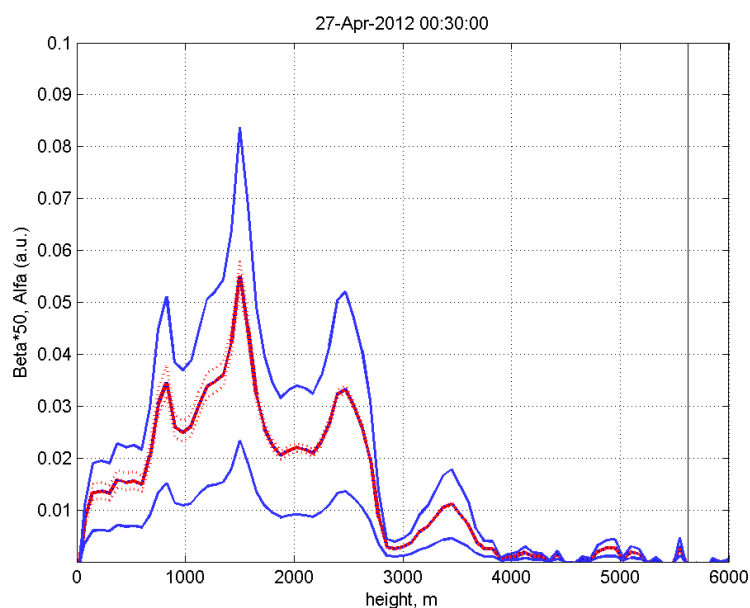


Figura 1. Profili di α, β ricavati da misure di un ceilometer Jenoptik CHM15k con i relativi intervalli di confidenza (rosso per β e blu per α)

Essa mostra i profili sovrapposti del coefficiente di retrodiffusione (moltiplicato per 50) e di estinzione, supposto un rapporto lidar pari a 50, nello strato limite planetario in un giorno di evento sahariano. Le linee blu rappresentano i profili estremali di estinzione per valori della costante lidar pari a 20 (inferiore) e 80 (superiore). Tali valori comprendono la quasi totalità delle distribuzioni di aerosol osservabili in atmosfera. Le linee tratteggiate rosse rappresentano invece i profili estremali, per le corrispondenti scelte della costante lidar, del coefficiente di retrodiffusione. Si può quantificare l'errore - associato alla non conoscenza delle caratteristiche dell'aerosol - sull'integrale dell'estinzione attorno al 20-40%, mentre sul coefficiente di retrodiffusione attorno all'1-4%. Se da un lato vari lavori sperimentali e modellistici hanno prodotto vari esempi di coefficienti di conversione estinzione-massa, è d'altra parte evidente che utilizzare un coefficiente estinzione-massa, nel caso di un lidar elastico senza vincoli, è soggetto ad un errore molto maggiore rispetto all'uso del coefficiente di retrodiffusione.

In base a quanto detto sopra l'analisi dei dati si seguirà il metodo descritto in Barnaba and Gobbi, 2001 e in Barnaba and Gobbi, 2002. Tale approccio, basato sulla generazione di un gran numero di tipologie di aerosol mediante un modello Monte Carlo e l'applicazione del modello di diffusione di Mie ai dati microfisici dell'aerosol generato, porta alla generazione di una relazione funzionale capace di accoppiare al dato di retrodiffusione i valori corrispondenti di estinzione, superficie e volume mediati su tutte le tipologie verosimili di aerosol. Un certo numero di flag selezionabili a priori possono restringere il campo per includere o escludere alcuni tipi particolari di aerosol in caso misure accessorie o modelli possano confermarne o escluderne la presenza (ad esempio polveri grossolane non sferiche durante eventi di avvezione sahariana).

Tale metodo è stato validato con campagne di misura dedicate e, rimandando all'articolo originale per maggiori dettagli (Gobbi et al., 2003), si può concludere che i valori ottenuti dal lidar possono essere considerati precisi entro un 40% di errore relativo.

3.3. Posizionamento delle osservazioni e stima dei flussi

Dato che le emissioni sfuggite alla captazione sono osservabili in uscita dalle aperture in prossimità del tetto degli edifici, una scansione su un piano orizzontale o leggermente obliquo al di sopra del tetto è ragionevolmente significativa delle emissioni totali. Va ricordato che, grazie alla possibilità di ranging offerte dal sistema a tempo di volo e alla possibilità di variare l'angolo di orientamento orizzontale del sistema, è possibile ottenere una sezione della concentrazione di particolato che attraversa il piano di scansione. L'integrale del valore sul piano, moltiplicato per la velocità del vento ortogonale al piano stesso permette infine il calcolo del flusso emissivo.

Il problema principale che si pone a questo punto è la stima della componente normale del vento al piano di scansione. Il metodo migliore per ottenere questo dato è ancora al vaglio, ma rappresenta un problema indipendente dalla tecnica lidar.

Il metodo più preciso sarebbe quello di ricorrere ad un lidar Doppler che permette di ricostruire con grande precisione, accuratezza e risoluzione spazio-temporale il campo di vento in un range di qualche km. C'è però da dire che questo tipo di strumentazione è molto costosa, per cui spesso è necessario ricorrere a misure più semplici e meno precise. Va comunque notato che, visto che in generale il piano di scansione è poco inclinato, la componente normale al piano sarà comunque dominata dalla proiezione della componente orizzontale della velocità del vento rispetto alla componente verticale (ordine dei m/s, rispetto ai cm/s). Queste misure sono facilmente realizzabili per mezzo di semplici anemometri a coppette, o meglio ultrasonici. Per determinare la velocità in quota si utilizzeranno quindi le canoniche relazioni di scaling logaritmico.

4. Il lidar ELIASS

Il lidar ELIASS (Elastic Lidar for Aerosol Sensing System) è un radar ottico monostatico a due polarizzazioni, operante a 355 nm per la rivelazione di polveri a distanze comprese tra 100 m e vari km, adattato, in queste campagne, alle necessità di misure quantitative di polvere in ambiente industriale.

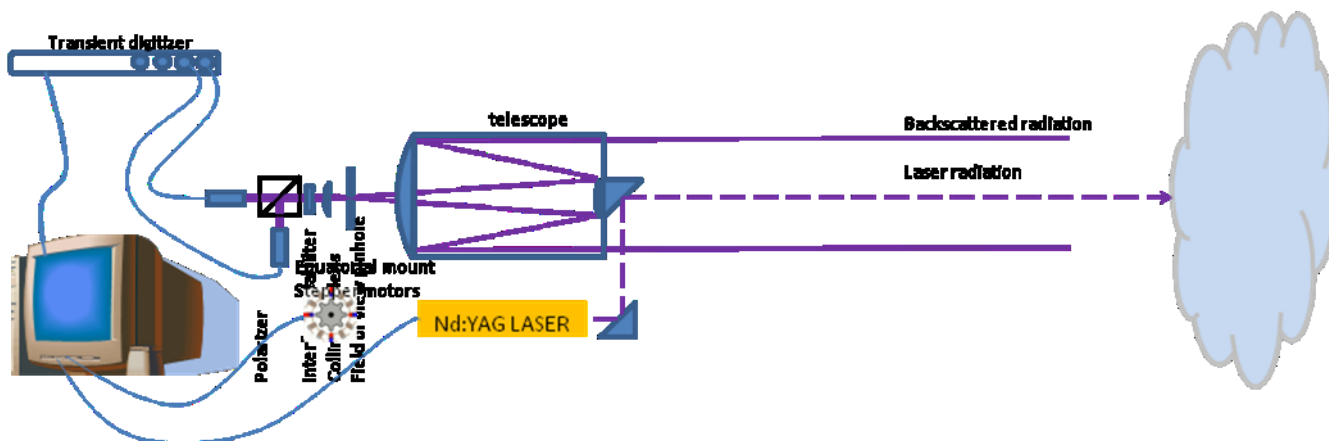


Figura 2. Schema a blocchi del lidar ELIASS utilizzato per la campagna di monitoraggio.

Lo schema del sistema, rappresentato in Figura 2, mostra un trasmettitore laser che emette impulsi brevi in modalità coassiale con l'ottica di raccolta costituita da un telescopio Cassegrain. Il segnale proveniente dalla retroriflessione del particolato atmosferico viene analizzato nella componente di polarizzazione e inviato a due rivelatori sensibili del tipo PMT (Photomultiplier Tubes). Il segnale analogico viene acquisito da una elettronica che lo converte digitalmente per essere successivamente acquisito e processato dal PC di controllo che sovrintende anche alla predisposizione delle scansioni da effettuare (angolo ed elevazione da impostare).

La scelta della lunghezza d'onda è stata fatta tenendo conto della necessità di operare ad angoli di elevazione molto bassi ed aumentare quindi la sicurezza del sistema. Inoltre, a questa lunghezza d'onda il segnale molecolare è maggiore che nel visibile-infrarosso, rendendo più precisa la calibrazione del sistema e quindi diminuendo l'errore sul retrieval della sezione d'urto aerosolica. Il sistema è illustrato in Figura 3.



Figura 3. Il sistema lidar ELIASS ed il montaggio sul laboratorio mobile.

4.1. Quantità misurabili

Il lidar elastico misura la sezione d'urto di molecole e aerosol inquadrati nel campo di vista (FOV, da Field Of View) del sistema telescopio-rivelatore. Nota teoricamente la sezione d'urto delle molecole d'aria è possibile quindi calcolare la sezione d'urto di retrodiffusione (coefficiente di retrodiffusione o backscattering coefficient) di tutto ciò che è disperso in aria (gocce, polveri, nubi, ghiaccio).

La presenza di due canali di rivelazione sensibili a differenti polarizzazioni lineari degli echi luminosi (polarizzazione parallela al laser inviato e polarizzazione ortogonale, rispettivamente PP e PO) permette di discriminare tra aerosol sferici e non. Dalla teoria della diffusione della luce sappiamo infatti che un corpo sferico non introduce (in retrodiffusione) alcuna componente di polarizzazione ortogonale ad un'onda piana incidente polarizzata linearmente. Questo fatto è di fondamentale importanza nell'impiego di lidar per la determinazione di polveri, in particolare in ambienti complessi come stabilimenti industriali in cui è essenziale distinguere le sorgenti di vapori da quelle di polveri. Per la polvere ci si può aspettare un contributo del canale PO pari fino al 50% del totale (depolarizzazione), mentre per nubi e sbuffi di vapore in genere non si osserva mai depolarizzazione superiore a qualche percento. Ciò sarà evidente nelle figure seguenti.

4.2. Descrizione dati acquisiti e analisi preliminare

Lo strumento è motorizzato su due assi, così da poter effettuare scansioni in azimut ed elevazione fino a varie decine di gradi rispetto una arbitraria origine. Per lo studio in oggetto, si è scelto di effettuare una scansione su un angolo di elevazione fisso, variando l'angolo azimutale. Nei due casi, vista la differente prospettiva di osservazione, i parametri utilizzati sono stati differenti, e verranno descritti in seguito.

La velocità di scansione è determinata dalla potenza dei motori e dalle necessità dell'elettronica di acquisizione. Le caratteristiche operative dello strumento sono state ottimizzate per ottenere scansioni angolari a diversi angoli zenitali e azimutali rispetto ad un riferimento scelto come origine. Ogni scansione è composta da un certo numero di singoli profili, ognuno integrato su un certo numero di impulsi laser per migliorare il rapporto segnale/rumore, che accostati compongono la scansione. L'acquisizione è continua, nel senso che avviene durante il movimento dei motori, così da non lasciare zone inesplorate durante lo spostamento. Il tempo di spostamento è di circa 5s per grado di spostamento, quindi i singoli profili sono mediati su questo tempo, che costituisce la massima risoluzione temporale del sistema in questa configurazione. Appena il dato è salvato e la memoria è svuotata, il sistema riprende la scansione per l'angolo successivo, fino a coprire tutto il campo determinato all'inizio. Questo processo di scansione è definito loop, e l'acquisizione successiva di più loop è chiamata scan. In genere uno scan è composto da 10 o 20 loop, a meno di interruzioni per problemi tecnici o pioggia. Il tempo per l'esecuzione di un singolo loop varia da 4 a 10 minuti, a seconda delle impostazioni. La risoluzione spaziale invece è fissata, da un lato, dalla frequenza di campionamento dell'elettronica di acquisizione (125 MHz, che corrispondono ad 8 ns e quindi ad 1.2 m, considerando il doppio viaggio andata/ritorno alla velocità della luce); dall'altro, dalla risoluzione angolare impostata che determina una risoluzione variabile con la distanza lungo la direzione tangenziale alla scansione. Una risoluzione di 1° consente quindi di avere dei pixel di 1.2x5 m a 300 m di distanza e di 1.2x9 m a 500 m di distanza.

L'idea alla base dell'osservazione così strutturata è che i processi avvengano a tempi casuali, e quindi un'osservazione ripetuta nel tempo riesca a cogliere, in media, tutte le emissioni che sfuggono nelle varie posizioni dell'edificio. E' evidente che non si potranno osservare tutte le emissioni, ma che su tempi lunghi è ragionevole pensare di campionare tutte le possibili fughe ed ottenere un valore rappresentativo della media temporale. L'orario associato alle misure lidar è da intendersi riferito al fuso orario CET (Central Europe Timezone), quindi non risentono del passaggio all'ora legale.

In Figura 4 è mostrato l'insieme dei dati ricavati dall'analisi di un profilo lidar. A sinistra sono visibili i profili del segnale parallelo e ortogonale (PAR e CRS), sovrapposti ai rispettivi segnali molecolari. Dopo la calibrazione del segnale molecolare, si ottengono i profili di estinzione e backscattering e volume totale degli aerosol, (α , β e vol, al centro), e nel pannello di destra sono riassunti i profili fondamentali prodotti dall'analisi lidar: Rapporto di retrodiffusione R, depolarizzazione volumica, depolarizzazione aerosolica, spessore ottico dall'origine (AOD) e concentrazione di PM.

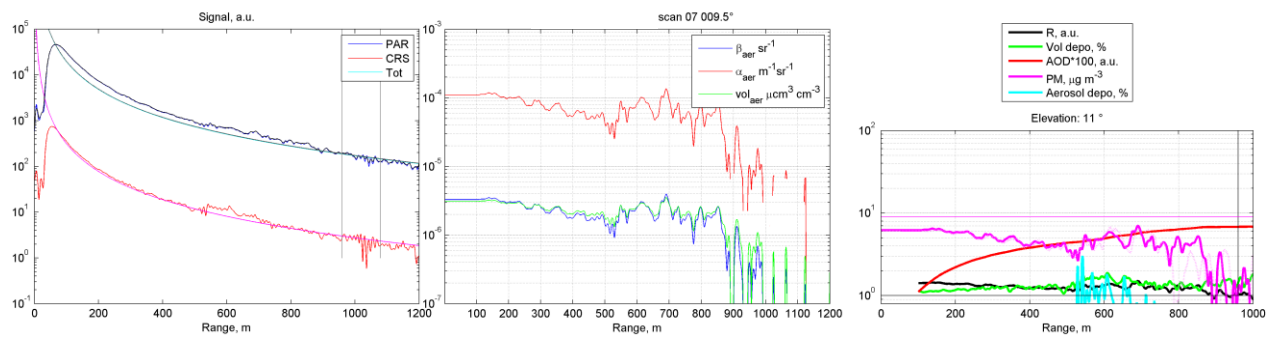


Figura 4. Profili lidar grezzi (a sinistra), e prodotti dell'elaborazione conseguente alla calibrazione sul segnale molecolare (al centro e a destra). Le quantità sono elencate in legenda. La linea magenta sottile nel plot di destra mostra invece il valore del PM10 misurato dalla centralina più vicina nel periodo considerato.

5. Metodologia di misura

L'acquisizione dei profili lidar prevede una serie di scansioni, da integrare sui rispettivi angoli fino ad ottenere un segnale dotato di un opportuno rapporto segnale/rumore. Infatti la distanza, le condizioni di illuminazione del fondo e la potenza laser disponibile influiranno sulle prestazioni del sistema in termini di segnale/rumore. Una volta ottenuta una serie di profili ad angoli adiacenti, occorre calibrare il sistema sul segnale molecolare per ottenere l'inversione del dato lidar e quindi la stima della concentrazione di particolato nella zona di interesse.

Per la calibrazione del profilo molecolare potranno essere effettuati delle scansioni ad elevazione fissata, in modo che sia possibile arrivare in troposfera libera (quota >3 km) con un rapporto segnale/rumore soddisfacente.

5.1. Analisi dei dati lidar

L'analisi dei dati lidar, come per la quasi totalità dei dati telerilevati, necessita di qualche accortezza e in qualche caso di alcune assunzioni. La necessità di associare la sezione d'urto aerosolica alla concentrazione in massa prevede infatti l'utilizzo di un modello di diffusione da particelle, che associa concentrazione numerica, massa e superficie alla sezione d'urto di retrodiffusione misurata. Questo perché l'aerosol è normalmente polidisperso secondo una distribuzione dimensionale che in genere non è nota. Inoltre, la sezione d'urto dipende dall'indice di rifrazione complesso del materiale costituente l'aerosol (cioè, in ultima analisi, dalla sua composizione chimica) e, in misura minore, dalla forma media delle particelle.

Per ovviare a questi problemi si affronta spesso il problema statisticamente, associando distribuzioni dimensionali medie e plausibili ai parametri ottici misurati dal lidar. Questo permette il retrieval dei dati di massa entro un errore relativo generalmente inferiore al 50%. Il metodo utilizzato nell'analisi dei dati lidar è quello descritto di seguito e nella bibliografia ivi citata. Per una review aggiornata si può comunque consultare Mamouri and Ansmann, 2014.

5.2. Analisi qualitativa

Una prima utile caratteristica dei dati lidar è la elevata risoluzione spaziale e temporale che permette, dall'esame delle mappe del segnale range-corrected, di visualizzare le singole plume di polvere e vapore con

risoluzione di circa 10 minuti, e separare il contributo del vapore da quello delle polveri grazie al plot di depolarizzazione. Un esempio è riportato nella Figura 5.

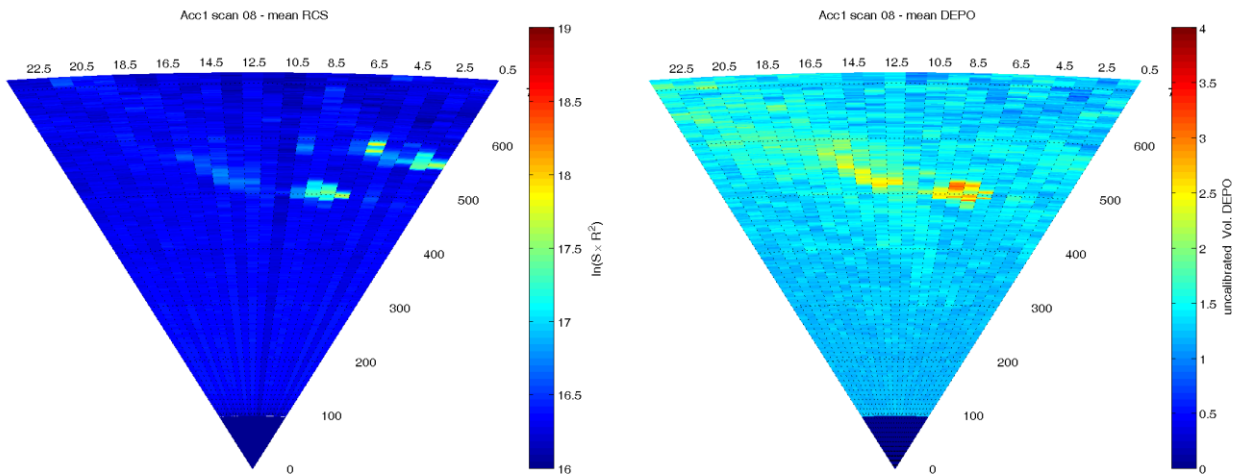


Figura 5. Segnale lidar totale e depolarizzazione.

Il coefficiente di depolarizzazione visualizzato è il cosiddetto coefficiente di depolarizzazione volumico (volume depolarization), classicamente indicato con la lettera δ . Esso è definito dalla relazione (Cairo et al., 1999):

$$\delta = \beta_{\perp} / \beta_{\parallel}$$

ove con β_{\parallel} si è indicato il coefficiente di retrodiffusione parallelo, e con β_{\perp} il coefficiente ortogonale. Questa definizione, se da un lato non è molto utile per definire in assoluto le caratteristiche dell'aerosol poiché, basandosi sulla sezione d'urto totale (aerosolica più molecolare, da cui volumica) non rende conto della concentrazione di aerosol ed associa valori differenti di depolarizzazione allo stesso aerosol se presente in concentrazioni diverse. Inoltre, a 355 nm il coefficiente di retrodiffusione molecolare è più intenso rispetto all'aerosolico che nel vis-IR, dando luogo a depolarizzazione volumica inferiore a parità di aerosol, rispetto a lunghezze d'onda superiori. Per contro, è una quantità subito disponibile dai dati grezzi una volta calibrati i due canali di ricezione, e permette comunque una valutazione qualitativa delle caratteristiche dell'aerosol.

In Figura 5 è visibile a sinistra il segnale corretto del fattore di diluizione r^{-2} (RCS). E' stato dimostrato (Angelini and Gobbi, 2014) che questa quantità è un ottimo indicatore della presenza di aerosol, e permette una serie di analisi automatiche come la segmentazione ed il rilevamento automatico di strutture di aerosol e nubi. Ad angolo di circa 2° è visibile un picco di eco, che non corrisponde però a destra ad un massimo di depolarizzazione. Ciò è dovuto al fatto che gli aerosol responsabili di questo eco non producono segnale depolarizzato, indicandone la buona sfericità, e quindi rivelandone l'origine liquida. Per contro, i massimi di depolarizzazione a 8° e 13° , mostrano una elevata non-sfericità, associata alla natura solida dell'aerosol.

L'esame dei profili delle singole scansioni permette l'individuazione di singole plume di polveri con elevata risoluzione spazio-temporale che, associate ad esempio con i record di produzione, possono aiutare ad isolare processi critici nei singoli passaggi dei cicli produttivi o dei processi di abbattimento polveri. D'altra parte, per analisi qualitative può essere utile avere a disposizione le misure con la maggior risoluzione temporale possibile, anche a scapito del rapporto segnale/rumore; per questo motivo in allegato D sono riportati i grafici dei singoli loop acquisiti, in termini di RCS e depolarizzazione.

5.3. Analisi quantitativa

Con dati medi, e quindi con un miglior rapporto segnale-rumore, è possibile calibrare il dato lidar sul segnale molecolare, e ricavare quindi la parte di segnale derivante dall'aerosol. Un segnale troppo rumoroso rende infatti inaffidabile la calibrazione e pertanto porta un errore poco quantificabile sull'inversione del dato. Mediando tra loro gli scan si ottiene una serie di profili con miglior rapporto segnale/rumore e rappresentativi delle emissioni medie del periodo in esame. A questo punto si può procedere all'analisi quantitativa dei dati lidar, come descritta nella sezione "Protocollo di misure lidar per la stima delle emissioni diffuse". L'inversione dei dati lidar permette a questo punto di ottenere dei contour-plot del coefficiente di retrodiffusione – la sezione d'urto ottica – che, attraverso un modello di aerosol, fornisce il valore dell'estinzione (quindi dello spessore ottico) e del volume totale dell'aerosol per unità di volume di atmosfera. Attraverso una stima di densità si può risalire alla concentrazione del particolato sospeso totale di polveri.

Il modello di diffusione da aerosol utilizzato accoppia infatti i parametri ottici delle particelle al loro indice di rifrazione e alle loro dimensioni, e per ottenere la massa è necessario ipotizzarne la densità. La possibilità che gli aerosol prodotti dai processi di acciaieria si discostino molto dalle caratteristiche tipiche dell'aerosol continentale non è da scartare, sia in quanto a indice di rifrazione, sia in quanto a distribuzione dimensionale. Inoltre, una densità tipica di aerosol crostale (2.5 g/cm^3) è stata ipotizzata, anche se non è detto che non sottostimi il valore vero. Comunque, Moss et al., (1972) hanno trovato valori di 2.55 g/cm^3 per sfere di ossido di ferro, mentre Pitz et al., 2003, hanno misurato la densità di aerosol urbani, ottenendo raramente valori oltre 2 g/cm^3 .

In Figura 6 è mostrato il contour-plot dei valori di PM elaborato a partire dai dati di uno scan integrato su vari loop.

Il modello di aerosol per l'elaborazione è descritto in Barnaba and Gobbi, 2002, per aerosol generico continentale. Per modello di aerosol si intende l'insieme dei parametri microfisici che caratterizzano la popolazione del particolato in esame: distribuzione dimensionale, indice di rifrazione, ecc. Utilizzando degli insiemi di valori tipici di una popolazione nelle equazioni della diffusione di Mie per sfere dielettriche, si

possono collegare tra loro le caratteristiche ottiche a quelle fisiche. Ovviamente in questo processo si annida un'ambiguità legata al fatto che la popolazione aerosolica è generalmente sconosciuta, il che è la fonte principale dell'incertezza legata a questo metodo. Tuttavia, tante più informazioni accessorie e indipendenti si hanno sulla tipologia di aerosol, tanto minore ci si aspetta l'incertezza.

L'impiego accoppiato della depolarizzazione, come detto, permette di isolare le polveri, evitando sovrastime date dal contributo dell'acqua condensata, emessa spesso dalle sorgenti convogliate e non. Per ottenere però grafici come in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e Figura 6**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, tuttavia, è necessaria un'accurata analisi manuale da parte di personale esperto in tecnica lidar, operazione che richiede parecchio tempo.

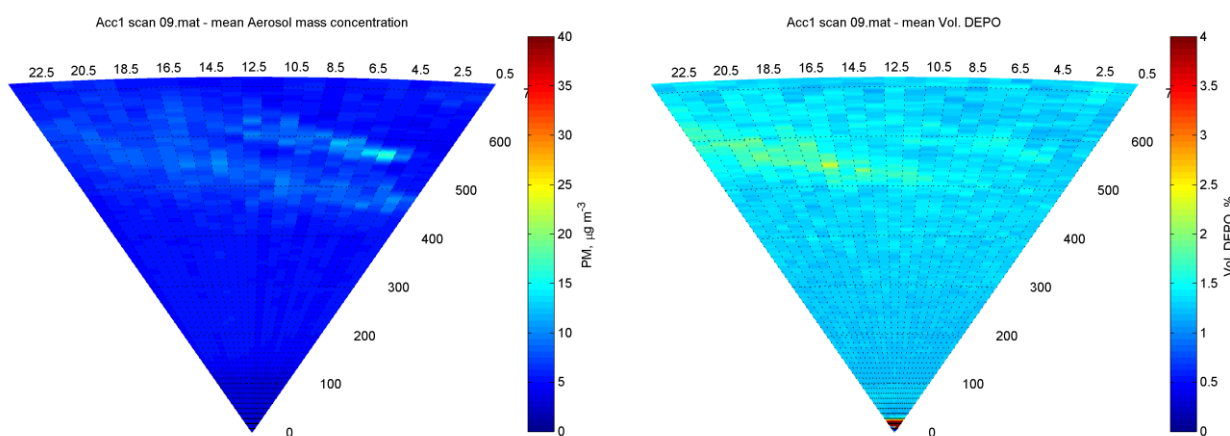


Figura 6. PM e depolarizzazione misurate durante uno scan

6. Calcolo delle emissioni dai dati lidar

Una volta ottenuta la mappa di PM dai dati lidar, occorre stimare il flusso totale emesso attraverso la superficie di scansione. Se non è disponibile il campo di vento telerilevato ad esempio con dei sodar o un lidar doppler, occorrerà ricorrere ad un semplice modello geometrico. Si considera infatti che la misura di concentrazione andrà moltiplicata per la componente della velocità del vento ortogonale al piano di scansione, per ottenere il flusso totale. Per definizione si ha:

$$dF = \rho \, dS \cdot v,$$

ove dS rappresenta il vettore ortogonale alla superficie infinitesima S considerata e v la velocità di spostamento del fluido, e \cdot è l'operazione di prodotto scalare; ρ è la densità volumica di aerosol, espressa generalmente in $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Come detto, essa è ottenuta imponendo una densità del bulk pari a $2.5 \text{ g}/\text{cm}^3$.

Calcolando per ogni pixel della mappa questa quantità è facile integrare la relazione precedente ed ottenere il flusso integrale.

Tuttavia, il problema della stima della componente ortogonale del vento non è banale, e costituisce una fonte di errore piuttosto importante. Poiché la polvere diffusa al di fuori dell'edificio può essere molto calda, ed associata a plume di aria calda, non è facile assegnare un comportamento univoco a questo tipo di diffusione. Se essa è assimilabile ad una plume, con velocità di salita determinata e coerente, occorrerebbe utilizzare la velocità di salita della plume stessa, che si può stimare in vari modi. Esistono infatti più metodi capaci di misurare la velocità di salita di plume visibili, sviluppati sia per vulcani che per navi o per impianti industriali, a partire da sequenze di immagini. Molti di questi sono basati sul block matching all'interno di filmati video; una review di queste tecniche è descritta in: Yaakob et al., 2013.

D'altra parte, però, è anche ragionevole supporre che le emissioni diffuse attorno agli impianti dipendano dal vento, capace di innescare moti non previsti nei sistemi di raccolta e convogliamento dei fumi e tra le aperture dell'edificio (finestre, fessurazioni e giunture delle lamiere di copertura). Per questo motivo si può anche supporre che il responsabile maggiore del flusso di aerosol (detto quindi fuggitivo) sia la componente ortogonale alla superficie di scansione del vento orizzontale.

Purtroppo una misura precisa del campo di vento non è facile né economica: sono infatti disponibili strumenti di telerilevamento progettati a questo scopo, ma tutti molto ingombranti, costosi e impegnativi da maneggiare (sodar, VHF wind profiler, lidar doppler). E' anche doveroso ricordare che in ambiti complessi come quelli attorno le acciaierie sono presenti molti vincoli che limitano le possibilità di funzionamento di questi strumenti (rumore acustico, limitazioni al campo di vista, presenza di ostacoli metallici, valori limite di esposizione a radiazioni non ionizzanti, ecc.).

Per questo motivo, come approssimazione di base, nel presente lavoro è stato utilizzato il vento orizzontale come forzante delle emissioni diffuse da acciaieria, considerando la sua proiezione ortogonale al piano di scansione:

$$V_{\perp} = |V| \sin(\alpha),$$

ove con α si intende l'angolo di elevazione del lidar rispetto all'orizzonte. La direzione del vento non viene considerata, a causa dei molto probabili errori associati. L'orografia urbana complessa, complicata ad esempio dalla presenza della linea di costa o orografia elevata nei dintorni, può infatti introdurre errori sistematici quanto casuali tali da falsare la stima. In questa prospettiva, considerare la direzione del vento orizzontale sempre ortogonale al piano di scansione porta a calcolare un valore che può essere considerato come estremante superiore delle stime di flusso.

A questo punto occorre fare una considerazione sulla necessità di decurtare il carico aerosolico di fondo dal computo del flusso, onde evitare di considerare gli aerosol presenti in maniera più o meno uniforme nel territorio circostante. Questo si può fare facilmente a partire dalle mappe di PM ottenute con il lidar,

considerando due zone confinanti: una sovrastante l'acciaieria ed una composta da una fascia attorno, larga circa 100 m. La geometria è mostrata in Figura 5 e **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** La concentrazione misurata sulla seconda zona è sottratta al valore misurato nella prima zona. E' importante che questa comprenda tutte le possibili sorgenti di polveri, sia per non perdere segnale utile, sia per non sovrastimare il fondo. Al contrario, se è maggiore del necessario non è grave, in quanto il valore di fondo registrato nelle zone periferico sarà decurtato e non darà contributi al flusso netto.

Uno studio di sensibilità ha mostrato che, spostando la zona di calcolo del fondo 50 m all'esterno dell'edificio, lo scarto quadratico medio tra i valori di flusso computati nei due modi è inferiore al 6‰.

Inoltre, questo riscaldamento mette al riparo in buona approssimazione da errori di calibrazione nel molecolare, in quanto il coefficiente di conversione retrodiffusione-volume è quasi lineare, pertanto se si commette un errore nel calibrare il molecolare, questo in buona parte si cancellerà con la sottrazione del fondo.

Il flusso totale si ottiene quindi dalla formula:

$$F = \sum_{i,j} C_{ij} \cdot dX \cdot dY \cdot \langle v \rangle \cdot \sin(\alpha) \, dx ,$$

ove C_{ij} è la concentrazione netta di particolato, dX è la larghezza di ogni bin, data da $dX = \Delta\beta \cdot r$ e dY la lunghezza, fissata in 1.2 m dal tempo di campionamento della scheda di acquisizione. $\langle v \rangle$ rappresenta il valor medio del modulo del vento nel periodo di scansione (in genere attorno ad un'ora). Va detto che, poiché il vento da considerare si trova ad una quota di circa 100 m, il valore al suolo è stato riscaldato con la classica legge di potenza. In essa, la velocità del vento alla quota z_1 è calcolata dalla velocità alla quota z_0 mediante la formula:

$$v_1 = v_0 \left(\frac{z_1}{z_0} \right)^{1/7} .$$

Poiché a causa del rumore alcuni valori di C_{ij} possono risultare nulli o negativi, una stima superiore può essere ricavata dal prodotto del flusso medio per la superficie, mentre una stima di minima considerando nulli tutti i valori negativi.

7. Conclusioni

Sono stati discussi i metodi di acquisizione ed analisi dei dati lidar per la stima di emissioni diffuse da impianti industriali. Le misure di concentrazione di particolato da lidar elastico rappresentano una stima il cui errore relativo è generalmente considerato dell'ordine del 50%. D'altra parte, misure più accurate in situ

non sono possibili a causa della conformazione degli edifici, ponendo inoltre seri problemi di rappresentatività, in quanto la superficie da monitorare risulta particolarmente estesa.

Nel calcolo dei flussi, a partire dalla concentrazione volumica di particolato ottenuta tramite lidar, occorre considerare altre possibili sorgenti di errore: dalla geometria di scansione alla disomogeneità del campo del vento, dall'extrapolazione del profilo del vento e della direzione in quota al rumore casuale cui è soggetta la misura lidar su tutti i punti del piano di scansione. Per tale motivo, le stime sono stati calcolati imponendo vincoli differenti, così da ottenere un valore di ensemble, la cui coerenza può essere considerata stima della bontà del dato. Per ulteriore cautela, inoltre, nei passaggi più incerti sono stati adottati criteri di sovrastima.

Si nota quindi, in conclusione, che non è possibile associare incertezze o intervalli di confidenza a questi valori, a causa del fatto che, come osservato in precedenza, la misura lidar è per forza di cose indiretta e dipende da una serie di misure cui è difficile associare un errore.

E' per questo motivo che i coefficienti determinabili sono dichiarati stime e non possono rappresentare misure certificabili in alcun modo, per lo meno allo stato attuale della tecnologia lidar.

8. Bibliografia di base

Barnaba F. and Gobbi, G. P.: Lidar estimation of tropospheric aerosol extinction, surface area and volume: Maritime and desert-dust cases, *J. Geophys. Res.*, 106, 3005–3018, 2001

Barnaba, F. and Gobbi, G. P.: Correction to “Lidar estimation of tropospheric aerosol extinction, surface area and volume: Maritime and desert-dust cases” by F. Barnaba and G. P. Gobbi, *J. Geophys. Res.*, 107, 4180, 2002

Gail E. Bingham, Christian C. Marchant, Vladimir V. Zavyalov, Douglas J. Ahlstrom, Kori D. Moore, Derek S. Jones, Thomas D. Wilkerson, Larry E. Hippias, Randal S. Martin, Jerry L. Hatfield, John H. Prueger, Richard L. Pfeiffer: Lidar based emissions measurement at the whole facility scale: Method and error analysis, *Journal of Applied Remote Sensing*, Vol. 3, 033510 (20 February 2009)

Gobbi, G. P., Barnaba, F., Van Dingenen, R., Putaud, J. P., Mircea, M., and Facchini, M. C.: Lidar and in situ observations of continental and Saharan aerosol: closure analysis of particles optical and physical properties, *Atmos. Chem. Phys.*, 3, 2161–2172, 2003

Britt A. Holmen, William E. Eichinger And Robert G. Flocchini: Application of Elastic Lidar to PM10 Emissions from Agricultural Nonpoint Sources, *Environ. Sci. Technol.* 1998, 32, 3068-3076

Christoph Munkel, Stefan Emeis, Wolfgang J. Müller, Klaus Schäfer: Aerosol concentration measurements with a lidar ceilometer: results of a one year measuring campaign, *Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere VIII*, Proc. of SPIE Vol. 5235, 2004

R. C. Muñoz, R. I. Alcañiz: Variability of Urban Aerosols over Santiago, Chile: Comparison of Surface PM10 Concentrations and Remote Sensing with Ceilometer and Lidar, *Aerosol and Air Quality Research*, 12: 8–19, 2012

P. Royer, P. Chazette, K. Sartelet, Q. J. Zhang, M. Beekmann, and J.-C. Raut: Comparison of lidar-derived PM10 with regional modeling and ground-based observations in the frame of MEGAPOLI experiment, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 10705–10726, 2011

Wiegner et al.: “What is the benefit of ceilometers for aerosol remote sensing? An answer from EARLINET”, *Atmos. Meas. Tech.*, 7, 1979–1997, 2014

F. Angelini, G. P. Gobbi: Some remarks about lidar data preprocessing and different implementations of the gradient method for determining the aerosol layer, *Annals of geophysics*, 2014

Owen R. Moss, Harry J. Ettinger, James R. Coulter: Aerosol density measurements using a modified spiral centrifuge aerosol spectrometer, *Environ. Sci. Technol.*, 1972, 6 (7), pp 614–617

R. E. Mamouri and A. Ansmann: Fine and coarse dust separation with polarization lidar, *Atmos. Meas. Tech.*, 7, 3717–3735, 2014

Pitz, M., Cyrys, J., Karg, E., Wiedensohler, A., Wichmann, H. E., & Heinrich, J. (2003). Variability of apparent particle density of an urban aerosol. *Environmental Science & Technology*, 37(19), 4336-4342.

Yaakob et al., A Comparison of Different Block Matching Algorithms for Motion Estimation, *Procedia Technology* 11 (2013) 199–205

ENEA
Servizio Promozione e Comunicazione
www.enea.it

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati
Agosto 2017