

OK

Monitoraggio atmosferico mediante telerilevamento laser nella Provincia di Brindisi

F. Colao, D. Del Bugaro, L. Fiorani, A. Palucci

ENEA FIM-FISLAS, Via Enrico Fermi 45, 00044 Frascati RM, Italy



Monitoraggio atmosferico mediante telerilevamento laser nella Provincia di Brindisi

Atmospheric monitoring by laser remote sensing in the Province of Brindisi

Riassunto

Questo rapporto riassume i risultati ottenuti con il lidar atmosferico ATLAS durante la campagna di misura svolta a Brindisi nel luglio 2008. ATLAS è montato nel laboratorio mobile ENVILAB ed è basato su un laser CO₂ impulsato accordabile. Etilene, vapore acqueo, ammoniaca, ozono e carico di aerosol sono stati ricostruiti lungo il cammino ottico. Questi risultati hanno fornito informazioni sulla dinamica spaziotemporale dell'inquinamento atmosferico.

Abstract

This report summarizes the results obtained by the atmospheric lidar ATLAS during the measurement campaign carried out in Brindisi on July 2008. ATLAS is mounted on the mobile laboratory ENVILAB and is based on a tunable pulsed CO₂ laser. Ethylene, water vapor, ammonia, ozone and aerosol load have been retrieved along the optical paths. Those results provided information on the spatiotemporal dynamics of atmospheric pollution.

Parole chiave: lidar, retrodiffusione elastica, assorbimento differenziale, inquinanti, aerosol, vapore acqueo.

Key words: lidar, elastic backscattering, differential absorption, pollutants, aerosol, water vapor.

Indice

Indice	3
1 Introduzione.....	4
2 Lidar atmosferico ATLAS.....	6
3 Protocollo di misura	10
4 Siti di misura	14
5 Misure.....	17
5.1 Misure presso la centrale elettrica	17
5.2 Misure presso la zona industriale	21
6 Discussione	23
6.1 Misure presso la centrale elettrica	23
6.1.1 Quadro osservativo.....	23
6.1.2 Inquinanti.....	24
6.2 Misure presso la zona industriale	25
6.2.1 Quadro osservativo.....	25
6.2.2 Inquinanti.....	26
7 Conclusioni.....	28
Appendice 1.....	29
Appendice 2.....	30
Ringraziamenti	31
Bibliografia.....	32

1 Introduzione

All'alba del nuovo millennio, la scienza è chiamata a mettersi a servizio dell'uomo: oggi più che mai, lo sviluppo tecnologico deve armonizzarsi con il rispetto della natura. Una delle minacce attuali più gravi per l'ambiente umano è l'inquinamento atmosferico [1]: sebbene la degradazione della qualità dell'aria sia conosciuta da lungo tempo (già dal XII secolo Moses Maimonides attribuiva a questo fenomeno varie turbe della psiche umana [2]), solo di recente questi fenomeni hanno raggiunto una scala mondiale (effetto serra, assottigliamento dello strato di ozono stratosferico e piogge acide). Questa sfida planetaria richiede una collaborazione interdisciplinare dei ricercatori e un trasferimento di conoscenza verso la comunità politica che deve stabilire la legislazione appropriata per limitare l'emissione di sostanze nocive.

Numerosi processi dinamici causano l'inquinamento dell'aria, rendendo così estremamente difficile la previsione del suo livello. Negli ultimi anni si è fatto sempre più uso di modelli atmosferici [3] per valutare l'evoluzione spazio-temporale della concentrazione degli inquinanti in quanto permettono di tenere conto delle sorgenti di emissione, delle reazioni chimiche, dell'irraggiamento solare, dei fenomeni di trasporto e degli effetti di deposizione. Nondimeno, l'adeguamento delle simulazioni numeriche alla realtà richiede di validare le predizioni con misure risolte in distanza e in tempo, effettuate di continuo fino alla sommità dello strato limite planetario [4]. Per questo motivo, è stata sviluppata una grande varietà di sistemi di monitoraggio dell'aria sia "in situ", sia remoti. I primi hanno una lunga storia e sono spesso impiegati in applicazioni di routine per il loro funzionamento semplice e affidabile [5]. Fra i secondi, il radar ottico o lidar [6] si è diffuso dopo la scoperta del laser [7] e offre molti vantaggi rispetto alle tecniche usuali:

- ricostruzione continua del profilo di concentrazione di un inquinante su una distanza considerevole e con buona risoluzione spazio-temporale,
- misura senza estrazione di campioni, eliminando così il rischio di alterare l'aria da analizzare,
- determinazione integrata su un cammino, meno sensibile a effetti locali,
- capacità di scansione dell'emisfero completo, permettendo di seguire la dinamica chimico-fisica dell'atmosfera.

Il presente documento si inserisce in questo filone di applicazione concreta della ricerca scientifica, presentando i recenti risultati della campagna di misura effettuata dal lidar atmosferico sviluppato presso il centro ricerche ENEA di Frascati. Tale campagna è stata commissionata dal Servizio Ambiente della Provincia di Brindisi che ha individuato due siti chiave per le misure: la centrale termoelettrica ENEL di Cerano e la zona industriale di Brindisi.

2 Lidar atmosferico ATLAS

Il lidar atmosferico ATLAS (“Agile Tuner Lidar for Atmospheric Sensing”) [8] è stato realizzato nel quadro del Fondo Speciale per lo Sviluppo della Ricerca di Interesse Strategico, un accordo di programma tra ENEA (Ente per le Nuove tecnologie, l’Energia e l’Ambiente) e MIUR (Ministero dell’Istruzione, dell’Università e della Ricerca). ATLAS è stato sviluppato da FISLAS (Sezione Applicazioni Laser) presso il centro ricerche di Frascati ed è stato montato nel laboratorio mobile ENVILAB (“ENVironmental LABoratory”) [9].

Un lidar atmosferico [6] è essenzialmente composto da un trasmettitore (laser) e un ricevitore (telescopio). La radiazione raccolta dal ricevitore è trasformata in segnale elettrico dal rivelatore che, a sua volta, è tramutato in segnale digitale dal convertitore analogico-digitale (ADC) prima di essere memorizzato in un computer. Il principio di funzionamento del lidar atmosferico è illustrato in Fig. 1: i retrodiffusori alla distanza R dal sistema rimandano parte dell’impulso laser verso A, superficie attiva del telescopio. Conseguentemente, l’analisi del segnale rivelato in funzione di t, intervallo di tempo fra emissione e rivelazione, permette lo studio delle proprietà ottiche dell’atmosfera lungo il fascio, poiché la relazione tra t ed R è data semplicemente da:

$$R = \frac{ct}{2}, \tag{1}$$

dove c è la velocità della luce.

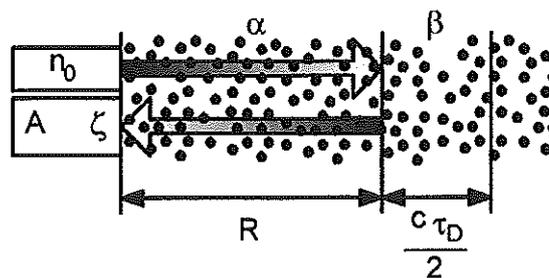


Fig. 1 – Principio di funzionamento del lidar. I punti rappresentano diffusori atmosferici generici (molecole e aerosol).

I fotoni rivelati durante τ_D , tempo di risposta del rivelatore, sono retrodiffusi dallo strato delimitato dalle distanze R ed $R+c\tau_D/2$. Il loro numero n è proporzionale allo spessore $c\tau_D/2$ e al coefficiente di

retrodiffusione β del volume d'aria coinvolto. Inoltre, nel suo viaggio di andata e ritorno, l'impulso emesso di n_0 fotoni è attenuato dall'atmosfera (legge di Lambert-Beer). Questo fenomeno è quantificato dal coefficiente di estinzione α . Infine, n è proporzionale all'angolo solido A/R^2 e all'efficienza ζ del sistema di rivelazione.

Sulla base della discussione precedente, l'equazione lidar può essere finalmente scritta:

$$n(R, \lambda) = n_0(\lambda) \zeta(\lambda) \frac{A}{R^2} \beta(R, \lambda) \frac{c\tau_D}{2} \exp\left[-2 \int_0^R \alpha(R', \lambda) dR'\right], \quad (2)$$

dove λ è la lunghezza d'onda.

In generale, alle lunghezze d'onda utilizzate in questo studio, α e β sono determinati dal carico di aerosol. In realtà, i coefficienti di estinzione e retrodiffusione sono entrambi incogniti, ma in questo studio è stato utilizzato un metodo affidabile per l'inversione dell'equazione lidar che permette di ricostruire α [10] con un errore del 10 - 20%. Per eliminare l'effetto della lunghezza d'onda sulle variazioni del coefficiente di estinzione [11] sono stati utilizzati i segnali lidar relativi a una sola riga di emissione del laser (10p20, corrispondente a 10.591 μm).

Oltre alla determinazione del carico di aerosol, il telerilevamento laser è utilizzato anche per misurare la concentrazione di gas (inquinanti, vapore acqueo, ecc.), generalmente mediante il lidar ad assorbimento differenziale (DIAL) [6]. Questo sistema è basato sulla rivelazione dei fotoni retrodiffusi da impulsi trasmessi in atmosfera a due lunghezze d'onda differenti. A una lunghezza d'onda (λ_{OFF}), la luce subisce la diffusione ordinaria dalle molecole (diffusione Rayleigh) e dagli aerosol (diffusione Mie) che compongono l'aria. mentre all'altra (λ_{ON}), è anche assorbita dal gas investigato. Più precisamente, sulla base dell'equazione lidar ed introducendo α' , variabile in cui è stato escluso l'effetto su α dovuto all'assorbimento della molecola in esame, nell'ipotesi in cui λ_{ON} e λ_{OFF} siano sufficientemente vicine, può essere scritta l'equazione DIAL:

$$C(R) = \frac{1}{2 \Delta \sigma} \frac{d}{dR} \ln \left[\frac{n(R, \lambda_{OFF})}{n(R, \lambda_{ON})} \right], \quad (3)$$

$$\Delta \sigma = \sigma(\lambda_{ON}) - \sigma(\lambda_{OFF}), \quad (4)$$

$$\Delta \alpha'(R) = \alpha'(R, \lambda_{ON}) - \alpha'(R, \lambda_{OFF}), \quad (5)$$

$$\alpha'(R, \lambda) = \alpha(R, \lambda) - C(R)\sigma(\lambda), \quad (6)$$

dove C e σ sono, rispettivamente, la concentrazione e la sezione d'urto della sostanza da monitorare.

Il lidar atmosferico ATLAS può operare in modalità DIAL in quanto è possibile accordare rapidamente il trasmettitore sulle due lunghezze d'onda più e meno assorbite dalla molecola in esame, essendo il laser equipaggiato con un reticolo di diffrazione e uno specchio di scansione veloce e accurato.

Le righe di emissione del laser utilizzate da ATLAS nella misura DIAL di etilene, vapore acqueo, ammoniacca e ozono sono elencate in Tab. 1.

Molecola	λ_{ON} [μm] (riga)	λ_{OFF} [μm] (riga)
C ₂ H ₄	10.532 (10p14)	10.591 (10p20)
H ₂ O	10.247 (10r20)	10.260 (10r18)
NH ₃	10.719 (10p32)	10.696 (10p30)
O ₃	9.504 (9p14)	9.588 (9p24)

Tab. 1 – Lunghezze d'onda e corrispondenti righe del laser utilizzate da ATLAS nella misura DIAL di etilene, vapore acqueo, ammoniacca e ozono.

La misura DIAL raggiunge la sua massima sensibilità quando il lidar è puntato su un bersaglio. In questo caso, supponendo che il bersaglio sia posto alla distanza R_T , l'equazione DIAL diviene [12]:

$$\bar{C} = \frac{1}{2 R_T \Delta\sigma} \left\{ \ln \left[\frac{n(R_T, \lambda_{OFF})}{n(R_T, \lambda_{ON})} \right] - \ln \left[\frac{n_0(\lambda_{OFF})}{n_0(\lambda_{ON})} \right] \right\}, \quad (7)$$

dove la barra indica il valor medio nel cammino ottico tra sistema e bersaglio.

Per quanto riguarda l'errore di misura, possiamo scrivere le relazioni [12]:

$$\delta C(R) \cong \frac{1}{\sqrt{2} \Delta R \sigma(\lambda_{ON}) SNR(R, \lambda_{ON})}, \quad (8)$$

$$\delta \bar{C} \cong \frac{1}{\sqrt{2} R_T \sigma(\lambda_{ON}) SNR(R_T, \lambda_{ON})}, \quad (9)$$

per il lidar DIAL senza e con bersaglio, rispettivamente, dove ΔR è la risoluzione spaziale del lidar e SNR è il rapporto segnale-rumore.

Durante questo studio, al variare delle condizioni sperimentali, ci si è trovati in tre regimi di misura: SNR alto, SNR medio e SNR basso.

Molecola	Errore di ATLAS	Errore del lidar della ref. 14
C ₂ H ₄	15 ppb	14 ppb
H ₂ O	0.4 torr	0.86 torr
NH ₃	40 ppb	25 ppb
O ₃	50 ppb	72 ppb

Tab. 2 – Errore di ATLAS e del lidar della ref. 14 per 1 km di cammino ottico nella misura DIAL di etilene, vapore acqueo, ammoniacca e ozono.

Nel primo regime di misura, è stato possibile ricostruire il profilo di concentrazione della molecola in esame con una risoluzione spaziale di 60 m. Per SNR medio, è stato necessario degradare la risoluzione spaziale fornendo un valore medio di concentrazione su un cammino ottico di qualche centinaio di m. Infine, nel terzo caso, è stato utilizzato un bersaglio, ottenendo una misura integrata su una distanza dell'ordine del km. In tutte e tre le eventualità, l'errore di misura è stato valutato a partire dalla fluttuazione del segnale. Per prudenza, comunque, l'errore di misura non è stato mai considerato inferiore a un valore calcolato mediante un modello fenomenologico del rapporto segnale-rumore [13], in buon accordo con il valore valutato per un sistema sperimentale simile [14] (Tab. 2).
 Concludiamo questa sezione elencando le caratteristiche principali di ATLAS (Tab. 3).

Trasmittitore	Energia dell'impulso	750 mJ
	Durata dell'impulso	70 ns
	Lunghezza d'onda	9.2 – 10.8 µm
	Frequenza di ripetizione	15 Hz
	Divergenza del fascio	0.7 mrad
Ricevitore	Diametro del telescopio	310 mm
	Campo di vista	0.8 mrad
Rivelatore	Rivelabilità specifica	4 × 10 ¹⁰ Jones
	Banda passante	0 – 10 MHz
ADC	Risoluzione verticale	8 bit
	Frequenza di campionamento	10 MS s ⁻¹

Tab. 3 – Specifiche del lidar atmosferico ATLAS.

3 Protocollo di misura

Prima di tutto, ATLAS è stato testato presso il centro ricerche di Frascati. Una misura di carico di aerosol è stata effettuata accordando il laser sulla riga 10p20 e puntando il lidar in verticale il 1° luglio 2008 tra le 15:29 e le 15:34 (ora legale). Il segnale è mostrato in Fig. 2A. A 1750 m comincia a degradarsi, fino a scomparire a 2250 m. La salita iniziale è spiegata dall'aumento dell'efficienza del ricevitore dal livello minimo (a 0 m) al livello massimo, costante a partire da R_{max} . Un modello dell'efficienza [15] indica che R_{max} è pari a circa due volte la distanza dal sistema per cui il segnale è massimo (150 m, nel nostro caso). Siccome l'algoritmo che ricostruisce il coefficiente di estinzione può essere applicato solo quando l'efficienza è costante, α è stato calcolato tra 300 e 2250 m (Fig. 2B). Il coefficiente di estinzione si riduce con l'altitudine ed è dell'ordine di $10^{-4} m^{-1}$, in accordo con la bibliografia [14, 16, 17, 18]. Il fatto che α si annulli praticamente al di là di 1650 m potrebbe indicare che lo strato limite planetario [4] si estende tra la superficie e tale altitudine.

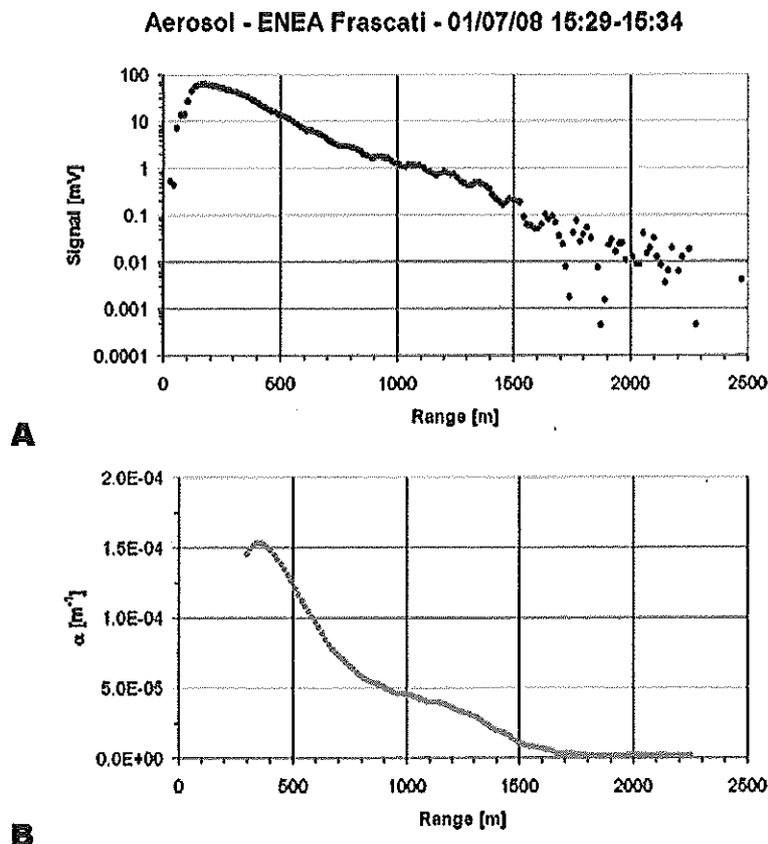


Fig. 2 – Segnale lidar (A) e corrispondente coefficiente di estinzione (B) misurati presso il centro ricerche ENEA di Frascati il 1° luglio 2008.

Lo stesso giorno, tra le 11:42 e le 11:45, è stata effettuata una misura DIAL di vapore acqueo, sempre puntando il lidar in verticale. In questo caso il segnale ON, essendo assorbito dalla molecola d'acqua, si degrada sensibilmente attorno a 1000 m (Fig. 3A). Per quanto riguarda l'altitudine minima di misura, trattandosi di una misura differenziale, è possibile ricavare la concentrazione anche prima di R_{max} . In conclusione, il profilo di vapore acqueo è stato ricostruito tra 90 e 990 m con una risoluzione spaziale di 60 m. Siccome il rapporto segnale-rumore peggiora con la distanza, l'errore di misura si incrementa di conseguenza.

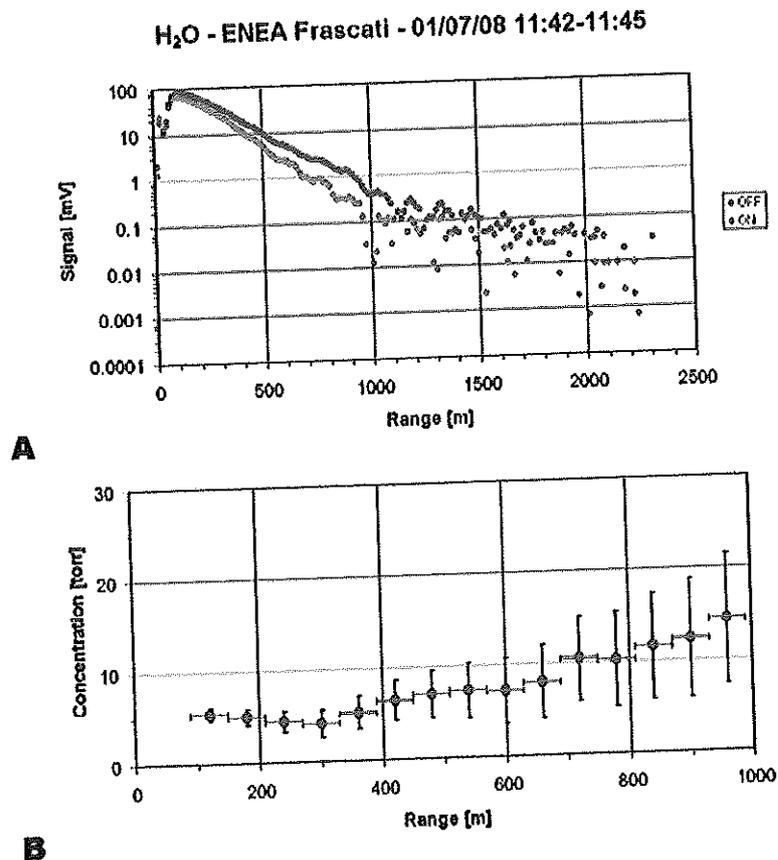


Fig. 3 – Segnali lidar (A) e corrispondente concentrazione di vapore acqueo (B) misurati presso il centro ricerche ENEA di Frascati il 1° luglio 2008. Le barre orizzontali rappresentano la risoluzione spaziale, quelle verticali l'errore.

Una volta arrivati a Brindisi è stata controllata la corrispondenza tra la posizione dello specchio di scansione di ATLAS (letta tramite un encoder collegato al computer che controlla il laser) e la lunghezza d'onda emessa. Presso ogni sito di misura (centrale elettrica e zona industriale), è stato

cambiato il gas del laser, per assicurare l'emissione della massima energia. Prima di ogni sessione di misura (Tab.4) sono stati controllati sia l'allineamento tra trasmettitore e ricevitore, sia il funzionamento del rivelatore che misura il tempo zero dell'esperimento osservando il passaggio del fascio laser pochi centimetri prima che venga emesso in atmosfera. Quindi, sono stati acquisiti segnali con il laser accordato sulle righe:

- 10p32 e 10p30 (misura della concentrazione di ammoniaca),
- 10p20 e 10p14 (misura della concentrazione di etilene e del carico di aerosol),
- 10r20 e 10r18 (misura della concentrazione d'acqua),
- 9p24 e 9p14 (misura della concentrazione d'ozono).

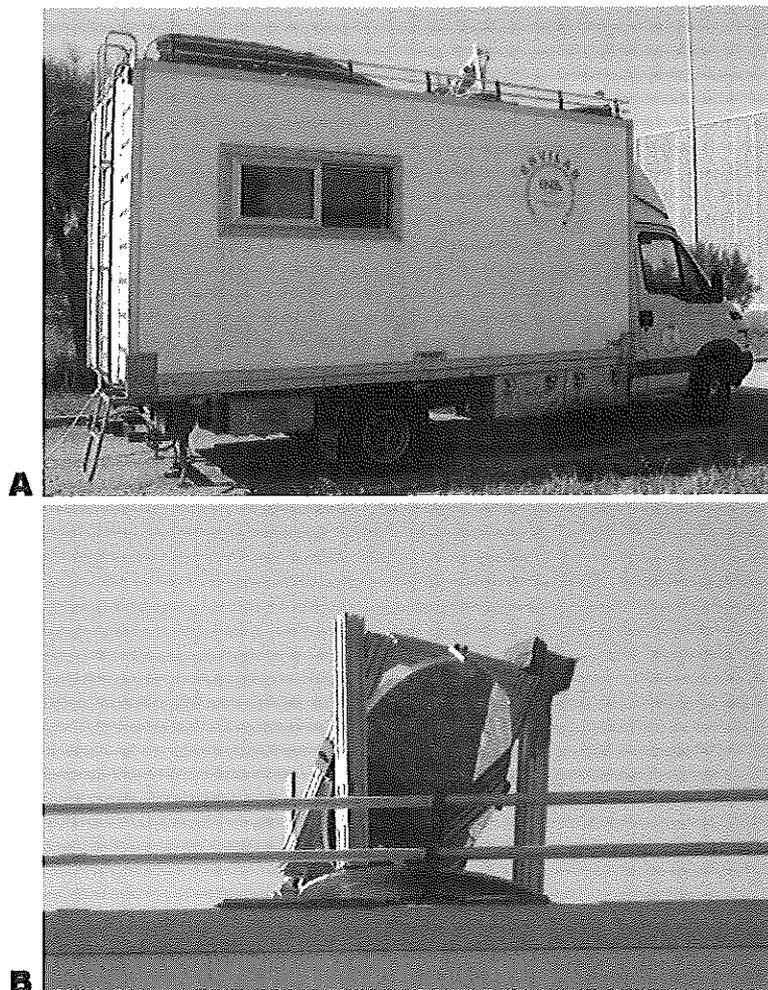


Fig. 4 – ENVILAB (A) durante la campagna di Brindisi. Sul tetto del laboratorio mobile è visibile lo specchio (B) che permette di puntare il lidar in direzione quasi orizzontale.

Tali cicli di misura sono stati effettuati con il lidar sia verticale, sia quasi orizzontale (per semplicità, useremo d'ora in poi il termine orizzontale). Nella maggior parte dei casi, il lidar orizzontale è stato puntato contro un bersaglio topografico (ciminiera), grazie a un apposito specchio (Fig. 4). Per le misure in verticale il segnale è stato ottenuto mediando 500 colpi laser, per quelle in orizzontale senza bersaglio mediando 300 colpi e, infine, per quelle in orizzontale con bersaglio mediando 200 colpi (tranne le due misure del 9 luglio 2008, per le quali sono stati usati 500 colpi). Tale differenza è dovuta al fatto che, in generale, il rapporto segnale rumore migliora passando da misure verticali a orizzontali, in particolare se il lidar è puntato su un bersaglio topografico.

Sessione	Inizio	Fine	Sito	N. misure verticali	N. misure orizzontali	N. totale misure
9 pomeriggio	09/07/08 14:46	09/07/08 18:59	Centrale elettrica	11	5	16
10 mattina	10/07/08 10:07	10/07/08 14:03	Centrale elettrica	8	27	35
10 pomeriggio	10/07/08 15:48	10/07/08 18:39	Zona industriale	8	24	32
11 mattina	11/07/08 09:30	11/07/08 12:58	Zona industriale	6	24	30
11 pomeriggio	11/07/08 14:58	11/07/08 18:23	Zona industriale	6	33	39
TOTALE				39	113	152

Tab. 4 – Sessioni di misura durante la campagna di Brindisi.

4 Siti di misura

La Provincia di Brindisi ha individuato due siti da monitorare: la centrale termoelettrica ENEL di Cerano e la zona industriale di Brindisi (Fig. 5). Più precisamente, ENVILAB è stato installato all'interno del perimetro della centrale elettrica il 9 luglio mattina (Figg. 6 e 7) e presso gli impianti del Consorzio SISRI il 10 luglio pomeriggio (Figg. 8 e 9).



Fig. 5 – Siti monitorati durante la campagna di Brindisi. Il simbolo colorato indica la posizione esatta di ENVILAB. (Immagine satellitare ricavata da Google Earth).

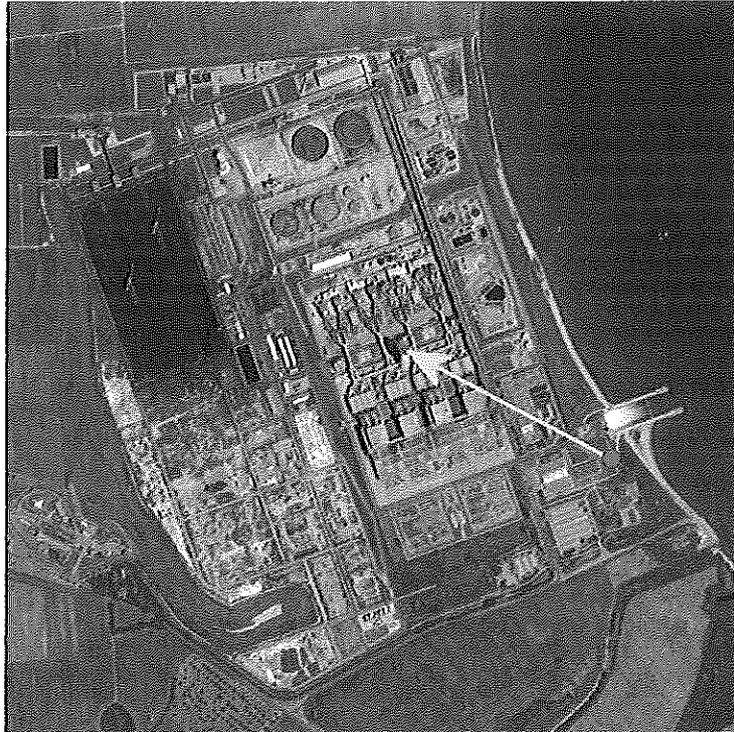


Fig. 6 – Posizionamento di ENVILAB presso la centrale elettrica di Cerano (punto rosso) e cammino ottico nella misura con bersaglio topografico (freccia gialla). (Immagine satellitare ricavata da Google Earth).



Fig. 7 – ENVILAB presso la centrale elettrica di Cerano. La ciminiera della centrale (a 0.7 km) è stata usata come bersaglio topografico.

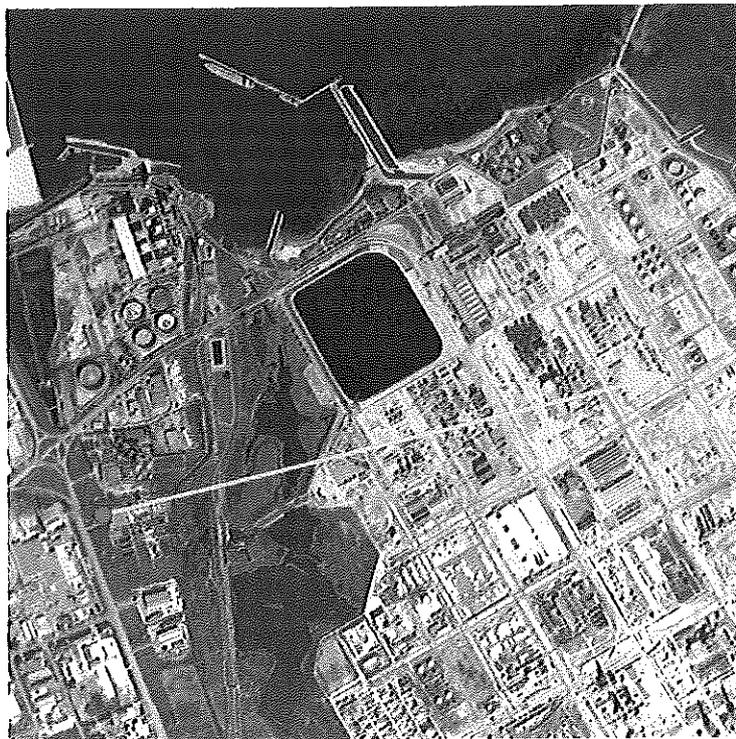


Fig. 8 – Posizionamento di ENVILAB presso la zona industriale di Brindisi (punto rosso) e cammino ottico nella misura con bersaglio topografico (freccia gialla). (Immagine satellitare ricavata da Google Earth).

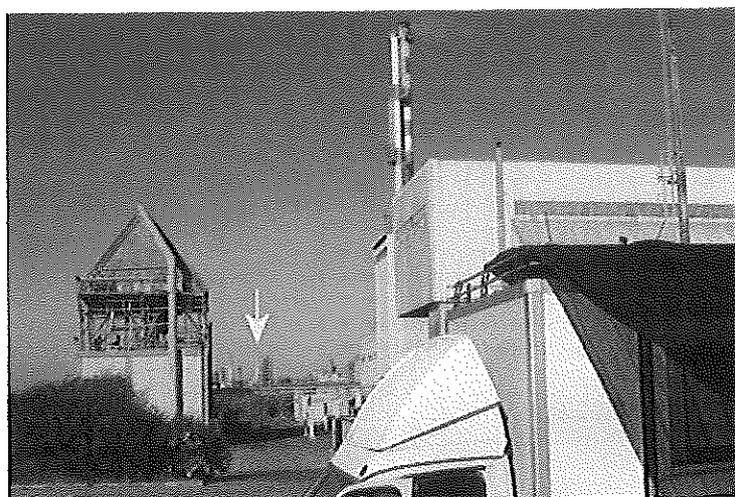


Fig. 9 – ENVILAB presso la zona industriale di Brindisi. La ciminiera indicata dalla freccia gialla (a 2 km) è stata usata come bersaglio topografico).

5 Misure

5.1 Misure presso la centrale elettrica

I profili di vapore acqueo misurati presso la centrale elettrica sono mostrati in Fig. 10.

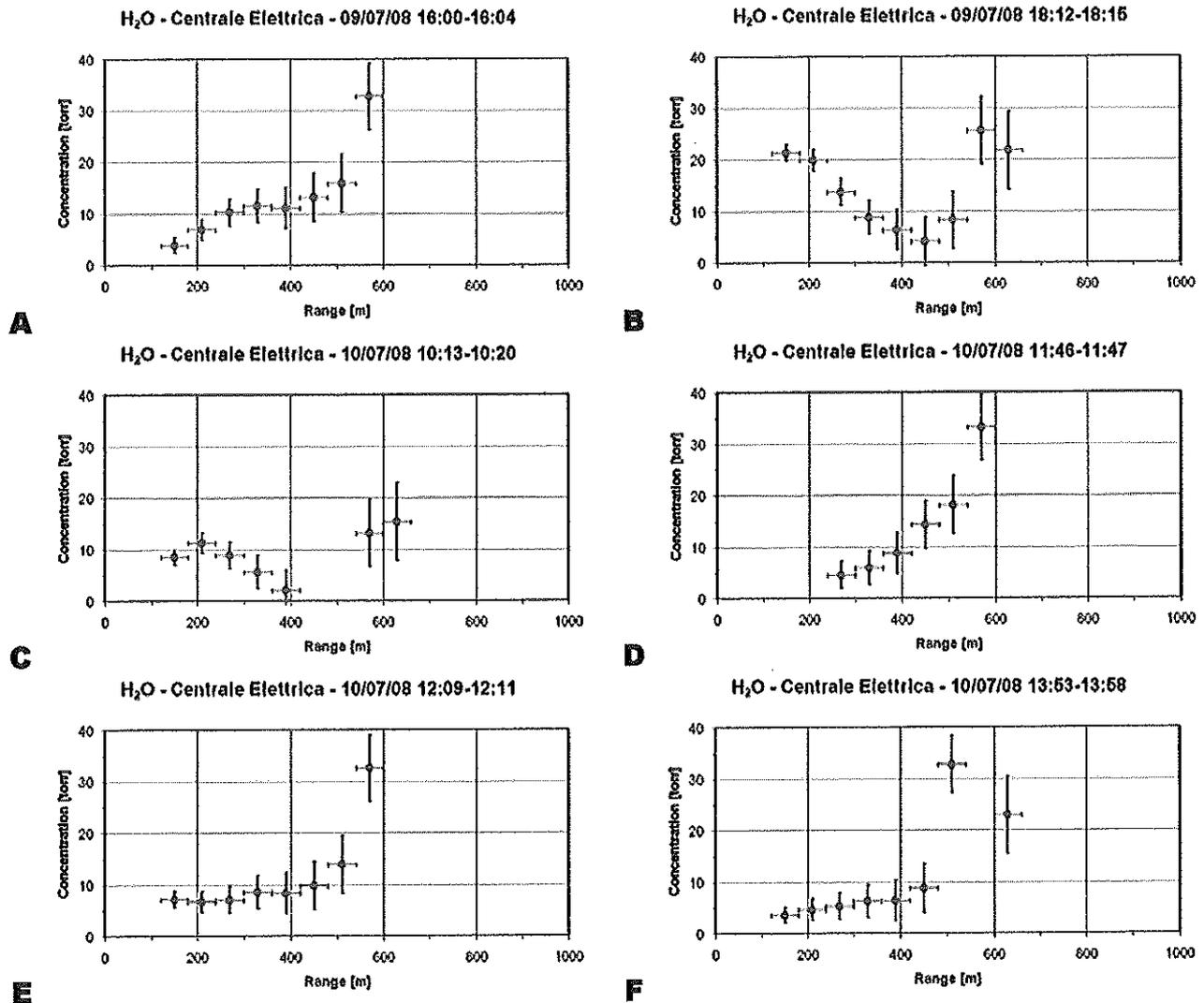


Fig. 10 – Profili di vapore acqueo misurati presso la centrale elettrica di Cerano il 9 luglio 2008 alle 16 (A) e alle 18 (B) e il 10 luglio alle 10 (C), alle 11 (D), alle 12 (E) e alle 13 (F). I profili del 9 alle 16 e del 10 alle 12 sono verticali, gli altri sono orizzontali. Le barre orizzontali rappresentano la risoluzione spaziale, quelle verticali l'errore.

I profili orizzontali sono stati anche georeferenziati (Fig. 11) e usati per osservare l'evoluzione spazio-temporale della concentrazione di vapore acqueo lungo il cammino ottico orizzontale (Fig. 12).

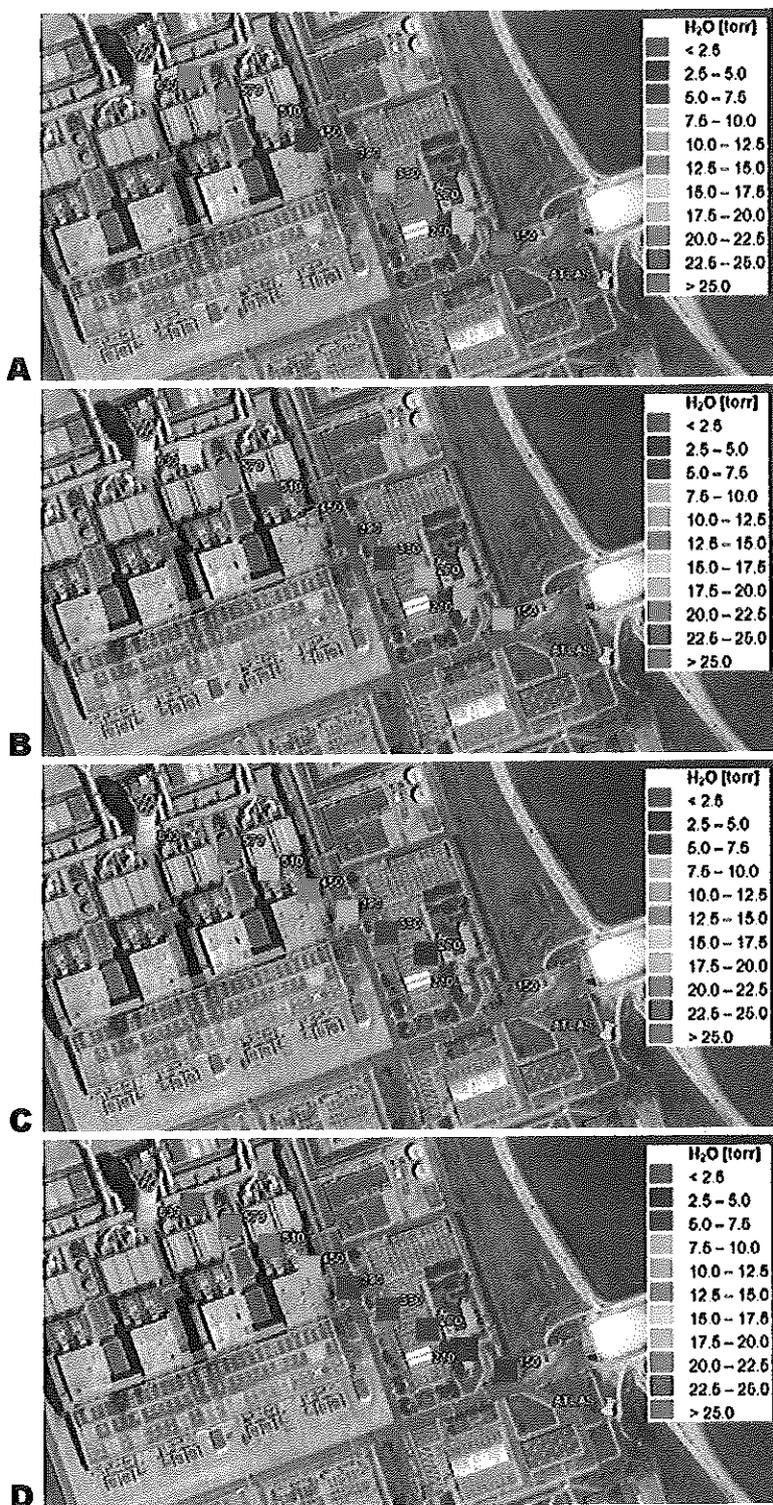


Fig. 11 – Profili orizzontali di vapore acqueo misurati presso la centrale elettrica di Cerano il 9 luglio 2008 alle 18 (A) e il 10 luglio alle 10 (B), alle 11 (C), e alle 13 (D). Le etichette rappresentano le distanze in m. (Immagine satellitare ricavata da Google Earth).

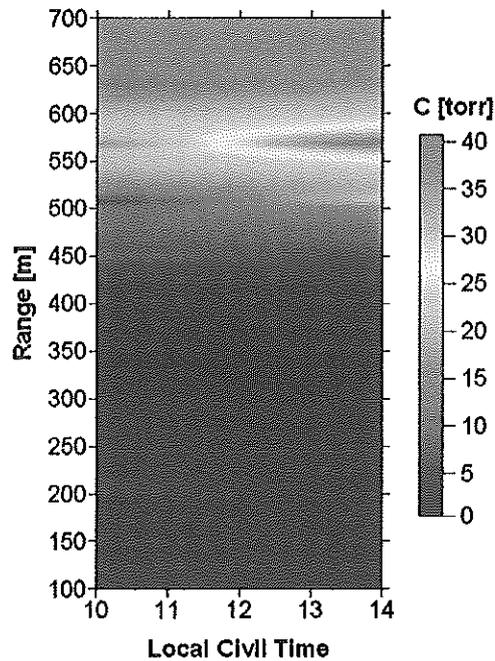


Fig. 12 – Evoluzione spazio-temporale della concentrazione di vapore acqueo lungo il cammino ottico orizzontale (Fig. 6) misurata presso la centrale elettrica di Cerano il 10 luglio 2008 tra le 10 e le 13.

Esempi di profili di etilene e ammoniaca sono mostrati in Fig. 13.

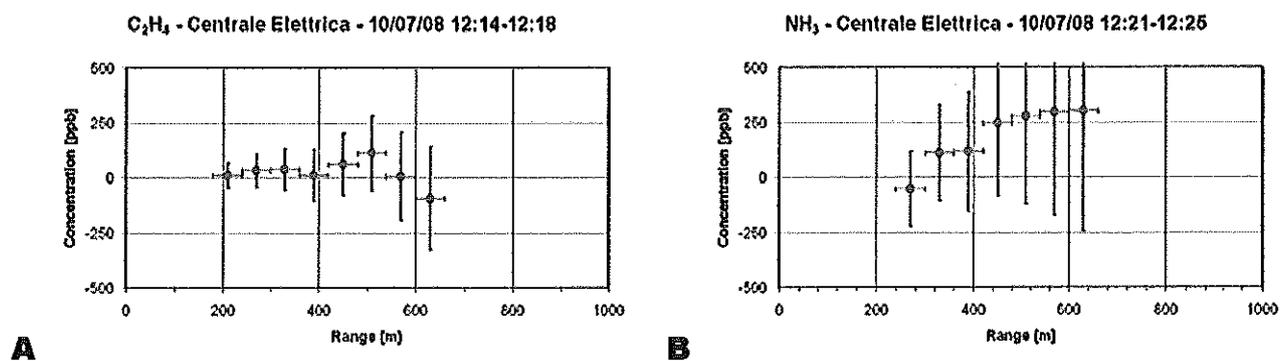


Fig. 13 – Esempi di profili verticali di etilene (A) e ammoniaca (B) misurati presso la centrale elettrica di Cerano il 10 luglio 2008 alle 12. Le barre orizzontali rappresentano la risoluzione spaziale, quelle verticali l'errore.

Per quanto riguarda l'ozono, il basso rapporto segnale-rumore non ha permesso la ricostruzione di profili.

Se invece dei profili si considerano i valori medi lungo il cammino ottico, è possibile ottenere misure anche di ozono: i valori medi di vapore acqueo, etilene, ammoniaca e ozono sono mostrati in Fig. 14.

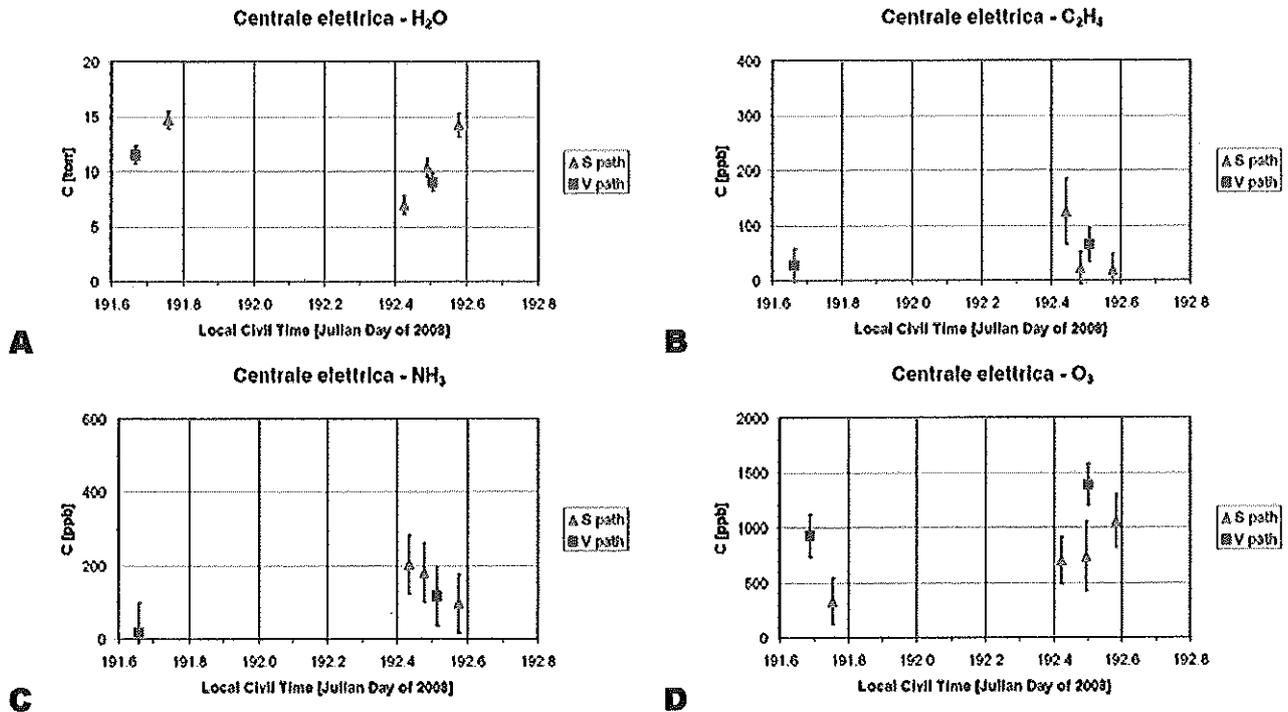


Fig. 14 – Misure, integrate lungo il cammino ottico, di vapore acqueo (A), etilene (B), ammoniaca (C) e ozono (D) effettuate presso la centrale elettrica di Cerano il 9 e 10 luglio 2008. I cammini ottici “S” sono orizzontali, quelli “V” verticali. Le barre verticali rappresentano l'errore.

Per quanto riguarda il carico di aerosol, i profili sono presentati in Fig. 15, i valori medi lungo il cammino ottico in Fig 16.

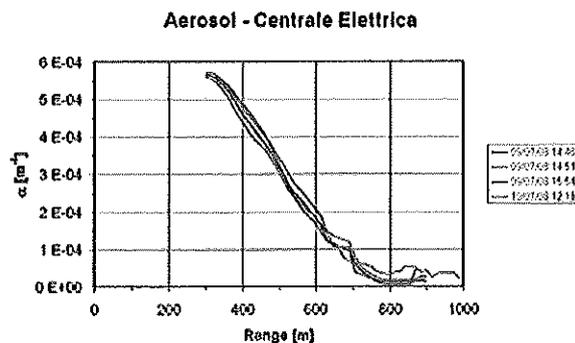


Fig. 15 – Profili verticali di carico di aerosol misurati presso la centrale elettrica di Cerano il 9 e 10 luglio 2008.

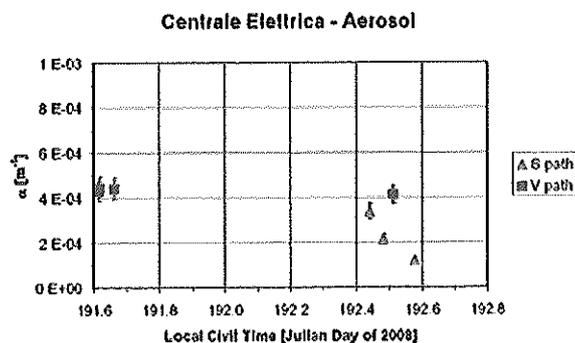


Fig. 16 – Misure, integrate lungo il cammino ottico, di carico di aerosol effettuate presso la centrale elettrica di Cerano il 9 e 10 luglio 2008. I cammini ottici “S” sono orizzontali, quelli “V” verticali. Le barre verticali rappresentano l’errore.

5.2 Misure presso la zona industriale

La qualità dei profili di vapore acqueo, etilene, ammoniaca e ozono misurati presso la zona industriale non è buona a causa del basso rapporto segnale-rumore. Nondimeno, è stato possibile ottenere i valori medi lungo il cammino ottico di tali molecole (Fig 17).

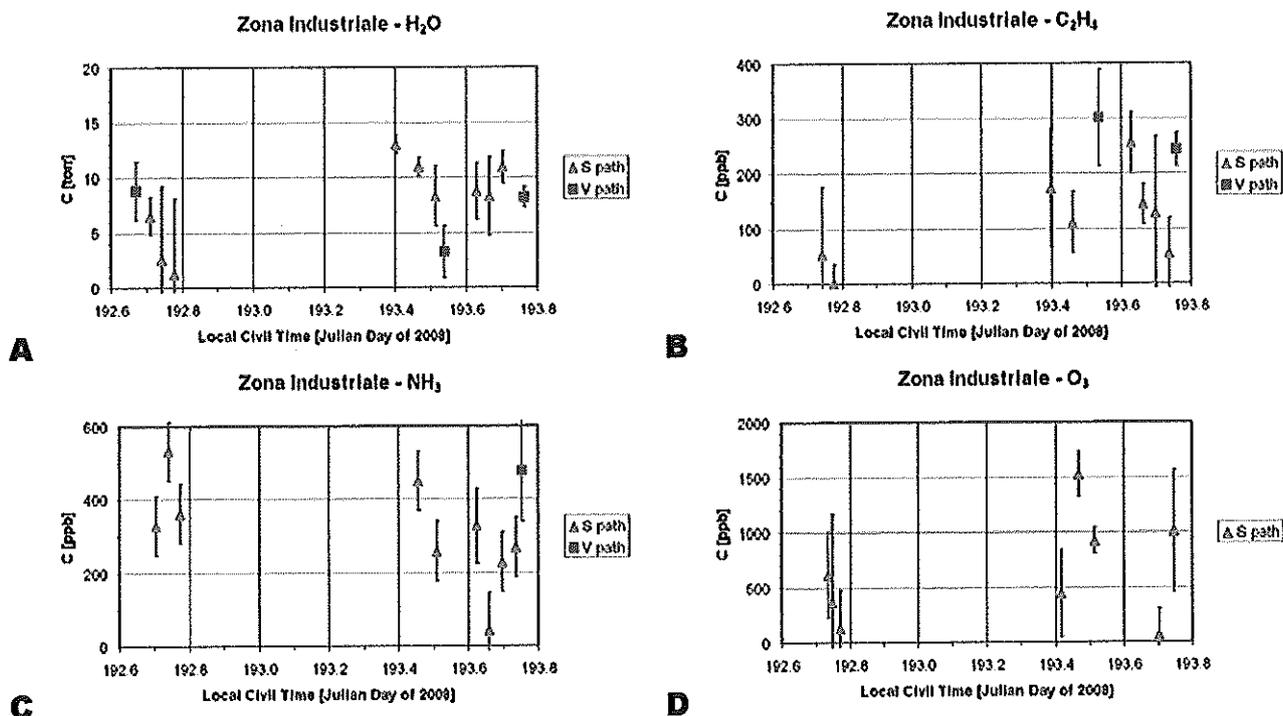


Fig. 17 – Misure, integrate lungo il cammino ottico, di vapore acqueo (A), etilene (B), ammoniaca (C) e ozono (D) effettuate presso la zona industriale di Brindisi il 10 e 11 luglio 2008. I cammini ottici “S” sono orizzontali, quelli “V” verticali. Le barre verticali rappresentano l’errore.

I profili e i valori medi lungo il cammino ottico del carico di aerosol sono mostrati nelle Figg. 18 e 19, rispettivamente.

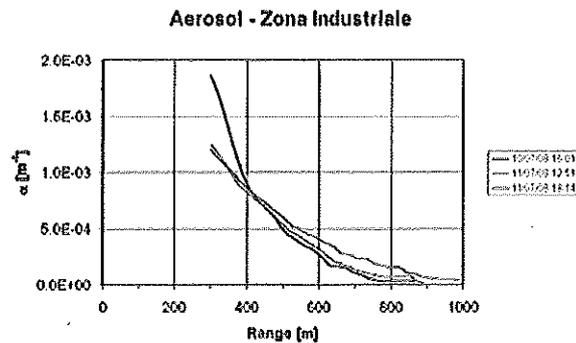


Fig. 18 – Profili verticali di carico di aerosol misurati presso la zona industriale di Brindisi il 10 e 11 luglio 2008.

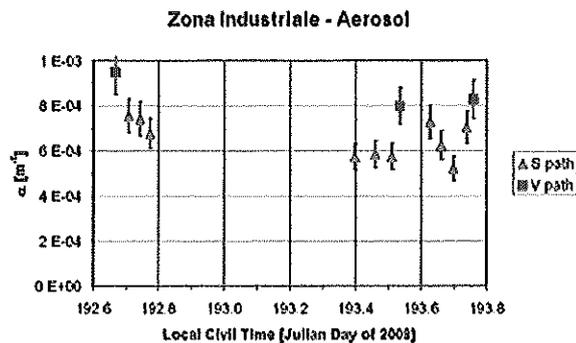


Fig. 19 – Misure, integrate lungo il cammino ottico, di carico di aerosol effettuate presso la zona industriale di Brindisi il 10 e 11 luglio 2008. I cammini ottici "S" sono orizzontali, quelli "V" verticali. Le barre verticali rappresentano l'errore.

6 Discussione

6.1 Misure presso la centrale elettrica

6.1.1 Quadro osservativo

I profili verticali di vapore acqueo misurati presso la centrale elettrica il 9 e il 10 luglio (Figg. 10A e 10E, rispettivamente) sono simili e indicano che la concentrazione di vapore acqueo è piuttosto bassa tra 100 e 500 m, aumentando considerevolmente tra 500 e 600 m (i valori sono in accordo con le concentrazioni tipiche che variano tra 5 e 30 torr). Queste osservazioni, assieme al fatto che le condizioni meteorologiche del 9 e 10 luglio sono quasi uguali (pressione: 1014 hPa, temperatura: 30 °C, vento: 12 nodi NW il 9 luglio e 12 nodi WNW il 10 luglio, visibilità: buona, cielo: sereno il 9 luglio e poco nuvoloso il 10 luglio), suggeriscono che le masse d'aria più secche provenienti dalla terra ferma (trasportate dai venti NW e WNW) possano incunarsi sotto quelle più umide caratteristiche della zona costiera. I profili orizzontali (Figg. 10B, 10C, 10D e 10F) presentano i valori più elevati attorno a 600 m: questo comportamento non è sorprendente perché a tali distanze il raggio laser investiga masse d'aria direttamente influenzate dalle emissioni di vapore della ciminiera. In due casi (Figg. 10B e 10C) anche i valori attorno a 200 m sono elevati, probabilmente a causa della vicinanza di ATLAS con lo scarico dell'acqua di raffreddamento della centrale (macchia bianca appena sopra ENVILAB in Fig. 6) in momenti della giornata (inizio della mattina e fine del pomeriggio) in cui la brezza di mare è debole. Quando la brezza di mare è forte (attorno a mezzogiorno) il vapore dello scarico è disperso e il massimo attorno a 200 m non è visibile (Figg. 10D e 10F).

I valori medi lungo il cammino ottico di vapore acqueo (Fig. 14A), in accordo con quanto osservato a proposito dei profili, indicano che la misura verticale di vapore acqueo è stabile da un giorno all'altro, mentre quella orizzontale varia, probabilmente in seguito all'azione di forzanti locali (ciminiera, scarico e brezza). L'aumento della concentrazione a partire da mezzogiorno può essere spiegato dal minore apporto delle masse d'aria più secche provenienti dalla terra ferma, a causa dell'indebolimento del vento NW.

6.1.2 Inquinanti

Considerando i valori medi lungo il cammino ottico di etilene, ammoniaca e ozono (Figg. 14B, 14C e 14D, rispettivamente) le seguenti conclusioni possono essere tirate:

- ATLAS non rivela etilene e ammoniaca il pomeriggio del 9 e 10 luglio;
- etilene e ammoniaca sono stati inequivocabilmente rivelati nella tarda mattinata del 10 luglio: la loro presenza potrebbe essere spiegata dal trasporto di inquinanti da Brindisi (nella tarda mattinata del 10 luglio, il vento NW è forte); questa ipotesi è rafforzata dall'osservazione che la loro concentrazione diminuisce a partire da mezzogiorno, quando il vento si indebolisce (i valori sono in accordo con le concentrazioni tipiche che possono raggiungere poche centinaia di ppb in atmosfere inquinate);
- la concentrazione di ozono è molto elevata (valori attorno a 1000 ppb sono tipici di atmosfere particolarmente inquinate), in accordo con la fotochimica dell'atmosfera: gli inquinanti primari (idrocarburi e ossidi di azoto) prodotti dal traffico veicolare e dall'attività industriale di Brindisi sono trasportati verso ATLAS dal vento NW sorvolando zone rurali in cui, grazie ai raggi ultravioletti solari, danno luogo alla formazione di ozono; questa interpretazione è corroborata dall'osservazione che il massimo di ozono è osservato dopo mezzogiorno (tale inquinante, infatti, tende ad accumularsi nel primo pomeriggio, poco dopo che l'irraggiamento solare ha raggiunto il valore più alto); la maggior concentrazione per strati atmosferici elevati (misura verticale) può essere dovuta a vari fattori: a) in generale, dal ruolo dei raggi ultravioletti, attenuati nel loro passaggio da strati alti a strati bassi dell'atmosfera; b) il 9 luglio, dal fatto che la misura orizzontale è effettuata nel tardo pomeriggio, quando l'irraggiamento solare è inferiore; c) il 10 luglio, dall'azione pulente della brezza di mare sugli strati più bassi dell'atmosfera.

I profili verticali del coefficiente di estinzione (Fig. 15) dimostrano che il carico di aerosol diminuisce con l'altitudine, sia il 9 che il 10 luglio, in pieno accordo con i modelli teorici e le misure sperimentali [18]. Tali profili sono simili, indicando che, essendo quasi invariate le condizioni meteorologiche del 9 e 10 luglio, gli strati più alti dell'atmosfera si comportano in modo analogo. I valori del coefficiente di estinzione sono molto alti rispetto a quelli pubblicati in letteratura [14, 16, 17, 18] (attorno a 10^{-4} m^{-1}).

Questa osservazione indica che il carico di aerosol è particolarmente elevato, probabilmente a causa sia della centrale elettrica, sia delle masse d'aria inquinate dal traffico veicolare e dall'attività industriale di Brindisi e trasportate verso ENVILAB dai venti NW e WNW. Essendo ATLAS particolarmente sensibile a particelle di taglia attorno a 10 μm , in accordo con la teoria di Mie [19], è legittimo sospettare che i PM_{10} siano la causa principale di tale accumulo di aerosol. Anche se l'apporto di aerosol marino non può essere escluso, è probabile che i PM_{10} osservati da ATLAS siano originati prevalentemente da motori a scoppio, macchinari industriali e dalla centrale elettrica. A conferma di questa ipotesi, osserviamo che il minor apporto delle masse d'aria da Brindisi, a causa dell'indebolimento del vento NW, coincide proprio con una diminuzione del carico di aerosol misurato da ATLAS. Inoltre, i valori medi lungo il cammino ottico del coefficiente di estinzione determinati il 10 luglio dimostrano che in tale giorno il carico di aerosol è maggiore per strati atmosferici elevati (misura verticale) e quindi, in analogia con quanto affermato per l'ozono, questo comportamento può essere spiegato dall'azione pulente della brezza di mare – pur carica di aerosol marino – sugli strati più bassi dell'atmosfera.

È importante notare che la forte attenuazione del fascio laser dovuta all'elevato carico di aerosol spiega perché le performance di ATLAS in termini di intervallo spaziale di misura e di rapporto segnale-rumore sia peggiore presso la centrale elettrica rispetto al centro ricerche di Frascati.

6.2 Misure presso la zona industriale

6.2.1 Quadro osservativo

La concentrazione di vapore acqueo è bassa il pomeriggio del 10 luglio (Fig. 17A.). L'11 luglio, quando si riporta su valori più elevati, è visibile una variazione dell'andamento prima e dopo le 13:15 dell'11 luglio (corrispondenti al giorno giuliano 193.55), allorché si verifica un cambiamento del vento da 10-13 nodi NW-NNW a 5-7 nodi NNE. Si noti, inoltre, l'aumento della concentrazione per strati atmosferici elevati (misura verticale), probabilmente a causa dell'apporto delle masse d'aria umide provenienti dal mare (vento da NNE).

6.2.2 Inquinanti

I valori medi lungo il cammino ottico di etilene, ammoniaca e ozono (Figg. 17B, 17C e 17D, rispettivamente) misurati presso la zona industriale indicano che:

- l'etilene è stata rivelata chiaramente l'11 luglio; la concentrazione è generalmente superiore ad altitudini maggiori (misura verticale), probabilmente a causa della formazione di un accumulo di aria inquinata negli strati atmosferici elevati, meno influenzati da fenomeni superficiali (variabilità delle immissioni, brezza marina, moti convettivi etc.); anche in questo caso, è visibile un cambiamento dell'andamento della concentrazione prima e dopo le 13:15 dell'11 luglio;
- l'ammoniaca è inequivocabilmente presente, sia il 10 che l'11 luglio; come nel caso dell'etilene, la concentrazione è generalmente superiore per strati atmosferici elevati (misura verticale);
- la concentrazione di ozono è elevata, anche se il valore medio è inferiore rispetto alla centrale elettrica; questo comportamento non è sorprendente in quanto l'ozono si forma prevalentemente nelle zone rurali in seguito a reazioni fotochimiche degli inquinanti primari ivi trasportati dai venti.

Come nel caso della centrale elettrica, i profili verticali del coefficiente di estinzione (Fig. 18) indicano che il carico di aerosol diminuisce con l'altitudine, sia il 10 che l'11 luglio, in accordo con la letteratura [18]. Questa volta, però, i profili differiscono l'uno dall'altro: il 10 luglio alle 16 l'aria è particolarmente inquinata sotto i 400 m di altitudine, mentre l'11 luglio il carico di aerosol è inferiore sotto i 400 m e superiore sopra i 400 m, soprattutto nella misura delle 18. L'elevato coefficiente di estinzione del 10 luglio alle 16 è probabilmente dovuto all'accumulo di inquinanti provocato dal vento proveniente in modo stabile dalla città a partire dalle 10. La differenza tra i profili dell'11 luglio, acquisiti alle 12 e alle 18, può essere ancora una volta ricondotta al cambiamento di vento delle 13:15. I valori del coefficiente di estinzione sono altissimi rispetto a quelli reperibili nella bibliografia [14, 16, 17, 18] e superiori a quelli misurati presso la centrale elettrica di circa un fattore 3. Questa osservazione indica che il carico di aerosol è elevatissimo, probabilmente a causa delle masse d'aria

inquinata dal traffico veicolare e dall'attività industriale di Brindisi. Come nel caso della centrale elettrica, è plausibile che i PM_{10} siano la causa principale di tale accumulo di aerosol.

I valori medi lungo il cammino ottico del coefficiente di estinzione osservati il 10 e l'11 luglio, dimostrano che in tali giorni il carico di aerosol è maggiore per strati atmosferici elevati (misura verticale). Ancora una volta, questo comportamento può essere spiegato dall'azione pulente della brezza di mare sugli strati più bassi dell'atmosfera.

Presso la zona industriale, in misura ancora maggiore rispetto alla centrale elettrica, il carico di aerosol è responsabile di una forte attenuazione del fascio laser che compromette seriamente le prestazioni di ATLAS in termini di intervallo spaziale di misura e di rapporto segnale-rumore, spiegando l'impossibilità di ottenere profili di concentrazione.

7 Conclusioni

Il lidar atmosferico ATLAS, a bordo del laboratorio mobile ENVILAB, ha svolto una campagna di misura dell'inquinamento atmosferico presso la centrale termoelettrica ENEL di Cerano e la zona industriale di Brindisi. Dal 9 luglio pomeriggio all'11 luglio pomeriggio, sono state effettuate 152 misure di etilene, vapore acqueo, ammoniaca, ozono e carico di aerosol. L'intervallo di misura ha raggiunto 2 km, le risoluzioni spaziale e temporale si sono spinte fino a 60 m e 5 minuti, rispettivamente. Nonostante il forte carico di aerosol abbia degradato il rapporto segnale rumore, gli errori di misura sono dell'ordine di decine di ppb per etilene, ammoniaca e ozono, frazioni di torr per il vapore acqueo e 10% per il carico di aerosol.

I dati raccolti sono stati utilizzati sia per definire un quadro osservativo (misure di vapore acqueo combinate ai dati meteorologici), sia per valutare la distribuzione spaziale e l'evoluzione temporale dell'inquinamento primario (misure di etilene, ammoniaca e carico di aerosol) e secondario (misure di ozono). I risultati finali indicano che l'inquinamento da particolato è forte sia presso la centrale elettrica, sia presso la zona industriale. Per quanto riguarda gli inquinanti gassosi, la concentrazione di ozono è elevata soprattutto presso la centrale elettrica, mentre ammoniaca ed etilene sono particolarmente presenti presso la zona industriale. Queste osservazioni, combinate con le informazioni sui venti, suggeriscono che la centrale elettrica sia una sorgente di particolato e vapore acqueo e che nella zona industriale siano rilasciati inquinanti primari. Tali inquinanti subiscono reazioni fotochimiche e contribuiscono alla formazione di ozono, soprattutto nelle zone rurali.

Sebbene questa campagna di misura abbia dimostrato il potere diagnostico del lidar atmosferico, è innegabile che sarebbe auspicabile eseguire serie più lunghe di misure, idealmente con un sistema fisso ininterrottamente funzionante, in modo da affrancare le informazioni ottenute da fenomeni di fluttuazione.

Appendice 1

La qualità delle misure di ATLAS è stata controllata con un test di autoconsistenza effettuato presso la centrale elettrica: dopo aver puntato il lidar atmosferico sul bersaglio topografico, è stata effettuata la misura di vapore acqueo sia nell'atmosfera compresa tra ATLAS e ciminiera, mediante l'eq. (3), sia nell'intero cammino ottico tra lidar e bersaglio, mediante l'eq. (7).

Siccome i segnali lidar non sono più utilizzabili dopo il bersaglio, la misura DIAL è stata effettuata tra 120 e 660 m con una risoluzione spaziale di 60 m. La media aritmetica dei valori ricavati con l'eq. (3) nel cammino ottico tra 120 e 660 m è:

$$C_{120-660} = 9.46 \text{ torr}, \quad (10)$$

mentre la concentrazione media nel cammino ottico tra 0 e 700 m, ottenuta mediante l'eq. (7) è:

$$C_{0-700} = 9.71 \text{ torr}. \quad (11)$$

Tenendo conto della differenza di cammino ottico, l'accordo tra i due valori è eccellente e indica sia che l'errore di misura (Tab. 2) è stato valutato correttamente, sia che i metodi di misura adottati per i differenti regimi di rapporto segnale-rumore sono equivalenti.

Appendice 2

Pochi giorni dopo la campagna di misura nella Provincia di Brindisi, ATLAS ha misurato il pennacchio dell'Etna. Il sistema si trovava presso il Santuario di Magazzeni (Sant'Alfio), a circa 10 km dalle bocche del vulcano, e il laser puntava verticalmente. Se si confrontano i dati sperimentali con un modello del segnale lidar, ottenuto ipotizzando un'atmosfera uniforme, (Fig. 20) si osserva chiaramente l'estensione del pennacchio tra circa 1800 e 3200 m di distanza. Il segnale si degrada attorno a 4000 m, quando raggiunge valori paragonabili al livello del rumore calcolato per il rivelatore del lidar. Queste osservazioni dimostrano che l'intervallo spaziale di misura di ATLAS può superare i 4 km se le condizioni atmosferiche sono favorevoli.

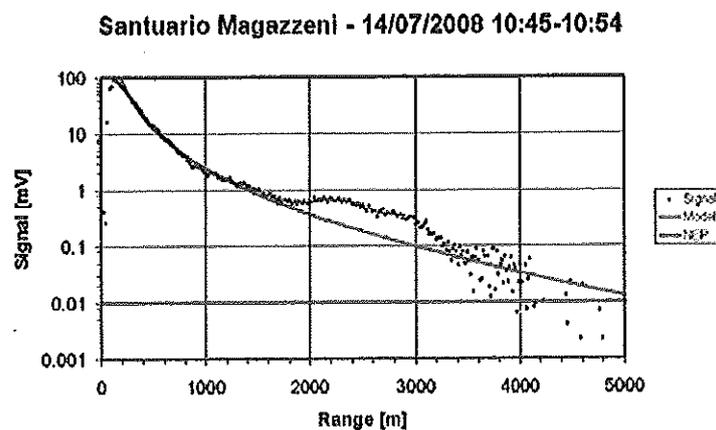


Fig. 20 – Segnale lidar misurato presso il Santuario di Magazzeni (Sant'Alfio) il 14 luglio 2008 (punti neri), modello del segnale (linea blu) e livello del rumore (linea verde).

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano per il sostegno il Dr. Pasquale Epifani, dirigente del Servizio Ambiente della Provincia di Brindisi, e per l'accoglienza il personale dell'ENEL (Dr.ssa Marcella Polignano e Ing. Vincenzo Putignano) e del Consorzio SISRI. Sono inoltre grati alla Dr.ssa Roberta Fantoni per l'incoraggiamento, al Dr. Filippo Fabbri e al Sig. Antonio Scoditti per il contributo nella preparazione dello strumento e allo svolgimento della campagna, rispettivamente, e al Sig. Paolo Aristipini e al Sig. Roberto Giovagnoli per la realizzazione di parti meccaniche.

Bibliografia

- [1] Seinfeld J. H., *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*, John Wiley & Sons, New York, US, 1986.
- [2] Finlayson-Pitts J. B., Pitts J. N., Jr., *Atmospheric Chemistry*, John Wiley & Sons, New York, US, 1986.
- [3] Melli P., Zanetti P., eds., *Environmental Modelling*, Computational Mechanics Publications, Southampton, UK, 1992.
- [4] Stull R. B., *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1988.
- [5] Stern A. C., ed., *Measuring, Monitoring and Surveillance of Air Pollution*, Academic Press, Orlando, US, 1977.
- [6] Fiorani L., Colao F., eds., *Laser Applications in Environmental Monitoring*. Nova Science Publishers, New York, US, 2008.
- [7] Breck Hitz C., *Understanding Laser Technology*, PennWell Publishing Company, Tulsa, US, 1985.
- [8] Colao F., Fiorani L., Palucci A., Delussu A., "Trasformazione della cavità laser del lidar atmosferico ATLAS," *Atti del 10° Convegno Nazionale "Strumentazione e metodi di misura elettroottici"*, AICT-AEIT, Milan, Italy (2008).
- [9] Aglione M., Aristipini P., Fiorani L., Palucci A., Poggi C., "ENVILAB: laboratorio mobile di telerilevamento atmosferico dell'ENEA," *Atti del 9° Convegno Nazionale "Strumentazione e metodi di misura elettroottici"*, AICT-AEIT, Frascati, Italy (2006).
- [10] Fiorani L., "Environmental monitoring by laser radar," in *Lasers and Electro-Optics at the Cutting Edge*, Larkin S. B., ed., Nova Science Publishers, New York, US, 2007, pp. 119-171.
- [11] Petheram J. C., "Differential backscatter from the atmospheric aerosol: the implications for IR differential absorption," *Applied Optics* **20**, 3941-3946 (1981).
- [12] Barbini R., Colao F., Fiorani L., Palucci A., "Lidar atmosferico: aspetti legislativi, scientifici e tecnologici," *Technical Reports of the Italian Agency for New Technologies, Energy and the Environment RT/INN/2000/34*, Rome, Italy (2001).

- [13] Durieux E., Fiorani L., "Measurement of the lidar signal fluctuation with a shot per shot instrument," *Applied Optics* **37**, 7128-7131 (1998).
- [14] Ben-David A., "Backscattering measurements of atmospheric aerosols at CO₂ laser wavelengths: implications of aerosol spectral structure on differential-absorption lidar retrievals of molecular species," *Applied Optics* **38**, 2616-2624 (1999).
- [15] Velotta R., Bartoli B., Capobianco R., Fiorani L., Spinelli N., "Analysis of the receiver response in lidar measurements," *Applied Optics* **37**, 6999-7007 (1998).
- [16] Elterman L., "UV, visible, and IR attenuation for altitudes to 50 km, 1968," *Technical Reports of the Air Force Geophysics Laboratory AFGL-TR-68-0153*, Hanscom, US (1968).
- [17] Warner J., Bichard V. M., "The statistics of atmospheric extinction at the CO₂ laser wavelength derived from meteorological office records," *Infrared Physics* **19**, 15-18 (1978).
- [18] Shettle E. P., Fenn R. W., "Models for the aerosols of the lower atmosphere and the effects of humidity variations on their optical properties," *Technical Reports of the Air Force Geophysics Laboratory AFGL-TR-79-0214*, Hanscom, US (1979).
- [19] Collis R. T. H., Russel P. B., "Lidar measurement of particles and gases by elastic backscattering and differential absorption," in *Laser Monitoring of the Atmosphere*, Hinkley E. D., ed., Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1976, pp. 71-151.