

# DISPOSITIVO SU AUTOVEICOLO PER LA MISURA APPROSSIMATA DEL PROFILO VERTICALE DI TEMPERATURA ATMOSFERICA NELLO STRATO LIMITE DI FIRENZE

Viene discusso l'uso di un dispositivo automatico di acquisizione dati (temperatura e pressione) a bordo di un veicolo ai fini della misura del profilo verticale di temperatura nello strato limite planetario (PBL). L'uso routinario del dispositivo rappresenta una integrazione della rete di monitoraggio chimico-meteorologico in zone urbane o industriali circondate da colline e spovviste di metodi più sofisticati di sondaggio del PBL. L'impiego del dispositivo descritto a bordo di autobus di linea è di particolare interesse in quanto consente la raccolta di routine ed a bassissimo costo del profilo di temperatura nel PBL, di grande interesse nel campo della modellistica dell'inquinamento atmosferico.

Vengono descritti in dettaglio i limiti di applicazione del metodo ed alcuni risultati sperimentali.

*In the present work, the use of a temperature-pressure data logger on board of a car is discussed. The device permits to determine the approximate, vertical temperature profile in the planetary boundary layer (PBL). The device improves the local meteorological and chemical monitoring system in urban and industrial areas surrounded by hills, whenever better PBL sounding systems are not available. The use of the device on line buses is interesting in the field of pollution-modeling, because it permits to obtain cheap vertical PBL profiles on a routine basis. The experimental results and the limits of the technique are discussed.*

Articles appearing in this journal are indexed in Environmental periodicals bibliography (Usa); Informascience (France); Institute of scientific information (ex Urss).

Il profilo verticale della temperatura è una delle informazioni fondamentali per lo studio, la modellizzazione ed il monitoraggio dell'inquinamento atmosferico. Infatti i fenomeni di inquinamento urbano o industriale avvengono normalmente entro i primi 1000 metri di atmosfera, il cosiddetto strato limite planetario (PBL) [Stull, 1988]. La conoscenza del profilo

verticale di temperatura nello strato limite permette da un lato l'individuazione immediata di eventuali strati di aria stabile, soggetti all'accumulo di inquinanti, e dall'altro consente la validazione di modelli di dispersione degli inquinanti stessi, nei quali il profilo verticale di temperatura assume invariabilmente un ruolo chiave.

L'evoluzione giornaliera dello strato limite, che può essere seguita misurandone in continuo il profilo termico, dipende sia dalla geografia locale che dalle condizioni meteorologiche su scala sinottica. A causa della stretta dipendenza dalla geografia del luogo, non è possibile una modellistica dello strato limite di validità generale, ma tale tecnica va calibrata sito per sito. La conoscenza dell'evoluzione del profilo termico dello strato limite su base statistica (unito all'evoluzione dei principali dati meteorologici, al suolo e su scala sinottica) rappresenta quindi un passo determinante per lo sviluppo e la validazione effettiva dei modelli di distribuzione degli inquinanti.

La misura del profilo di temperatura avviene normalmente mediante sonde PTU (pressione-temperatura-umidità) lanciate su pallone presso aeroporti o stazioni di ricerca. Tuttavia il costo elevato delle sonde (con relative strumentazioni di ricezione ed elaborazione) e la necessaria presenza umana al momento della misura ne rende inappetibile l'utilizzo di routine in ambiente urbano o industriale, tanto più che nel caso del PBL risultano necessari lanci con cadenza almeno oraria. L'uso di palloni frenati riduce il costo dei materiali, ma mantiene la necessità della presenza umana durante la misura. Alcuni strumenti (radiometri a microonde, Radio Acoustic Sounders (RASS,

ecc.) sono stati sviluppati per fornire in modo automatico profili di temperatura attendibili (entro circa  $\pm 5$  °C) fino a circa 1000 metri di quota. Tuttavia tali apparecchiature sono ancora a livello sperimentale o estremamente costose. Per questi motivi risulta particolarmente interessante lo sviluppo di sistemi di misura alternativi del profilo di temperatura, meno dispendiosi, anche se di minore precisione.

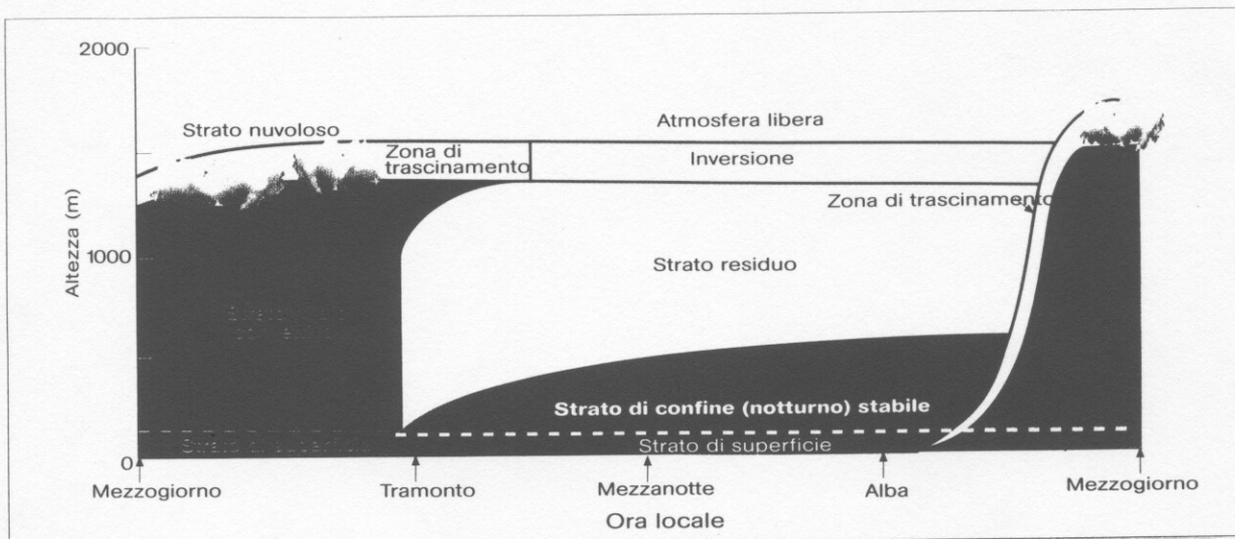
Nel presente lavoro viene proposto un dispositivo elettronico di basso costo (inferiore al milione) che consente la misura approssimata del profilo verticale di temperatura in aree urbane o industriali circondate da colline (400-500 metri di quota) dotate di viabilità ordinaria. Il metodo consiste nella misura della temperatura all'esterno di un veicolo (esempio: autobus di linea) che percorra una tratta fissa tra il fondovalle e le colline, seguendo un percorso che si affaccia continuamente sulla vallata in studio. La possibilità di installare tale dispositivo su qualunque mezzo dotato di batteria e contattometri ne consente l'uso anche su autobus di linea, permettendo un uso di routine del dispositivo.

## L'evoluzione giornaliera dello strato limite planetario

In condizioni di alta pressione, lo strato limite planetario (PBL) presenta una struttura ben definita con una tipica evoluzione giornaliera. A livello generale si possono individuare tre strati fondamentali, la cui evoluzione è schematizzata in figura 1.

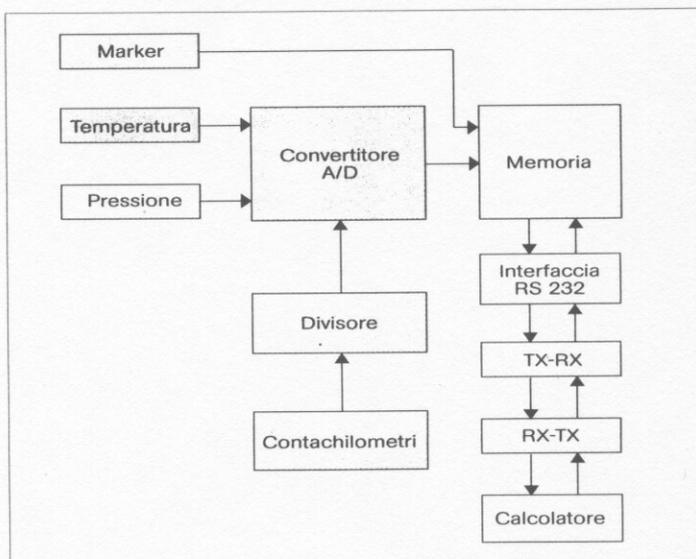
1) Lo strato rimescolato (Mixed Layer, ML), che si forma durante la mattinata a causa della turbolenza indotta dall'irraggiamento solare.

2) Lo strato residuo (Residual Layer, RL), che si forma nella



**FIGURA 1**  
Evoluzione giornaliera dello strato limite tratta da [Stull, 1988].

**FIGURA 2**  
Schema a blocchi dell'apparecchio: la parte in basso a destra contenuta nel tratteggio è installata nella stazione fissa (esempio capolinea autobus). Il resto è montato sul veicolo.

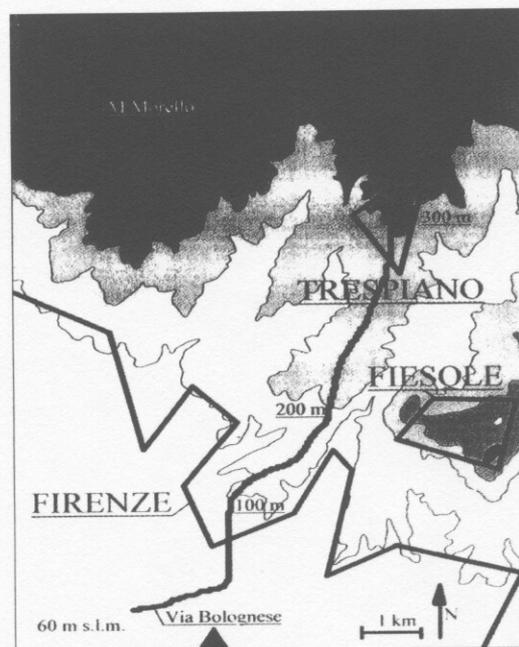


dissipazione dello strato rimescolato nelle ore serali e notturne. Lo si osserva in tarda serata e di notte, quando i moti turbolenti che generano lo strato rimescolato sono inibiti.

3) Lo strato stabile notturno (Stable Boundary Layer, SBL), il cui confine con lo strato residuo non è netto. Questo strato si genera durante la notte col raffreddamento dell'aria prossima al suolo. In tale strato, i moti turbolenti sono pressoché assenti.

Questo modello del PBL rappresenta una semplificazione della realtà: spesso gli strati che possono venire individuati nel PBL sono più numerosi e di evoluzione più complessa. È tuttavia sempre possibile seguire l'evoluzione dei diversi strati seguendo l'evoluzione del profilo verticale della temperatura dell'aria. In tale profilo gli strati

di aria stabile o neutrale vengono immediatamente identificati in base al gradiente verticale di temperatura: un gradiente di circa  $-9,8 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$  caratterizza teoricamente aria secca instabile o neutrale, mentre gradienti via via più positivi di  $-9,8 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$  indicano la presenza di strati di aria stabile (e/o molto umida). Lo strato rimescolato (ML) e lo strato residuo (RL), specialmente in condizioni di scarsa umidità, presentano un gradiente prossimo ai  $-9,8 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ , mentre nello strato stabile notturno il gradiente di temperatura diviene facilmente positivo. In condizioni di scarso irraggiamento solare e calma di vento, strati stabili prossimi al suolo (SBL) possono perdurare anche per intere giornate. In tali condizioni, che per Firenze corrispondono al perdurare di



“inversione termica” (strato di aria stabile) nei primi 50-300 metri del PBL, si verifica un accumulo di inquinanti che porta agli episodi acuti di inquinamento ben noti nel periodo invernale. La misura del profilo di temperatura, assieme alla conoscenza delle grandezze meteorologiche e dell'irraggiamento solare al suolo consentono di stimare tramite modello la durata prevista degli episodi acuti e, a livello decisionale, permette di ricorrere agli opportuni provvedimenti di limitazione sulle sorgenti inquinanti.

#### Il metodo sperimentale adottato

La misura della temperatura all'esterno di un veicolo che per-

**FIGURA 3**  
Mappa schematica dell'area di studio. Le curve altimetriche sono ogni 100 metri. Sono indicate con triangoli le due stazioni meteorologiche di riferimento. La S.S. 25 della Futa (Via Bolognese) è indicata in nero.

corra un percorso in pendenza consente di misurare in prima approssimazione l'andamento della temperatura dell'aria con la quota, se si riporta la temperatura misurata con la quota di ciascuna stazione di misura. Purtroppo la misura condotta in questo modo può differire in modo sostanziale da quanto mi-

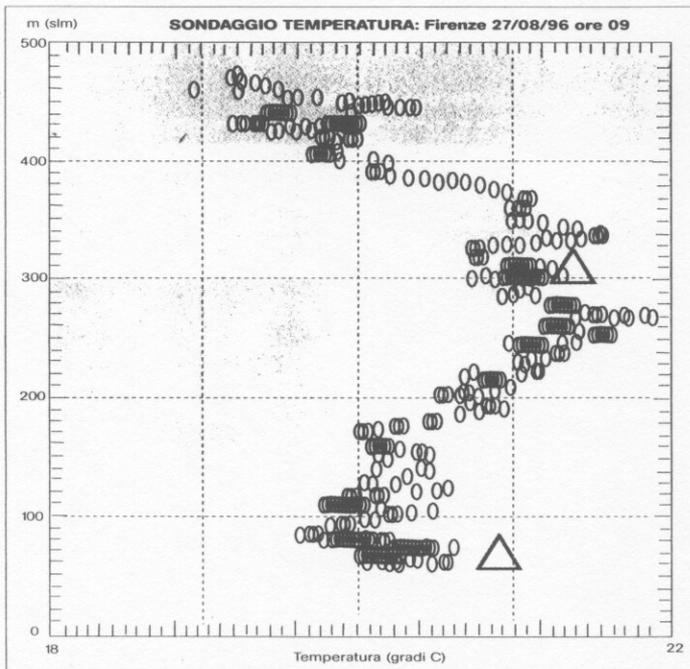
surato da un pallone sonda sulla verticale del sito di interesse. Numerosi fattori (brezze, evapotraspirazione della vegetazione, riscaldamento domestico, isola termica urbana, ecc.) rendono diversi i due profili. In condizioni di limitata ventilazione, la misura condotta su un veicolo (quindi a pochi metri dal suolo) rischia di divenire un transetto dello strato superficiale d'aria (surface layer, SL), la cui temperatura è fortemente influenzata dalla topografia. Inoltre va considerato, che la temperatura registrata a veicolo quasi fermo differisce dalla misura in movimento in quanto il termometro si riscalda a causa del sole o del calore irraggiato da veicoli ed edifici. Nonostante questi problemi di fondo, la misura del profilo verticale di temperatura a bordo di un veicolo consente di ottenere un andamento verticale della temperatura, la cui validità ai fini della problematica dell'inquinamento atmosferico non può essere giudicata a priori ma solo in ba-

zione" di un profilo verticale di temperatura, la precedente discussione rispetto all'influenza della topografia sul "profilo" di temperatura ottenuto. Ne consegue che il profilo termico misurato da un veicolo rappresenta comunque un miglioramento dell'attuale sistema di misura del profilo di temperatura. C'è poi da notare che, dal punto di vista del monitoraggio dell'inquinamento, l'andamento verticale pur impreciso della temperatura ottenuto di routine risulta più appetibile della misura scientificamente impeccabile ma necessariamente saltuaria del vero profilo con pallone meteorologico.

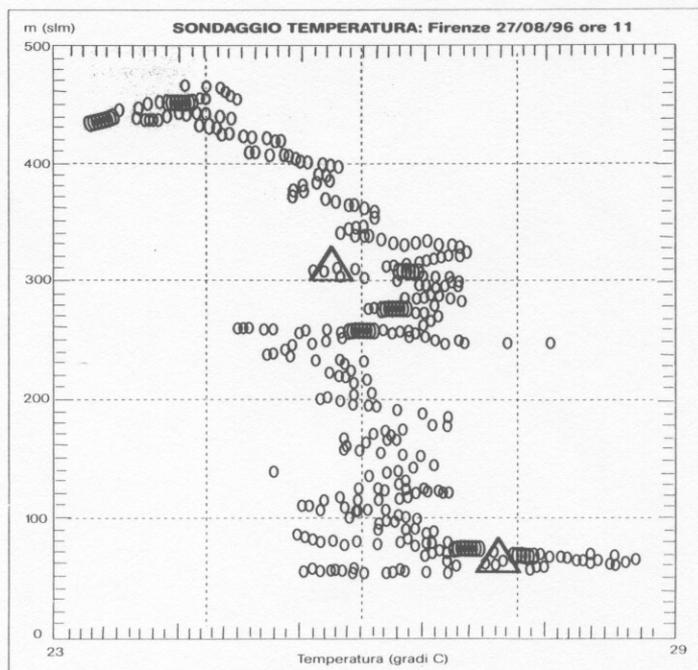
Il dispositivo qui presentato consente la misura della temperatura a bordo di un qualunque veicolo, a costo di esercizio pressoché nullo.

La misura può avvenire ad ogni corsa di un veicolo di linea, il che permette di ottenere profili di temperatura semiorari o orari a partire dalla primissima mattinata fino alla mezzanotte. L'unico limite di applicabilità del metodo è dato dalla topografia del territorio, che deve necessariamente vedere l'area "inquinata" nel fondovalle ed

**FIGURA 4**  
*Profilo ottenuto il 27 agosto 1996 alle ore 9. Si nota l'inversione termica fino a circa 300 metri.*



surato da un pallone sonda sulla verticale del sito di interesse. Numerosi fattori (brezze, evapotraspirazione della vegetazione, riscaldamento domestico, isola termica urbana, ecc.) rendono diversi i due profili. In condizioni di limitata ventilazione, la misura condotta su un veicolo (quindi a pochi metri dal suolo) rischia di divenire un transetto dello strato superficiale d'aria (surface layer, SL), la cui temperatura è fortemente influenzata dalla topografia. Inoltre va considerato, che la temperatura registrata a veicolo quasi fermo differisce dalla misura in movimento in quanto il termometro si riscalda a causa del sole o del calore irraggiato da veicoli ed edifici. Nonostante questi problemi di fondo, la misura del profilo verticale di temperatura a bordo di un veicolo consente di ottenere un andamento verticale della temperatura, la cui validità ai fini della problematica dell'inquinamento atmosferico non può essere giudicata a priori ma solo in ba-



**FIGURA 5**  
*Profilo ottenuto il 27 agosto 1996 alle ore 11. Lo strato rimescolato ha raggiunto i 250 metri di quota. Lo stretto picco negativo a 450 metri di quota è dovuto allo attraversamento della sola zona boscata di tutto il percorso.*

su Monte Morello, a ben 10 km di distanza dalla città. Anche per tali stazioni "standard" vale, al momento in cui i dati relativi vengono utilizzati nella "crea-

una opportuna viabilità in collina. Di conseguenza il dispositivo è applicabile solo in situazioni geografiche particolari, come nel caso di Firenze.

### L'apparecchiatura

Il dispositivo è costituito da un "data logger" (figura 2) che acquisisce i dati di pressione, temperatura ed umidità forniti da

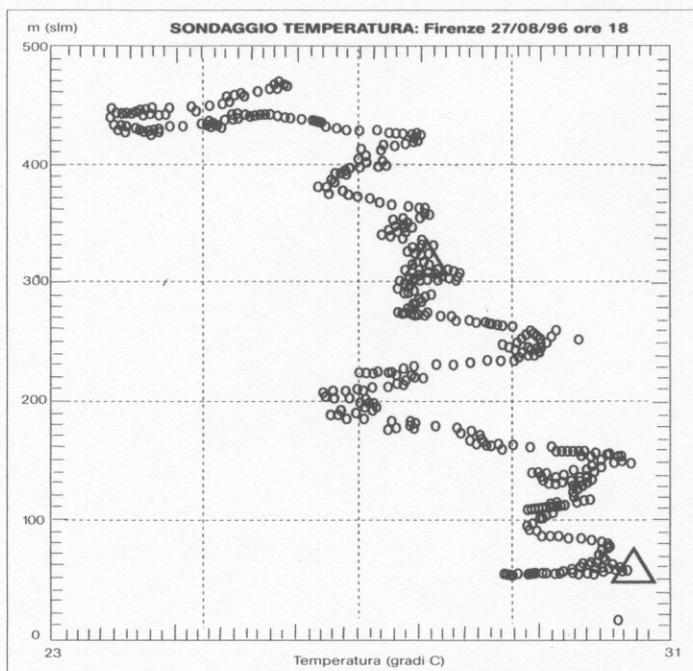
logici del contachilometri al data logger, previo condizionamento. Gli impulsi forniti dal sensore Hall (tipicamente uno o due per ogni rotazione della

del veicolo sono più frequenti. La conversione dei dati analogici avviene mediante convertitore A-D a 12 bit. Il risultato digitalizzato viene raccolto in memoria. La frequenza di campionamento dipende dalla lunghezza e dalla pendenza del percorso, oltre che dalla memoria disponibile nel data-logger. Gli autobus della linea 25 ATAF che percorrono il tracciato (Firenze-Pratolino) prescelto nel presente studio percorrono un totale di 270 km/giorno, il che corrisponde ad un accumulo di dati di circa 35 kbyte/giorno acquisendo un "punto" ogni 50 metri di strada percorsa.

Un dispositivo di "marker", azionato manualmente, consente di "marcare" mediante un pulsante punti particolari del percorso (per esempio località di riferimento) per il test del dispositivo. È in questo modo possibile ritrovare eventuali punti "marcati" sul profilo P-T, il che consente l'individuazione sul profilo di punti di riferi-

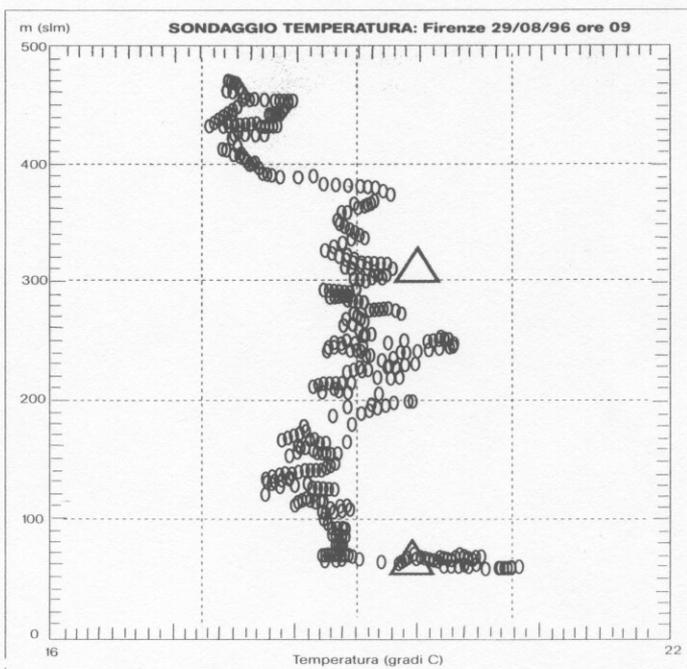
**FIGURA 6**

Profilo ottenuto il 27 agosto 1996 alle ore 18. Inizio del raffreddamento serale con conseguente riduzione della turbolenza. Lo stretto picco negativo a 450 metri di quota è dovuto allo attraversamento della sola zona boscata di tutto il percorso.



tre sensori montati sul veicolo [Del Guasta, 1996]. Il sensore di temperatura viene installato su un'asta esterna di 0,5-1 metro di lunghezza, localizzata lontano dalle fonti di calore del veicolo e sopravvento al veicolo stesso durante il moto. Il sensore viene protetto dalla luce solare diretta, ed installato con un montaggio a bassa inerzia termica: una costante di tempo termica del sensore di circa 3 secondi in aria ventilata risulta appropriata. La precisione del misuratore di temperatura, basato su un sensore Analog Devices AD590, è di circa  $\pm 0,2$  °C tra 0 e 40 °C. Il sensore di umidità relativa è di tipo resistivo (Elmwood Sensors).

Il sensore di pressione barometrica risiede nel contenitore del data-logger, all'interno del veicolo. La cadenza di acquisizione dei dati è fornita da un sensore ad effetto Hall installato nel contachilometri del veicolo. L'installazione del sensore prevede lo smontaggio del contachilometri meccanico ed il montaggio del sensore presso i magneti permanenti. Nel caso di contachilometri elettronici, il sensore Hall è superfluo, essendo possibile inviare gli impulsi



**FIGURA 7**

Profilo ottenuto il 29 agosto 1996 alle ore 9. Si nota una debole inversione termica fino a circa 400 metri.

ruota) vengono divisi via hardware o software da un divisore programmabile in modo da acquisire un dato P-T ogni n metri percorsi dal veicolo. In questo modo l'acquisizione non avviene mai a veicolo fermo, fatto che consente di ridurre la mole di dati acquisiti in ambiente urbano, dove le soste

mento noti. Tutto il dispositivo di acquisizione è alimentato dalla batteria del veicolo (12-24 V). Il consumo complessivo è di circa 1 W. L'ingombro è quello di un cubo di 15 centimetri di lato.

Alla fine di una serie di acquisizioni, il dispositivo viene collegato alla porta seriale di un

personal computer per lo scarico dei dati. Il computer è quindi in grado di memorizzare ed eventualmente inviare in rete i profili di temperatura. Tutte queste operazioni, che richiedono tempi dell'ordine del minuto, possono venire automaticamente eseguite al capolinea o deposito dell'autobus (o al punto di rifornimento), dove il veicolo sosta necessariamente. Il collegamento tra computer e dispositivo di sondaggio può avvenire, anziché via cavo, mediante una coppia di radio-modem di bassissima potenza, l'uno installato sul veicolo e l'altro al capolinea, a terra. In questo modo, nessun tipo di intervento umano è richiesto nella conduzione del dispositivo.

L'informazione di pressione acquisita dal dispositivo viene utilizzata in senso altimetrico: essendo note a priori sia la quota di inizio della corsa (esempio capolinea autobus) che la quota massima raggiunta dal veicolo (ottenibile dalla cartografia usuale), è possibile ricondurre la misura della pressione ad una misura di quota con una precisione di circa 5 metri, evitando lo spinoso problema della calibrazione diretta tra pressione e

ne) consente la calibrazione automatica della quota.

In situazioni particolarmente difficili è possibile ottenere due o più quote di calibrazione mediante il segnale di marker, azionato manualmente o automaticamente al passaggio del veicolo in località prestabilite di

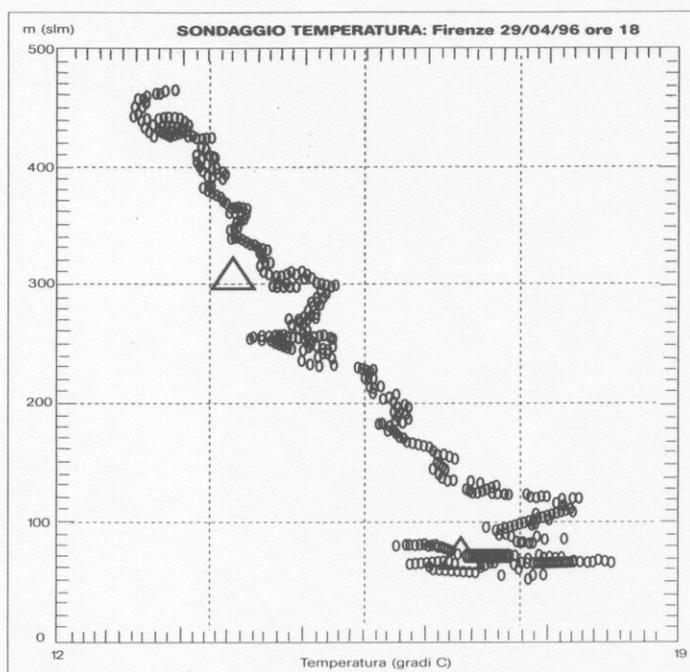
quota di un generico punto intermedio tra i due, avente pressione  $P$  è data da:

$$Z = (P-b)/a$$

con:

$$b = (P_1 - P_1 * Z_2 / Z_1) / (1 - Z_2 / Z_1)$$

$$a = (P_1 - b) / Z_1$$

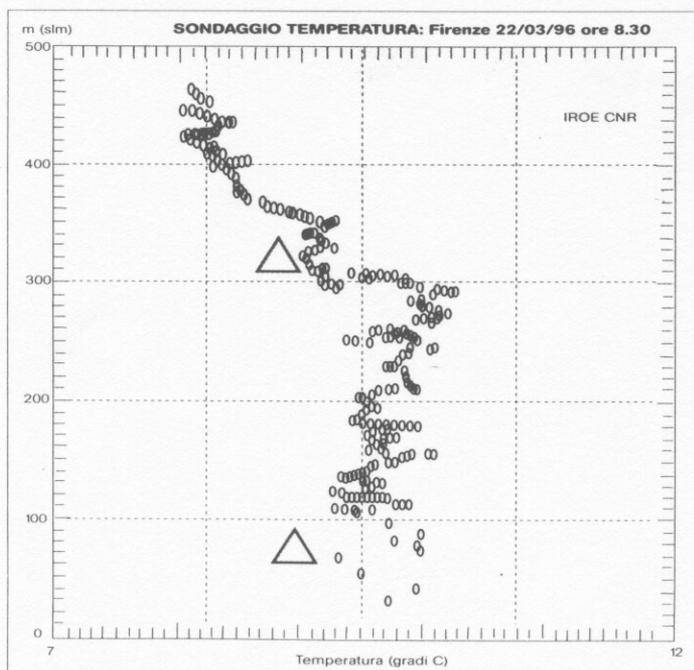


**FIGURA 8**

Profilo ottenuto il 29 aprile 1996 alle ore 18: atmosfera pseudoadiabatica. Lo stretto picco negativo a 450 metri di quota è dovuto allo attraversamento della sola zona boscata di tutto il percorso.

**FIGURA 9**

Profilo ottenuto il 22 marzo 1996 alle ore 8,30. Si nota l'inversione termica con gradiente +3 °C/km fino a circa 300 metri. I dati meteo vedono invece una atmosfera quasi isoterma con gradiente -1 °C/km.



quota. La conoscenza di almeno due quote note (rintracciabili automaticamente dal computer come punti di massima o minima pressio-

nota. In ogni caso, dati due punti del percorso aventi quota nota  $Z_1$  e  $Z_2$ , se il dispositivo ivi registra due pressioni  $P_1$  e  $P_2$  (in unità arbitrarie), la

Questa rinormalizzazione pressione-quota viene eseguita automaticamente in fase di lettura dei dati acquisiti, e consente la visualizzazione immediata del diagramma quota assoluta-temperatura. Grazie alla rinormalizzazione, la precisione della misura di quota risulta dell'ordine di qualche metro.

### Situazione geografica di Firenze

Firenze è situata sul fondo di un bacino alluvionale circondato da colline di quota massima 900 metri (Monte Morello). La viabilità ordinaria è tuttavia presente solo fino a 500 metri di quota. La Via Bolognese (S.S. 25, della Futa) è la strada più adatta per l'impiego del dispositivo qui descritto in quanto sale con pendenza relativamente costante dai 60 metri slm (città) fino a circa 500 metri di quota (loc. Pratolino), rimanendo affacciata sul bacino termico di Firenze, salvo brevi tratti. In figura 3 è riportata una

mappa del territorio con indicate le curve altimetriche (ogni 100 m), la S.S. 25 Via Bolognese usata per il test dell'apparecchio, e le due stazioni meteorologiche di M. Morello e Osservatorio Ximeniano (triangoli). La Via Bolognese presenta solo raramente ingorghi di traffico nella zona extraurbana, ed inoltre attraversa zone aperte e non boscate (salvo negli ultimi due chilometri, nei pressi della località Pratolino). Queste ultime due caratteristiche assicurano un limitato effetto sul profilo di temperatura da parte della vegetazione e del traffico. La Via Bolognese è inoltre percorsa da numerose linee di autobus che congiungono Firenze col Mugello. In particolare, la linea ATAF n. 25 percorre il tragitto Firenze-Pratolino con continuità dalle 6,30 del mattino alle 23,00, consentendo in principio un sondaggio pressoché continuo della temperatura.

Per quanto riguarda la situazione dello strato limite su Firenze, c'è da notare che la locale conformazione geografica rende frequente la presenza di importanti stratificazioni di aria stabile fino ed in genere non oltre i 300 metri di quota. La presenza di inversioni termiche di rilievo per il fenomeno dell'inquinamento urbano di Firenze (SBL) è in genere limitata ai 300 metri circa. Questa situazione è facilmente verificabile visivamente raggiungendo Firenze la mattina dalle colline, e stimando l'altezza della "cappa" di smog e di foschia in base a qualche riferimento geografico. In questa situazione, la raccolta di dati di temperatura fino a 500 metri di quota è sufficiente per ottenere un profilo completo di quella parte di PBL di maggiore interesse nella problematica dell'inquinamento urbano su Firenze. È da notare l'assenza di sondaggi PTU presso Firenze.

### Risultati sperimentali

A titolo di esempio, vengono qui riportati alcuni sondaggi ottenuti con l'apparato descritto, installato sulla vettura dell'autore ed utilizzato sulla Via Bolognese tra Firenze e Pratolino (figura 3). Su ciascun sondaggio sono riportate con triangoli le temperature medie orarie regi-

strate per stessa ora nelle due stazioni meteorologiche di M. Morello (320 m slm) e Osservatorio Ximeniano (centro città). I dati di tali stazioni meteorologiche, congiuntamente a quelli relativi a circa 12 centraline chimiche dislocate in ambito urbano, sono attualmente utilizzati dall'Agenzia Regionale Per l'Ambiente Toscana (A.R.P.A.T.) per il monitoraggio e la previsione dell'inquinamento urbano su Firenze [AA.VV., 1995].

Nelle figure 4-6 sono riportati tre sondaggi relativi al giorno 29/8/1996, caratterizzato da calma di vento. Le situazioni di aria calma sono le più critiche per la prova dell'apparecchio descritto, in quanto in tali casi la temperatura in prossimità del suolo è fortemente influenzata dalla topografia. I sondaggi sono relativi alle ore 9, 11 e 18. Nel sondaggio delle ore 9 (figura 4) si nota una certa dispersione dei dati a circa 60 metri di quota slm (quota della città), dovuto alle soste continue del veicolo nel traffico cittadino, e ad eventuali "isole" di diversa temperatura (canyons urbani, ecc.). Fino ai 300 metri di quota si nota uno strato di aria decisamente stabile (SBL), caratterizzata da temperatura in crescita con la quota. Sopra i 300 metri, la temperatura riprende a scendere, indicando il passaggio allo strato residuo (RL) o all'atmosfera libera. Nel sondaggio delle ore 11 (figura 5) la situazione termica sta evolvendosi verso la formazione di uno strato rimescolato (ML) di spessore crescente: tra 100 e 250 metri slm l'atmosfera è pressoché neutrale, con un gradiente termico di circa  $-7$  °C/km. Una inversione termica a circa 300 metri di quota divide lo strato rimescolato sottostante dall'atmosfera libera, che mostra un gradiente di circa  $-8$  °C/km. Anche in questo sondaggio si nota sia la dispersione dei dati dovuta al traffico urbano (60 m di quota), che diverse strutture fini a temperatura più elevata dovute, oltre alle soste del veicolo, alla presenza di piccole "isole termiche" lungo il percorso (zone più o meno assolate, vallette, ecc.). Tuttavia, tali dettagli termici si estendo-

no per non più di alcune decine di metri in quota ciascuna nel profilo finale, e quindi la struttura grossolana del profilo termico può ritenersi poco affetta dal fenomeno. Nel sondaggio delle ore 18 (figura 6), l'atmosfera è grossolanamente pseudoadiabatica, con un gradiente di  $-9$  °C/km. Nel tardo pomeriggio si assiste tuttavia alla progressiva diminuzione dei moti turbolenti, che porta alla lenta dissoluzione dello strato rimescolato. Tale fenomeno, in condizioni di calma di vento, presenta velocità diversa nei diversi bacini termici (vallate, ecc.) sui quali il veicolo si affaccia durante la marcia, fatto che porta alle strutture fini visibili sul profilo (un fenomeno analogo si verifica anche durante il riscaldamento mattutino). Una volta fissato il percorso di routine del veicolo, è tuttavia possibile eliminare in parte il problema togliendo dal profilo termico i tratti che corrispondono a bacini termici diversi da quello di interesse, tratti identificabili su base statistica e cartografica.

In figura 7 è riportato un profilo del giorno 29/8 (ore 9). Anche in questo caso si nota uno strato stabile fino a 350 metri di quota, ma con una inversione meno marcata rispetto a figura 4: l'atmosfera è pressoché isoterma in tale strato. Strati stabili fino a 100-300 metri di quota sono comunissimi a Firenze nella prima mattinata. In figura 8 è invece riportato un profilo relativo a condizioni di intensa convezione. In casi come questo, spesso poco interessanti per l'inquinamento al suolo, il profilo di temperatura misurato dall'apparato è necessariamente vicino al profilo reale, con un gradiente termico prossimo ai  $-9,8$  °C/km caratteristici dell'aria secca. In tutti i profili riportati nelle figure 4-8 (compatibilmente con la distanza di molti chilometri tra centraline meteorologiche e percorso del data-logger), si nota un accordo puntiforme tra temperatura alle centraline e sondaggio alla stessa quota entro  $\pm 0,5$  °C.

In figura 9 è riportato il profilo relativo al 22/3/96 (ore 9). Si nota come le due stazioni fisse mostrino una atmosfera apparentemente quasi isoterma ( $-1$

°C/km), mentre il sondaggio rivela una inversione marcata di temperatura ( $+3$  °C/km) tra la città e 300 metri di quota. La presenza di inversioni termiche a quote inferiori ai 320 metri (quota della stazione meteo di M. Morello) può infatti facilmente sfuggire in base ai dati meteo ufficiali, mentre risulta evidente nei sondaggi ottenuti a bordo del veicolo.

### Conclusioni

La semplice tecnica di misura del profilo di temperatura qui esposta presenta oggettivi limiti di applicabilità: è utilizzabile esclusivamente in zone circondate da colline percorse da viabilità ordinaria (linee di autobus) e può risentire fortemente della topografia del percorso utilizzato. Tuttavia, previa scelta del percorso ottimale, consente di implementare a bassissimo costo la rete meteorologica ufficiale al fine dell'individuazione di strati di aria stabile, della misura del loro spessore e dell'entità dell'inversione termica associata, per lo sviluppo ed il test della modellistica dell'inquinamento atmosferico urbano. Lo scarto tra la temperatura ottenuta col metodo proposto e quella determinata dalle due stazioni meteorologiche a terra utilizzate dall'A.R.P.A.T. per il monitoraggio della struttura termica del PBL è risultato contenuto entro  $\pm 5$  °C durante la sperimentazione del dispositivo, rendendo incoraggiante l'applicazione del medesimo su autobus di linea, a scopo sperimentale. ■

## BIBLIOGRAFIA

Del Guasta M.: *Dispositivo su autoveicolo per la misura di routine del profilo verticale di temperatura nello strato limite di Firenze - Report tecnico IROE TRI/ATM/18.96*, pp. 41, 1996.

Stull R.B.: *An introduction to boundary layer meteorology* - Kluwer Academic Publishers, pp. 665, 1988.

AA.VV.: *Rapporto annuale sulla qualità dell'aria 1994-1995*, Luglio 1995, a cura di Dipartimento ambiente Area 2, Ed. Giunta regionale Toscana, pp. 158.

Zannetti P.: *Air pollution modeling - Computational Mechanics Publications*, Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 444, 1990.