

TROMBE D'ARIA SULL'ITALIA

Sabino PALMIERI e Alfredo PULCINI*

(Lavoro presentato il 28 settembre 1978)

RIASSUNTO — E' stato condotto uno studio sulle trombe d'aria segnalate in Italia nel periodo 1946-1973.

Si esamina la distribuzione spazio-temporale di questi fenomeni. Segue un'analisi degli aspetti economici con una valutazione della perdita annua e del danno medio causato da uno di tali eventi. Si passa poi all'esame delle condizioni meteorologiche favorevoli allo sviluppo delle trombe utilizzando l'indice SWEAT.

Si considera infine il problema della determinazione delle grandezze di una tromba di « progetto » per l'Italia.

Trombes sur l'Italie

RÉSUMÉ — Une étude a été menée sur les trombes signalées en Italie dans la période 1946-1973.

On examine la distribution espace-temporelle de ces phénomènes. Ensuite on fait une analyse des aspects économiques avec une évaluation de la perte annuelle et du dégât moyen causé par un de ces événements. On examine en outre les conditions météorologiques favorables au développement des trombes en utilisant l'indice SWEAT.

On considère enfin le problème de la détermination des dimensions d'une trombe de « projet » pour l'Italie.

Tornadoes over Italy

SUMMARY — A study about tornadoes over Italy in the period 1946-1973 has been carried out.

The space-time distribution as well as an analysis of the economic impact of these phenomena are presented, with an estimate of mean annual losses and mean casualties caused by each of them.

Furthermore favorable meteorological conditions for tornado-genesis are discussed, using SWEAT index.

The determination of a "project tornado" for Italy is finally discussed.

1. PREMESSA

E' noto da molto tempo che parecchie regioni italiane sono di tanto in tanto interessate da tempeste vorticosi di piccole dimensioni e di straordinaria violenza. Si tratta di perturbazioni che si presentano con particolare frequenza ed intensità negli Stati Uniti dove sono note con il nome di *tornado*. Notizie su eventi del tipo anzidetto, possono essere attinte fin dai tempi dell'antichità da vari autori latini: SENECA, PLINIO IL VECCHIO,

il naturalista LUCREZIO (1) ed in epoche meno lontane da Nicolò MACCHIAVELLI (2). Inoltre la frequenza di tali fenomeni meteorologici ha destato l'interesse di molti studiosi i quali ne hanno fornito descrizioni particolarmente reggiate.

In particolare è doveroso menzionare:

— le diverse osservazioni sui turbini atmosferici riportate da A. DESIO (3);

— la pubblicazione di A. PUPPO e P. LONGO (4) nella quale con grande precisione

* entrambi del Servizio Meteorologico A.M.

e dovizia di particolari viene analizzata una tromba d'aria che colpì il territorio di Treviso il 24 luglio 1930;

— le osservazioni e considerazioni espresse da G. CRESTANI in vari articoli (5), (6), (7), (8), (9), (10), (11);

— lo studio eseguito da F. SPERANZA sulla tromba abbattutasi su Venezia il 24 luglio 1939 (12);

— le pubblicazioni di O. BALDACCI (13), (14) su alcune trombe verificatesi nel Tirreno a largo di Ladispoli di cui fu spettatore l'autore che riuscì a realizzare un'interessante documentazione fotografica sulla manifestazione del fenomeno.

Inoltre, un'attenta rassegna critica delle ipotesi sulla formazione delle trombe d'aria e dei tornado, è stata fornita da R. BILANCINI in diversi articoli (15), (16), (17).

Infine, uno degli eventi di questo tipo più drammatici e disastrosi che ebbe a verificarsi l'11 settembre 1970 nella zona di Venezia, è stato descritto da R. JANESELLI (18) e da S. BORGHI e N. MINAFRA (19).

Recentemente l'interesse per questi fenomeni si è risvegliato in Italia in relazione ai programmi per la costruzione di nuove centrali elettriche nucleari. Le trombe d'aria vanno incluse nella lista di eventi potenzialmente possibili (terremoti, caduta di un aereo, esplosioni, etc.) che potrebbero concorrere a causare un rilascio di materiale radioattivo. Le informazioni disponibili relative a tali eventi (intensità e probabilità del loro verificarsi) possono influire sia sulla scelta dei siti dove ubicare gli impianti, sia sulle misure protettive. Ma non solo gli impianti atomici hanno interesse notevole per il problema. I danni (agricoltura e insediamenti urbani in modo particolare) che la comunità sopporta per effetto di tali fenomeni sono tutt'altro che trascurabili e tali da richiedere protezioni assicurative, le uniche possibili in questo caso.

Per programmare un sistema assicurativo efficace si è reso necessario negli USA definire oltre la frequenza, una lunghezza del percorso ed un diametro *standard* di tali fenomeni, in maniera che i danni in eccesso

rispetto a quelli causati da una tromba *standard* possano essere riassicurati presso altre organizzazioni limitando così i rischi di una singola compagnia.

Lo sviluppo delle misure nella libera atmosfera e della elaborazione rapida dei dati relativi rende possibile oggi approfondire lo studio delle condizioni meteorologiche favorevoli alla formazione delle trombe d'aria e consente di segnalare tempestivamente quando tali condizioni si verificano. Questo aspetto è già stato considerato nel citato lavoro di BORGHI e MINAFRA che hanno illustrato l'utilità dell'applicazione di un metodo proposto da FUJITA e collaboratori. I risultati positivi del metodo sono poi stati confermati da I. VISCONTI (20) nell'analisi di un *tornado* abbattutosi nella zona di Budrio (Bologna) l'11 novembre 1971. Un'approfondita conoscenza descrittiva di tali fenomeni, con particolare riferimento al loro spostamento, può consentire poi alle autorità locali di predisporre eventuali sistemi di allarme per la popolazione, i quali entrino in funzione quando una di tali perturbazioni venga segnalata. Mezzi di questo tipo hanno dato luogo, negli USA, ad una cospicua riduzione del numero di morti e feriti.

Per concludere questa breve introduzione, vale la pena di menzionare che l'interesse per le trombe d'aria e per le condizioni meteorologiche ad esse favorevoli è ulteriormente attivato da una recente proposta di L.M. MICHAUD (21) consistente nell'impiego di un vortice controllato per utilizzare l'energia meccanica prodotta nell'atmosfera per effetto del riscaldamento solare.

Tale energia sarebbe catturata forzando l'espansione dell'aria verso l'alto ed obbligandola ad aver luogo in un sito prescelto per mezzo di un vortice controllato simile a quelli naturali. Questo verrebbe a formarsi al di sopra di una « stazione » costituita da un gruppo di opportuni deflettori disposti su una circonferenza di raggio dell'ordine dei 100 m. La circolazione vorticoso verrebbe avviata surriscaldando l'aria nella stazione mediante accensioni di combustibile. Una volta avviato, il vortice persisterebbe senza ulteriori necessità di riscaldamento sempreché

l'atmosfera si trovi nelle condizioni di stratificazione verticale instabile favorevole allo sviluppo dei *tornado*.

Parte dell'energia cinetica prodotta dalla espansione dell'aria che sale sarebbe imbrigliata per mezzo di turbine installate al di sotto dei deflettori. Il progetto ha già subito parziali verifiche sperimentali. Non è quindi escluso che i meteorologi non abbiano in futuro un ruolo importante nella soluzione della crisi energetica!

I vari aspetti cui si è accennato hanno indotto gli autori a completare ed integrare, con il concorso del CNEN (Comitato Nazionale Energia Nucleare), una raccolta di dati e notizie sulle trombe d'aria già disponibile nell'ambito del Servizio Meteorologico. Sulla base di questi si è tentato poi di delineare la distribuzione di tali fenomeni sull'Italia, nello spazio e nel tempo. Si è quindi passati

a studiare le condizioni meteorologiche che ne favoriscono lo sviluppo concentrando in particolare l'attenzione su un indice dello « stato » dell'atmosfera denominato SWEAT (*Severe Weather Threat*) impiegato con successo negli Stati Uniti per questo scopo. E' stato infine considerato il problema della definizione di una « tromba di progetto », cioè di un evento estremo che possa essere preso in considerazione nella progettazione di opere ingegneristiche (in particolare di impianti nucleari).

2. DATI

Per lo studio delle trombe d'aria è necessario ricorrere ad una definizione il più possibile oggettiva del fenomeno basata, sulle osservazioni disponibili. In questo caso si tratta quasi sempre di notizie attinte dalla

TAVOLA I

CLASSE	EFFETTI	
I	LIEVE	- Oggetti di poco peso vengono scaraventati in aria; rottura di vetri.
II	MODERATA	- Scoperchiamento parziale dei tetti, crollo dei cornicioni e di qualche muro pericolante; abbattimento dei cartelloni pubblicitari, danni alle colture.
III	FORTE	- Scoperchiamento totale dei tetti; crollo di qualche casa di vecchia costruzione, di baracche e capannoni, piegamento ed abbattimento di alberi.
IV	ROVINOSA	- Lesione alle strutture degli edifici, diversi crolli di case di vecchia costruzione, edifici pericolanti, baracche e capannoni, pali abbattuti ed alberi sradicati; qualche oggetto pesante scaraventato in aria a qualche metro di distanza.
V	DISASTROSA	- Crolli di case in muratura di costruzione anche recente e di capannoni industriali, piloni in c.a. abbattuti, imposte e saracinesche scardinate, parecchi oggetti pesanti (macchine, roulotte, lamiere, tubi ecc.) e persone scaraventate in aria a parecchi metri di distanza.
VI	CATASTROFICA	- Tornado di tipo americano.

Scala delle intensità per le trombe d'aria

stampa quotidiana e da altre fonti che hanno un contenuto relativamente preciso per quanto si riferisce ai danni, ma sono pochissimo affidabili nella descrizione del fenomeno fisico. In particolare la stampa quotidiana tende a classificare come tromba d'aria anche i casi di raffiche di vento di eccezionale intensità, ma non associati a perturbazione vorticiosa. Per quanto detto si è ritenuto opportuno partire da una classificazione qualitativa basata sulla valutazione dei danni proposta dal CNEN ed esposta nella tav. I.

Si sono quindi elencati tutti gli eventi classificati come trombe d'aria dai principali quotidiani nel periodo che va dal 1946 al 1973. Nella schedatura dei fenomeni si è cercato di quantificare i danni ordinando questi ultimi in 15 classi diverse (ad esempio distruzioni di case, casette, baracche, tetti, etc.) ed a ciascuna di queste classi si è attribuito il codice 1, 2 o 3 a seconda della estensione del danno (1 piccola, 2 moderata, 3 grande). E' risultato un insieme di 280 casi. L'analisi dei danni e delle notizie meteorologiche disponibili ha quindi consentito di estrarre un sottoinsieme di 38 casi sicuramente attribuibili a perturbazioni vorticiose.

3. DISTRIBUZIONE NELLO SPAZIO E NEL TEMPO

3.1 Distribuzione per le varie regioni italiane

D'accordo con T.L. DOAN (22) per le applicazioni dell'ingegneria, il luogo che può essere colpito da una tromba d'aria può considerarsi come un punto geometrico; pertanto si è interessati nella probabilità che una tromba colpisca un determinato punto.

Si avrà allora:

$$P = \frac{an}{S} \quad , \quad [1]$$

nella quale P è la probabilità annuale che un punto nella regione di area S sia colpito da una tromba;

a è l'area media della zona interessata da una singolare tromba;

n è la frequenza annuale di trombe sulla regione di area S;

S è l'area nella quale si è calcolata la frequenza n.

Per quanto si riferisce all'area spazzata da una tromba, H.E.S. ТЮМ (23) ha valutato sulla base di 230 *tornado* americani un valore di 7,3 km². Nel caso dell'Italia non si dispone di elementi per procedere ad una valutazione statistica. Si è preferito considerare l'area spazzata dalla tromba più intensa verificatasi nell'arco di tempo considerato che è stata quella che ha colpito Venezia-Iesolo l'11 settembre 1970. Nella circostanza il fenomeno ha interessato un percorso di circa 40 km, mentre un valore molto realistico del raggio del vortice è di 100 m. In questo caso l'area spazzata risulta $a = 40 \times 10^3 \times 2 \times 10^2 \text{ m}^2$ pari a 8 km². Appare dunque plausibile per l'Italia assumere come valore medio dell'area spazzata 4 km². Il numero di trombe che si è verificato in ogni regione italiana nel periodo 1946-1973 è riportato nella fig. 1.

Poiché gli eventi di questo tipo si presentano quasi esclusivamente su zone pianeggianti, per valutare la probabilità di trombe d'aria in un punto di ciascuna regione italiana è stata utilizzata soltanto l'area pianeggiante Sp. Nella tav. II sono indicate le frequenze con cui il fenomeno si presenta in un punto di ogni regione. Nella interpretazione di questi dati è opportuno tener presente che essi sono basati sull'intero insieme dei 280 fenomeni verificatesi.

Si può rilevare come le massime frequenze si raggiungono sulle regioni della costa tirrenica. Ciò è dovuto all'alta incidenza su queste regioni di tempeste di vento che, in accordo alla classificazione menzionata al paragrafo 2, sono di entità lieve o moderata. Seguono le frequenze delle regioni settentrionali che pur essendo inferiori sono invece da attribuirsi a fenomeni di intensità superiore (forti, rovinose e disastrose).

E' interessante confrontare i valori della tav. II con quelli relativi agli Stati Uniti forniti dal citato lavoro di T.L. DOAN. Risulta che essi variano tra 10⁻³ e 10⁻⁴.

In particolare si rileva che la più elevata probabilità locale 36,2 x 10⁻⁴ si ha ad Oklahoma per un sito sede di impianto nucleare ed



Fig. 1 - Trombe d'aria verificatesi nelle regioni italiane dal 1946 al 1973

è solo di poco superiore a quella del Lazio di $24,0 \times 10^{-4}$.

Va sottolineato tuttavia, come si vedrà più avanti, che il fenomeno in Italia si presenta con intensità molto minore che non negli Stati Uniti.

Nella fig. 2 è esposta la distribuzione geografica del sottoinsieme di 38 casi di tempeste di vento sicuramente attribuibili a perturbazioni vorticosi. Tale rappresentazione conferma le osservazioni precedentemente effettuate.

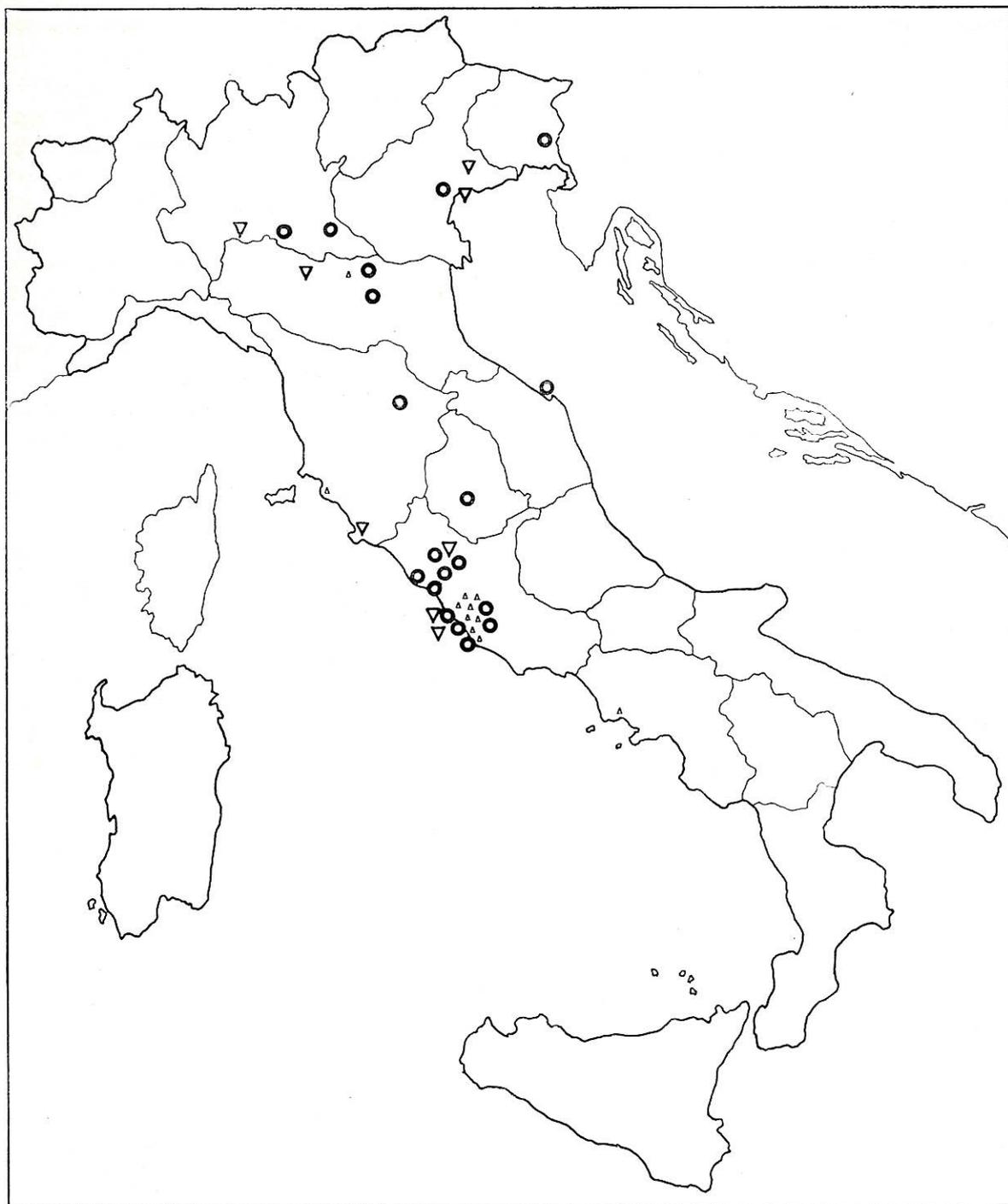


Fig. 2 - Distribuzione geografica del sottoinsieme costituito dai 38 casi esaminati

3.2 Andamento nel tempo

Le figure 3 e 4 mostrano l'andamento del numero di trombe d'aria per bimestre. Si può osservare che le regioni Piemonte, Lombardia, Veneto, Emilia Romagna, Friuli Ve-

nezia Giulia e Trentino Alto Adige presentano un massimo nel bimestre luglio-agosto. Nelle regioni costiere tirreniche il massimo numero di trombe si ha nel bimestre settembre-ottobre. Come era da attendersi i massimi di frequenza delle trombe d'aria si presen-

TAVOLA II

REGIONE	PROBABILITA' P
PIEMONTE	$5 \cdot 10^{-4}$
LOMBARDIA	$5 \cdot 10^{-4}$
VENETO	$3,6 \cdot 10^{-4}$
FRIULI VENEZIA GIULIA	$3,3 \cdot 10^{-4}$
EMILIA ROMAGNA	$2,4 \cdot 10^{-4}$
TOSCANA	$18,0 \cdot 10^{-4}$
LAZIO	$24,0 \cdot 10^{-4}$
CAMPANIA	$9,4 \cdot 10^{-4}$
PUGLIA	$1,2 \cdot 10^{-4}$
BASILICATA	$1,8 \cdot 10^{-4}$
CALABRIA	$8,8 \cdot 10^{-4}$
SICILIA	$1,4 \cdot 10^{-4}$
SARDEGNA	$1,3 \cdot 10^{-4}$
LIGURIA	$4,0 \cdot 10^{-4}$
MARCHE	$3,2 \cdot 10^{-5}$
ABRUZZI E MOLISE	$3,5 \cdot 10^{-5}$

Frequenza del fenomeno per le regioni italiane

tano in concomitanza con quelli dei temporali e delle precipitazioni essendo i due fenomeni favoriti dalla forte instabilità convettiva.

3.3 Valutazione della perdita economica

Per formarsi una base mediante la quale calcolare i danni, si è considerato il sottoinsieme di 38 trombe menzionato nella fig. 2, corredato di informazioni esaurienti. Risulta che l'entità dei danni D può essere quantizzata in maniera realistica tenendo conto del tipo di distruzione provocata (palazzine, piccoli edifici in muratura, capannoni, costruzioni in legno o strutture prefabricate leggere, tetti e danni alle colture).

La stima dei danni complessivi è stata effettuata mediante la:

$$D = \sum_{k=1}^5 a_k e_k + c \quad , \quad [2]$$

nella quale gli a_k , valori della distruzione in termini monetari, vengono fissati secondo quanto indicato nella tav. III mentre gli e_k sono assunti pari ad 1, 2 o 3 a seconda della estensione in accordo alla tav. IV. Infine il

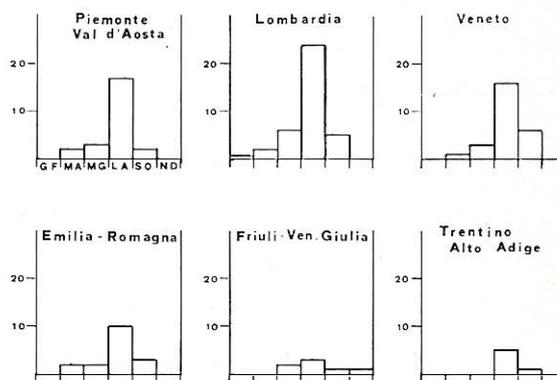


Fig. 3 - Andamento bimestrale del numero di trombe d'aria verificatosi nel periodo 1946-1973 sulle regioni Prealpine e della Val Padana

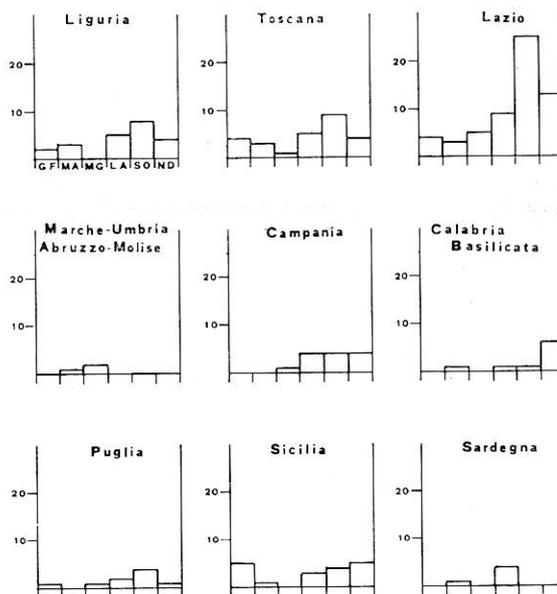


Fig. 4 - Andamento bimestrale del numero di trombe d'aria verificatosi nel periodo 1946-1973 per le regioni peninsulari e le isole

valore di c (danno alle colture agricole) viene stimato in base alla tavola V. Tutte le stime sono riferite al valore della lira nell'anno 1974.

Procedendo nella maniera indicata si è valutata la perdita economica complessiva relativa ai 280 eventi verificatesi nell'arco di tempo che va dal 1946 al 1973. E' risultato un danno pari a 79 miliardi di lire. La perdita annua media è di 2,926 miliardi di lire. Il danno economico medio per ogni tromba segnalata è di 280 milioni, mentre il numero medio di vittime è di 0,37.

TAVOLA III

K	TIPO DELLA DISTRUZIONE	VALORE DELLA DISTRUZIONE a_k
1	Palazzine	$a_1 = 500$ ML
2	Piccoli edifici in muratura	$a_2 = 200$ ML
3	Capannoni	$a_3 = 100$ ML
4	Costruzioni in legno o strutture prefabbricate	$a_4 = 100$ ML
5	Tetti	$a_5 = 100$ ML

Entità della distribuzione in termini monetari

TAVOLA IV

ESTENSIONE DELLA DISTRUZIONE	e_k
Limitata estensione	1
Media estensione	2
Notevole estensione	3

Coefficienti per tener conto della estensione della distribuzione

TAVOLA V

TIPO DI COLTURA	DANNO PER ETTARO (lire 1974)	DANNO PER kmq (lire 1974)
Grano maturo	210 000	84 ML
Coltura foraggera	210 000	84 ML
Granoturco	420 000	168 ML
Colture ortive pregiate	700 000	280 ML
Vigneto o frutteto	1 400 000	560 ML

Elementi per la valutazione del danno alle colture agricole

4. CONDIZIONI METEOROLOGICHE FAVOREVOLI ALLO SVILUPPO DELLE TROMBE D'ARIA

4.1 Caratteristiche sinottiche

Una prima guida per la classificazione delle situazioni sinottiche nei casi di trombe d'aria ci è offerta dalle regole di E. J. FAWBUSH e R. C. MILLER (24):

a) la distribuzione del vento in quota deve essere caratterizzata da un massimo di velocità lungo un corridoio relativamente stretto tra i 3 000 e i 7 000 metri, con valori della velocità del vento non inferiori ai 35 nodi;

b) nelle situazioni che precedono lo sviluppo delle trombe d'aria una ben netta lingua d'aria secca è presente a livelli bassi e medi e, se sono soddisfatti altri criteri, lo sviluppo principale della tromba d'aria sarà nella zona nella quale l'aria secca penetra nella massa umida o vi scorre sopra;

c) la distribuzione orizzontale di umidità nello strato di aria umida a bassa quota deve avere un massimo ben marcato lungo un corridoio relativamente stretto sul lato sopravvento rispetto alla zona in cui si forma la tromba d'aria. In parole più semplici vi deve essere aria secca sopravvento alla zona di possibile sviluppo.

La regola a) è stata perfezionata nel 1972 (25) con l'inclusione di forti *shear* nel campo del vento alle quote medie.

Per quanto riguarda la regola b) l'esperienza indica che le infiltrazioni di aria secca non solo sono necessarie per delineare la possibilità di una eventuale tromba di aria ma costituiscono uno dei principali contributi al meccanismo d'innescò nella maggior parte dei casi. Infine in riferimento alla terza regola c) si può dire che essa sia stata confermata dall'esperienza; generalmente l'in-

tensità dello sviluppo è proporzionale non soltanto all'intensità del gradiente di umidità, ma anche alla componente del vento dall'aria secca all'aria umida.

I criteri enunciati sono stati riformulati negli Stati Uniti su una base di uno studio di più di quattrocento trombe d'aria allo scopo di classificare sinotticamente le situazioni favorevoli al fenomeno; vengono sottolineate le seguenti caratteristiche:

— presenza di una corrente a getto o di *shear* del vento a livelli medi;

— intrusione di aria secca e sua vicinanza al promontorio di aria umida.

Si ritiene utile a questo punto richiamare, con la fig. 5, lo schema in sezione verticale di una perturbazione frontale secondo vedute recenti di K.A. BROWNING (26). La figura permette di interpretare la generazione di instabilità potenziale. La freccia punteggiata indica il movimento rispetto al sistema frontale del così detto *conveyor belt* uno strato d'aria prossimo alla superficie e di spessore limitato che trasporta, nell'ambito del settore caldo, entità notevoli di calore, umidità e quantità di moto verso nord e verso l'alto. La freccia in tratteggio rappresenta uno strato superiore in movimento costituito da aria che, avendo subito un movimento discendente si presenta secca e relativamente calda. Nella figura compare una distribuzione ipotetica di isolinee di temperatura potenziale di bulbo bagnato (Θ_w) espresso in °C. Si vede facilmente come le zone caratte-

rizzate da instabilità potenziale ($\frac{\partial \Theta_w}{\partial z} < 0$) si hanno in prossimità del fronte freddo e dove l'aria «secca» scorre sull'aria umida (nella figura laddove la freccia tratteggiata è sovrapposta a quella punteggiata).

La formazione di un *tornado* implica l'esistenza di condizioni estreme di instabilità atmosferica, ed il quadro fornito consente di intuire, sia pure in maniera qualitativa, come tali circostanze possano effettivamente verificarsi mediante l'interazione di aria secca e di aria umida, nell'ambito di un sistema frontale.

Sulla base delle considerazioni esposte è stata proposta (25) una classificazione delle situazioni sinottiche favorevoli allo sviluppo dei *tornado* nei cinque tipi di cui segue la descrizione.

1) Situazione del tipo A

E' caratterizzata dai seguenti elementi:

- un ramo di getto ben definito da SW;
- una corrente di aria umida da S negli strati prossimi al suolo;
- una corrente da SW di aria secca al suolo fino a 700 mbar ad W della corrente di aria umida.

L'area di fenomeni più intensi è localizzata nei punti dove si ha massima convergenza tra aria umida e aria secca e preferibilmente in vicinanza della corrente a getto.

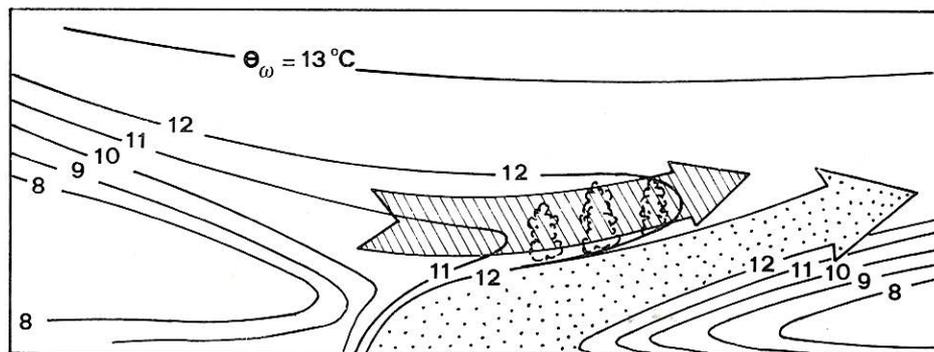


Fig. 5 - Schema in sezione verticale di una perturbazione frontale secondo BROWNING. Nella figura compare la distribuzione ipotetica di isolinee di temperatura potenziale di bulbo bagnato espresso in gradi °C

2) Situazione del tipo B

Le caratteristiche di queste situazioni sono:

- una corrente a getto da SW;
- un marcato afflusso di aria secca nei bassi strati;
- correnti da S di aria calda ed umida fino alla quota di circa 850 mbar;
- depressione con sistema frontale ed avvezione di aria fredda molto marcata da W NW a tutti i livelli fino a 500 mbar.

L'area di massima attività temporalesca coincide con la posizione del getto in un punto caratterizzato da diffluenza o da forte *shear* e dove si verifica inoltre convergenza tra aria umida e aria secca a livelli bassi e medi.

Si fa notare che la differenza tra il tipo A ed il tipo B consiste nel fatto che in quest'ultimo esistono una saccatura in quota ben delineata ed un sistema frontale.

3) Situazione del tipo C

E' caratterizzata da:

- una corrente da W oppure da una zona di *shear* ad orientamento W-E;
- afflusso di aria secca da SW particolarmente evidente a 700 mbar;
- correnti umide calde nei bassi strati che salgono al disopra del fronte quasi stazionario al suolo.

L'attività temporalesca più intensa si forma dove l'aria umida sale sul fronte quasi stazionario a causa dell'azione di sollevamento e di un aumento dell'instabilità potenziale. Questa deriva dal fatto che l'aria umida in movimento verso N viene a trovarsi sovrastata da aria sempre più fredda in quota.

4) Situazione del tipo D

E' caratterizzata da:

- un ramo di corrente a getto con marcata componente da sud;
- avvezione di aria secca e fredda nei bassi strati intorno ad una depressione in rapido sviluppo;

— afflusso da S o da SE di aria umida nei bassi strati che si inerpica sull'aria fredda;

— la depressione al suolo si muove generalmente verso nord ed è associata ad una bassa fredda a 50 mbar avente il suo centro più ad W.

Gli intensi fenomeni temporaleschi sono innescati da forte convergenza nei bassi strati e dalla instabilità potenziale dovuta alla avvezione di aria fredda in quota sull'aria umida negli strati più bassi.

5) Situazione del tipo E

E' caratterizzata da:

- una corrente ben definita in direzione W-E;
- una sorgente di aria secca identificabile in un settore caldo a 700 mbar;
- una lingua di aria calda e umida nei bassi strati in un ramo di correnti da S o da SW.

Il sollevamento frontale dell'aria calda e umida innesca l'inizio dell'attività frontale. La forte avvezione di aria fredda da NW contribuisce ad intensificare la perturbazione e così pure il riscaldamento diurno in superficie nell'ambito dell'aria umida prima che essa si inerpichi sul fronte caldo. Infine la massima attività temporalesca si forma quando s'inserisce nel sistema aria secca a livelli medi.

4.2 Trombe d'aria in Italia e tipi di situazioni sinottiche

Il problema di classificare le trombe d'aria occorse in Italia ispirandosi ai tipi di situazione descritti nel paragrafo precedente non è semplice. Bisognerebbe infatti disporre di analisi temoigrometriche particolareggiate tridimensionali dell'atmosfera che i pochi radiosondaggi disponibili sull'Italia non consentono di effettuare. Nella tav. VI viene presentato un raggruppamento in funzione delle correnti in quota.

Si nota come la maggior parte degli eventi (90%) si sono verificati con correnti in quota tra S ed W.

Un'analisi approfondita dei casi cui si riferisce la prima riga della tav. VI ha rivelato che in corrispondenza di 11 eventi si sono avuti nel corso del tempo, sintomi di passaggio frontale (raffreddamento e/o rotazione del vento in senso orario). Ciò induce a concludere che dovrebbe trattarsi in prevalenza di situazioni tipo B.

TAVOLA VI

CORRENTI IN QUOTA DA	SITUAZIONE TIPO	NUMERO DI TROMBE	FREQUENZA %
SW	A, B	14	37
W	C, E	12	32
S	D	8	21
NW	-	3	8
SE	-	1	2

Raggruppamento degli eventi in funzione delle correnti in quota

Un esame dei casi con correnti in quota da W ha confermato che anche in questa classe vi è una netta prevalenza di eventi in cui vi sono sintomi di passaggio frontale (7 casi su 12). E' molto verosimile pertanto che a questa classe diano un contributo prevalente le situazioni di tipo E. Non si riscontrano promiscuità di tipo nei casi con correnti da S. In conclusione, dagli elementi disponibili, limitandosi ad un'analisi del campo del vento e della temperatura, sembra lecito asserire che le trombe sull'Italia si verificano in prevalenza con situazioni del tipo B, E, D in seno alle correnti a componente meridionale che precedono una perturbazione frontale a carattere freddo. Nel 30% circa dei casi esaminati l'aria prefrontale in cui si è verificata la perturbazione vorticoso risultava molto secca al livello di 850 mbar fornendo una conferma diretta della osservazione b) del paragrafo 4.1.

Dall'analisi della tav. V si può anche concludere che il 90% delle trombe d'aria

che interessano l'Italia proviene (seguendo le correnti medie in quota) dalle direzioni tra S ed W con una netta preferenza per il settore SW-W (69%)¹.

5. DESCRIZIONE ED APPLICAZIONE DELL'INDICE DI STABILITÀ SWEAT

L'analisi di un gran numero di trombe d'aria occorse negli Stati Uniti ha consentito di sviluppare un indice di stabilità particolarmente adatto alla valutazione di probabilità di trombe d'aria. La sigla SWEAT che designa l'indice sta per: *Severe Weather Threat* (minaccia di condizioni intensamente perturbate). E' necessario notare che l'indice SWEAT è di concezione essenzialmente empirica e quindi non è a priori affatto garantito che esso si riveli ugualmente efficace in qualunque ragione. Ci si propone di valutare l'utilità di tale indice anche per le regioni italiane.

5.1 L'indice SWEAT

L'indice descritto diffusamente in (25) s'ispira ai seguenti criteri:

— deve essere calcolabile dai messaggi di sintesi dei dati di radiosonda che sono disponibili un'ora dopo il tempo di osservazione;

— deve poter essere calcolato dai dati disponibili, dai prodotti dei modelli numerici e dai dati correntemente archiviati. Questo facilita sia eventuali previsioni automatizzate dell'indice che studi retrospettivi;

— l'indice deve includere soltanto grandezze che vengono previste o misurate direttamente, ciò per evitare calcoli complicati di grandezze derivate.

Esso è definito dalla:

$$I = 12D + 20(T - 49) + 2f_8 + f_5 + 125(S + 0,2), \quad [3]$$

¹ Questa indicazione è utile per progettare la protezione di installazioni importanti con barriere frangivento (per esempio costituite da fasce boschive di alberi d'alto fusto).

nella quale:

I = indice SWEAT;

D = temperatura di rugiada in °C ad 850 mbar (se D è negativo il termine viene posto uguale a zero);

f8 = velocità in nodi del vento a 850 mbar;

f5 = velocità in nodi del vento a 500 mbar;

S = $\sin \Delta\phi$;

$\Delta\phi$ è la differenza tra la direzione di provenienza del vento a 500 mbar e quella del vento a 850 mbar;

T (in °C) è la somma della temperatura e della temperatura di rugiada a 850 mbar meno due volte la temperatura a 500 mbar; se T è inferiore al valore di 49, il termine 20 (T - 49) viene posto uguale a zero.

Il termine dello *shear* del vento 125 (S + 0,2) viene posto uguale a zero se uno o più delle seguenti condizioni non sono soddisfatte:

— direzione del vento a 850 mbar comprese nell'intervallo tra 130° e 250°;

— direzione del vento a 500 mbar comprese nell'intervallo tra 210° e 310°;

— direzione del vento a 500 mbar meno direzione del vento a 850 mbar positiva;

— velocità del vento sia ad 850 mbar che a 500 mbar uguali o superiori ai 15 nodi.

Si noti che nessun termine della formula può essere negativo.

5.2 Valori dell'indice SWEAT e casi di trombe d'aria

Negli Stati Uniti il valore di soglia dell'indice SWEAT che caratterizza i *tornado* è 400. In altre parole quando l'indice risulta ≥ 400 si reputa che la situazione meteorologica abbia una notevole « predisposizione » allo sviluppo delle trombe d'aria. Nell'insieme considerato di 38 casi², solo 4 trombe d'aria sull'Italia hanno raggiunto il livello SWEAT dei *tornado* degli Stati Uniti, e le informazioni disponibili confermano chiara-

mente che si tratta dei più intensi fenomeni del genere che si sono verificati in Italia. Si può concludere che l'indice SWEAT sembra avere anche sull'Italia una ottima capacità selettiva per i casi estremamente forti. La maggior frequenza di casi nell'intervallo 100-300 unitamente alla assenza di situazioni con indice superiore a 500 fanno presu-

TAVOLA VII

	0-99	100-199	200-299	300-399	400	TOTALE
TROMBE D'ARIA	1	12	11	7	4	35

Valore dell'indice SWEAT

TAVOLA VIII

	100	200	300	400	500
TROMBE D'ARIA	1	13	24	31	35

Distribuzione cumulativa dell'indice SWEAT

mere che sull'Italia fenomeni di questo tipo si presentino di minore dimensioni e intensità. La relazione empirica tra indice SWEAT e la frequenza di eventi di data intensità è mostrata nella fig. 6.

Sebbene la relazione non sia particolarmente significativa da un punto di vista

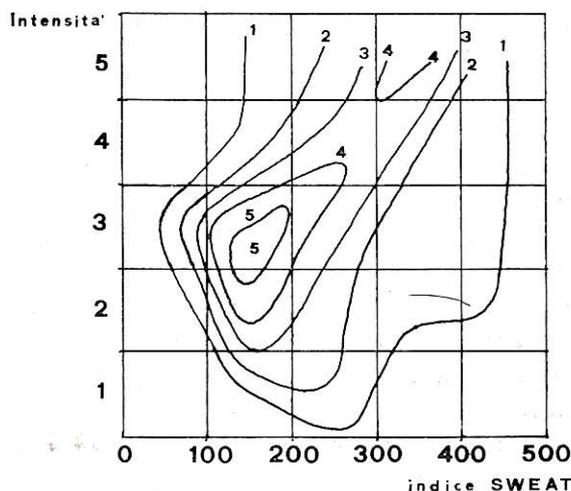


Fig. 6 - Numero di trombe d'aria in funzione dell'indice SWEAT e della intensità della tromba

² Si vedano tav. VII e VIII.

strettamente statistico vi è una chiara indicazione che ad indici SWEAT alti corrispondono fenomeni di forte intensità. Viceversa l'indice SWEAT non appare molto efficace nel discriminare tra eventi leggeri moderati e forti (corrispondenti rispettivamente alle classi di intensità 1, 2 e 3). Il confronto di analoghe relazioni con altri indici di stabilità ha indicato la netta superiorità del SWEAT nel discriminare le condizioni meteorologiche favorevoli allo sviluppo di trombe d'aria.

6. MASSIMIZZAZIONE DELLE GRANDEZZE CARATTERISTICHE DI UNA TROMBA D'ARIA

Un problema di rilevante interesse ingegneristico è quello di determinare una tromba « di progetto » con particolare riferimento agli impianti nucleari. Si chiede generalmente che questi ultimi siano progettati in maniera che una tromba di intensità estrema (detta « di progetto ») non possa determinare:

a) un rilascio pericoloso di contaminante radioattivo nell'ambiente circostante;

b) una degradazione dei sistemi di sicurezza che limitano le conseguenze di perdite accidentali di materiale radioattivo.

L'esame dei vari indici SWEAT relativi ai giorni in cui si sono avute trombe consente di determinare un valore estremo X_e di detto indice sommando i massimi verificatisi dei vari termini che compaiono nella [3], nell'ipotesi che essi siano indipendenti l'uno dall'altro.

Operando nel modo suddetto si è ottenuto un valore di X_e pari a 636.

Viceversa il massimo effettivamente verificatosi è stato, nel periodo considerato, $X_m = 470$. La relazione empirica che lega l'indice X alla intensità Y è espressa dalla retta di regressione

$$Y = 2,05 + (4,65 \times 10^{-3}) X \quad [4]$$

da cui si ha:

$$\frac{Y(X_e)}{Y(X_m)} = \frac{Y(636)}{Y(470)} = 1,18 \quad [5]$$

Poiché ci si propone di determinare le grandezze massime che caratterizzano i fenomeni di maggior intensità sembra opportuno assumere come fattore di massimizzazione 1,56. Si consideri ora che il fattore così trovato si applica all'intensità del fenomeno che è stata definita attraverso gli effetti causati dalle trombe. Tenendo conto che tali effetti sono a loro volta legati alle forze dinamiche di sollevamento del vento e che queste ultime sono proporzionali al quadrato della velocità, sembrerebbe ragionevole applicare il fattore di massimizzazione al quadrato della velocità del vento.

Nel caso del *tornado* di Venezia, come riporta JANESELLI, le raffiche del vento segnalate dall'anemografo *Dires* dell'Osservatorio Meteorologico del Lido³, al passaggio del vortice, si ritiene abbiano superato i 60 m/s.

Assumendo una velocità di 80 m/s si ha per la velocità massimizzata:

$$V_{MAX} = (80^2 \times 1,18)^{1/2} \cong 87 \text{ m/s} \quad [6]$$

Assumendo una velocità di traslazione $V_t = 18$ m/s pari a quella effettivamente osservata nel caso di Venezia, la velocità massima di rotazione V_{RMAX} risulterebbe:

$$V_{RMAX} = 87 - 18 = 69 \text{ m/s} \quad [7]$$

La forza dinamica del vento, q , è legata alla velocità del vento V dalla relazione

$$q = \rho (V^2/2) \quad [8]$$

nella quale ρ è la densità.

Questa è la formula classica usata per i progetti di struttura. Introducendo il valore della velocità massima in tale equazione risulta (usando le unità del sistema tecnico):

$$q = 0,5 \times 0,1300525 \times (87)^2 = 492,18$$

Generalmente si assume l'equazione del vento ciclostrofico nella forma:

$$\frac{dp}{dn} = -\rho \frac{V^2}{r} \quad [9]$$

³ La velocità massima effettiva non è stata registrata perché l'anemometro è andato fuori scala al passaggio della tromba.

per descrivere la variazione della pressione perpendicolare alla traiettoria delle particelle d'aria, $\frac{dp}{dn}$ in funzione della velocità del vento V e della distanza radiale r dal centro della tromba.

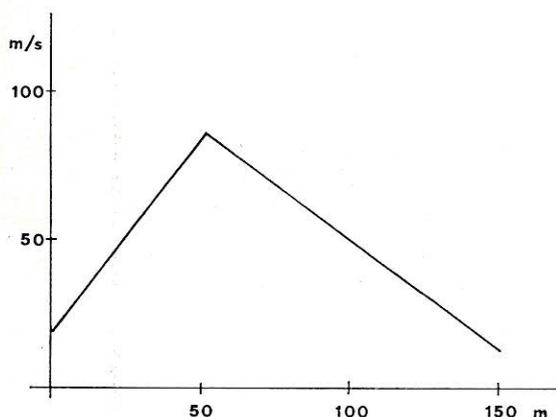


Fig. 7 - Ipotetico profilo del vento in funzione della distanza dal centro della perturbazione

Assumendo un profilo del vento come quello della fig. 7 compatibile con il raggio osservato ($r = 50$ m) e con la velocità massima stimata ($V = 87$ m/s), integrando la [9] si ottiene:

$$P_1 - P_0 = \rho \int_0^{R_1} V^2 d(\ln r) = \frac{1245 \text{ kg}_p}{\text{m}^2}, \quad [10]$$

nella quale P_1 è la pressione atmosferica in un punto a distanza $R_1 = 100$ m dal centro del vortice stesso), P_0 è la pressione nel punto centrale.

Poiché si ha interesse nel valutare gli effetti del campo mobile della pressione, si può considerare che il campo stazionario si sposti con la velocità di traslazione del vortice (18 m/s). Si avrebbe quindi nel caso in questione:

$$R_1/V_T = 100/18 = 5,5 \text{ s}$$

e pertanto una variazione di pressione di:

$$\frac{1245}{5,5} \text{ kg}_p \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} = 226,4 \text{ kg}_p \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} = 1,8 \frac{\text{pound}}{\text{inch}^2}.$$

In conclusione, sulla base degli elementi acquisiti, le caratteristiche di una tromba

d'aria di progetto per l'Italia potrebbero essere le seguenti⁴:

velocità tangenziale:	88 m/s;
velocità di traslazione	18 m/s;
caduta di pressione:	1245 kg_p/m^2 in 5 sec.

7. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

E' stato condotto uno studio sulle trombe d'aria segnalate in Italia nel periodo 1946-1973. Si è rilevata una maggior frequenza di questi fenomeni sulle regioni della costa tirrenica e sulla pianura padana. Essi appaiono di maggiore intensità sulle regioni settentrionali. Le trombe si presentano con maggior frequenza in estate sulla Valle Padana ed in autunno sull'Italia peninsulare seguendo l'andamento della instabilità convettiva.

Un'analisi sia pure grossolana degli aspetti economici indica una perdita media annua dell'ordine dei tre miliardi di lire, mentre il danno medio causato da un evento è di 280 milioni (si è adottato il valore della lira nel 1974). Si è passati poi all'esame delle condizioni meteorologiche favorevoli allo sviluppo di tali fenomeni mostrando come l'indice denominato SWEAT, sviluppato negli Stati Uniti, costituisca un possibile strumento per fondare un eventuale servizio di preallarme. Si è infine considerato il problema di determinare i valori massimi delle grandezze meteorologiche che possono presentarsi nelle trombe d'aria. Utilizzando la relazione tra intensità del fenomeno ed indice SWEAT si è proposto un coefficiente di massimizzazione per il quadrato della velocità del vento pari ad 1,56 e si sono ricavate le grandezze caratteristiche di una tromba « di progetto » per

⁴ Per un tornado di progetto valido per gli Stati Uniti d'America, T.L. DoAN ha proposto (22):
 velocità tangenziale: 133 m/sec;
 velocità di traslazione: 27 m/sec;
 caduta di pressione: 2109 kg_p/m^2 in 3 sec.

l'Italia (velocità tangenziale 88 m/s, caduta di pressione 1245 kg_p/m² in 5 sec.)

colare l'ing. C. ZAFFIRO per aver stimolato e sostenuto questo studio offrendo un'efficace cooperazione nella raccolta dei dati.

RINGRAZIAMENTO

Si desidera ringraziare il CNEN (Comitato Nazionale Energia Nucleare) ed in parti-

Si esprime gratitudine al dott. V. CANTÙ per la preziosa collaborazione offerta alla raccolta di informazioni e testimonianze sulle trombe d'aria in varie città.

BIBLIOGRAFIA

- (1) LUCRETIVS, C.T. - De Rerum Natura. *Liviana editrice*, Padova 1969, pp. 232-233
- (2) MACCHIAVELLI, N. - Tutte le opere. *Barbera editore*, Firenze 1929, pp. 557-558
- (3) DESIO, A. - Su un turbine atmosferico che investì Roma nel 1749. *Riv. Geogr. Ital.*, anno 1922, pp. 156-162
- (4) PUPPO, A. e LONGO, P. - La tromba del 24 luglio 1930 nel territorio di Treviso, Udine. *Memorie del R. Ufficio Centrale di Meteorologia e Geofisica*, serie III, v. IV, Roma 1934, pp. 5-68
- (5) CRESTANI, G. - Le trombe nel Friuli. *La Meteorologia Pratica*, Montecassino 1924, pp. 90-93 e pp. 171-179
- (6) CRESTANI, G. - Tromba marina o groppo? *La Meteorologia Pratica*, Montecassino 1924, pp. 226-227
- (7) CRESTANI, G. - Le trombe nei dintorni del Lago di Bracciano. *La Meteorologia Pratica*, Montecassino 1925, pp. 38-39
- (8) CRESTANI, G. - Le trombe in Italia nell'anno 1925. *La Meteorologia Pratica*, Montecassino 1926, pp. 152-160
- (9) CRESTANI, G. - Le trombe in Italia nel 1926. *La Meteorologia Pratica*, Montecassino 1927, pp. 113-114
- (10) CRESTANI, G. - Le trombe in Italia nel 1927. *La Meteorologia Pratica*, Montecassino 1929, pp. 16-18
- (11) CRESTANI, G. - Le trombe in Sardegna. *La Meteorologia Pratica*, Perugia 1936, pp. 49-57
- (12) SPERANZA, F. - Osservazioni e descrizione della tromba che ha interessato Venezia il 24 luglio 1939. *Riv. Met. Aer.*, a. III, n. 3, Roma 1939, pp. 26-32
- (13) BALDACCI, O. - Trombe marine al largo della costa settentrionale del Lazio - *Boll. Soc. Geogr. Ital.*, Roma 1958, pp. 507-509
- (14) BALDACCI, O. - Trombe marine in Italia. *Boll. Soc. Geogr. Ital.*, Roma 1966, pp. 3-21
- (15) BILANCINI, R. - I tornado e le trombe marine. *Riv. Met. Aer.*, a. XIX, n. 2, Roma 1959, pp. 48-49
- (16) BILANCINI, R. - Ancora sui tornado e sulle trombe marine *Riv. Met. Aer.*, a. XX, n. 1, Roma 1960, pp. 54-55
- (17) BILANCINI, R. - Ancora sulla origine delle trombe. *Riv. Met. Aer.* a. XXII, n. 2, Roma 1962, pp. 55-57
- (18) JANESELLI, R. - Il tornado che colpì la laguna di Venezia l'11 settembre 1970. *Annali di Geofisica*, v. XXV, n. 3, Roma 1972, pp. 407-432
- (19) BORCHI, S. e MINAFRA, N. - La tromba d'aria abbattutasi su Venezia la sera dell'11 settembre 1970. Indagine su alcuni fattori concomitanti alla sua formazione. *Riv. Met. Aer.*, v. XXXII, n. 2, Roma 1972, pp. 133-145
- (20) VISCONTI, I. - Indagini riguardanti la tromba d'aria abbattutasi nella zona di Budrio (Bologna) il giorno 11 novembre 1971. *Riv. Met. Aer.*, v. XXXV, n. 2, Roma 1975, pp. 113-120
- (21) MICHAUD, L.M. - Proposal for the Use of a Controlled Tornado-like Vortex to Capture the Mechanical Energy Produced in the Atmosphere from Solar Energy. *Bull. Am. Met. Soc.* v. 56, n. 5, Boston 1975, pp. 530-533
- (22) DOAN, T.L. - Tornado Considerations for Nuclear Power Plant Structures. *Nuclear Safety*, v. 11, n. 4, 1970
- (23) THOM, H.E.S. - Tornado Probabilities. *Mont. Weath. Rev.*, Washington D.C., 1963, pp. 730-736
- (24) FAWBUSH, E.J., MILLER, R.C., STARRETT, L.G. - An Empirical Method for Forecasting Tornado Development. *Bull. Amer. Met. Soc.*, v. 32 n. 1, Boston 1951, pp. 1-9
- (25) MILLER, R.C. - Notes on Analysis and Severe-Storm Forecasting Procedures. *Air Weather Service (MAC), USAF* 1972
- (26) BROWNING, K.A. - Radar Measurements of Air Motion Near Fronts, Part 2: Some Categories of Frontal Air Motion. *Weather*, 26, Londra 1971, pp. 320-340