

XIV Convegno Internazionale di Automazione e Strumentazione

Milano, 23 - 24 novembre 1976

AUTOMAZIONE E UTILIZZAZIONE DELLE RISORSE

relazione presentata al convegno



FAST Federazione delle Associazioni Scientifiche
e Tecniche - Piazzale R. Morandi, 2 - Milano

ANALISI DELLE SERIE TEMPORALI DI MISURE DELLA QUALITA' DELL'ARIA IN VENEZIA: UNO STUDIO PRELIMINARE

PAOLO ZANNETTI
Centro Scientifico IBM, Venezia

SOMMARIO

Il problema dello studio dell'inquinamento atmosferico in Venezia è stato finora affrontato dal punto di vista strettamente deterministico, attraverso un'analisi di tipo meteorologico seguita dall'applicazione di due tipi di modelli: la versione climatologica del modello gaussiano, per la simulazione del campo di concentrazione (medie a lungo termine), ed un modello di diffusione ad integrazione numerica, per la simulazione delle medie a breve termine.

Nel presente lavoro viene presentata innanzi tutto una panoramica sulle diverse applicazioni dei modelli statistici a problemi di inquinamento atmosferico; vengono quindi illustrati i primi risultati ottenuti nell'area Veneziana attraverso un'analisi puramente statistica del fenomeno. Tale indagine preliminare ha permesso di evidenziare quelle caratteristiche di trend e di ciclicità presenti nelle misure di SO_2 e le correlazioni esistenti tra le diverse stazioni di misura. E' stata inoltre applicata la metodologia proposta da Box e Jenkins per l'identificazione di modelli ARIMA e la stima dei parametri che li caratterizzano. Tali modelli possono essere utilmente applicati per la previsione dei valori medi di SO_2 e la stima dell'attendibilità di tale previsione.

Le due reti automatiche di misura dell' SO_2 presenti in Venezia (Istituto Superiore di Sanità ed Ente Zona Industriale di Porto Marghera) hanno fornito i dati oggetto della presente analisi. Le stazioni di tali reti sono state esaminate secondo la metodologia accennata e si sono così potute evidenziare le analogie e le diversità riscontrate nell'area di misura, nonché la variabilità stagionale dei parametri statistici stimati.

Si accenna infine agli sviluppi futuri nell'applicazione di tali metodologie con particolare riguardo alla previsione, con qualche ora di anticipo, dei livelli medi orari di SO_2 nell'area Veneziana. Tale realizzazione fornirebbe uno strumento efficace per la segnalazione in tempo reale di situazioni di pre-allarme: una conseguente opportuna diminuzione delle emissioni industriali potrebbe evitare quindi, in numerosi casi, il superamento di prefissati livelli di soglia.

INTRODUZIONE

Nell'affrontare lo studio dell'inquinamento atmosferico nell'area Venezia - Mestre - Marghera ci si è rivolti finora più all'aspetto deterministico che all'aspetto puramente statistico del fenomeno. Tale linea di indagine trova evidente spiegazione nel fatto che la dinamica dell'inquinamento atmosferico è regolata da una precisa relazione di causa-effetto (quantità di inquinante emessa da una sorgente - concentrazione immessa nell'ambiente). In questa ottica il fenomeno fisico della dispersione di un inquinante trova una completa ed esauriente trattazione matematica con l'equazione di diffusione ⁽¹⁾, e cioè un'equazione differenziale alle derivate parziali, che risulta però difficilmente integrabile per via analitica se non in casi estremamente semplici e lontani quindi dalla complessa realtà del fenomeno. Per questa ragione la fisica del trasporto e della diffusione di un inquinante gassoso è stata trattata seguendo due direttive. La prima di queste consiste nel descrivere il fenomeno con una equazione semi-empirica di tipo esplicito, che esprime cioè la concentrazione prodotta da una sorgente direttamente come funzione dei parametri meteorologici, geografici, e della quantità di inquinante emessa; tale formulazione è stata applicata con successo ⁽²⁾ ⁽³⁾ nell'area Veneziana per la simulazione delle medie mensili, stagionali ed annuali del campo di concentrazione di SO₂. Il secondo tipo di indagine consiste nell'integrazione, per via numerica, della equazione di diffusione; tale studio era stato suggerito dall'esigenza di operare con uno strumento matematico che non avesse le limitazioni tipiche delle formule semi-empiriche e potesse quindi simulare il fenomeno in maniera più rigorosa, tenendo conto della variabilità spazio-temporale delle quantità di inquinante emesse e dei parametri meteorologici. Tale indagine, tuttora in fase di completamento, ha permesso l'analisi ed il confronto di diversi schemi di integrazione numerica ⁽⁴⁾; si è operata inoltre una applicazione del modello nell'area Veneziana che ha prodotto una serie di buone simulazioni delle concentrazioni medie giornaliere di SO₂ ⁽⁵⁾. La complessità di tale formulazione, comunque, ne rende difficile, almeno per il momento, l'operatività pratica nel senso del controllo in tempo reale dell'inquinamento atmosferico; per questa ragione l'utilità di tali studi va ricercata, oltre che nell'approfondimento matematico delle complesse tecniche di integrazione numerica, specialmente nel campo della pianificazione del territorio; un modello tridimensionale di questo tipo infatti, una volta che sia ben tarato e nota che sia la variabilità spazio-temporale dei parametri meteorologici, permette di analizzare la risposta del sistema (modifiche del campo di concentrazione) al variare della meteorologia, della geografia locale, della distribuzione e della portata delle sorgenti inquinanti. La sofisticatezza di tale approccio al problema è giustificata quindi quando siano ben chiari gli obiettivi che si vogliono raggiungere e si disponga dei dati necessari per una realistica simulazione del fenomeno fisico.

MODELLI STATISTICI

Il considerare la concentrazione di un inquinante in un dato punto come una variabile stocastica produce inizialmente un notevole vantaggio, e cioè quello di poter dimenticare, almeno in una prima fase, tutti i problemi connessi alla emissione ed alla dispersione dell'inquinante, e di considerare ogni serie di misure di concentrazione come una delle infinite possibili realizzazioni di un processo stocastico, cioè un processo che si sviluppa nel tempo seguendo delle leggi statistiche ⁽⁶⁾. Una analisi di questo tipo è senz'altro una analisi limitata del fenomeno, ma, nonostante questo, può produrre risultati estremamente interessanti, specie per quanto riguarda l'aspetto previsionale del problema.

L'approccio statistico per lo studio delle serie di misure che interessano il fenomeno dell'inquinamento atmosferico si è sviluppato seguendo principalmente quattro vie:

- A) studio del tipo di distribuzione delle misure di qualità dell'aria
- B) analisi spettrale delle serie di dati meteorologici e di concentrazione
- C) applicazione della regressione multipla
- D) uso della metodologia Box-Jenkins

Per quanto riguarda il punto A) si può affermare che gli studi di Larsen (7) possono essere formulati nei termini descritti dalle seguenti due leggi:

- 1) le concentrazioni misurate sono approssimativamente distribuite con una distribuzione log-normale per tutti gli inquinanti in tutte le regioni per tutti gli intervalli di media
- 2) il logaritmo della concentrazione mediana di ogni distribuzione è una funzione lineare del logaritmo dell'intervallo temporale di media.

La log-normalità delle misure di concentrazione nell'atmosfera è stata confermata da numerosi studi sperimentali e si è potuto dare di questo fatto una ragionevole giustificazione euristica (8). L'identificazione di tale distribuzione permette di conoscere la precisione associata ad ogni serie di misure per ogni livello di confidenza ed ogni intervallo temporale (9). In particolare, calcolati i parametri che caratterizzano tale distribuzione in una data regione, è possibile conoscere la probabilità di superamento di prefissati standard.

L'analisi spettrale (punto B)) non può vantare, nel campo dello studio dell'inquinamento atmosferico, una diffusa serie di applicazioni paragonabile, ad esempio, agli studi sui modelli di diffusione. Si può facilmente prevedere, comunque, un forte sviluppo futuro di tale metodologia. Vanno senz'altro citati alcuni lavori (10) (11) in questo campo orientati verso l'analisi della ciclicità dei dati di inquinamento e dei dati meteorologici, unitamente alla loro correlazione. In tal modo si è potuto isolare le variazioni dovute alle oscillazioni semi-diurne, diurne ed a periodo maggiore; in particolare questi studi evidenziano, sia per l'inquinamento atmosferico che per la velocità del vento, una oscillazione di periodo $3 \div 3.5$ giorni che viene attribuita alle variazioni sinottiche del tempo meteorologico nelle regioni in cui si sono operate le misure (Nord America). Le ciclicità diurna e semi-diurna vengono invece attribuite a fenomeni meteorologici locali quali ad esempio l'effetto di brezza.

Riguardo al punto C) si può dire che la concentrazione media di un inquinante in un dato intervallo di tempo può essere pensata come una combinazione lineare di determinate variabili predittive quali ad esempio la precedente concentrazione dello stesso inquinante e le variabili meteorologiche. Una analisi di regressione multipla permetterà di determinare quelle costanti di tale combinazione lineare che producono la migliore previsione. Con questa metodologia, ad esempio, sono stati condotti alcuni studi (12) (13) per la previsione del massimo livello orario di ossidante nella giornata.

Il punto D), infine, rappresenta probabilmente la metodologia (6) più avanzata nel campo del trattamento delle serie temporali. Questa teoria gode essenzialmente di tre vantaggi (14):

- 1) una particolare capacità ed adattabilità della metodologia a scopi previsionali

- 2) la possibilità di trattare serie altamente correlate. Il metodo infatti permette di tener conto sia di termini autoregressivi (AR) che di termini media mobile (MA) (la normale regressione non tiene conto di questi ultimi)
- 3) la economicità nel numero di parametri che tale sistema permette di ridurre al minimo.

La metodologia Box-Jenkins, nonostante sia molto recente, ha trovato subito interessanti applicazioni ⁽¹⁵⁾ ⁽¹⁶⁾ ⁽¹⁴⁾ per la previsione di livelli medi di inquinamento atmosferico settimanali, giornalieri ed orari.

MISURE METEOROLOGICHE E DI SO₂ NELL'AREA VENEZIANA

L'enorme sviluppo industriale verificatosi nella zona di Porto Marghera negli ultimi decenni e la vicinanza di tale area al centro storico di Venezia, con tutti i conseguenti pericoli al patrimonio artistico-culturale della città, ha destato una viva impressione nell'opinione pubblica provocando l'attenzione del mondo politico e scientifico al problema dell'inquinamento atmosferico in tale area lagunare.

I primi studi di un certo interesse si riferiscono agli anni '50 ⁽¹⁷⁾ ⁽¹⁸⁾, ma è solo nel 1973, con la realizzazione della rete di controllo dell'inquinamento atmosferico installata dalla Tecneco per conto dell'Istituto Superiore di Sanità, che si comincia ad avere una visione globale del problema; tale rete, che dal 1976 è gestita dalla Provincia e dal Comune di Venezia, è formata ⁽¹⁹⁾ attualmente da 24 stazioni di misura di SO₂ e da una stazione di misura delle principali variabili meteorologiche (registrazione orarie). Con tali serie di misure a livello del suolo è stato possibile eseguire una analisi accurata della dipendenza dell'SO₂ dai singoli parametri meteorologici ⁽²⁰⁾, nonché operare la taratura e la verifica nella zona di un modello di diffusione di tipo gaussiano ⁽²⁾ ⁽³⁾ ⁽²⁰⁾.

Alla rete dell'Istituto Superiore di Sanità si è affiancata, nel 1974, una rete gestita dall'Ente Zona Industriale di Porto Marghera e composta ⁽²¹⁾ da 21 analizzatori di SO₂ e 4 stazioni meteorologiche (registrazioni ogni mezz'ora). Tale installazione va considerata come complementare alla precedente e porta a 45 il numero totale di stazioni misuranti anidride solforosa a livello del suolo. Ora, se è vero che tale abbondanza può sembrare eccessiva o addirittura ridondante, va precisato che i significativi risultati finora ottenuti nello studio della variabilità temporale dei livelli di SO₂ e nell'applicazione dei modelli di diffusione possono già da soli giustificare la presenza in tale area di una strumentazione così diffusa e, casomai, mettono in luce l'insufficiente misura della distribuzione verticale delle più importanti variabili in gioco (SO₂, vento, temperatura). Nella Fig.1 è illustrata la distribuzione geografica delle due reti sopra descritte.

ANALISI SPETTRALE

Dati N successivi valori $x_1, x_2, \dots, x_N$ di una serie temporale discreta che sia una realizzazione di un processo stocastico stazionario, si ottiene ⁽²²⁾ la seguente formula per la stima "smussata" della funzione di densità spettrale:

$$\bar{R}_{xx}(\ell) = 2 \left\{ 1 + 2 \sum_{k=1}^{L-1} r_{xx}(k) w(k) \cos \frac{\pi \ell k}{F} \right\}, \quad \ell = 0, 1, \dots, F$$

dove $r_{xx}(k)$, $k = 1, 2, \dots, L-1$ è la stima della funzione di autocorrelazione della serie:

$$r_{xx}(k) = \frac{c_{xx}(k)}{c_{xx}(0)}$$

e $c_{xx}(k)$, $k = 0, 1, \dots, L-1$ è la stima della funzione di autocovarianza della serie:

$$c_{xx}(k) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x})$$

dove $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x_t$.

F è il numero di divisioni in cui viene diviso l'intervallo di frequenza $0 \div 1/(2\Delta)$, dove Δ è l'intervallo temporale tra ogni valore della serie ed il successivo (si suggerisce F uguale a due o tre volte L). L è il punto di troncamento per la funzione di autocorrelazione: i valori $r_{xx}(k)$ con $k \geq L$ vengono cioè considerati nulli. La funzione $w(k)$, $k = 1, 2, \dots, L-1$ è la "lag window" scelta. Per le applicazioni presentate in questa relazione si è scelta la "Tukey window":

$$w(k) = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi k}{L} \right)$$

che risulta particolarmente efficace a causa della ristretta "banda passante" prodotta ⁽²³⁾, e che è già stata applicata ⁽¹¹⁾ per lo studio di serie analoghe a quelle in esame. In definitiva $\bar{R}_{xx}(\ell)$ può essere visto come quella frazione della varianza del processo che può essere attribuita ad una oscillazione di frequenza $f = \ell/(2F\Delta)$.

medie orarie

Lo studio della funzione di densità spettrale delle serie di misure orarie di SO_2 e delle principali variabili meteorologiche (intensità del vento, temperatura, pressione, umidità relativa) ha permesso di identificare le oscillazioni fondamentali di tali serie. L'analisi preliminare svolta (che si è limitata allo spettro e non ha esaminato quindi la coerenza e la fase delle coppie di serie in esame) non ha fornito comunque risultati omogenei nell'area esaminata, a conferma della notevole complessità del fenomeno di dispersione di un inquinante in una zona, come quella Veneziana, caratterizzata ⁽²⁴⁾ da discontinuità superficiali (mare - terra - laguna) e, di conseguenza, da una complessa meteorologia locale. Dai risultati ottenuti si può comunque affermare che, in estate, le stazioni di misura di SO_2 e le variabili meteorologiche mostrano chiaramente una marcata oscillazione diurna ed una più ridotta oscillazione semi-diurna, mentre, per quanto riguarda le ciclicità di periodo superiore, sono riscontrabili oscillazioni di $3 \div 3.5$ giorni e di $2 \div 2.5$ giorni. Durante il periodo invernale sia i parametri meteorologici che l' SO_2 mostrano una netta flessione nella ampiezza della oscillazione diurna ed una accentuazione dell'onda a periodo semi-diurno, specie nelle stazioni in prossimità delle aree residenziali urbane. Va ricordato, a questo proposito, che durante il periodo invernale alle emissioni di SO_2 di origine industriale si sovrappongono le emissioni urbane dovute al riscaldamento domestico.

A titolo esemplificativo dell'analisi svolta vengono riportati quattro grafici che mostrano la stima del logaritmo della funzione di densità spettrale per le seguenti variabili:

- A) logaritmo naturale delle misure orarie di SO_2 registrate durante l'estate del 1973 nella stazione 2 (Istituto Superiore di Sanità) situata a Sud della zona industriale di Porto Marghera (Fig.2)
- B) misure orarie di intensità del vento registrate durante l'estate del 1973 nella stazione meteorologica situata in Venezia (Fig.3)
- C) logaritmo naturale delle misure orarie di SO_2 registrate durante l'inverno '73-'74 nella stazione 10 situata in Marghera (Fig.4)
- D) misure orarie di temperatura registrate durante l'inverno '73-'74 nella stazione meteorologica in Venezia (Fig.5).

Dai grafici si possono verificare le notevoli analogie tra le oscillazioni dell' SO_2 e delle variabili meteorologiche, anche se non è stato possibile finora identificare una oscillazione attribuibile con certezza alle variazioni sinottiche del tempo meteorologico analogamente a quanto affermato da altri autori ⁽¹⁰⁾ ⁽¹¹⁾, sia pure in riferimento a zone diverse da quella in esame.

Va infine aggiunto che, per eliminare la non-stazionarietà delle serie analizzate, è stata sperimentata anche l'analisi spettrale delle serie delle differenze, trasformando cioè la serie X con l'operatore ∇ ($\nabla x_t = x_t - x_{t-1}$). Lo spettro risultante non ha presentato sostanziali modifiche, salvo un effetto di filtraggio che ha notevolmente ridotto il contributo delle frequenze più basse; da ciò si è ritenuto inutile operare sistematicamente sulle serie delle differenze in quanto tale operazione non produceva un sensibile aumento di informazione sullo spettro.

medie giornaliere

Sono state prese in esame le serie di 730 valori corrispondenti al periodo 1/2/73 - 31/1/75 e si è esaminato in particolare il comportamento di dieci stazioni di misura di SO₂ e dei parametri meteorologici. L'analisi mostra come lo spettro della intensità del vento sia quello che ha maggiori analogie con gli spettri dell'SO₂. Va poi notato come le sole stazioni delle zone urbane mostrino un picco nello spettro in corrispondenza ad un periodo di 20 giorni (oscillazione presente anche nello spettro dell'intensità del vento).

Per quanto concerne le variabili meteorologiche, a parte la temperatura che risulta pesantemente caratterizzata da un ciclo annuale che rende trascurabili tutte le altre oscillazioni, esse presentano un comportamento abbastanza simile, nonostante l'intensità del vento mostri una forte oscillazione con un periodo di 6 mesi, che risulta mancante nelle altre variabili.

A titolo di esempio viene riportato in Fig. 6 il periodogramma ⁽⁶⁾ dell'intensità del vento: i picchi evidenziano i periodi fondamentali di oscillazione della serie in esame.

medie settimanali

L'analisi delle serie di 104 valori relativi alle medie settimanali del periodo 1/2/73 - 31/1/75 conferma l'esistenza di una oscillazione di circa tre settimane presente sia nei dati di SO₂ che nei dati meteorologici. Tale fatto indica l'esigenza di una futura analisi più approfondita in tale campo, in modo da identificare con certezza l'esistenza di tale ciclo che potrebbe rivelarsi caratteristico dell'area in esame.

MODELLI ARIMA PER LO STUDIO DELLE SERIE TEMPORALI

La metodologia proposta da Box e Jenkins ⁽⁶⁾ permette la identificazione e la stima dei parametri che modellizzano serie temporali omogenee. Il sistema consiste nell'estrarre dalla serie di dati tutti i trend e le correlazioni seriali in modo che rimanga solo un rumore bianco. Per rimuovere trend e non-stazionarietà dalla serie X (sequenza di N osservazioni equidistanti nel tempo $x_1, x_2, \dots, x_n$) vengono usati gli operatori ∇ ($\nabla x_t = x_t - x_{t-1}$) e ∇_s ($\nabla_s x_t = x_t - x_{t-s}$) dove s è il periodo della oscillazione che si vuole rimuovere. Tali operatori possono essere applicati rispettivamente d e D volte sulla serie. Per rimuovere la correlazione seriale vengono applicati due tipi di operatori: autoregressivi (AR) e media mobile (MA). Questi operatori possono essere espressi come polinomi degli operatori B e B^s dove $Bx_t = x_{t-1}$ e $B^s x_t = x_{t-s}$. Tali polinomi sono:

$$\Phi_p(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p \quad \text{autoregressivo regolare}$$

$$\Phi_p(B^s) = 1 - \phi_1 B^s - \phi_2 B^{2s} - \dots - \phi_p B^{ps} \quad \text{autoregressivo stagionale di periodo } s$$

$$\Theta_q(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q \quad \text{media mobile regolare}$$

$$\Theta_q(B^s) = 1 - \theta_1 B^s - \theta_2 B^{2s} - \dots - \theta_q B^{qs} \quad \text{media mobile stagionale di periodo } s$$

Gli operatori autoregressivi permettono di esprimere i valori correnti della serie come una somma finita dei valori passati della serie, mentre gli operatori media mobile esprimono i valori correnti della serie come una somma finita del corrente e dei passati valori di a_t , dove a_t è il rumore bianco della serie che di solito viene assunto con distribuzione normale, media zero e varianza σ_a^2 .

La combinazione di tutto quanto precedentemente esposto porta all'equazione generale:

$$\Phi_p(B^s) \phi_p(B) \nabla_s^D \nabla^d x_t = \theta_0 + \Theta_q(B^s) \theta_q(B) a_t$$

nella quale θ_0 rappresenta il trend deterministico della serie, se questa è non-stazionaria (d e/o D > 0), mentre se la serie è stazionaria (d = D = 0) si assume $\theta_0 = 0$ e si sostituisce x_t con il valore della serie al tempo t meno il valore medio della serie. L'equazione generale descrive così un modello ARIMA che può essere denotato come $(p, d, q) \times (P, D, Q)_s$; la denominazione ARIMA deriva dall'uso dei termini autoregressivi (AR) e media mobile (MA) unitamente agli operatori ∇ e ∇_s la cui inversione si risolve in una integrazione della serie (I). Va fatto notare che un termine media mobile equivale all'introduzione di una serie infinita di termini autoregressivi e viceversa; di qui la economicità della formulazione che, con pochi parametri, riesce a descrivere anche le più complicate serie temporali.

L'applicazione pratica della procedura esposta si applica ad una serie temporale operando le seguenti analisi:

- 1) identificazione del tipo (o dei tipi in caso di molteplicità) di modello che meglio descrive la serie: determinazione cioè dei termini p, d, q, P, D, Q, s ; tale identificazione viene normalmente effettuata analizzando la funzione di autocorrelazione e la funzione di autocorrelazione parziale della serie $\nabla^d \nabla_s^D x_t$ al variare di d, D ed s
- 2) calcolo dei $p+q+P+Q+1$ parametri del modello in modo da minimizzare la stima della varianza residua della serie $\hat{\sigma}_a^2$
- 3) controllo di validità del modello tramite l'analisi dei residui $\hat{a}_t$ che non devono discostarsi troppo dal comportamento tipico di un rumore bianco
- 4) riscrittura dell'equazione generale del modello in forma esplicita rispetto a x_t . In tal modo la formula diventa previsionale nel senso che, noti i valori $x_{t-1}, x_{t-2}, x_{t-3}, \dots$ ed $a_{t-1}, a_{t-2}, a_{t-3}, \dots$ fino ad un certo istante t-1, è possibile stimare x_t a meno dell'errore a_t di cui conosciamo però la media nulla e la varianza $\hat{\sigma}_a^2$. In tal modo, noti che siano i dati reali della serie ad un certo istante e nell'ipotesi che le caratteristiche fondamentali di tale serie non siano variate rispetto a quelle che hanno permesso il calcolo dei parametri del modello, si viene a disporre di una generalmente semplice formula predittiva che permette di stimare l'evoluzione temporale futura di tale serie, fornendo inoltre i limiti superiore ed inferiore di tale previsione in corrispondenza ad un prefissato livello di confidenza.

Va fatto notare come tale metodologia sia già stata applicata con successo a serie temporali di tipo più diverso e dalle caratteristiche più disparate. Tali studi ⁽⁶⁾ ⁽¹⁶⁾ hanno potuto confermare che è sufficiente un numero molto limitato di parametri autoregressivi e media mobile (massimo 4) per descrivere le serie più complesse, costruendo per queste un efficiente algoritmo predittivo.

medie orarie

La formulazione esposta è stata applicata alle serie orarie di SO₂ misurate nell'area Veneziana. Come considerazione generale si può dire che, durante il periodo estivo, si nota in tutte le stazioni (specialmente in quelle vicine alla zona industriale) una spiccata ciclicità diurna che può essere agevolmente descritta da un modello $(0,2,1) \times (0,1,1)_{24}$. Durante il periodo invernale tale ciclicità giornaliera si riduce sensibilmente o addirittura scompare in alcune stazioni di misura; per tale periodo si possono quindi suggerire due formulazioni alternative alla precedente, e precisamente: $(0,2,1)$ e $(1,0,0)$.

A titolo di esempio viene riportato lo studio della stazione 29 (situata in piena area industriale) durante l'estate 1974. In Fig. 7 è rappresentata la funzione di autocorrelazione del logaritmo naturale della serie: in tale grafico si può constatare l'alta correlazione tra ogni misura oraria e la successiva ($r(1) = 0.8$) e l'effetto tipico del ciclo diurno. In Fig. 8 abbiamo invece la funzione di autocorrelazione della serie trasformata con l'operatore $\nabla^2 \nabla_{24}$: l'andamento di tale funzione mostra come i soli termini $r(1)$, $r(23)$, $r(24)$, $r(25)$ possono essere considerati sensibilmente diversi da zero permettendo l'identificazione della serie con un modello $(0,2,1) \times (0,1,1)_{24}$ che può essere scritto come

$$\nabla^2 \nabla_{24} x_t = (1 - \theta_1 B)(1 - \omega_1 B^{24}) a_t$$

dove θ_1 e ω_1 sono facilmente ricavabili dalle relazioni

$$r(1) = \frac{-\theta_1}{1 + \theta_1^2} \quad e \quad r(24) = \frac{-\omega_1}{1 + \omega_1^2}.$$

medie giornaliere

Le serie relative a due anni di medie giornaliere di SO₂ forniscono una informazione minore, rispetto a quella estratta dall'analisi delle medie orarie, dal momento che non possiedono, almeno apparentemente, delle ciclicità caratterizzanti. Per tali serie l'analisi della funzione di autocorrelazione permette di ipotizzare il modello misto $(1,1,1)$.

Per le medie giornaliere va poi rilevato l'alto grado di correlazione tra ogni misura e la successiva ($r(1) = 0.6 \div 0.7$), analogamente a quanto verificato per le misure orarie.

medie settimanali

Quasi tutte le stazioni, ed in particolare quelle urbane, forniscono delle serie di 104 dati (relativi a due anni di medie settimanali di SO₂) caratterizzate da una ciclicità annuale riconoscibile dal corrispondente picco nella funzione di autocorrelazione. Un esempio di tale comportamento viene illustrato in Fig. 9 ed è relativo alla stazione 22 situata in Venezia.

Le serie contengono un numero troppo limitato di dati per poter azzardare qualche ulteriore ipotesi; le prime analisi sembrano comunque confermare, per le medie settimanali, la validità del modello $(1,0,1) \times (0,1,1)$ già utilizzato per tali serie da altri autori ⁽¹⁴⁾.

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Con l'indagine preliminare qui presentata si è cercato di inquadrare le caratteristiche applicative dei diversi tipi di studi nel campo del trattamento statistico delle serie temporali che interessano il fenomeno dell'inquinamento atmosferico. Tali metodologie sono state illustrate mostrando un primo tentativo di loro applicazione ai dati misurati nell'area Veneziana durante il periodo 1/2/73 - 31/1/75. Questa applicazione sarà sviluppata in futuro in modo da estrarre da tali serie temporali tutte le informazioni possibili. In particolare sarà posta molta attenzione sugli aspetti previsionali della modellistica applicata. Lungo tale direttiva si cercherà di sviluppare la metodologia di Box e Jenkins al fine di applicare i modelli a funzione di trasferimento alle serie orarie di SO₂; in tal modo si potrà stimare l'evoluzione futura a breve termine del campo di SO₂ sulla base dei suoi valori presenti e passati, e dei parametri meteorologici più caratterizzanti. Lo stretto rapporto di collaborazione esistente con i responsabili delle reti di rilevamento dell'SO₂ in Venezia permetterebbe così di operare degli allarmi in tempo reale per le industrie ogni qualvolta il modello stocastico fornisse delle previsioni a breve termine che superassero gli standard prefissati.

Volendo concludere con una nota di ottimismo, va notato che non si è troppo lontani da un controllo efficace e costante della qualità dell'aria nella zona di Venezia e si spera che una realizzazione come quella proposta possa diventare presto operativa.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano i tecnici ed i ricercatori delle due reti di monitoraggio (Istituto Superiore di Sanità ed Ente Zona Industriale di Porto Marghera) presenti nell'area Veneziana per la collaborazione fornita durante la raccolta e l'organizzazione delle misure. Si ringrazia inoltre il Dott. Boscolo ed il Sig. Fantini del Centro Scientifico IBM di Venezia per l'aiuto fornito in fase di programmazione.

BIBLIOGRAFIA

- (1) Pasquill, F. (1962): Atmospheric Diffusion - D. van Nostrand Company Ltd, London.
- (2) Zannetti, P. e Runca, E. (1975): Validità della applicazione di un modello gaussiano di tipo climatologico nell'area Veneziana - Inquinamento XVII (5) - Etas Kompass, Milano.
- (3) Runca, E., Melli, P. e Zannetti, P. (1976): Computation of long-term average SO₂ concentration in the Venetian area - Applied Mathematical Modelling 1 (1), 9-15 - C.A. Brebbia editor, University of Southampton.
- (4) Runca, E. e Sardei, F. (1975): Numerical treatment of time dependent advection and diffusion of air pollutants - Atmospheric Environment 9, 69-80 - Pergamon Press, England.

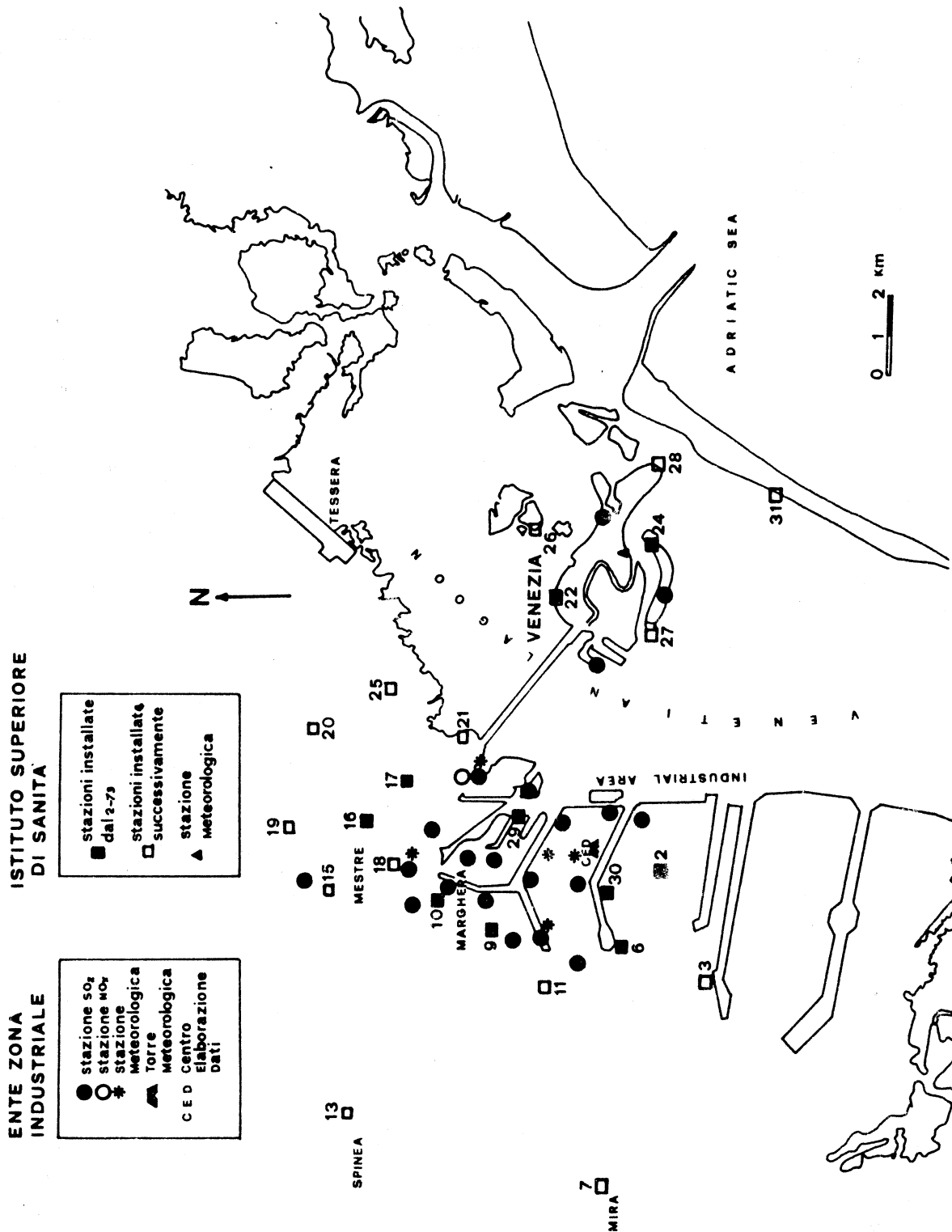
- (5) Runca, E. Melli, P. e Zannetti, P. (1976): An application of air pollution models to the Venetian area - Atti del Seminario "Air Pollution Modelling", Centro Scientifico IBM di Venezia, 27-28 novembre 1975.
- (6) Box, G.E.P. e Jenkins, G.M. (1970): Time series analysis forecasting and control - Holden-day, S.Francisco.
- (7) Larsen, R.I. (1969): A new mathematical model of air pollutant concentration averaging time and frequency - Journal of the Air Pollution Control Association 19(1), 24-30.
- (8) Kahn, H.D. (1973): Note on the distribution of air pollutants - Journal of the Air Pollution Control Association 23(11), 973.
- (9) Hunt Jr., W.F. (1972): The precision associated with the sampling frequency of log-normally distributed air pollutant measurements - Journal of the Air Pollution Control Association 22(9), 687-691.
- (10) Tilley, M.A. e Mc Bean, G.A. (1973): An application of the spectrum analysis to synoptic-pollution data - Atmospheric Environment 7, 793-801.
- (11) Trivikrama Rao, S., Samson, P.J. e Peddada, A.R. (1976): Spectral analysis approach to the dynamics of air pollutants - Atmospheric Environment 10, 375-379.
- (12) Bennet, C. (1974): California air quality data - 6, ottobre-novembre-dicembre, California air resources board, Sacramento.
- (13) Tiao, G.C., Phadke, M.S. e Box, G.E.P. (1976): Some empirical models for the Los Angeles photochemical smog data - Journal of the Air Pollution Control Association 26(5), 485-490.
- (14) Chock, D.P., Terrel, T.R. e Levitt, S.B. (1975): Time-series analysis of Riverside, California air quality data - Atmospheric Environment 9, 978-989.
- (15) Merz, P.H., Painter, L.J. e Ryason, P.R. (1972): Aerometric data analysis-time series analysis and forecast and an atmospheric smog diagram - Atmospheric Environment 6, 319-342.
- (16) McCollister, G.M. e Wilson, K.R. (1975): Linear stochastic models for forecasting daily maxima and hourly concentrations of air pollutants - Atmospheric Environment 9, 417-423.
- (17) Dechigi, M. e Paccagnella, B. (1954): Inquinamento atmosferico da prodotti della combustione e dell'attività industriale - Atti del XVII congresso nazionale dell'Associazione Italiana per l'Igiene - Venezia, ottobre
- (18) Vendramini, R. (1960): Relazione sui risultati delle rilevazioni sistematiche eseguite dal 1956 al 1959 sull'inquinamento dell'aria nella zona di Mestre e Marghera - Rapporto tecnico, Istituto di Igiene, Università di Padova.
- (19) Autori vari (1973): Sistema di rilevamento dell'inquinamento atmosferico nella zona di Venezia - Rapporto tecnico PROT/AGA N.60, Tecneco, Fano.
- (20) Zannetti, P., Melli, P. e Runca, E. (1976): SO₂ in Venezia: analisi e prospettive - Atti del 3° Convegno "Ambiente e Risorse", Università di Padova, Bressanone, settembre 1975.
- (21) Zilio-Grandi, F. (1975): Ricerche sulla qualità dell'aria della zona di P.Marghera, Mestre e Venezia - Atti del 2° Convegno "Ambiente e Risorse", Università di Padova, Bressanone, settembre 1974.
- (22) Jenkins, G.M. e Watts, D.G. (1968): Spectral analysis and its applications - Holden-day, S.Francisco.

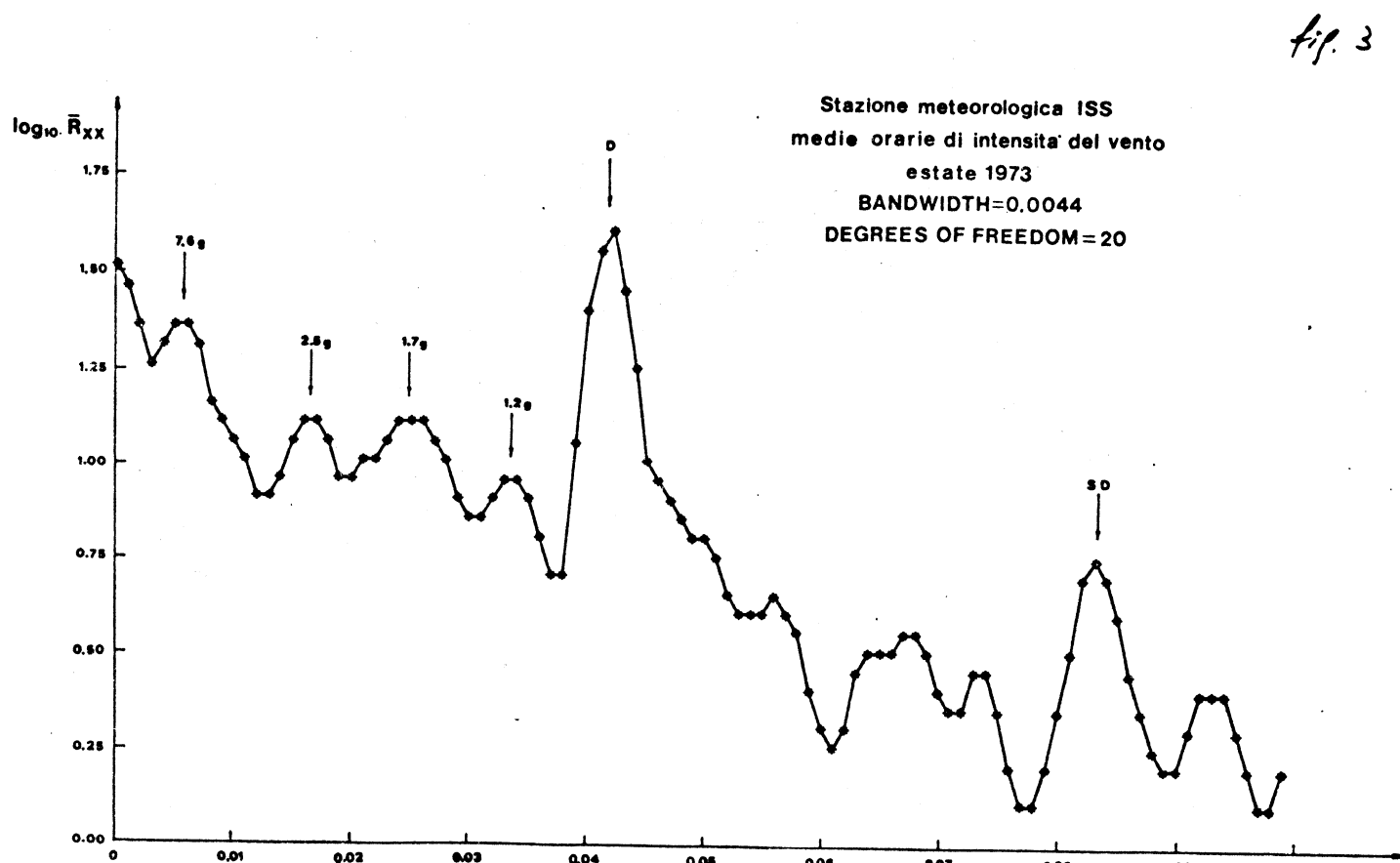
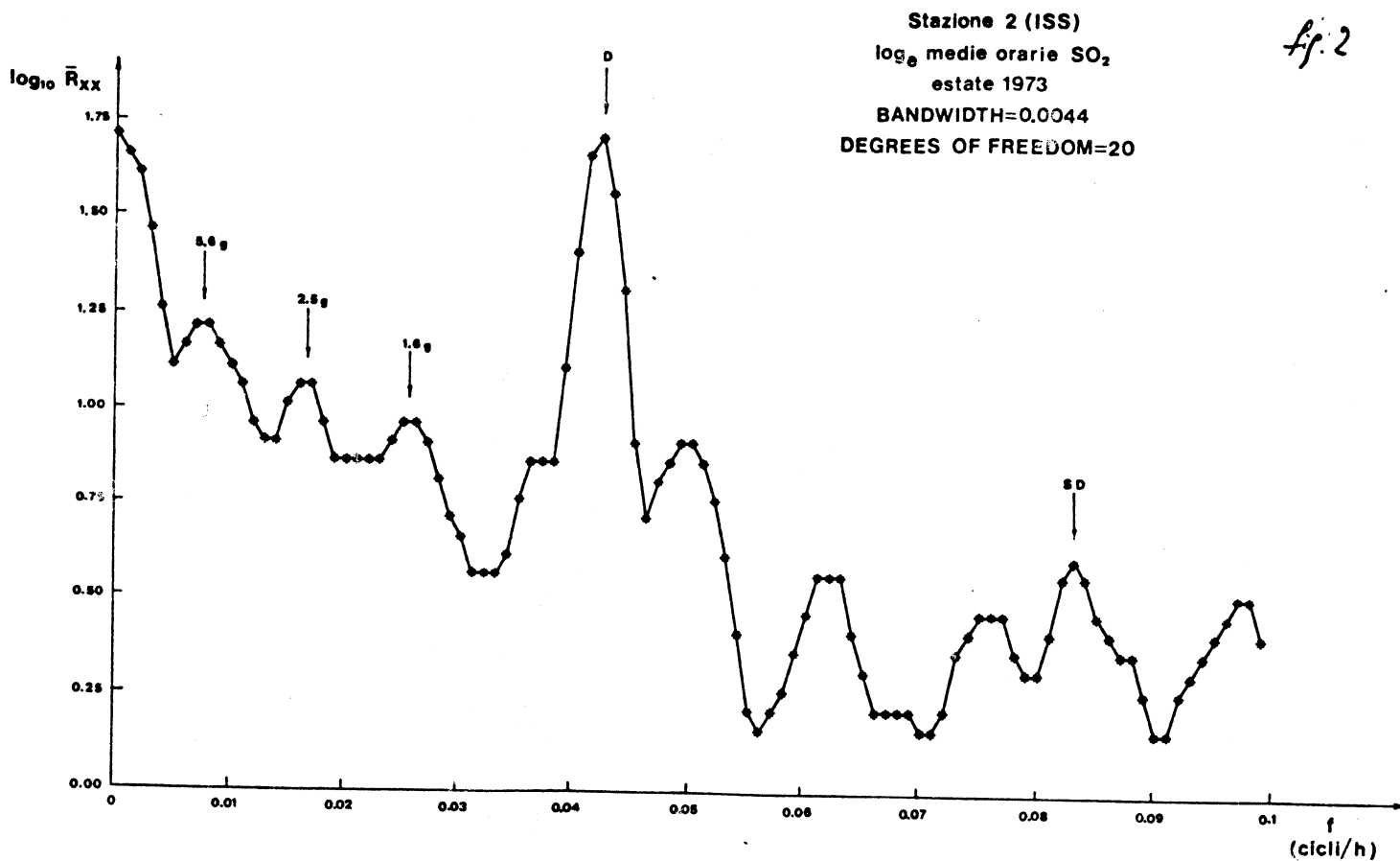
- (23) Jenkins, G.M. (1965): Some examples of and comments on spectral analysis - Atti del "IBM Scientific Computing Symposium on Statistics", IBM Data Processing Division, White Plains, New York, 21-23 ottobre 1963.
- (24) Runca, E. e Zannetti, P. (1973): Una indagine preliminare sul problema dell'inquinamento atmosferico nell'area Veneziana - Rapporto tecnico CRV007/513-3522, Centro Scientifico IBM, Venezia.
- (25) Myrabo, L.N., Wilson, K.R. e Trijonis, J.C. (1975): Survey of statistical models for oxidant air quality prediction - Conference on the State-Of-The-Art of Assessing Transportation Related Air Quality Impacts, October, 1975, Washington, D.C.

DIDASCALIE

- Fig.1 Area Veneziana. - Sono indicate le stazioni di misura delle due reti di monitoraggio installate dall'Istituto Superiore di Sanità (ISS) e dall'Ente Zona Industriale di Porto Marghera (EZ) .
- Fig.2 Stima della funzione di densità spettrale dei dati orari di SO_2 misurati nella stazione 2 (ISS) durante l'estate 1973 . Sono indicate le ciclicità diurna (D), semidiurna (SD) e di periodo superiore alle 24 ore.
- Fig.3 Stima della funzione di densità spettrale dei dati orari di intensità del vento misurati nella stazione meteorologica ISS durante l'estate 1973 . Sono indicati i periodi corrispondenti ai picchi della funzione (D = 24h, SD = 12h) .
- Fig.4 Stima della funzione di densità spettrale dei dati orari di SO_2 registrati nella stazione 10 (ISS) durante l'inverno '73-'74.
- Fig.5 Stima della funzione di densità spettrale dei dati orari di temperatura misurati nella stazione meteorologica ISS durante l'inverno '73-'74.
- Fig.6 Periodogramma relativo alle 730 medie giornaliere di intensità del vento misurate nella stazione meteorologica ISS durante il periodo 1/2/73 - 31/1/75.
- Fig.7 Stima della funzione di autocorrelazione delle misure orarie di SO_2 registrate nella stazione 29 (ISS) durante l'estate 1974.
- Fig.8 Stima della funzione di autocorrelazione delle trasformata secondo $\nabla^2 \nabla_{24}$ delle misure orarie di SO_2 registrate nella stazione 29 (ISS) durante l'estate 1974.
- Fig.9 Stima della funzione di autocorrelazione delle medie settimanali di SO_2 registrate nella stazione 22 (ISS) durante il periodo 1/2/73-31/1/75.

Fig. 1





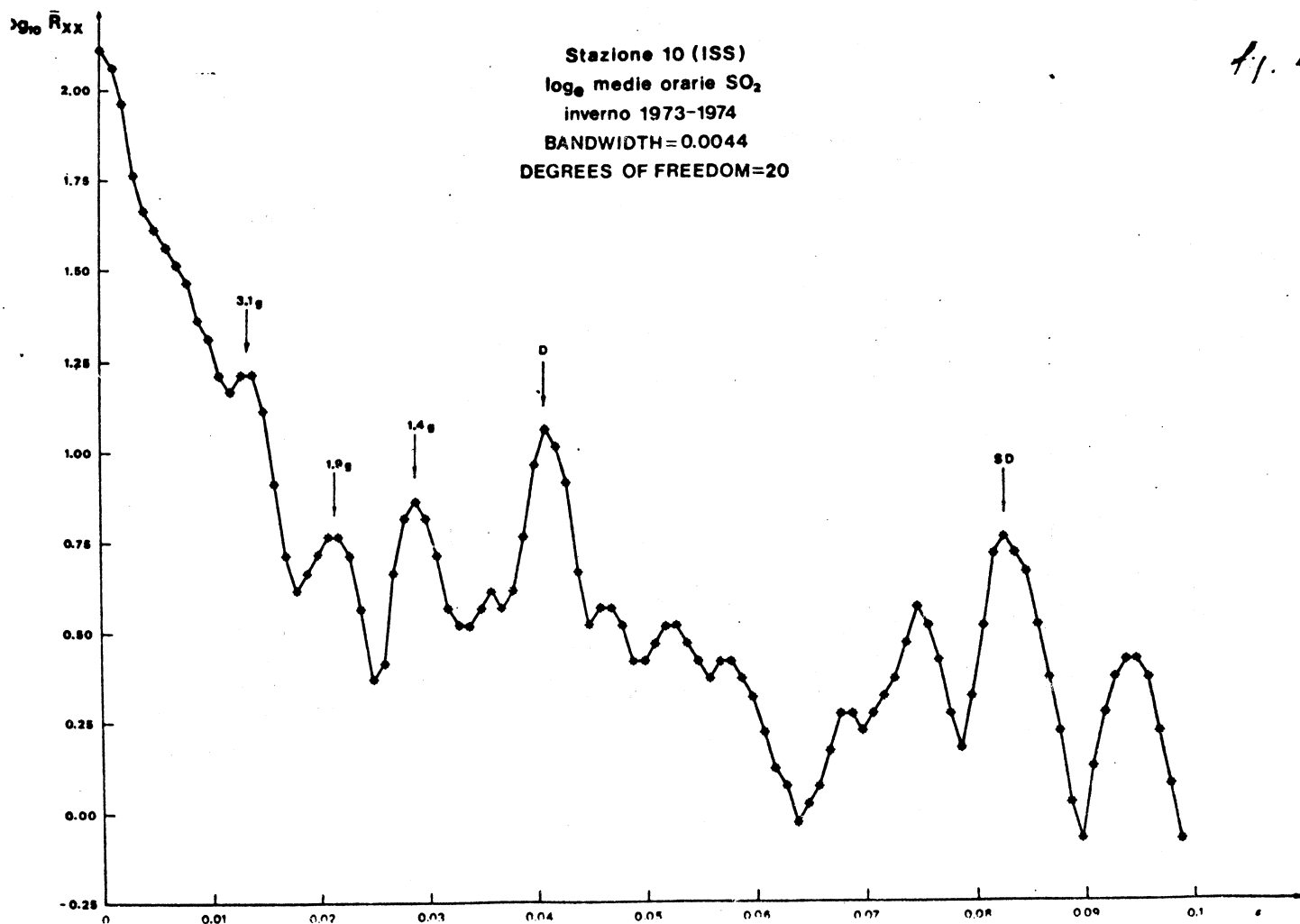


fig. 5

Stazione meteorologica ISS
 medie orarie di temperatura
 inverno 1973-1974
 BANDWIDTH=0.0044
 DEGREES OF FREEDOM=20

