

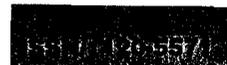


ENTE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E L'AMBIENTE



IT0100538

Serie Innovazione



LIDAR ATMOSFERICO: ASPETTI LEGISLATIVI, SCIENTIFICI E TECNOLOGICI

ROBERTO BARBINI, FRANCESCO COLAO, LUCA FIORANI, ANTONIO PALUCCI
ENEA - Divisione Fisica Applicata
Centro Ricerche Frascati, Roma

This report has been prepared and distributed by: Servizio Edizioni Scientifiche - ENEA
Centro Ricerche Frascati, C.P. 65 - 00044 Frascati, Rome, Italy

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

LIDAR ATMOSFERICO: ASPETTI LEGISLATIVI, SCIENTIFICI E TECNOLOGICI

Riassunto

Il Lidar atmosferico è uno dei sistemi del Laboratorio Mobile di Telerilevamento Laser in corso di realizzazione presso il Centro Ricerche di Frascati dell'ENEA. Questo rapporto tecnico discute gli aspetti legislativi, scientifici, tecnologici che sono alla base dell'individuazione dei requisiti, della definizione dell'architettura e della fissazione delle specifiche del Lidar atmosferico. La problematica dell'inquinamento dell'aria è introdotta nella sezione 2. Segue un riassunto della legislazione italiana su tale tematica. La sezione 4 offre una panoramica delle misure atmosferiche realizzabili con il Lidar. La sensibilità nel monitoraggio di inquinanti è discussa nella sezione 5. Gli altri sistemi del Laboratorio Mobile di Telerilevamento Laser sono descritti brevemente nella sezione 6. L'ultima sezione è dedicata alle conclusioni e alle prospettive.

Parole chiave: Telerilevamento laser, lidar, DIAL (lidar ad assorbimento differenziale), ambiente, inquinamento atmosferico.

ATMOSPHERIC LIDAR: LEGISLATIVE, SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL ASPECTS

Abstract

The Atmospheric Lidar is one of the systems of the Mobile Laboratory of Laser Remote Sensing under development at the ENEA Research Center of Frascati. This technical report addresses the legislative, scientific and technological aspects that are the basis for the identification of the requirements, the definition of the architecture and the fixation of the specifications of the Atmospheric Lidar. The problems of air pollution are introduced in section 2. A summary of the Italian laws on that topic is then given. Section 4 provides a survey of the atmospheric measurements that can be achieved with the lidar. The sensitivity in the monitoring of pollutants is discussed in section 5. The other systems of the Mobile Laboratory of Laser Remote Sensing are shortly described in section 6. The last section is devoted to conclusions and perspectives.

Key words: Laser remote sensing, lidar, DIAL (differential absorption lidar), environment, atmospheric pollution.

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	7
2. L'INQUINAMENTO ATMOSFERICO.....	8
3. LA LEGISLAZIONE ITALIANA	10
4. MISURE ATMOSFERICHE CON IL LIDAR	13
4.1 Misura del carico di aerosol.....	15
4.2 Misura della velocità del vento	16
4.3 Misura della concentrazione di molecole	17
5. SENSIBILITÀ DELLA MISURA DIAL.....	22
6. IL LABORATORIO MOBILE DI TELERILEVAMENTO LASER	28
6.1 Lidar Fluorosensore.....	29
6.2 Sistema LIBS	30
7. CONCLUSIONI	30
Bibliografia.....	32

LIDAR ATMOSFERICO: ASPETTI LEGISLATIVI, SCIENTIFICI E TECNOLOGICI

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 [1]. Una delle minacce attuali più gravi per l'ambiente umano è l'inquinamento atmosferico [2]: 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 [3]), solo di recente questi fenomeni hanno raggiunto una scala mondiale (effetto serra, impoverimento dello strato di ozono e piogge acide) [4]. 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. La modellizzazione dell'atmosfera con programmi al calcolatore [5] è lo strumento privilegiato per valutare l'evoluzione spazio-temporale della concentrazione degli inquinanti perché permette 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 validarne le predizioni con misure risolte in distanza e in tempo, effettuate di continuo fino alla sommità dello strato limite planetario [6]. 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 [7]. Fra i secondi, il radar ottico o lidar [8] si è diffuso dopo la scoperta del laser [9] 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 propone di discutere gli aspetti legislativi, scientifici e tecnologici che sono alla base dell'individuazione dei requisiti, della definizione dell'architettura e della fissazione delle specifiche del Lidar Atmosferico. Tale sistema fa parte del Laboratorio Mobile di Telerilevamento Laser ovvero della strumentazione laser per il monitoraggio del suolo, dell'acqua e dell'aria che sarà montata su un apposito furgone nel quadro di un accordo di programma fra ENEA e MURST. La problematica dell'inquinamento atmosferico è introdotta nella sezione 2. Segue un riassunto della legislazione italiana su tale tematica. La sezione 4 offre una panoramica delle misure atmosferiche realizzabili con il lidar. La sensibilità nel monitoraggio di inquinanti è discussa nella sezione 5. Il Lidar Atmosferico è inserito nel contesto del Laboratorio Mobile di Telerilevamento Laser nella sezione 6. L'ultima sezione è dedicata alle conclusioni. Vista la vastità della letteratura, abbondantemente citata nella bibliografia, l'esposizione delle sezioni 2-4 è volutamente sintetica. Maggiore attenzione è dedicata alla discussione della sensibilità nel monitoraggio di inquinanti che costituisce lo scopo per cui il Lidar Atmosferico è stato concepito.

2. L'INQUINAMENTO ATMOSFERICO

Gli inquinanti atmosferici possono essere suddivisi in sei categorie:

- 1) composti contenenti zolfo,
- 2) composti contenenti azoto,
- 3) composti contenenti carbonio,
- 4) composti contenenti alogeni,
- 5) ossidanti fotochimici,
- 6) particelle sospese.

Ricapitoliamo nella tabella 1 i principali inquinanti e la loro concentrazione tipica in atmosfera inquinata [2]. Nel caso dei gas è conveniente esprimere la concentrazione come rapporto tra il volume di inquinante e il volume d'aria, indicato generalmente in termini di ppm, ppb e ppt (parti per milione, miliardo e trilione, rispettivamente), nel caso delle particelle sospese come rapporto tra la massa dell'inquinante e il volume d'aria, indicato generalmente in termini di mg/m^3 , $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e ng/m^3 .

A parte i clorofluorocarburi, presunti responsabili dell'impoverimento dello strato di ozono, gli inquinanti elencati nella tabella 1 hanno effetti più o meno gravi sulla qualità dell'aria respirata da persone, animali e piante. Il biossido di zolfo, ad esempio, è responsabile dello "smog di Londra", mentre lo "smog di Los Angeles" è il risultato dell'interazione tra irraggiamento solare e inquinanti primari (VOC o composti organici volatili e ossidi di azoto) che conduce alla formazione di inquinanti secondari (ozono ed altri ossidanti fotochimici). Per quanto riguarda le particelle sospese, possono essere suddivise in particolato grossolano (dimensioni superiori a $2.5 \mu\text{m}$) e particolato fine (dimensioni inferiori a $2.5 \mu\text{m}$). Tali classi differiscono per origine, trasformazione, rimozione, composizione chimica, proprietà ottiche, tecniche di controllo e pericolosità per la persona (mentre il primo è soltanto inalabile, il secondo è anche respirabile).

Il caso dello "smog di Los Angeles" dimostra che la conoscenza della concentrazione dei gas non è sufficiente per la comprensione della dinamica dello strato limite planetario: in generale è necessario misurare la pressione, la temperatura e l'umidità dell'aria, la velocità del vento, l'irraggiamento solare e la concentrazione di gas inquinanti e particelle sospese. Nel seguito vedremo in quali di questi campi il lidar possa offrire la soluzione ottimale.

Tabella 1 - Inquinanti principali.

<i>Categoria</i>	<i>Inquinanti principali</i>	<i>Concentrazione tipica</i>
Composti contenenti zolfo	Biossido di zolfo	20-200 ppb
Composti contenenti azoto	Monossido di azoto	50-750 ppb
	Biossido di azoto	50-250 ppb
Composti contenenti carbonio	Monossido di carbonio	1,000-10,000 ppb
	Benzene	1-40 ppb
Composti contenenti alogeni	Clorofluorocarburi	0.5 ppb
Ossidanti fotochimici	Ozono	100-500 ppb
Particelle sospese	Piombo	$1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$
	Particelle sospese totali	20-2,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

3. LA LEGISLAZIONE ITALIANA

Le strategie adottate dalla legislazione italiana per la prevenzione e il contenimento dell'inquinamento atmosferico possono essere riassunte in:

- norme di qualità dell'aria che limitano le concentrazioni degli inquinanti,
- norme che impongono limiti di emissione per inquinanti da fonti fisse e mobili,
- linee guida per il contenimento delle emissioni,
- norme per la localizzazione degli impianti (studio dell'impatto ambientale e analisi dei rischi da incidenti),
- partecipazione alle iniziative internazionali volte al contenimento degli effetti globali (effetto serra, impoverimento dello strato di ozono e piogge acide).

Il concetto di **standard della qualità dell'aria** è stato introdotto nella legislazione italiana dal DPCM del 28/03/83 che ha fissato, per la prima volta, limiti alle concentrazioni e alle esposizioni relative a inquinanti atmosferici per la tutela delle persone.

In seguito, il DPR 203 del 24/05/88 – emanato in attuazione delle direttive CEE 80/779, 82/884, 84/360 e 85/203 – modificando e integrando il DPCM del 28/03/83:

- ha fissato i **valori limite di qualità dell'aria** ovvero: “limiti massimi di accettabilità delle concentrazioni e limiti massimi di esposizione relativi ad inquinanti nell'ambiente esterno” (DPR 203 del 24/05/88, art. 2, comma 2),
- ha fissato i **valori guida di qualità dell'aria** ovvero: “limiti delle concentrazioni e limiti di esposizione relativi ad inquinamenti nell'ambiente esterno destinati: a) alla prevenzione a lungo termine in materia di salute e protezione dell'ambiente; b) a costituire parametri di riferimento per l'istituzione di zone specifiche di protezione ambientale per le quali è necessaria una particolare tutela della qualità dell'aria” (DPR 203 del 24/05/88, art. 2, comma 3),
- ha definito linee guida per il contenimento delle emissioni,
- ha conferito alle regioni competenze, quali il ruolo di controllo e la fissazione di valori limite anche inferiori ai valori guida imposti dalle norme nazionali,
- ha istituito sanzioni penali per le inadempienze procedurali e per i superamenti nelle emissioni.

La completa attuazione del DPR 203 del 24/05/88 ha richiesto interpretazioni e integrazioni contenute nel DPCM del 21/07/89 e nel DM del 12/07/90.

I **livelli di attenzione e di allarme**, sono stati introdotti dal DM del 15/04/94. Successivamente, il DM del 25/11/94 ha modificato i livelli di attenzione e di allarme e ha indicato gli **obiettivi di qualità** per PM10 (particelle con diametro aerodinamico equivalente inferiore a 10 µm) , benzene e idrocarburi policiclici aromatici (con riferimento al benzo[a]pirene).

Un caso a parte è costituito dall'ozono, per cui non sono stati stabiliti valori guida ma **livelli per la protezione della salute e della vegetazione** (DM del 16/05/96).

Infine, il DLgs 351 del 04/08/99 – emanato in attuazione della direttiva CEE 96/62/CE – ha fornito indicazioni in merito alla valutazione e alla gestione della qualità dell'aria.

Ricapitoliamo, nelle tabelle 2 e 3, i valori limite e guida di qualità dell'aria, i livelli di attenzione e di allarme (livelli di protezione della salute e della vegetazione nel caso dell'ozono) e gli obiettivi di qualità.

Nel caso dei gas inquinanti (biossido di zolfo, biossido di azoto, ozono, monossido di carbonio, fluoro, benzene, benzo[a]pirene) è conveniente esprimere la concentrazione in termini di ppb. Considerando l'atmosfera standard (1 atm, 25 °C), la conversione da µg/m³ a ppb è data dalla formula [2]:

$$C[\text{ppb}] = \frac{24.464}{W} C[\mu\text{g}/\text{m}^3], \quad (1)$$

dove C è la concentrazione e W è il peso molecolare.

Uno strumento di monitoraggio che intenda fornire indicazioni utili agli enti per la protezione dell'ambiente deve essere sensibile al minimo livello di un gas inquinante tra quelli stabiliti dalla normativa vigente (tabelle 2 e 3). Per dare un'idea della sensibilità necessaria, tali livelli sono stati elencati nella tabella 4 (assieme alle formule e ai pesi molecolari [10]).

Tabella 2 - Valori limite e guida e livelli di attenzione e di allarme.

Inquinante	Valori limite		Valori guida ^a		Livelli di attenzione e di allarme	
Biossido di zolfo [µg/m ³]	80	Mediana delle concentrazioni medie di 24 ore rilevate in 1 anno (01/04-31/03)	40-60	Media delle concentrazioni medie di 24 ore rilevate in 1 anno (01/04-31/03)	125 e 250	Media giornaliera
	250	98° percentile delle concentrazioni medie di 24 ore rilevate in 1 anno (01/04-31/03) ^b	100-150	Concentrazione media di 24 ore (00-24)		
	130	Mediana delle concentrazioni medie di 24 ore rilevate in inverno (01/10-31/03)				
Biossido di azoto [µg/m ³]	200	98° percentile delle concentrazioni medie di 1 ora rilevate in 1 anno (01/01-31/12) ^b	50	50° percentile delle concentrazioni medie di 1 ora rilevate in 1 anno (01/01-31/12)	200 e 400	Media oraria
			135	98° percentile delle concentrazioni medie di 1 ora rilevate in 1 anno (01/01-31/12)		
Ozono [µg/m ³]	200	Concentrazione media di 1 ora ^c	110	Concentrazione media di 8 ore ^d	180 e 360	Media giornaliera
			200	Concentrazione media di 1 ora ^e		
			65	Concentrazione media di 24 ore ^e		
Monossido di carbonio [mg/m ³]	10	Concentrazione media di 8 ore			15 e 30	Media giornaliera
	40	Concentrazione media di 1 ora				
Piombo [µg/m ³]	2	Media delle concentrazioni medie di 24 ore rilevate in 1 anno				
Fluoro [µg/m ³]	20	Concentrazione media di 24 ore				
	10	Media delle concentrazioni medie di 24 ore rilevate in 1 mese				
Particelle sospese [µg/m ³]	150	Media delle concentrazioni medie di 24 ore rilevate in 1 anno	40-60	Media delle concentrazioni medie di 24 ore rilevate in 1 anno (01/04-31/03)	150 e 300	Media giornaliera
	300	95° percentile delle concentrazioni medie di 24 ore rilevate in 1 anno	100-150	Concentrazione media di 24 ore (00-24)		

^a Nel caso dell'ozono sono riportati i livelli di protezione.

^b Si devono prendere tutte le misure atte ad evitare il superamento di questo valore per più di tre giorni consecutivi; inoltre si deve cercare di prevenire e ridurre detti superamenti.

^c Da non raggiungere più di una volta al mese.

^d Livello per la protezione della salute. La media è calcolata ogni ora h sulla base dei valori orari dell'intervallo h/h-8.

^e Livello per la protezione della vegetazione.

Tabella 3 - Obiettivi di qualità (dal 01/01/99).

Inquinante	Obiettivo di qualità
PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	40
benzene [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	10
benzo[a]pirene [ng/m^3]	1

Tabella 4 - Formule, pesi molecolari e minimo livello stabilito dalla normativa vigente dei gas inquinanti.

Gas inquinante	Formula	Peso Molecolare	Livello [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Livello [ppb]
Biossido di zolfo	SO ₂	64.06	40	15
Biossido di azoto	NO ₂	46.01	50	27
Ozono	O ₃	48.00	65	33
Monossido di carbonio	CO	28.01	10,000	8,700
Fluoro	F ₂	38.00	10	6
Benzene	C ₆ H ₆	78.11	10	3
Benzo[a]pirene	C ₂₀ H ₁₂	252.31	0.001	0.0001

4. MISURE ATMOSFERICHE CON IL LIDAR

L'acronimo "lidar" (Light Detection And Ranging) è stato introdotto in analogia con "radar" nel contesto dei rivelatori di nubi a luce impulsata [11]. Sebbene questo termine sia stato suggerito ben prima della scoperta del laser (concepito da Schawlow e Townes nel dicembre del 1958 e realizzato da Maiman nel 1960) [9], il lidar si è diffuso solo dopo il suo avvento.

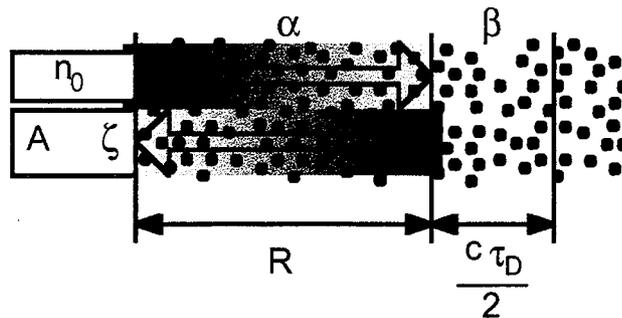


Fig. 1 - Principio di funzionamento del lidar. I punti rappresentano diffusori atmosferici generici (molecole e aerosol).

Le nuove capacità offerte agli studi atmosferici da questa rivoluzionaria sorgente di luce sono state ben presto capite e sfruttate [12-15]. A causa delle sue caratteristiche (alta intensità, piccola divergenza, breve durata degli impulsi ed eccellente monocromaticità) il fascio laser è lo strumento ideale per il telerilevamento attivo. La misura, fino a molti chilometri di altezza, di densità, temperatura e umidità dell'aria, la rivelazione di gas traccia, lo studio delle nubi, l'osservazione degli aerosol stratosferici, il sondaggio dell'alta atmosfera e il monitoraggio degli inquinanti sono alcuni esempi delle possibili applicazioni del lidar [16-19].

Un lidar è essenzialmente composto da un trasmettitore (laser) e un ricevitore (telescopio). Il suo principio di funzionamento 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:

$$R = \frac{ct}{2}, \quad (2)$$

dove c è la velocità della luce.

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:

$$n(R, \lambda) = n_0(\lambda) \zeta(\lambda) \frac{A}{R^2} \beta(R, \lambda) \frac{c\tau_D}{2} \exp \left[-2 \int_0^R \alpha(R', \lambda) dR' \right], \quad (3)$$

dove λ è la lunghezza d'onda. Se si desidera esprimere l'equazione lidar (3) in termini di energia rivelata ed emessa (E ed E_0 , rispettivamente) occorre moltiplicare n ed n_0 per hc/λ , energia del singolo fotone, dove h è la costante di Planck, ottenendo:

$$E(R, \lambda) = E_0(\lambda) \zeta(\lambda) \frac{A}{R^2} \beta(R, \lambda) \frac{c\tau_D}{2} \exp \left[-2 \int_0^R \alpha(R', \lambda) dR' \right]. \quad (4)$$

Se, invece, si desidera esprimere l'equazione lidar (3) in termini di potenza rivelata ed emessa (p e p_0 , rispettivamente) occorre dividere n per τ_D ed n_0 per τ_L , durata dell'impulso, ottenendo:

$$p(R, \lambda) = p_0(\lambda) \zeta(\lambda) \frac{A}{R^2} \beta(R, \lambda) \frac{c\tau_L}{2} \exp \left[-2 \int_0^R \alpha(R', \lambda) dR' \right]. \quad (5)$$

Come abbiamo visto, la porzione di atmosfera che ci interessa maggiormente è lo strato limite planetario. In questo ambito, il lidar è stato utilizzato soprattutto per la misura del carico di aerosol, della velocità del vento e della concentrazione di molecole.

4.1 Misura del carico di aerosol

La discussione precedente ha evidenziato che l'eco lidar è legato alle proprietà ottiche dell'atmosfera lungo il fascio laser. In generale, i coefficienti di estinzione e retrodiffusione sono determinati principalmente dal carico di aerosol. Questo parametro è importante per i suoi effetti sulla trasmissione atmosferica della radiazione solare [20] e, quindi, sul clima. In realtà, α e β sono entrambi incognite, ma alcuni metodi affidabili per l'inversione dell'equazione lidar (3) sono stati elaborati per ricostruire α e β a partire dal segnale [21-24], sulla base di collaudati modelli atmosferici [25-27]. La figura 2 [28], ottenuta seguendo uno

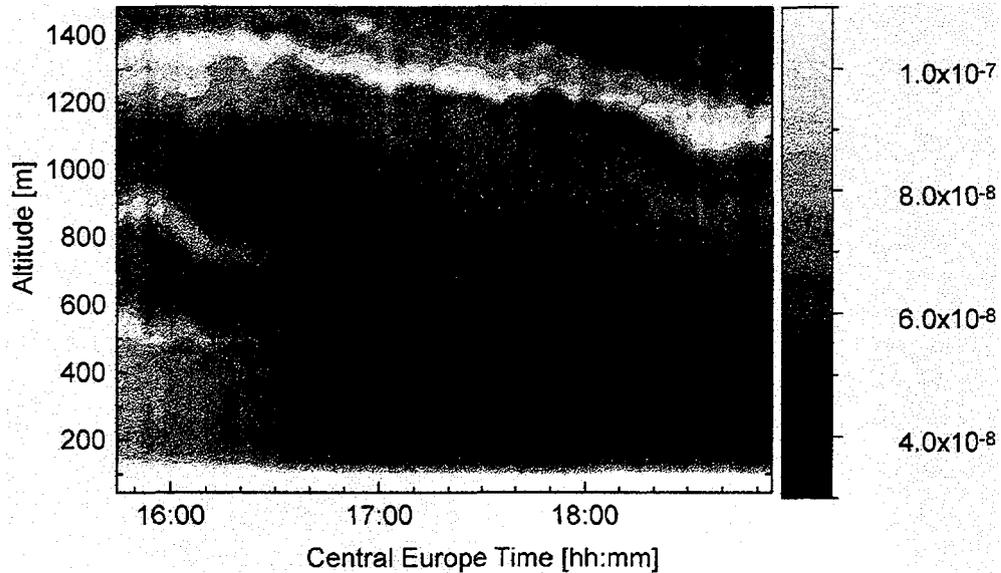


Fig. 2 - Coefficiente di retrodiffusione degli aerosol [$cm^{-1} sr^{-1}$] misurato a 351 nm in funzione del tempo e dell'altezza (Napoli, 13 marzo 1997).

schema di inversione accettato da numerosi ricercatori [29], è un esempio della capacità del lidar di analizzare la dinamica del carico di aerosol nella bassa troposfera. Se ci si vuole spingere oltre, deducendo le proprietà delle particelle, è necessario emettere numerose lunghezze d'onda [30].

4.2 Misura della velocità del vento

Un lidar capace di monitorare il carico di aerosol, con alcune modifiche, può essere usato per misurare la velocità del vento. Occorre la capacità di dirigere il fascio in qualsiasi direzione [31] e di acquisire il segnale corrispondente al singolo eco lidar (acquisizione colpo per colpo) [32].

Secondo l'equazione lidar (3), il numero di fotoni retrodiffusi dall'atmosfera a una data distanza dallo strumento è proporzionale al coefficiente di retrodiffusione. Questo fattore è funzione della carica di aerosol responsabile della diffusione della luce. Qualsiasi cambiamento nella sua distribuzione spazio-temporale durante una acquisizione di dati condurrà quindi a variazioni negli echi lidar da un colpo laser all'altro. In particolare, un flusso di vento lungo l'asse del fascio sarà rivelato dal trasporto delle inhomogeneità spaziali di

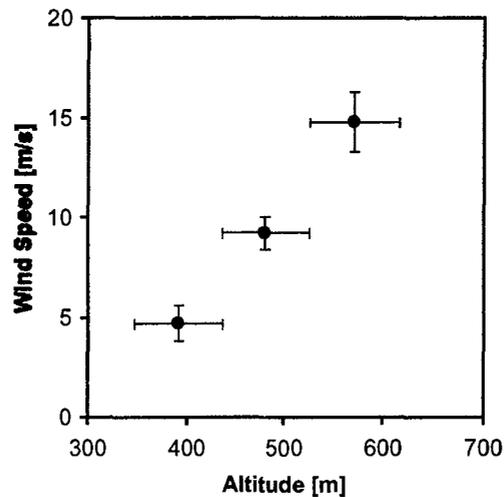


Fig. 3 - Velocità del vento in funzione dell'altezza (Atene, 13 settembre 1994).

β lungo il cammino ottico [33]. Un esempio di misura della velocità del vento è dato in fig. 3 [34].

In realtà, la misura con un solo fascio laser è limitata (occorre puntare il sistema nella direzione del vento). Per ovviare a questo problema, si possono emettere gli impulsi simultaneamente in tre direzioni [35].

Alcuni strumenti, invece di rivelare il trasporto delle inhomogeneità spaziali di β , misurano lo spostamento Doppler nell'eco lidar [36].

4.3 Misura della concentrazione di molecole

Il telerilevamento laser è largamente utilizzato per misurare la concentrazione di molecole (inquinanti, vapore acqueo, ecc.) generalmente mediante il lidar ad assorbimento differenziale (DIAL) [37]. 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 dalla molecola in esame. Più precisamente, sulla base dell'equazione lidar (3) ed introducendo α' ,

variabile in cui è stato escluso l'effetto su α dovuto all'assorbimento della molecola in esame, può essere scritta l'equazione DIAL:

$$C(R) = \frac{1}{2 \Delta\sigma} \left\{ \frac{d}{dR} \ln \left[\frac{n(R, \lambda_{OFF})}{n(R, \lambda_{ON})} \right] - \frac{d}{dR} \ln \left[\frac{\beta(R, \lambda_{OFF})}{\beta(R, \lambda_{ON})} \right] \right\} - \frac{\Delta\alpha'(R)}{\Delta\sigma}, \quad (6)$$

$$\Delta\sigma = \sigma(\lambda_{ON}) - \sigma(\lambda_{OFF}), \quad (7)$$

$$\Delta\alpha'(R) = \alpha'(R, \lambda_{ON}) - \alpha'(R, \lambda_{OFF}), \quad (8)$$

$$\alpha'(R, \lambda) = \alpha(R, \lambda) - C(R)\sigma(\lambda), \quad (9)$$

dove C e σ sono, rispettivamente, la concentrazione e la sezione d'urto della molecola in esame.

Nell'ipotesi in cui λ_{ON} e λ_{OFF} siano sufficientemente vicine, l'equazione DIAL (6) si semplifica:

$$C(R) = \frac{1}{2 \Delta\sigma} \frac{d}{dR} \ln \left[\frac{n(R, \lambda_{OFF})}{n(R, \lambda_{ON})} \right]. \quad (10)$$

Notiamo che il numero di fotoni n potrebbe essere sostituito dall'energia E o dalla potenza p nelle equazioni (6) e (10).

Generalmente, il risultato delle equazioni (6) e (10) è espresso in molecole/cm³. Per ottenere la concentrazione in ppb basta dividere tale risultato per la densità dell'aria in molecole/cm³ e moltiplicare per un miliardo. Considerando l'atmosfera standard (1 atm, 25 °C), la conversione da molecole/cm³ a ppb è data dalla formula [2]:

$$C[\text{ppb}] = \frac{C[\text{molecole/cm}^3]}{2.46 \times 10^{10}}. \quad (11)$$

La fig. 4 [38] è un esempio di misura della concentrazione d'ozono durante un episodio di smog fotochimico ad Atene.

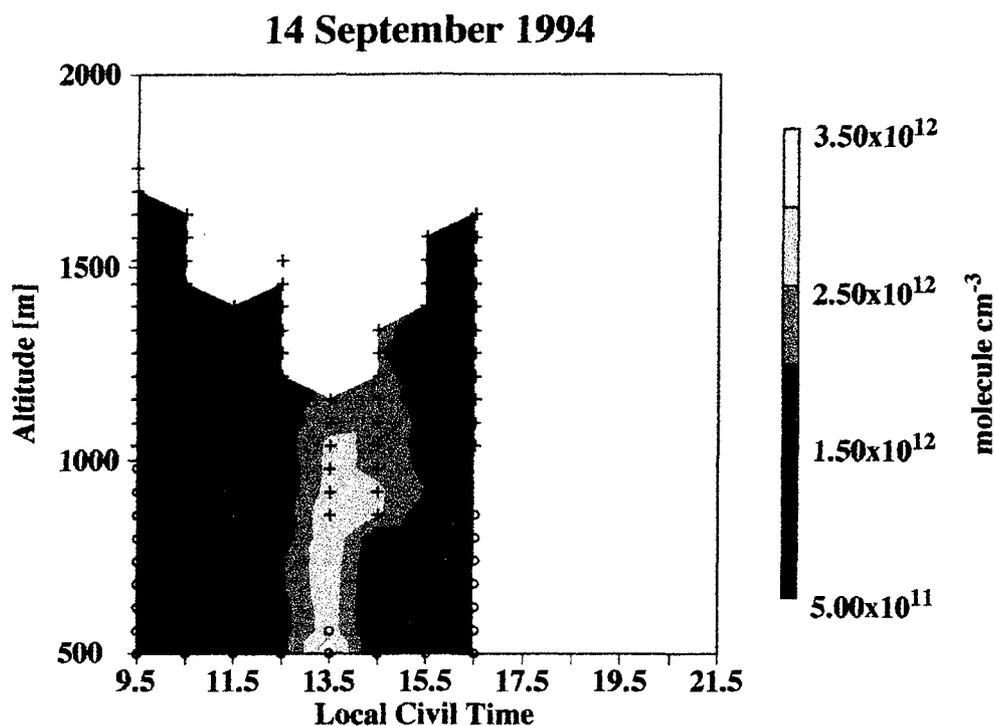


Fig. 4 - Concentrazione d'ozono in funzione del tempo e dell'altezza (Atene, 14 settembre 1994).

La tecnica DIAL è stata largamente utilizzata per il monitoraggio di vapore acqueo [39] e inquinanti [40]: quelli elencati nella tabella 4, ad esempio, sono stati tutti rivelati ad eccezione del fluoro (banda di assorbimento troppo larga) e del benzo[a]pirene (concentrazione troppo bassa). Riassumiamo nella tabella 5 le regioni spettrali in cui più frequentemente tali misure sono state effettuate o suggerite.

Come si può notare le regioni spettrali più usate sono:

- l'UV tra 250 e 300 nm,
- il visibile attorno a 450 e 700 nm,
- l'IR attorno a 5 μm ,
- l'IR attorno a 10 μm ,

anche se, più recentemente, è stato utilizzato con frequenza crescente l'IR più vicino (1-5 μm) [47-48].

Proponiamo quindi, anche tenendo conto dell'esperienza già acquisita [49, 50], un sistema che, in un primo momento, possa esplorare l'UV tra 250 e 300 nm (monitoraggio di SO₂, O₃ e C₆H₆), il visibile attorno a 450 nm (monitoraggio di NO₂), l'IR attorno a 10 μm (monitoraggio di H₂O, SO₂, O₃ e C₆H₆). La prima regione spettrale si può ottenere duplicando con un cristallo non lineare un laser dye pompato da un'armonica di un laser Nd:YAG, la seconda con un dye pompato da un'armonica di un Nd:YAG e, infine, la terza con un laser CO₂.

Tabella 5 - Molecola, lunghezza d'onda utilizzata nella misura DIAL, corrispondente sezione d'urto e riferimento.

Molecola	λ_{ON} [μm]	σ_{ON} [10^{-18} cm^2]	Riferimenti
H ₂ O	0.694	1.4×10^{-5}	R. M. Schotland, J. Appl. Meteor. 13 , 71 (1974)
	0.724	5.2×10^{-5}	E. V. Browell et al., Appl. Opt. 18 , 3474 (1979)
	10.247	3.5×10^{-5}	E. R. Murray, Opt. Eng. 17 , 30 (1978)
SO ₂	0.300	1.1	K. Fredriksson et al., Appl. Opt. 20 , 4181 (1981)
	7.4	0.65	P. L. Hanst, in <i>Advances in Environmental Science and Technique - Vol. 2</i> , (Wiley, New York, NY, 1971)
	4.001	0.02	R. M. Measures, <i>Laser remote sensing</i> (Krieger, Malabar, FL, 1992).
	9.024	0.25	T. Kobayasi and K. Inaba, Opt. Quant. Electron. 7 , 319 (1975)
NO ₂	0.448	0.35	H. J. Kölsch et al., Appl. Opt. 28 , 2052 (1989)
	6.229	2.7	L. B. Kreuzer et al., Science 177 , 347 (1972)
O ₃	0.272	5.9	L. Fiorani et al., Appl. Opt. 36 , 6857 (1997).
	9.504	0.51	R. Barbini et al., in <i>Lidar Atmospheric Monitoring</i> (SPIE, Bellingham, WA, 1997)
CO	2.3	1.6×10^{-2}	T. Henningsen et al., Appl. Phys. Lett. 24 , 242 (1974)
	4.709	2.8	R. M. Measures, <i>Laser remote sensing</i> (Krieger, Malabar, FL, 1992).
	4.776	0.80	T. K. McCubbin, Jr., AFCRL-67-0437 (USAF, Bedford, MA, 1967).
C ₆ H ₆	0.25	1.3	J. H. Calloman et al., Phil. Trans. Roy. Soc. 259A , 499 (1966)
	9.639	0.09	W. Schnell and W. Fischer, Appl. Opt. 14 , 2058 (1975)

Per raggiungere tale scopo, occorrono due sorgenti: la prima è costituita da un Nd:YAG, un dye e un cristallo non lineare (inserito per le misure nell'UV, disinserito per quelle nel visibile), la seconda da un CO₂. In entrambi i casi, l'emissione di λ_{ON} e λ_{OFF} non può che essere quasi simultanea (intervallo temporale dell'ordine di 0.1-1 s) [51]. Comunque, tale modalità di funzionamento è sufficiente per raggiungere lo scopo del Lidar Atmosferico.

Tenendo conto che il CO, a causa della sua elevata concentrazione, è facilmente misurabile con dispositivi convenzionali, con tale scelta monitoreremmo gli inquinanti di maggiore interesse e, in più, l'umidità dell'aria e il carico di aerosol (analizzando il segnale alle varie lunghezze d'onda potremmo verificare se gli algoritmi che deducono le proprietà delle particelle [30] sono applicabili al nostro caso). Inoltre, costruendo un sistema avente la capacità di dirigere il fascio in qualsiasi direzione [31] e di acquisire il segnale corrispondente al singolo eco lidar (acquisizione colpo per colpo) [32] potremmo essere in grado, in particolari condizioni, di determinare la velocità del vento.

In un secondo momento, varie migliorie potrebbero essere applicate al sistema:

- raddoppiando le sorgenti per ogni regione spettrale (emissione simultanea di λ_{ON} e λ_{OFF}),
- duplicando la frequenza del laser CO₂ con un cristallo non lineare, in modo da monitorare il CO [52],
- raggiungendo la regione spettrale tra 1 e 5 μm con cristalli non lineari od oscillatori parametrici (OPO) montati in cascata alla sorgente UV/visibile [47-48],
- aggiungendo alcune lunghezze d'onda (ad esempio, le armoniche del laser Nd:YAG) in modo da dedurre le proprietà delle particelle che costituiscono gli aerosol [30, 53],
- emettendo gli impulsi simultaneamente in tre direzioni per determinare la velocità del vento in condizioni più generali [35, 53].

Nondimeno, già la prima fase del progetto potrebbe presentare aspetti tecnologici innovativi quali:

- l'utilizzo di un filtro ottico accordabile in frequenza che permetterebbe la riduzione del rumore [54],
- l'impiego di un controllo remoto per la selezione delle lunghezze d'onda,
- l'implementazione di un allineamento automatico tra trasmettitore e ricevitore [28],
- la misura quasi simultanea di un inquinante (SO₂, O₃ o C₆H₆) in due regioni spettrali completamente differenti, quali l'UV e l'IR.

Quest'ultima potenzialità, unica a nostra conoscenza, permetterebbe al Lidar Atmosferico di proporsi come strumento di riferimento per la calibrazione dei sistemi di telerilevamento attivo.

5. SENSIBILITÀ DELLA MISURA DIAL

Una discussione approfondita degli effetti sistematici [41, 42] e degli errori statistici [43, 44] nella misura DIAL è al di là dello scopo del presente documento. Nondimeno, desiderando rivelare i livelli di inquinamento stabiliti dalla legislazione italiana (tabella 4), ne discuteremo brevemente la sensibilità.

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 e abbia una superficie lambertiana di riflettività ρ , le equazioni lidar (3), (4) e (5) divengono:

$$n(R_T, \lambda) = n_0(\lambda) \zeta(\lambda) \frac{A}{R_T^2} \frac{\rho(\lambda)}{\pi} \chi \exp \left[-2 \int_0^{R_T} \alpha(R', \lambda) dR' \right], \quad (12)$$

$$E(R_T, \lambda) = E_0(\lambda) \zeta(\lambda) \frac{A}{R_T^2} \frac{\rho(\lambda)}{\pi} \chi \exp \left[-2 \int_0^{R_T} \alpha(R', \lambda) dR' \right], \quad (13)$$

$$p(R_T, \lambda) = p_0(\lambda) \zeta(\lambda) \frac{A}{R_T^2} \frac{\rho(\lambda)}{\pi} \exp \left[-2 \int_0^{R_T} \alpha(R', \lambda) dR' \right], \quad (14)$$

dove:

$$\chi = \frac{\tau_D}{\tau_L} \quad \text{per} \quad \tau_D \leq \tau_L \quad \chi = 1 \quad \text{per} \quad \tau_D > \tau_L. \quad (15)$$

L'equazione DIAL (6) diviene:

$$\bar{C} = \frac{1}{2 R_T \Delta \sigma} \left\{ \ln \left[\frac{n(R_T, \lambda_{\text{OFF}})}{n(R_T, \lambda_{\text{ON}})} \right] - \ln \left[\frac{n_0(\lambda_{\text{OFF}}) \zeta(\lambda_{\text{OFF}}) \rho(\lambda_{\text{OFF}})}{n_0(\lambda_{\text{ON}}) \zeta(\lambda_{\text{ON}}) \rho(\lambda_{\text{ON}})} \right] \right\} - \frac{\Delta \bar{\alpha}'}{\Delta \sigma}, \quad (16)$$

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

Nell'ipotesi in cui λ_{ON} e λ_{OFF} siano sufficientemente vicine e gli impulsi alle due lunghezze d'onda abbiano lo stesso numero di fotoni, l'equazione DIAL (16) si semplifica:

$$\bar{C} = \frac{1}{2 R_T \Delta\sigma} \ln \left[\frac{n(R_T, \lambda_{OFF})}{n(R_T, \lambda_{ON})} \right]. \quad (17)$$

Notiamo che il numero di fotoni n potrebbe essere sostituito dall'energia E o dalla potenza p nelle equazioni (16) e (17).

Supponendo che le fluttuazioni del segnale per le due lunghezze d'onda non siano correlate e adottando la convenzione per cui la sensibilità $\delta\bar{C}$ è uguale alla deviazione standard di \bar{C} otteniamo [45]:

$$\delta\bar{C} = \frac{1}{\sqrt{2} R_T \Delta\sigma \text{SNR}(R_T)}, \quad (18)$$

dove SNR è la media del rapporto segnale-rumore per le due lunghezze d'onda.

Ad un risultato simile si perviene senza utilizzare un bersaglio [45]:

$$\delta\bar{C}(R) = \frac{1}{\sqrt{2} \Delta R \Delta\sigma \text{SNR}(R)}, \quad (19)$$

dove ΔR è la risoluzione spaziale del lidar.

Come avevamo accennato, essendo in generale $\Delta R < R$ e $\text{SNR}(R) < \text{SNR}(R_T)$, la misura DIAL raggiunge la sua massima sensibilità quando il lidar è puntato su un bersaglio.

Le equazioni (18) e (19) possono essere ulteriormente semplificate:

$$\delta\bar{C} \cong \frac{1}{\sqrt{2} R_T \sigma(\lambda_{ON}) \text{SNR}(R_T, \lambda_{ON})}, \quad (20)$$

$$\delta C \equiv \frac{1}{\sqrt{2} \Delta R \sigma(\lambda_{ON}) \text{SNR}(R, \lambda_{ON})}. \quad (21)$$

Inoltre, queste relazioni forniscono una stima più prudente della sensibilità, considerando che, in generale:

$$\Delta \sigma \equiv \sigma(\lambda_{ON}), \quad (22)$$

$$\text{SNR}(R, \lambda_{ON}) < \text{SNR}(R). \quad (23)$$

Per quanto riguarda il rapporto segnale-rumore, possiamo scrivere [46]:

$$\text{SNR}(R, \lambda) = \frac{Q(\lambda) G p(R, \lambda)}{\sqrt{2 e B G^2 [Q(\lambda) p(R, \lambda) + Q p_B(R, \lambda) + i_D(\lambda)]}}, \quad (24)$$

dove:

$$Q(\lambda) = \frac{e \lambda \eta(\lambda)}{h c}, \quad (25)$$

$$p_B = A \zeta(\lambda) \Delta \lambda H(\lambda) \Omega \left(\frac{\rho(\lambda)}{\pi} \exp[-\bar{\alpha}(\lambda) R_T] + \frac{1}{4\pi} \{1 - \exp[-\bar{\alpha}(\lambda) R_T]\} \right), \quad (26)$$

nel caso con bersaglio,

$$p_B = A \zeta(\lambda) \Delta \lambda H(\lambda) \Omega \left(\frac{\beta(R, \lambda) c \tau_L}{2} \exp[-\bar{\alpha}(\lambda) R] + \frac{1}{4\pi} \{1 - \exp[-\bar{\alpha}(\lambda) R]\} \right), \quad (27)$$

nel caso senza bersaglio, G è il guadagno del rivelatore, e è la carica dell'elettrone, B è la banda passante elettronica, i_D è la corrente di buio del rivelatore, η è l'efficienza quantica del rivelatore, $\Delta \lambda$ è la banda passante ottica, H è l'irradianza ambientale e Ω è l'angolo solido del ricevitore.

Notiamo che i tre addendi al denominatore rappresentano le principali sorgenti di rumore: fluttuazione del segnale (“shot noise”), fondo (“background noise”) e corrente di buio (“dark noise”), rispettivamente.

L’equazione (24) è particolarmente comoda quando il rivelatore è un fotomoltiplicatore. Nel caso di un rivelatore a stato solido, è usuale tabulare, invece della corrente di buio, la potenza equivalente di rumore NEP (rapporto tra la potenza che produrrebbe un segnale uguale alla corrente di buio e la radice della banda passante elettronica). La relazione che permette di calcolare i_D a partire da NEP è la seguente:

$$i_D(\lambda) = Q(\lambda)\sqrt{B} \text{NEP}(\lambda), \quad (28)$$

Talora, invece della potenza equivalente di rumore, è tabulata la rivelabilità specifica:

$$D^*(\lambda) = \frac{\sqrt{a}}{\text{NEP}(\lambda)}, \quad (29)$$

dove a è la superficie attiva del rivelatore.

In realtà, la risoluzione del convertitore analogico digitale (ADC) che campiona il segnale pone un altro limite al rapporto segnale rumore che può essere ottenuto:

$$\text{SNR}(R, \lambda) = p^*(R, \lambda), \quad (30)$$

dove p^* è la potenza misurata espressa in livello dell’ADC. Nel calcolo della sensibilità si dovrà considerare il minimo valore tra quelli ottenuti dalle equazioni (24) e (30). In entrambi i casi, considerando la media su N impulsi laser, il rapporto segnale rumore potrà essere migliorato di un fattore \sqrt{N} .

Concludiamo questa sezione con il calcolo della sensibilità per i parametri tipici che potranno essere orientativamente raggiunti con il Lidar Atmosferico nelle tre regioni spettrali.

Per quanto riguarda l’energia e la durata dell’impulso, sono ragionevoli i seguenti valori:

UV: $E_0=5 \text{ mJ}$ $\tau_L=10 \text{ ns}$,

visibile: $E_0=50 \text{ mJ}$ $\tau_L=10 \text{ ns}$,

IR: $E_0=1 \text{ J}$ $\tau_L=100 \text{ ns}$.

Approssimando la potenza emessa con il rapporto tra energia e durata dell’impulso otteniamo:

UV: $p_0=0.5$ MW,

visibile: $p_0=5$ MW,

IR: $p_0=10$ MW.

Considereremo un ricevitore avente diametro 0.3 m, divergenza 10 mrad, efficienza 0.2 e banda passante ottica 1 nm (UV e visibile) e 10 nm (IR). La riflettività del bersaglio si aggira attorno a 0.1 [55]. I valori di G , i_D ed η sono ispirati a quelli di comuni fotomoltiplicatori (UV e visibile) o fotodiodi HgCdTe raffreddati con azoto liquido aventi superficie attiva di 1 mm² (IR). Per quanto riguarda la banda passante elettronica si è immaginato di campionare il segnale con un ADC avente risoluzione di 12 bit e velocità di campionamento di 100 MS/s e quindi, per il teorema di Nyquist, B può essere al massimo di 50 MHz. Conseguentemente, il tempo di salita dell'elettronica, calcolato in base alla formula:

$$t_r \approx \frac{0.35}{B}, \quad (31)$$

è di 7 ns, adeguato allo scopo del Lidar Atmosferico. Il valore dell'irradianza ambientale è stato calcolato sulla base di collaudati modelli [56, 57].

Tabella 6 - Valori tipici dei parametri sperimentali per le misure DIAL di inquinanti e vapore acqueo.

Parametro	Valore (UV)	Valore (VIS)	Valore (IR)	Unità
P_0	5×10^5	5×10^6	10^7	W
A	0.07			m ²
ζ	0.2			
ρ	0.1			
c	3×10^8			m s ⁻¹
G	10^6	10^6	1	
e	1.6×10^{-19}			C
B	5×10^7			Hz
i_d	10^{-9}		$3 \times 10^{-12} \times Q \times \sqrt{B}$	A
η	0.15		0.5	
h	6.6×10^{-34}			J s
$\Delta\lambda$	1		10	nm
H	0.5	1.5	0.01	W m ⁻² nm ⁻¹ sr ⁻¹
Ω	8×10^{-5}			sr

Per quanto riguarda i coefficienti di estinzione, ogni caso dovrà essere esaminato separatamente. Ad α' è attribuito un valore standard ("clear atmosphere") [16, 55, 58] e alla concentrazione degli inquinanti e del vapore acqueo è tratta, rispettivamente, dalla tabella 1 e dai modelli citati [56, 57]. Notiamo che, nel caso del benzene, α' è dominato dall'assorbimento dovuto all'ozono.

In realtà, la risoluzione del convertitore analogico digitale (ADC) che campiona il segnale pone un altro limite al rapporto segnale rumore che può essere ottenuto:

In riferimento al limite imposto dalla risoluzione dell'ADC al rapporto segnale rumore, immaginiamo:

- nel caso con bersaglio, di utilizzare tutta la dinamica,
- nel caso senza bersaglio, di utilizzare tutta la dinamica per $R=100$ m.

Conseguentemente, nel primo caso $SNR \sim 4000$, nel secondo $SNR \sim 40$ per $R=1000$ m (ricordando che il segnale è approssimativamente proporzionale all'inverso del quadrato della distanza).

I parametri sperimentali, i coefficienti di estinzione e le corrispondenti sensibilità sono elencati nelle tabelle 6, 7 e 8, rispettivamente.

Tabella 7 - Valori tipici dei coefficienti di estinzione e di retrodiffusione per le misure DIAL di inquinanti e vapore acqueo.

Regione	Molecola	C [ppb]	λ_{ON} [μm]	σ_{ON} [cm^2]	α' [m^{-1}]	α [cm^{-1}]	β [$sr^{-1} cm^{-1}$]
UV	SO ₂	100	0.300	1.1×10^{-18}	5×10^{-4}	7.7×10^{-4}	1.5×10^{-5}
	O ₃	100	0.272	5.9×10^{-18}		2.0×10^{-3}	1.5×10^{-5}
	C ₆ H ₆	10	0.25	1.3×10^{-18}	2.7×10^{-3}	2.7×10^{-3}	1.5×10^{-5}
VIS	NO ₂	100	0.448	0.35×10^{-18}	3×10^{-4}	3.9×10^{-4}	9.0×10^{-6}
IR	H ₂ O	10^7	10.247	3.5×10^{-23}	5×10^{-5}	9.1×10^{-4}	1.5×10^{-6}
	SO ₂	100	9.024	0.25×10^{-18}		1.1×10^{-4}	1.5×10^{-6}
	O ₃	100	9.504	0.51×10^{-18}		1.8×10^{-4}	1.5×10^{-6}
	C ₆ H ₆	10	9.639	0.09×10^{-18}		5.2×10^{-5}	1.5×10^{-6}

Tabella 8 - Valori tipici delle sensibilità per le misure DIAL di inquinanti e vapore acqueo (nel caso con bersaglio la distanza è di 100 m, nel caso senza bersaglio il segnale è stato mediato su 1000 impulsi e la distanza e la risoluzione spaziale sono di 1000 e 100 m, rispettivamente). Le lettere S, B, D e A individuano il fattore che limita il rapporto segnale rumore. S: "shot noise"; B: "background noise"; D: "dark noise"; A: risoluzione dell'ADC. Il rumore termico o "Johnson noise" [17] è trascurabile in tutti i casi.

Regione	Molecola	Con bersaglio		Senza bersaglio	
		Sensibilità [ppb]	Rumore	Sensibilità [ppb]	Rumore
UV	SO ₂	0.7	A	10	S, B e D
	O ₃	0.1	A	30	S, B e D
	C ₆ H ₆	0.6	A	600	B e D
VIS	NO ₂	2	A	7	S, B e D
IR	H ₂ O	20 × 10 ³	A	60 × 10 ³	A
	SO ₂	3	A	9	A
	O ₃	1	A	4	A
	C ₆ H ₆	8	A	30	A

Possiamo concludere quindi che il Lidar Atmosferico dovrebbe raggiungere la sensibilità necessaria a monitorare livelli di inquinanti (SO₂, NO₂, O₃ e C₆H₆) oltre i limiti stabiliti dalla legislazione vigente. In particolare, tre (SO₂, NO₂ e O₃) non richiederebbero bersaglio e due (SO₂, e O₃) potrebbero essere misurati in due regioni spettrali completamente differenti, quali l'UV e l'IR (la misura del benzene nell'UV è fortemente disturbata dall'ozono). Per quanto riguarda il vapore acqueo, la sensibilità tabulata, anche senza bersaglio, è inferiore all'1% della concentrazione media. Naturalmente, i valori di sensibilità calcolati sono molto indicativi e devono essere considerati con molta cautela, sia perché i parametri strumentali potrebbero discostarsi da quelli tabulati, sia perché abbiamo considerato un modello standard di atmosfera.

6. IL LABORATORIO MOBILE DI TELERILEVAMENTO LASER

Come abbiamo ricordato nell'introduzione, il Lidar Atmosferico è parte di un sistema più complesso, il Laboratorio Mobile di Telerilevamento Laser, che include la strumentazione per il monitoraggio – oltre che dell'aria – dell'acqua, della vegetazione e del suolo.

La realizzazione del Laboratorio Mobile di Telerilevamento Laser, finanziata dal fondo speciale per lo sviluppo della ricerca di interesse strategico e in particolare per le ricerche in campo ambientale, prevede l'acquisizione di un mezzo mobile opportuno, l'allestimento interno, il suo completamento con diversa strumentazione e la messa a punto dei sistemi di telerilevamento attivo, operanti in modo remoto con tecnologie avanzate nel campo della caratterizzazione ambientale. Questi sistemi si basano sull'impiego di sorgenti laser, con emissione in finestre ottiche nell'infrarosso e nell'ultravioletto, compatibili con i limiti di sicurezza per l'esposizione oculare, e sono stati sviluppati diffusamente per applicazioni di monitoraggio ambientale sia atmosferico che del territorio, includendo acqua, vegetazione e suolo. Si prevede quindi di installare nel Laboratorio Mobile di Telerilevamento Laser – oltre al Lidar Atmosferico – un Lidar Fluorosensore per l'analisi di acqua e vegetazione e un Sistema LIBS per la rivelazione "in situ" di inquinanti metallici in tracce dispersi nel suolo. Al termine del progetto, sarà possibile effettuare tutte le misure da postazione mobile. Per questa linea di attività, inoltre, si prevede di estendere le capacità del monitoraggio laser con l'elaborazione di immagini satellitari nel visibile. Descriviamo ora brevemente il Lidar Fluorosensore e il Sistema LIBS.

6.1 Lidar Fluorosensore

Il Lidar Fluorosensore, già realizzato nell'ambito del Programma Nazionale di Ricerche in Antartide per il telerilevamento della qualità delle acque del Mare di Ross, ha partecipato a diverse campagne di monitoraggio (Bari [59], Venezia [60] e Cagliari [61]) e trova applicazione anche nell'indagine sulla salute della vegetazione. In particolare, permette la rivelazione di reflui nei processi di produzione agroalimentare o manifatturiero, oppure di oli o componenti naturali delle acque (CDOM e pigmenti fitoplanctonici). In Antartide, il Lidar Fluorosensore ha partecipato alle campagne nell'ambito della XIII spedizione (1997/98) [62], della XV spedizione (1999/2000) [63] e prenderà parte alla prossima campagna oceanografica (2000/01).

Il Lidar Fluorosensore può operare con la tecnica di eccitazione differenziale, sviluppata nel nostro laboratorio negli anni precedenti per applicazioni remote, permettendo di avere informazioni sullo stato di salute dell'apparato fotosintetico delle piante o delle alghe investigate, incrementando le potenzialità di questa tecnica nel rivelare possibili stress biotici e/o abiotici in atto e di determinare le specie algali dominanti nei mari.

6.2 Sistema LIBS

Il Sistema LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy), sviluppato presso il nostro laboratorio [64], permette la rivelazione “in situ” di metalli inquinanti nei terreni e nelle acque, focalizzando la luce laser sul campione da analizzare. La caratterizzazione qualitativa e quantitativa del campione, analizzato praticamente senza alcun pretrattamento, è effettuata con tecniche spettroscopiche ad alta risoluzione e adottando algoritmi di calcolo opportunamente sviluppati. Più precisamente, un impulso laser ad alta potenza è focalizzato sul campione in modo da provocare la formazione sulla superficie di un piccolo volume di plasma. Le emissioni dei singoli atomi sono raccolte da una fibra ottica e analizzate da un monocromatore e da un analizzatore ottico (iCCD). L’assegnazione delle emissioni spettrali corrispondenti ai singoli atomi permette di riconoscere la composizione del campione e, mediante l’utilizzo di emissioni di campioni a concentrazione nota, di risalire alle concentrazioni atomiche del campione. Con questa tecnica è possibile riconoscere la maggior parte degli inquinanti metallici dispersi in tracce.

Il grande vantaggio del Sistema LIBS è che – a parte il semplice compattamento tramite pressa meccanica – non necessita di alcun pretrattamento del campione, come invece è il caso in tecniche spettroscopiche tradizionali: l’ICP (Inductively Coupled Plasma), ad esempio, richiede la mineralizzazione tramite attacco acido con acqua regia.

7. CONCLUSIONI

Il presente documento ha esaminato i principali aspetti legislativi, scientifici e tecnologici relativi alla realizzazione del Lidar Atmosferico. In particolare, abbiamo introdotto l’inquinamento atmosferico, la legislazione italiana in tale materia e le possibilità offerte dal lidar nel campo delle misure meteorologiche (carico di aerosol, velocità del vento e concentrazioni di molecole). Anche gli elementi innovativi e i possibili sviluppi del Lidar Atmosferico sono stati brevemente passati in rassegna. Su questa base, è ora possibile procedere all’individuazione dei requisiti, alla definizione dell’architettura e alla fissazione delle specifiche di tale strumento. In particolare, l’analisi della sensibilità nella misura di inquinanti indica che il Lidar Atmosferico dovrebbe essere in grado di:

- monitorare livelli di inquinanti chiave, quali SO_2 , NO_2 , O_3 e C_6H_6 , oltre i limiti stabiliti dalla legislazione vigente,
- misurare la concentrazione di vapore acqueo con un’accuratezza dell’1%,
- fornire indicazioni sul carico di aerosol,

- determinare, in particolari condizioni, la velocità del vento.

Grazie a queste caratteristiche, unite alla mobilità, il Lidar Atmosferico troverebbe la sua utilizzazione ideale in campagne di misura della qualità dell'aria in aree urbane, rurali e industriali. Inoltre, la misura quasi simultanea di un inquinante (SO_2 , O_3 o C_6H_6) in due regioni spettrali completamente differenti, quali l'UV e l'IR (potenzialità unica a nostra conoscenza), permetterebbe al Lidar Atmosferico di proporsi come strumento di riferimento per la calibrazione dei sistemi di telerilevamento attivo.

Bibliografia

- [1] P. degli Espinosa and E. Tiezzi, *I limiti dell'energia* (Garzanti, Milan, Italy, 1987).
- [2] J. H. Seinfeld, *Atmospheric chemistry and physics of air pollution* (Wiley, New York, NY, 1986).
- [3] J. B. Finlayson-Pitts and J. N. Pitts, Jr., *Atmospheric chemistry* (Wiley, New York, NY, 1986).
- [4] J. Vernier, *L'environnement* (Presses Universitaires de France, Paris, France, 1992).
- [5] P. Melli and P. Zanetti, eds., *Environmental modelling* (Computational Mechanics, Southampton, UK, 1992).
- [6] L. Fiorani, *Introduzione alla meteorologia dello strato limite planetario – Quaderno 26* (CORISTA, Napoli, Italy, 2000).
- [7] A. C. Stern, ed., *Measuring, monitoring and surveillance of air pollution* (Academic, Orlando, FL, 1977).
- [8] L. Fiorani, "Lidar: a powerful tool for atmospheric measurements," *J. Optoelectr. Adv. Mat.* **1** (3), 3-11 (1999).
- [9] J. Hecht, *Laser pioneers* (Academic, Orlando, FL, 1985).
- [10] W. G. Mallard and P. J. Linstrom, eds., *NIST standard reference database number 69* (NIST, Gaithersburg, MD, 2000).
- [11] W. E. K. Middleton and A. F. Spilhaus, *Meteorological instruments* (University of Toronto, Toronto, Canada, 1953).
- [12] G. Fiocco and L. D. Smullin, "Detection of scattering layers in the upper atmosphere by optical radar," *Nature* **199**, 1275-1276 (1963).
- [13] G. G. Goyer and R. Watson, "The laser and its application to meteorology," *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **44**, 564-570 (1963).
- [14] R. T. H. Collis, "Lidar: a new atmospheric probe," *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **92**, 220-230 (1966).

- [15] V. E. Derr and C. G. Little, "A comparison of remote sensing of the clear atmosphere by optical, radio, and acoustic radar techniques," *Appl. Opt.* **9**, 1976-1991 (1970).
- [16] E. D. Hinkley, ed., *Laser monitoring of the atmosphere* (Springer, Heidelberg, Germany, 1976).
- [17] R. M. Measures, *Laser remote sensing* (Krieger, Malabar, FL, 1992).
- [18] S. F. Clifford, J. C. Kaimal, R. J. Latatits and R. G. Strauch, "Ground-based remote profiling in atmospheric studies: an overview," *Proc. IEEE* **82**, 313-355 (1994).
- [19] W. B. Grant, "Lidar for atmospheric and hydrospheric studies," in *Tunable Laser Applications*, F. J. Duarte, ed., (Dekker, New York, NY, 1995) pp. 213-305.
- [20] A. Papayannis, D. Balis, A. Bais, H. van den Bergh, B. Calpini, E. Durieux, L. Fiorani, L. Jaquet, I. Ziomas and C. S. Zerefos, "Role of urban and suburban aerosols on solar UV radiation over Athens, Greece," *Atmos. Environ.* **32**, 2193-2201 (1998).
- [21] J. D. Klett, "Stable analytical inversion solution for processing lidar returns," *Appl. Opt.* **20**, 211-220 (1981).
- [22] F. G. Fernald, "Analysis of atmospheric lidar observations: some comments," *Appl. Opt.* **23**, 652-653 (1984).
- [23] E. V. Browell, S. Ismail and S. T. Shipley, "Ultraviolet DIAL measurements of O₃ profiles in regions of spatially inhomogeneous aerosols," *Appl. Opt.* **24**, 2827-2836 (1985).
- [24] W. Krichbaumer and C. Werner, "Current state-of-the-art of lidar inversion methods for atmospheres of arbitrary optical density," *Appl. Phys. B* **59**, 517-523 (1994).
- [25] L. Elterman, *UV, visible and IR attenuation for altitudes to 50 km – AFCRL-68-0153* (USAF, Bedford, MA, 1968).
- [26] *United States Standard Atmosphere*, (US Government Printing Office, Washington, DC, 1976).
- [27] E. P. Shettle and R. W. Fenn, *Models for the aerosols of the lower atmosphere and the effects of humidity variations on their optical properties – AFGL-TR-79-0214* (USAF, Hanscom AFB, MA, 1979).

- [28] L. Fiorani, M. Armenante, R. Capobianco, N. Spinelli and X. Wang, "Self-aligning lidar for the continuous monitoring of the atmosphere," *Appl. Opt.* **37**, 4758-4764 (1998).
- [29] E. Durieux and L. Fiorani, "Data processing," in *Instrument Development for Atmospheric Research and Monitoring*, J. Bösenberg, D. Brassington and P. C. Simon, eds., (Springer, Heidelberg, Germany, 1997) pp. 89-116.
- [30] D. Müller, U. Wandinger, D. Althausen, I. Mattis and A. Ansmann, "Retrieval of physical particle properties from lidar observations of extinction and backscatter at multiple wavelengths," *Appl. Opt.* **37**, 2260-2263 (1998).
- [31] A. Amodeo, A. Boselli, L. Fiorani, G. Passeggio and R. Veletta, "Innovative telescope for 3-D lidar measurements," *J. Optoelectr. Adv. Mat.* **2** (1), 73-81 (2000).
- [32] E. Durieux, B. Calpini, A. Clappier, L. Fiorani, M. Flamm, L. Jaquet and H. Van den Bergh, "An innovative high repetition rate shot per shot acquisition system and its application to a new kind of tropospheric lidar measurements," in *Excimer Lasers – NATO Asi Series E, Vol. 265*, L. D. Laude, ed., (Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, 1994) pp. 245-267.
- [33] E. W. Eloranta, J. M. King and J. A. Weinman, "The determination of wind speeds in the boundary layer by monostatic lidar," *J. Appl. Meteor.* **14**, 1485-1489 (1975).
- [34] L. Fiorani, B. Calpini, L. Jaquet, H. Van den Bergh and E. Durieux, "A combined determination of wind velocities and ozone concentrations for a first measurement of ozone fluxes with a DIAL instrument during the MEDCAPHOT-TRACE campaign," *Atmos. Environ.* **32**, 2151-2159 (1998).
- [35] I. Kolev, O. Parvanov and B. Kaprielov, "Lidar determination of winds by aerosol inhomogeneities: motion velocity in the planetary boundary layer," *Appl. Opt.* **27**, 2524-2531 (1988).
- [36] J. W. Bilbro, "Atmospheric laser Doppler velocimetry: an overview," *Opt. Eng.* **19**, 533-542 (1980).
- [37] R. Barbini, *Sistemi laser per telerilevamento ambientale – RTI/TIB/85/22* (ENEA, Frascati, Italy, 1985).
- [38] E. Durieux, L. Fiorani, B. Calpini, M. Flamm, L. Jaquet and H. Van den Bergh, "Tropospheric ozone measurements over the Great Athens Area during the

- MEDCAPHOT-TRACE campaign with a new shot-per-shot DIAL instrument. Experimental system and results,” *Atmos. Environ.* **32**, 2141-2150 (1998).
- [39] R. Barbini, F. Colao, A. Palucci, S. Ribezzo, T. Hermsen and S. Orlando, *Atmospheric water vapor measurements with the ENEA lidar station – RT/INN/90/53* (ENEA, Frascati, Italy, 1990).
- [40] R. Barbini, F. Colao, A. Palucci and S. Ribezzo, *Misure di assorbimento gassoso in un impianto lidar a CO₂ – RT/TIB/89/33* (ENEA, Frascati, Italy, 1989).
- [41] L. Fiorani, B. Calpini, L. Jaquet, H. Van den Bergh and E. Durieux, “Correction scheme for experimental biases in differential absorption lidar tropospheric ozone measurements based on the analysis of shot per shot data samples,” *Appl. Opt.* **36**, 6857-6863 (1997).
- [42] R. Velotta, B. Bartoli, R. Capobianco, L. Fiorani and N. Spinelli, “Analysis of the receiver response in lidar measurements,” *Appl. Opt.* **37**, 6999-7007 (1998).
- [43] E. Durieux and L. Fiorani, “Measurement of the lidar signal fluctuation with a shot per shot instrument,” *Appl. Opt.* **37**, 7128-7131 (1998).
- [44] L. Fiorani, *Une Première Mesure Lidar Combinée d’Ozone et de Vent, à partir d’une Instrumentation et d’une Méthodologie Coup par Coup – PhD Thesis 1585* (EPFL, Lausanne, Switzerland, 1996).
- [45] C. B. Carlisle, J. E. van der Laan, L. W. Carr, P. Adam and J.-P. Chironi, “CO₂ laser-based differential absorption lidar system for range-resolved and long-range detection of chemical vapor plumes,” *Appl. Opt.* **34**, 6187-6200 (1995).
- [46] G. Mamon, D. G. Youmans, Z. G. Sztankay and C. E. Mongan, “Pulsed GaAs Laser Terrain Profiler,” *Appl. Opt.* **17**, 205-221 (1978).
- [47] P. Ambrico, A. Amodeo, S. Amoroso, M. Arenante, V. Berardi, A. Borselli, R. Bruzzese, P. Di Girolamo, L. Fiorani, G. Pappalardo, N. Spinelli and R. Velotta, “A multiparametric lidar system spanning from UV to the mid IR,” *Laser und Optoelektronik* **29** (5), 62-69 (1997).
- [48] H. L. Walmsley and S. J. O’Connor, “The accuracy and sensitivity of infrared differential absorption lidar measurements of hydrocarbon emissions from process units,” *Pure Appl. Opt.* **7**, 907-925 (1998).

- [49] R. Barbini and A. Palucci, "ENEA ozone DIAL system," in *Instrument Development for Atmospheric Research and Monitoring*, J. Bösenberg, D. Brassington and P. C. Simon, eds., (Springer, Heidelberg, Germany, 1997) pp. 62-64.
- [50] E. Durieux, B. Calpini, A. Clappier, L. Fiorani, M. Flamm, L. Jaquet and H. Van den Bergh, "EPFL ozone DIAL system," in *Instrument Development for Atmospheric Research and Monitoring*, J. Bösenberg, D. Brassington and P. C. Simon, eds., (Springer, Heidelberg, Germany, 1997) pp. 64-67.
- [51] R. Barbini, F. Colao, G. d'Auria, A. Palucci and S. Ribezzo, "New double wavelength CO₂ laser source for DIAL measurements," in *Lidar Atmospheric Monitoring*, J.-P. Wolf, ed., (SPIE, Bellingham, WA, 1997) pp. 167-172.
- [52] R. Barbini, A. Palucci and S. Ya. Tochitsky, *Study of the CO₂ lidar/DIAL potential for atmospheric gases monitoring in the range 9.2-11.4 μm and 4.6-5.5 μm – RT/INN/96/19* (ENEA, Frascati, Italy, 1996).
- [53] L. Fiorani, "LISA: lidar with integrated spectroscopy and anemometry," (6th Conference on Optics ROMOPTO 2000, Bucharest, Romania, 4-7 September 2000).
- [54] C. M. Gittins, W. G. Lawrence and W. J. Marinelli, "Frequency-agile bandpass filter for direct detection lidar receivers," *Appl. Opt.* **37**, 8327-8335 (1998).
- [55] A. V. Jelalian, *Laser radar systems* (Artech, Boston, MA, 1991).
- [56] F. X. Kneizys, G. P. Anderson, E. P. Shettle, W. O. Gallery, L. W. Abreu, J. E. A. Selby, J. H. Chetwynd and S. A. Clough, *Users Guide to LOWTRAN 7 – AFGL-TR-88-0177* (USAF, Hanscom AFB, MA, 1988).
- [57] R. A. McClatchey, R. W. Fenn, J. E. A. Selby, F. E. Volz and J. S. Garing, *Optical properties of the atmosphere (third edition) – AFCRL-72-0497* (USAF, Bedford, MA, 1968).
- [58] H. Weichel, *Laser beam propagation in the atmosphere* (SPIE, Bellingham, WA, 1990).
- [59] R. Barbini, F. Colao, R. Fantoni, A. Palucci and S. Ribezzo, "Remote sea water quality monitoring by means of a lidar fluorosensor," in *Global Process Monitoring and Remote Sensing of the Ocean and Sea Ice*, D. W. Deering and P. Gudmandsen, eds., (SPIE, Bellingham, WA, 1995) pp. 46-55.

- [60] R. Barbini, F. Colao, R. Fantoni, A. Palucci and S. Ribezzo, "Shipborne laser remote sensing of the Venice lagoon," *Int. J. Remote Sensing* **20**, 2405-2421 (1999).
- [61] R. Barbini, F. Colao, A. Contu, R. Fantoni, R. Habel, A. Palucci, S. Ribezzo, A. Ulzega, I. Usai and R. Zoccali, *Misure di telerilevamento della qualità delle acque e calibrazioni locali durante la campagna marina nel golfo di Cagliari – RT/INN/98/11* (ENEA, Frascati, Italy, 1998).
- [62] R. Barbini, F. Colao, R. Fantoni, A. Palucci and S. Ribezzo, "Local and remote fluorescence techniques for phytoplankton and sea water quality monitoring used during the XIII Italian Antarctic Oceanographic Campaign," (5th International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, San Diego, CA, 5-7 October 1998).
- [63] R. Barbini, F. Colao, R. Fantoni, A. Palucci and S. Ribezzo, "Continuous and remote monitoring of the Southern Ocean and Antarctic Ross Sea during the XIII and XV Italian oceanographic campaign," (3rd Southern Ocean – Joint Global Flux Study Symposium, Brest, France, 9-12 July 2000).
- [64] R. Barbini, F. Colao, R. Fantoni, A. Palucci and F. Capitelli, "Application of laser-induced plasma spectroscopy to the analysis of metals in soils," *Appl. Phys. A* **69** [Suppl.], S175-S178 (1999).

Edito dall' **ENEA**
Unità Comunicazione e Informazione
Lungotevere Grande Ammiraglio Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma
Stampa: Centro Stampa Tecnografico - C. R. Frascati
Indirizzo Internet: www.enea.it

Finito di stampare nel mese di marzo 2001