

2 - ELEMENTI DI CLIMATOLOGIA

2.1 - Meteorologia e climatologia

La pioggia, la neve, la brina, la grandine, il vento, la nebbia,... sono fenomeni atmosferici dovuti a scambi di energia tra masse d'aria con caratteri fisici diversi (umidità, temperatura, pressione,...). Esse provengono dalle varie parti del globo, dove hanno ricevuto disuguali quantità di calore. È la diversità di riscaldamento da parte del Sole (maggiore all'equatore e minore ai poli) che determina squilibri termici a livello dell'atmosfera. Quindi si hanno spostamenti di masse d'aria che tendono a riportare condizioni di equilibrio. Altrimenti la temperatura sarebbe più elevata ai tropici e più bassa ai poli. I caratteri della circolazione generale dell'atmosfera, le diverse modalità e intensità dei fenomeni al suolo ed in quota, la descrizione puntuale del “tempo” di un determinato momento e il tentativo di predirne l'evoluzione, sono argomenti della **meteorologia**: *scienza che studia il tempo atmosferico* (**schede 1.1 e 1.2**). Il fine della meteorologia è quello di “costruire un modello” della circolazione generale dell'atmosfera che tenga conto delle variabili che su essa possono influire, allo scopo di predire, sulla base della situazione meteorologica passata e presente, l'evoluzione del tempo futuro (previsioni) con crescente attendibilità. Le *previsioni del tempo* sono importanti per la programmazione di trasporti via aerea o marittima, per prevenire il dissesto idrogeologico (conseguente ad intense precipitazioni) e i danni all'agricoltura, ecc....

Quasi tutti i satelliti artificiali sono muniti di apparecchiature in grado di “fotografare”, in un determinato istante, la situazione meteorologica di una regione. La superficie terrestre è “coperta” da una fitta rete di stazioni che registrano milioni di dati riguardanti i parametri meteorologici al suolo. Palloni sonda controllano la situazione dell'atmosfera alle varie altitudini. In Italia la raccolta e l'elaborazione di tali dati è affidata al SERVIZIO METEOROLOGICO dell'AERONAUTICA, che collabora attivamente con enti meteorologici di tutta l'Europa e di buona parte del Mondo.

Alzarsi al mattino, vedere il “tempo che fa” per predirne l'evoluzione durante la giornata, vuol dire “fare della meteorologia”. Decidere di andare in vacanza in montagna nel mese di luglio perché si pensa che, in genere, è il più caldo e il meno piovoso dell'estate, vuol dire “fare della climatologia”. La **climatologia** è una scienza affine alla meteorologia, il cui obiettivo principale è quello di definire il *tempo medio* di una regione, come sintesi di analisi statistiche della successione di eventi meteorologici che hanno caratterizzato quella regione nel passato. La climatologia una scienza storica: non cerca di prevedere il tempo che farà, ma studia il *tempo che è stato*, andando indietro negli anni, nei decenni ed anche nei secoli. La climatologia utilizza, come strumento fondamentale, la *statistica*. Questa fornisce preziosi risultati se è grande il numero di dati a disposizione (rilevati alle stazioni meteorologiche e riguardanti la temperatura dell'aria, le precipitazioni, ecc....). I climatologi raccomandano che il *periodo di osservazione*, durante il quale sono state compiute le rilevazioni, presso una o più stazioni meteorologiche, non sia inferiore a $25 \div 30$ anni. In Italia, i dati che si utilizzano per gli studi di climatologia, oltre a quelli rilevati dal Servizio Meteorologico dell'Aeronautica, si ricavano dagli *Annali Idrologici* pubblicati, a partire dal 1913, dal SERVIZIO IDROGRAFICO e MAREOGRAFICO ITALIANO.

Le alluvioni, dovute ad eventi meteorologici eccezionali (che recano danni a persone, ai manufatti, all'agricoltura ed all'economia,...), le siccità, l'uso più corretto e razionale delle risorse idriche,... dimostrano l'importanza dello studio e della programmazione di interventi sul territorio atti a limitare sempre più efficacemente i danni derivati da “capricci meteorologici”, prevedibili statisticamente. Gli eventi meteorologici intensi, sempre più spesso, innescano le manifestazioni del *dissesto idrogeologico*. I progetti di interventi di protezione sul territorio non possono prescindere da un accurato studio statistico della successione degli eventi meteorologici normali ed eccezionali che, storicamente, hanno caratterizzato il clima. Le applicazioni delle analisi climatiche sono numerose: dal ripristino di argini di corsi d'acqua alla sistemazione della rete idrica, dal calcolo e gestione delle risorse idriche al dimensionamento di fogne e collettori. Lo sfruttamento agricolo del territorio è connesso con le caratteristiche del clima che, tra l'altro, ha notevole influenza sui processi di formazione del suolo. La ricerca scientifica nel settore climatologico è un aspetto fondamentale dello studio e della tutela della Natura, una necessità improrogabile conseguente ai gravi guasti ambientali perpetrati soprattutto negli ultimi decenni.

2.2 - Le regioni climatiche

I diversi e molteplici aspetti del tempo atmosferico (temperatura dell'aria, pioggia, neve, grandine, nebbia, vento,...) non concorrono separatamente a costituire il clima di un qualsiasi località della Terra, ma si combinano tra loro in modo molto vario. Considerando solo i valori medi dei diversi parametri misurati per lungo tempo, le possibili combinazioni sono così numerose da ritenere praticamente impossibile per due luoghi della Terra avere

un clima identico. Esiste un numero illimitato di climi realmente esistenti e distinguibili; pertanto diventa necessaria un raggruppamento in tipi (classificazione). Le variabili che vengono prese in maggior considerazione sono le temperature e le precipitazioni, ma ciò non rende più facile individuare semplici criteri di classificazione. Si potrebbe considerare unicamente la temperatura media annua; due località diverse possono presentare uguale valore, ma una con valori stagionali molto simili e l'altra con valori estremi molto diversi, la cui media è comunque la stessa; quindi due località caratterizzate da grande differenza per l'escursione termica, potrebbero essere classificate nello stesso clima. Si potrebbe utilizzare, come criterio principale, il numero medio di giorni in cui si verificano temperature uguale o inferiori allo zero, limite biologico fondamentale; oppure si potrebbe utilizzare, come riferimento, la temperatura di 15 °C, il valore medio annuo dell'intero pianeta. Vi sono numerosi sistemi per classificare i climi della Terra, ciascuno dei quali presenta vantaggi, ma nessuno può definirsi il migliore. Il fine è lo stesso: ridurre gli innumerevoli climi locali a un numero relativamente esiguo di tipi fondamentali entro i quali i singoli elementi presentino caratteri in comune, suddividendo la Terra in **regioni climatiche**, cioè porzioni della superficie del nostro pianeta entro le quali i climi sono simili.

PARMENIDE di Elea (500 a.C.), prese come linee divisorie i tropici e i circoli polari e individuò una zona torrida centrale, due zone temperate con clima mite con sensibili oscillazioni termiche stagionali e due zone fredde. La classificazione di Parmenide è una ripartizione climatica secondo fasce di latitudine. Del resto sembra ovvio che la trama di fondo della distribuzione dei climi sulla Terra debba avere una base zonale in funzione della diversa intensità della radiazione solare. Una simile impostazione si complica per la diversa distribuzione delle terre emerse e dei mari, per l'orografia (montagne alle basse latitudini possono avere un clima analogo alle pianure delle alte latitudini) e per altri numerosi fattori. Una ripartizione dei climi basata solo sulle fasce latitudinali è insufficiente. Il geografo tedesco A. SUPAN (1879) utilizzò come criteri fondamentali i seguenti valori termici:

- la temperatura media annua pari a 20 °C, come limite fra i climi caldi e quelli temperati;
- la temperatura di 10 °C nel mese più caldo; tale isoterma coincide con il limite settentrionale delle foreste.

L'Autore ottenne una delimitazione di tre zone fondamentali della Terra (calda, temperata e fredda), più aderente alla realtà, ma ancora troppo schematica. Fra i numerosi tentativi di classificazione fondati prevalentemente sulla temperatura dell'aria, merita di essere ricordato quello di W.P. KOPPEN (1846 ÷ 1940) che, nel 1884, propose uno schema più articolato; esso individua cinque tipi climatici fondamentali:

- **clima tropicale**, in nessun mese il valore termico medio scende sotto i 20 °C;
- **clima subtropicale**, 4 ÷ 11 mesi con valore termico medio superiore a 20 °C; nei rimanenti mesi non scende sotto i 10 °C;
- **clima temperato**, meno di 4 mesi con temperatura media inferiore a 20 °C; 4 ÷ 12 mesi con temperatura compresa fra 10 e 20 °C e meno di 4 mesi con temperatura inferiore a 10 °C;
- **clima freddo**, 1 ÷ 4 mesi con temperatura media fra 10 e 20 °C e i restanti mesi con media inferiore a 10 °C;
- **clima polare**, tutti i mesi hanno un valore termico medio inferiore a 10 °C.

Anche i criteri proposti da Koppen sono criticabili. Lo stesso Autore propose modifiche al suo modello e dopo la sua scomparsa i suoi collaboratori lo perfezionarono ulteriormente. I dati in **tab. 2.1** sono sufficienti per la classificazione dei climi di numerose località del Mondo nei cinque tipi (e sottotipi) proposti da Koppen (essi possono essere convenientemente utilizzati per rappresentare i climogrammi termo - pluviometrici; **scheda 2.3**).

Numerosi altri ricercatori (DE MARTONNE nel 1926, THORNTWHAITE dal 1948, FLOHN nel 1950, GAUSSEN nel 1952, TURC nel 1953 e tanti Altri) hanno proposto schemi di classificazione dei climi. Tuttavia sembra più che sufficiente ricordare quello proposto da Koppen, tanto più che ad esso assomigliano tutti gli altri, in quanto le differenze non sono facilmente distinguibili in carte a piccolissima scala dove, come sulle pagine di un atlante, si pretende di rappresentare tutta la Terra.

Tab. 2.1 - Valori [°C] medi mensili ed annui delle temperature "T" [°C], delle precipitazioni "P" [mm] e dell'escursione media annua "E" [°C] di alcune località in diverse parti del mondo.													
Clima umido equatoriale. Uaupés (Brasile), presso l'equatore (83 m s.l.m.; E = 1,6 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	26,9	26,7	26,7	26,5	26,4	25,8	25,3	26,1	26,5	26,6	26,8	26,8	26,4
P	262	196	254	269	305	234	224	183	130	175	183	264	2.679
Clima monsonico. Cochín (India), presso l'equatore (3 m s.l.m.; E = 3,2 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	26,9	27,8	28,9	29,6	28,9	26,7	26,1	26,4	26,6	26,8	27,5	27,2	27,5
P	23	20	51	124	297	724	592	353	340	196	170	41	2.931

Clima secco tropicale umido. Saigon (Vietnam), sopra l'equatore (9 m s.l.m.; E = 3,6 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	26,4	27,2	28,6	29,7	28,9	27,8	27,5	27,5	27,2	27,2	26,7	26,1	27,8
P	15	3	13	43	221	330	315	335	269	260	114	56	1.974
Clima tropicale desertico. Cairo (Egitto), 30° Lat. Nord (116 m s.l.m.; E = 15,0 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	13,3	14,7	17,5	21,1	25,0	27,5	28,3	28,2	26,1	24,2	20,0	15,0	21,7
P	5	4	3	2	2	1	0	0	1	1	1	3	23
Clima tropicale steppico desertico. Bushire (Iran), 30° Lat. Nord (4 m s.l.m.; E = 18,3 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	14,2	15,0	18,9	23,3	28,1	30,3	31,9	32,5	30,3	26,7	21,4	16,4	24,1
P	74	46	20	10	5	0	0	0	0	3	41	81	280
Clima freddo desertico. Santa Cruz (Argentina), 50° Lat. Sud (12 m s.l.m.; E = 13,6 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	15,0	15,0	12,5	8,9	5,6	1,9	1,4	3,9	6,4	9,2	11,1	13,1	8,9
P	15	10	10	15	12	13	12	14	10	11	12	17	151
Clima freddo steppico. Ankara (Turchia), 40° Lat. Nord (861 m s.l.m.; E = 23,1 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	-0,3	1,1	5,0	10,8	16,1	18,6	22,5	22,8	18,3	13,6	8,3	2,2	11,7
P	33	30	32	34	48	25	13	10	18	23	30	48	344
Clima umido subtropicale. Nagasaki (Giappone), 32° Lat. Nord (133 m s.l.m.; E = 21,4 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	5,8	6,1	9,4	14,4	18,3	21,9	26,1	27,2	23,6	18,3	13,3	8,1	16,1
P	71	84	124	185	193	312	257	249	175	114	94	81	1.941
Clima costiero marino (Caldo estivo). Nuova Zelanda, 37° Lat. Sud (26 m s.l.m.; E = 8,3 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	19,4	19,2	17,2	16,4	13,6	11,7	11,5	11,1	12,5	14,2	15,6	17,5	15,0
P	79	81	94	97	127	137	145	117	102	99	91	79	1.247
Clima costiero marino (freddo estivo). Kodiak (Alaska), 54° Lat. Nord (4 m s.l.m.; E = 13,7 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	-0,6	0,0	0,6	3,3	6,1	9,7	12,5	13,1	10,3	6,1	2,2	0,3	5,3
P	124	114	99	94	150	119	86	130	135	183	152	147	1.534
Clima mediterraneo. Gerusalemme (Israele), 32° Lat. Nord (757 m s.l.m.; E = 15,3 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	8,9	9,4	13,1	16,4	20,6	22,5	23,9	24,2	23,1	21,1	16,4	11,1	17,2
P	137	127	64	28	3	1	0	0	2	13	71	86	532
Clima umido continentale (caldo estivo). Corea, circa 37° Lat. Nord (70 m s.l.m.; E = 28,6 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	-3,3	-1,7	3,3	10,0	15,3	20,3	23,9	25,3	20,3	14,4	6,4	-0,8	11,1
P	18	20	30	66	84	99	277	224	109	46	36	28	1.036
Clima subartico continentale. Quebec (Canada), 50 Lat. Nord (376 m s.l.m.; E = 35,0 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	-18,6	-16,4	-12,2	-2,2	6,7	13,1	16,4	15,0	10,0	3,1	-5,6	-14,7	-0,6
P	58	51	66	69	74	109	114	130	137	102	86	69	1.064
Clima subartico marino. Isole Falkland, quasi 52 Lat. Sud (2 m s.l.m.; E = 7,5 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	9,4	8,9	8,1	6,1	3,9	2,2	1,9	2,2	3,9	5,3	6,9	8,1	5,6
P	76	69	65	63	58	53	51	48	38	43	51	71	681
Clima della Tundra. Upernivik (Groenlandia), 73 Lat. Nord (18 m s.l.m.; E = 28,7 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	-21,7	-23,1	-20,8	-13,9	-3,6	2,2	5,0	5,6	0,8	-3,9	-9,7	-16,7	-8,3
P	10	13	18	15	15	13	23	25	28	30	28	15	234
Clima della calotta polare. Eismitte (Groenlandia), 71 Lat. Nord (3.000 m s.l.m.; E = 35,0 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	-41,7	-47,2	-40,0	-31,9	-21,1	-16,7	-12,2	-18,3	-22,2	-35,8	-38,3	-42,8	-30,6
P	15	10	8	5	3	2	4	8	9	11	13	25	111
Clima montano. La Paz (Bolivia), 16 Lat. Sud (3.658 m s.l.m.; E = 4,5 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	12,8	12,2	11,7	11,1	10,0	8,9	8,3	9,4	10,6	11,1	11,7	12,2	6,6
P	114	107	66	33	13	8	10	13	28	41	48	94	574

2.3 - Il clima in Italia

Il clima è comunemente definito come l'insieme delle condizioni meteorologiche medie che caratterizzano una località. La temperatura dell'aria, la pressione atmosferica, l'umidità, le precipitazioni,... sono gli *elementi del clima*; essi si condizionano vicendevolmente e sono molto variabili nelle diverse zone del mondo; infatti la classificazione dei climi è una disciplina molto complessa. Si potrebbe pensare che la classificazione dei climi in una regione molto limitata della Terra come la penisola italiana, sia più facile, ma la realtà è ben diversa. Sappiamo che gli elementi del clima sono, in Italia, fortemente influenzati da diversi fattori; fra essi ricordiamo:

- *latitudine*; l'Italia è molto sviluppata nel senso dei meridiani; i suoi limiti sono compresi tra 37° Lat. Nord e 47° Lat. Nord;
- *altitudine*; abbiamo aree costiere che si affacciano sul mare e montagne che superano i 4.000 m s.l.m.;
- *continentalità*; il clima delle zone costiere è molto influenzato dalla massa marina con basse escursioni termiche; viceversa le ampie pianure interne, come la pianura Padana centrale ed occidentale, sono poco influenzate dal mare e fortemente condizionate dalle nebbie nella stagione invernale (**fig. 2.1**);
- *l'esposizione*; molte montagne sono esposte a Nord e quindi caratterizzate da una minore radiazione solare; alcuni versanti delle Alpi orientali sono direttamente esposti a Est o a Nord - Est risultando quindi più freddi; al contrario il versante meridionale dell'Appennino ligure è esposto a Sud; la zona della Riviera, pur trovandosi nell'Italia settentrionale, presenta temperature invernali particolarmente miti.

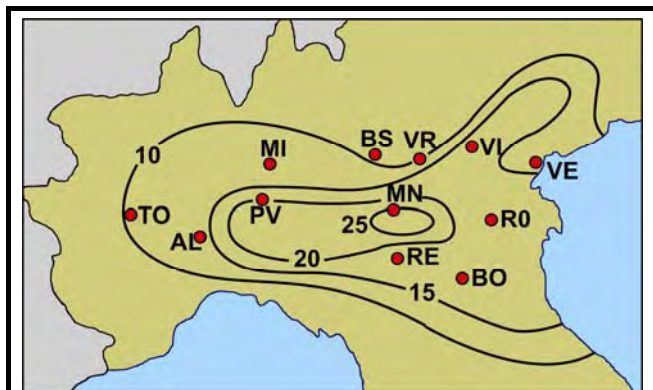


Fig. 2.1 - Frequenze (numero medio annuo di giorni) della nebbia sulla valle Padana nella stagione invernale.

Vi sono località alpine che presentano precipitazioni abbondanti in tutte le stagioni fino a valori annui che sfiorano i 2.000 mm (Gran S. Bernardo; **tab. 2.2**), ma ve ne sono altre nel meridione che non raggiungono i 600 mm (Reggio Calabria; **tab. 2.2**) e dove le precipitazioni sono prevalentemente concentrate nel semestre freddo quando minori sono le esigenze irrigue e potabili. Le temperature medie annue oscillano da valori negativi, presso le località alpine più elevate, fino a medie di quasi 18 °C come a Palermo. Infine bisogna considerare l'esposizione ai venti predominanti nel bacino del Mediterraneo. Freschi e molto umidi quelli occidentali, più freddi ed umidi i venti Nord - occidentali; ancora più freddi ma secchi quelli orientali e Nord - orientali. I venti meridionali sono temperati o addirittura caldi e molto umidi (**fig. 2.2**). Un approfondimento dei climi italiani è possibile mediante il confronto dei climogrammi termo - pluviometrici di più località (**scheda 2.3**).

Tab. 2.2 - Valori medi mensili ed annui delle temperature "T" [°C], delle precipitazioni "P" [mm] e dell'escursione media annua "E" [°C] di alcune località italiane.

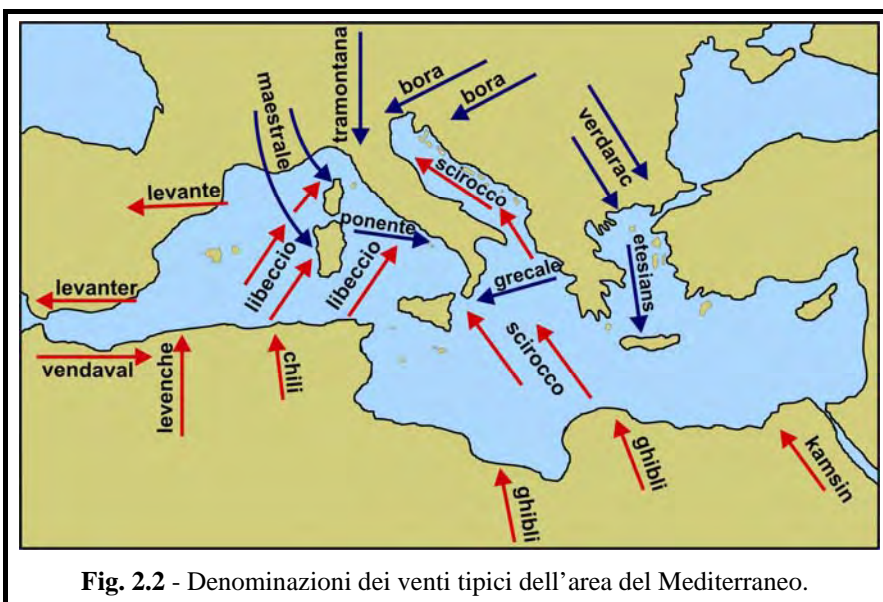
ZONA ALPINA - Gran S. Bernardo (2.467 m s.l.m.; E = 16,1 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	-9,2	-9,0	-7,1	-4,3	-0,2	4,0	6,9	6,9	4,3	-0,5	-4,9	-7,9	-1,8
P	176	157	157	215	183	139	129	138	154	178	200	173	1.999
ZONA ALPINA - Cortina d'Ampezzo (1.275 m s.l.m.; E = 18,1 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	-2,3	-1,3	1,8	5,2	9,1	13,5	15,8	15,4	12,7	7,6	2,8	-1,6	6,6
P	51	47	82	138	132	128	148	117	115	119	116	59	1.252
ZONA PADANA - Milano (121 m s.l.m.; E = 22,9 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	1,9	3,8	8,6	13,2	17,3	22,2	24,8	23,9	20,3	13,7	8,5	3,0	13,4
P	57	55	69	78	101	80	59	68	74	93	97	75	906
ZONA PADANA - Torino (238 m s.l.m.; E = °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	0,9	3,3	8,3	12,9	17	21,2	23,4	22,8	19	12,9	6,9	2,4	12,5
P	32	37	58	93	113	84	60	66	68	73	79	54	817
ZONA PADANA - Bologna (55 m s.l.m.; E = 23,5 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	2,5	3,4	8,6	13,8	18,1	23,3	26,0	25,4	21,5	15,2	9,7	3,9	14,3
P	44	53	49	47	57	43	33	28	51	82	72	57	616

ZONA DELLA RIVIERA - Genova (21 m s.l.m.; E = 16,6 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	8,4	8,7	11,5	14,5	17,8	21,9	24,6	25,0	22,8	18,1	13,3	9,5	16,3
P	92	93	96	95	85	53	25	60	93	151	185	122	1.147
ZONA APPENNINICA - Urbino (451 m s.l.m.; E = 20,4 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	2,5	4,1	6,9	10,8	14,9	19,4	22,9	22,2	18,4	12,9	7,7	4,1	12,2
P	56	69	72	72	69	59	33	49	111	91	91	117	889
ZONA APPENNINICA - Potenza (826 m s.l.m.; escursione media annua = 18,3 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	3,5	3,7	6,6	10,5	14,4	19,3	21,8	21,0	18,8	14,1	10,1	5,3	12,5
P	102	79	65	64	70	49	26	30	58	71	99	103	816
ZONA ADRIATICA - Trieste (11 m s.l.m.; E = 14,3 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	5,3	4,8	8,6	12,9	17,1	21,2	24,0	23,8	20,8	15,6	11,0	6,3	14,3
P	61	50	65	77	87	91	69	70	94	113	119	67	963
ZONA ADRIATICA - Ancona (50 m s.l.m.; escursione media annua = 15,1 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	5,7	5,8	9,4	13,6	17,6	22,3	24,9	24,3	21,1	16,6	12,6	7,4	15,1
P	68	39	46	57	50	51	28	31	59	101	62	51	643
ZONA ADRIATICA - Bari (12 m s.l.m.; escursione media annua = 16,1 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	8,4	8,5	10,8	13,9	17,5	21,9	24,5	24,3	21,7	18,2	14,8	10,2	16,2
P	39	39	50	35	38	32	19	24	40	111	110	67	604
ZONA TIRRENICA - Firenze (50 m s.l.m.; E = 19,4 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	5,6	5,8	9,9	13,3	17,4	22,1	25,0	24,5	21,2	15,8	11,2	6,0	19,4
P	68	65	68	61	69	54	23	36	63	114	106	81	808
ZONA TIRRENICA - Roma (30 m s.l.m.; E = 16,5 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	7,5	8,5	10,0	13,0	17,0	21,0	23,5	24,0	21,0	16,5	11,5	8,5	15,2
P	103	99	68	65	48	34	23	33	68	94	130	111	876
ZONA TIRRENICA - Napoli (149 m s.l.m.; E = 16,1 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	8,7	8,7	11,4	14,3	18,1	22,3	24,8	24,8	22,3	18,1	14,5	10,3	16,5
P	102	82	67	51	49	31	13	28	75	114	125	114	851
ZONA CALABRO - INSULARE - Reggio Calabria (15 m s.l.m.; E = 15,2 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	11,1	11,1	13,2	15,4	19,0	23,1	25,9	26,3	23,9	19,3	17,3	13,2	18,2
P	91	63	51	38	25	14	4	14	38	62	96	92	588
ZONA CALABRO - INSULARE - Palermo (71 m s.l.m.; E = 15,0 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	10,3	10,4	13,0	16,2	18,7	23,0	25,3	25,1	23,2	19,9	16,8	12,6	17,9
P	111	97	67	42	31	14	6	15	44	91	94	153	765
ZONA CALABRO - INSULARE - Cagliari (73 m s.l.m.; E = 15,9 °C).													
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
T	9,9	10,3	12,9	15,3	18,6	22,8	25,8	25,7	23,3	19,5	15,6	11,8	17,6
P	70	59	59	45	38	11	6	7	38	64	73	80	668

2.4 - Il clima cambia

Il vulcano Agung (isola di Bali, Indonesia) ebbe una violenta eruzione nel marzo del 1963; la finissima polvere scagliata in alto venne sparsa dai venti nell'atmosfera. Le particelle di quella polvere formarono un velo che intercettò parte della radiazione solare, il che determinò, secondo le stime dei meteorologi, un raffreddamento dell'intero globo di circa un terzo di grado negli anni 1964 e 1965. Quella del vulcano Agung è stata una delle eruzioni più intense. Secondo il climatologo LAMB il quel "velo di polvere" era circa l'80 % di quello provocato dalla ben nota eruzione del Krakatau (Indonesia) del 1883. Una grande eruzione vulcanica influenza la macchina del tempo per alcuni anni, almeno sino a quando la polvere non si è deposta al suolo.

L'atmosfera di una grande città come Milano (a causa dell'attività industriale, del “fumo” prodotto dai veicoli, dal riscaldamento e da altre fonti) è inquinata (*smog*) ed è ricca di un “velo di polvere” che, analogamente a quella prodotta da un vulcano, determina una diminuzione della temperatura. Tale fenomeno, nelle grandi città, si è manifestato e si sta manifestando, ma ciò è in contrasto con i dati relativi ai rilevamenti della temperatura dell'aria effettuati, fin dall'inizio del 1900, con stazioni meteorologiche che hanno funzionato regolarmente nei principali centri abitati. Infatti alla fine del 1800, la temperatura era leggermente più bassa, anche se l'atmosfera era presumibilmente più pulita.



Un altro fenomeno di inquinamento atmosferico che interessa l'intero globo è la liberazione di anidride carbonica (CO_2). Anche se questo gas costituisce una piccola frazione (meno di 1/1.000) dei gas della atmosfera, è molto importante nel determinare la temperatura terrestre, in quanto cattura una parte del calore emesso dalla Terra (producendo il cosiddetto **effetto serra**). Le attività umane, particolarmente nelle aree urbanizzate e la deforestazione, hanno già aumentato la CO_2 nell'atmosfera del 20 % dal 1950 (**fig. 2.3**) e si stima che nei prossimi anni tale percentuale salirà ancora in modo significativo. In tale situazione, secondo numerosi

ricercatori, si determina un riscaldamento dell'atmosfera; ciò potrebbe ridurre le masse di ghiaccio ai poli e sollevare il livello dei mari, oppure potrebbe influire sul clima soprattutto delle zone temperate, inaridendole.

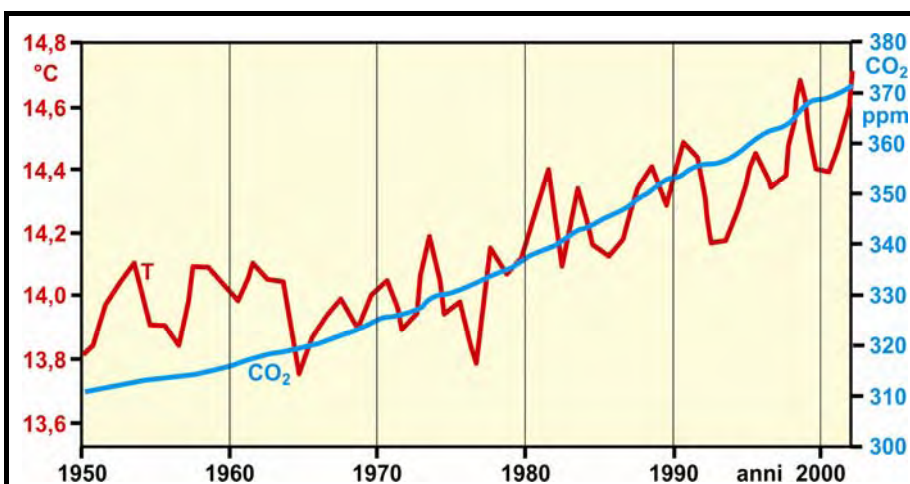


Fig. 2.3 - Correlazione tra gli incrementi della temperatura media annua globale dell'aria a livello del suolo [$^{\circ}\text{C}$] ed il tasso di anidride carbonica (CO_2) espresso in parti per milione [ppm].

Da alcuni decenni si registra un evidente riscaldamento globale della Terra. Dal 1860 a oggi, la temperatura media è cresciuta di circa un grado (da 13,5° C a 14,5 °C) e almeno metà di questo incremento si è avuto negli ultimi 20 anni.

peratura, rispetto al 1860, compresa fra 4 e 6,5 °C. Un aumento senza precedenti nella storia dell'uomo, se si pensa che al culmine dell'ultima era glaciale, 18.000 anni fa, la Terra era circa cinque gradi più fredda di ora e che il riscaldamento planetario da quell'epoca a oggi si è verificato in maniera da 10 a 100 volte più lenta. Attualmente ci troviamo da più di 10.000 anni in un cosiddetto *periodo interglaciale*, un'epoca più calda tra due ere glaciali, ma l'attività umana potrebbe alterare, per la prima volta nella lunga storia terrestre, il consueto regime naturale.

periodo più recente può essere stata determinata da un cambiamento del clima a livello dell'intero globo. Oppure, semplicemente, siamo di fronte a oscillazioni climatiche che rientrano in una normale distribuzione statistica di una qualunque successione di eventi naturali.

Possiamo considerare un'altra ipotesi, più semplice, ma non meno attendibile: l'*inquinamento termico*. Con questa espressione si fa riferimento all'enorme quantità di energia degradata (calore) liberata nell'atmosfera in conseguenza di una intensa attività antropica. Questo fenomeno è maggiore nelle grandi città (le cosiddette "isole di calore") che costituiscono un insieme di fonti di inquinamento termico: riscaldamento, energia termica dissipata dai motori, ecc...

Nelle ore notturne la temperatura si abbassa perché il terreno irraggiando si raffredda. La perdita di calore è tanto più pronunciata quanto più il cielo è sgombro di nubi. La temperatura si abbassa molto meno in città che in campagna, soprattutto con il "bel tempo". Questo fenomeno è tanto maggiore quanto più gli edifici sono alti e ravvicinati. Infatti i muri delle case irraggiando in tutte le direzioni, anche verso il basso, svolgono le stesse funzioni delle nubi. La differenza di temperatura tra campagna e città aumenta con l'espansione edilizia.

L'analisi della successione cronologica delle temperature registrate da stazioni meteorologiche lontane dai maggiori centri abitati ha messo in evidenza una tendenza all'aumento della temperatura dalla fine del 1800 fino al periodo attuale, in accordo con quanto si verificherebbe nelle città. Ma ciò rappresenta una contraddizione in quanto in aperta campagna non vi è stata una grossa espansione edilizia e industriale. È difficile formulare ipotesi di inquinamento termico e/o chimico dell'atmosfera immediatamente sovrastante, a meno che non si consideri il fatto che tali dispersioni inquinanti non rimangono circoscritte in una zona ristretta, ma si diffondono influenzando il clima anche nelle aree più o meno vicine. Oppure le compromissioni locali dell'atmosfera determinano degli effetti limitati e inferiori a quelli di grande scala che coinvolgono l'intero pianeta e pertanto il riscaldamento registrato dagli studi climatici sulle grandi città e sulle zone meno abitate rientra nel contesto generale dell'incremento di temperatura per l'effetto serra su tutta la Terra secondo le teorie oggi più accreditate.

Non è possibile fornire una risposta univoca ed esauriente sull'apparente modificazione climatica che coinvolgerebbe il mondo intero; abbiamo avanzato delle ipotesi che andrebbero "controllate" con ulteriori ricerche. È possibile a questo punto arrivare ad una conclusione assai importante: **il clima di una regione (o della Terra) può subire, nel corso della storia, fluttuazioni determinate da cause naturali o da fonti di inquinamento atmosferico**. Finché abbiamo dati riguardanti rilevazioni di stazioni meteorologiche, si può tentare di stimare l'entità e la durata di tali fluttuazioni, ma più indietro nel tempo, in epoche storiche, non si hanno dati sperimentali disponibili. È necessario, se si vuole percorrere a ritroso la storia del clima, fare riferimento a prove indirette quali documenti storici. Oppure si può ricorrere a metodi di ricerca cercando sulla superficie della Terra testimonianze della natura e del paleoclima di una data epoca (**schede 2.4 ÷ 2.9**).

2.5 - Le glaciazioni

Vi sono diverse tecniche di indagine sul clima del passato. Ciascuna di esse non fornisce risultati precisi ma occorre correlare tutte le informazioni dei diversi tipi di indagine in modo che non siano fra loro in contraddizione. Ancora oggi si aggiungono dati alle nozioni già acquisite che spesso mettono in crisi modelli e teorie che sembravano prima molto probabili. Facendo riferimento alle regioni italiane (le Alpi in particolare) e non volendo entrare nel dettaglio di una precisa cronologia, faremo riferimento a cinque grandi periodi freddi che hanno caratterizzato l'era Quaternaria. Ci limiteremo a indicare l'età (la più probabile secondo la maggior parte dei ricercatori) dell'inizio del primo di questi periodi freddi: *due milioni di anni fa*. Tale limite può essere fatto coincidere con quello inferiore dell'**era Quaternaria** (o **Neozoico**) suddivisa nei periodi **Pleistocene** e **Olocene** (gli ultimi 12.000 anni quest'ultimo cioè dalla fine dell'ultima glaciazione).

Le cinque fasi fredde (**glaciazioni**) che hanno caratterizzato il Pleistocene sono denominate, a partire dalla più antica (iniziata circa 2 milioni di anni fa): **Donau, Gunz, Mindel, Riss** e **Würm**. Fra una glaciazione e l'altra il clima era decisamente più mite (anche più caldo dell'attuale): periodi **interglaciali**. Attualmente stiamo vivendo in un periodo **postglaciale** che segue il Würm (l'ultima glaciazione). Nei periodi interglaciali il clima era anche più caldo dell'attuale e l'ambiente nella Pianura Padana, sulle colline e sulle montagne era decisamente diverso, simile a quello attuale delle regioni subtropicali. Le grandi masse di ghiaccio sulle montagne, dei poli e della Groenlandia erano ridotte, il livello marino assai più alto e le terre emerse meno estese (**fig. 2.4/A**).

Durante i periodi più freddi la temperatura della superficie terrestre era più bassa dell'attuale. Le grandi masse di ghiaccio dei poli raggiunsero la massima estensione invadendo parte del continente europeo e di quello Nordamericano (**fig. 2.5**). La conseguenza fu un generale abbassamento del livello marino e maggiore estensione delle terre emerse (**fig. 2.4/B**). L'ambiente naturale delle nostre regioni settentrionali era simile, come aspetto, a

quello attuale delle regioni fredde del Nord - Est europeo, con estese foreste di conifere in pianura alternate ad ampi spazi con vegetazione simile alla steppa. Questi ambienti erano popolati da animali tipici dei climi freddi.

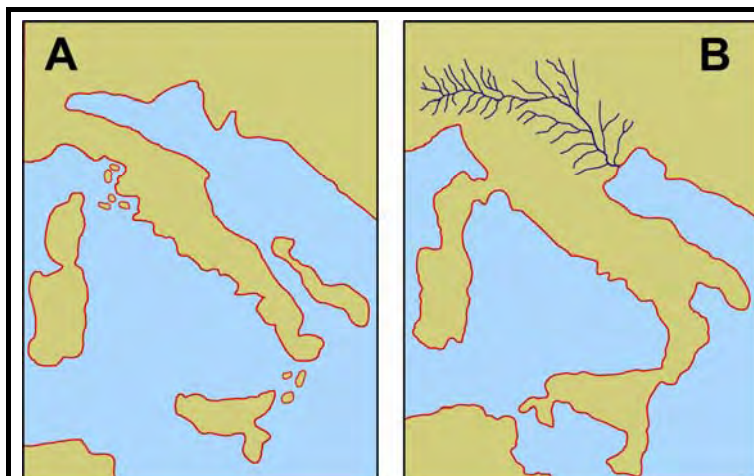


Fig. 2.4 - L'Italia all'inizio del Quaternario (A) prima delle grandi glaciazioni. Durante la massima espansione dei ghiacci (B), per l'abbassamento del livello marino, l'Adriatico aveva notevolmente ridotte le sue dimensioni ed il fiume Po sfociava presso l'attuale Ancona.



Fig. 2.5 - La calotta glaciale, durante la glaciazione più estesa, ricopriva l'Europa settentrionale. Le frecce indicano le direzioni di movimento dei ghiacci.

Durante le glaciazioni le Alpi erano “coperte” da grandi masse di ghiaccio che arrivavano ad invadere anche la pianura. L'estensione di tali ghiacciai, la loro azione di “esarazione” (erosione glaciale) nei confronti di quasi tutte le vallate alpine completamente occupate dai ghiacci, il trasporto da parte di questi ultimi di grandi quantità di detrito, hanno modificato notevolmente le forme del paesaggio. Possiamo affermare che, nel passato recente della storia della Terra, i ghiacciai sono stati i maggiori agenti di modificazione della morfologia di gran parte della superficie terrestre, soprattutto in quelle zone che sono state più coinvolte dai fenomeni di glacialismo; fra queste è senza dubbi tutta la regione alpina. Inoltre tale successione di intervalli freddi e caldi ha influito notevolmente sull'evoluzione delle comunità viventi (**scheda 2.10**).

SCHEDA 2.1 - Storia della meteorologia

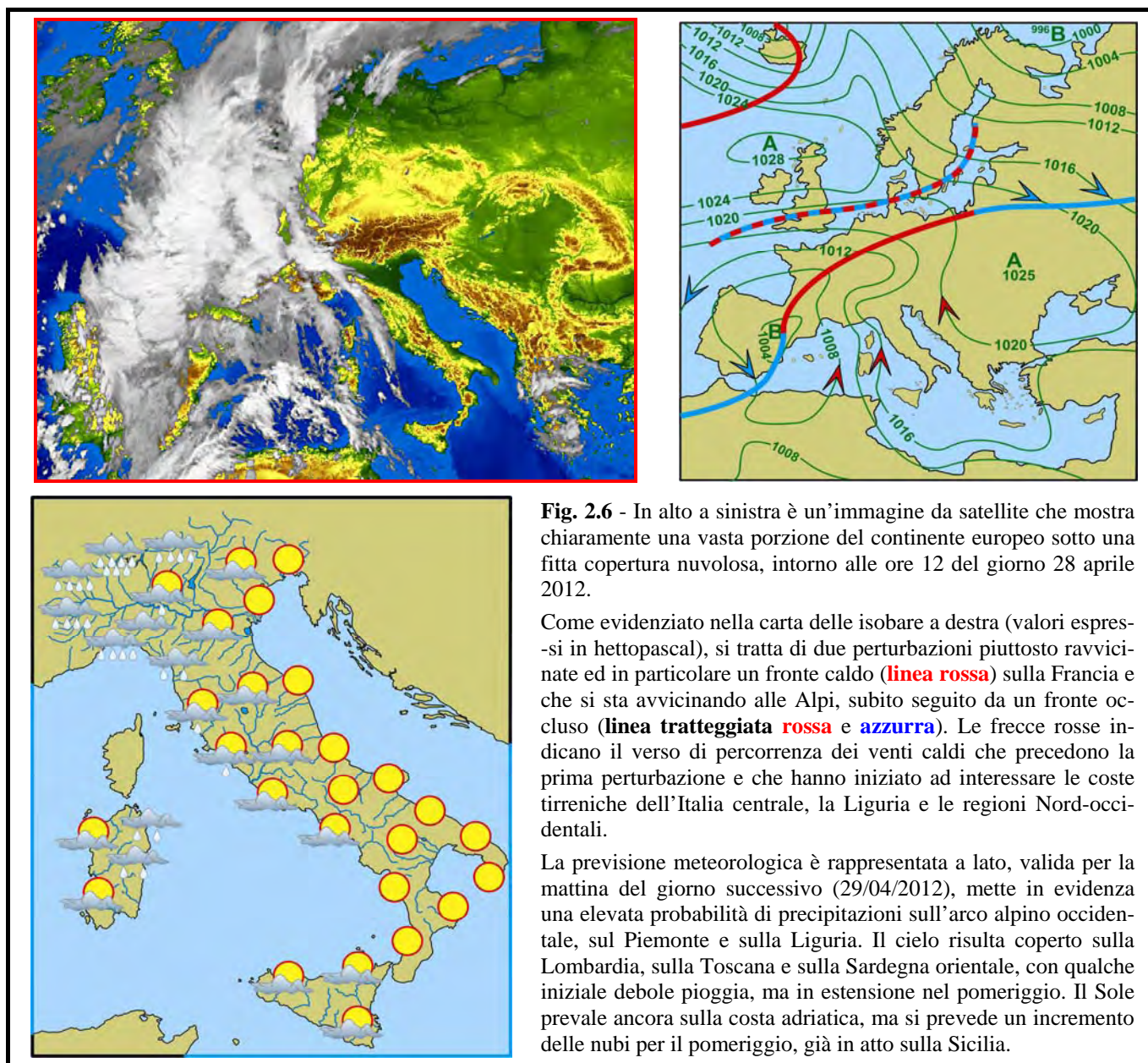
Da: **La stampa** (*Tutto Scienze e Tecnologia* - 13/02/2002) un articolo di Luca MERCALLI (www.nimbus.it).

La meteorologia è una tra le scienze applicate più complesse ed evolute. Ma spesso è ancora vista come disciplina ambigua, più vicina all'astrologia che alla fisica. Ne è sintomo lo stesso verbo “azzeccare” usato per le previsioni, oppure la fiducia riposta più nel canto dei merli o nei detti dei vecchietti di montagna che nella fluidodinamica. Eppure oggi la previsione meteorologica numerica, tecnicamente NWP (*Numerical Weather Prediction*) ha fatto passi da gigante, raggiunge affidabilità del 98 per cento sul primo giorno e tra l'80 e il 70 per cento sui cinque giorni successivi. Un traguardo forse unico nelle possibilità umane di predire il futuro al servizio delle più diverse attività, tant'è che l'Organizzazione Meteorologica Mondiale assegna agli investimenti condotti in meteorologia un rendimento di 1 a 25.

Questo spettacolare successo si deve alla favorevole combinazione di tre elementi: l'istituzione (a partire dalla fine dell'800) di una rete di osservazione su tutta la Terra, una cooperazione internazionale di prim'ordine in campo fisico e matematico e la disponibilità di supercomputer in grado di accrescere la potenza di calcolo di un fattore 10 ogni cinque anni. Ma la strada per giungere a tutto ciò è stata lunga, e (come in tanti settori della scienza) deve i suoi frutti all'opera di scienziati e ricercatori dei quali non si parla mai. Nel 1904 il meteorologo scandinavo Bjerknes per primo concepì la previsione come un problema di meccanica e fisica, descrivibile da 7 variabili (componenti tridimensionali del vento, temperatura, densità, pressione e umidità dell'aria) connesse da altrettante equazioni differenziali. La soluzione di queste equazioni non lineari dette “primitive” apparve tuttavia impossibile ai tempi di Bjerknes. Nel 1922, l'inglese Lewis Fry Richardson semplificò le metodologie di calcolo e impiegò sei settimane per eseguire a mano le operazioni di una rudimentale previsione. Richardson teorizzò perfino un “teatro meteorologico” dove 64.000 matematici avrebbero potuto compiere i calcoli necessari in una sorta di catena di montaggio intellettuale, per ottenere una previsione meteorologica in tempo utile.

In realtà le cose andarono diversamente: Richardson, anche se era sulla buona strada, sbagliò alcuni calcoli e i risultati fuorvianti che ottenne fecero cadere nell'oblio le sue intuizioni per quasi trent'anni. Nel 1946, Jule Charney, brillante studente di matematica dell'Università della California, fu chiamato a Chicago dal meteorologo svedese Carl Gustav Rossby. A Princeton incontrarono il geniale matematico Von Neumann, uno dei padri del computer, che pensò subito che il primo

problema da sottoporre al nascente calcolatore elettronico sarebbe stato di tipo meteorologico. La costruzione del computer di Princeton andava tuttavia per le lunghe, così, grazie a Francis Reichelderfer, direttore del servizio meteorologico americano, nel marzo 1950 Charney e Von Neumann ottennero di poter utilizzare il famoso computer ENIAC che l'esercito americano aveva da poco messo a punto ad Aberdeen, nel Maryland. Ci vollero 33 giorni di lavoro per far ingoiare alle valvole termoioniche dell'enorme computer oltre 100.000 schede perforate contenenti le istruzioni per i calcoli, e la prima rozza previsione del tempo a 24 ore, che un moderno PC eseguirebbe oggi in pochi minuti, impiegò ben 24 ore per essere calcolata. Ma la strada era aperta e venne sancita in uno storico articolo dal titolo "*Numerical Integration of the Barotropic Vorticity Equation*" che Charney, Fjörtoft e von Neumann pubblicarono (sempre nel 1950) sulla rivista Tellus. Alla fine del 1953 venne sfornata dal computer svedese BESK anche la prima previsione numerica europea, che suddivise l'atmosfera in una griglia di 300 km di lato e impiegava 6,5 ore per calcolare il tempo delle 24 ore successive, con risultati ancora modesti. Il 15 aprile 1955, negli USA, fu emessa la prima previsione meteorologica di uso operativo, ma gli errori erano ancora elevati e solo dal 1958 i meteorologi ottennero indicazioni utili per il loro lavoro di routine.



Attualmente, il modello spettrale T511, con risoluzione orizzontale di circa 40 km e 65 livelli verticali, usa potenze di calcolo di alcuni teraflop (miliardi di miliardi di operazioni matematiche al secondo) per risolvere in poche ore le equazioni della dinamica atmosferica su 21 milioni di punti compresi tra la superficie terrestre e una quota di 65 km. Altri modelli girano su supercomputer di centri di ricerca soprattutto americani e si trovano liberamente sulla rete. Molta strada è stata dunque compiuta dalla prima previsione che Charney eseguì nell'aprile del 1950, e molta resta ancora da fare per migliorare continuamente una delle più entusiasmanti sfide scientifiche al servizio della vita quotidiana. Tuttavia, senza le tecnologie informatiche questi traguardi non sarebbero mai stati raggiunti.

Nuovi calcoli hanno dimostrato che il "teatro meteorologico" che Richardson immaginò nel 1922, avrebbe in realtà impiegato non 64.000 bensì almeno 200.000 matematici per risolvere le equazioni allora concepite. Con l'attuale complessità dei

modelli globali, non sarebbe sufficiente nemmeno l'impiego degli attuali 6 miliardi di cervelli umani disponibili sulla Terra. Ma Richardson, che era di culto quacchero, non voleva certo trasformare gli uomini in macchine calcolatrici e nel suo progetto stabilì che fuori dal teatro si trovassero campi da gioco, montagne e laghi "perché è giusto che chi calcola il tempo debba poterlo respirare liberamente".

In Europa nel 1957 veniva utilizzato un calcolatore IBM704 con 8 KB di memoria, il cui tempo di calcolo costava 1 marco al secondo: per una previsione sperimentale a 48 ore erano necessari ben 1500 minuti, pari ad oltre 90.000 marchi! Si dovette attendere la metà degli anni 1960 affinché le previsioni diventassero più economiche. Al progresso dei computer si affiancò quello teorico, che consentì di impostare i primi modelli atmosferici a scala globale con griglia di circa 300 km di lato, ai quali fece seguito lo sviluppo dei modelli più dettagliati ad area limitata, detti LAM (*Limited Area Models*), con griglia di circa 100 km (oggi siamo a 12 km). Nel 1974 la scuola meteorologica dell'Università di Belgrado, con Fedor Mesinger, introdusse il modello ETA, nettamente migliorato sul piano della fisica atmosferica e degli effetti del rilievo montuoso. I tempi erano ormai maturi per raccogliere frutti più sostanziosi cosicché, nel 1975, fu fondato a Reading, presso Londra il Centro Europeo per le previsioni a Medio Termine (ECMWF) oggi sostenuto da 22 paesi: la prima previsione operativa uscì nel giugno 1979 da un computer CRAY 1 costato 9 milioni di dollari con potenza di calcolo pari a un Pentium III di oggi.



Fig. 2.7 - L'evento alluvionale che, il 4 novembre 2001, ha colpito duramente la città di Genova (sopra) era stato previsto. Per essere più precisi fu lanciato l'allarme sull'alta probabilità di forti precipitazioni. Esse furono responsabili di vistosi fenomeni di ruscellamento che comportarono l'accumulo di notevoli volumi d'acqua limacciosi e violenti che, dai versanti delle vicine montagne, si sono riversati per le strade della città trasformandole in torrenti impetuosi che produssero gravi danni alle persone ed ai manufatti.

A sinistra è rappresentata la situazione meteorologica a livello europeo. L'intensa perturbazione (evidenziata con la linea gialla) era preceduta da forti correnti meridionali (**scirocco**) che, dopo essersi arricchiti di umidità nell'attraversare, da Sud, il Mediterraneo, colpirono le regioni italiane Nord-occidentali, soprattutto la Liguria, direttamente esposta a tali venti. Inoltre, verso Est, la presenza di un robusto anticiclone rallentò il movimento del fronte perturbato che pertanto insistette per più tempo sulle stesse regioni con piogge che, oltre ad essere abbondanti, furono anche prolungate.

Tali situazioni meteorologiche eccezionali producono gravi danni alle persone ed agli edifici e sono inevitabili. Possiamo tuttavia cercare di contenere i danni soprattutto con l'ausilio della **Protezione Civile** in grado di agire tempestivamente grazie alle **previsioni del tempo**, la cui affidabilità a breve termine (uno o due giorni) è ormai molto elevata.

SCHEDE 2.2 - L'importanza della Meteorologia

Da: La stampa (*Tutto Scienze e Tecnologia* - 13/02/2002) un articolo di Piero BANUCCI.

Il turismo, i trasporti, l'agricoltura, la produzione di energia, la pesca e innumerevoli altre attività che coinvolgono enormi interessi dipendono in modo cruciale dagli eventi meteorologici. Prevedere il tempo è quindi essenziale per l'economia. Ma ancora più importante è prevedere quei fenomeni che mettono a rischio vite umane. Le cifre parlano chiaro. Delle vittime di catastrofi naturali, quasi due terzi si devono a cicloni e inondazioni, solo un terzo a terremoti. Tra il 1997 e il 1998 le

perturbazioni legate al Nino hanno ucciso 2100 persone e fatto danni per 33 miliardi di dollari. Nelle Filippine il ciclone tropicale «Angela» ha causato un migliaio di morti e danni per mezzo miliardo di dollari. In Italia tutti ricordiamo la frana di Sarno e ogni anno facciamo i conti con inondazioni e siccità.

L'Organizzazione Meteorologica Mondiale, organismo dell'Onu con sede a Ginevra, calcola che tra il 1947 e il 1980 il 45 per cento delle vittime di disastri naturali è direttamente attribuibile alle condizioni meteorologiche e il 17 per cento a conseguenze indirette come frane, allagamenti e valanghe. Questi e molti altri dati si trovano in «Tempo, vita e salute», un libro che Guido Caroselli, il meteorologo che conduce la rubrica «Che tempo fa» su Rai Uno, ha appena pubblicato da Garzanti (226 pagine, 9,50 euro).

Nei giorni scorsi l'inquinamento da polveri fini (sotto i 10 micron) ha reso molto attuale il problema del rapporto tra meteorologia e salute: tre mesi di alta pressione atmosferica hanno infatti comportato un lungo periodo di siccità e di scarsa ventosità nel Nord Italia, con il conseguente accumulo nell'aria di polveri e altri inquinanti. Ai problemi dell'emergenza si affiancano quelli «normali»: Caroselli ci parla per esempio delle meteoropatie primarie e secondarie, ci spiega come il nostro benessere dipenda da un equilibrato rapporto tra umidità e temperatura dell'aria, chiarisce i concetti poco noti di «indice di calore» e di «effetto vento».

A metà strada tra normalità ed emergenza si pongono fenomeni come i temporali e la grandine. In ogni istante sulla Terra sono in corso circa duemila temporali che producono otto milioni di scariche elettriche al giorno. Le vittime dei fulmini sono ogni anno qualche migliaio e alcune zone risultano più esposte. Per limitarci all'Italia, le regioni più colpite sono quelle settentrionali e una fascia che comprende Toscana, Umbria e Lazio, dove cadono in media quattro fulmini all'anno per kilometro quadrato. Poche nozioni elementari permettono di proteggersi: basta ad esempio accucciarsi al suolo per dimezzare il rischio che si ha stando in piedi sotto un temporale.

Alla meteorologia si riconduce anche la nuova grande emergenza del pianeta: la scarsità di acqua dolce. La pioggia che ogni anno cade sulle terre emerse (ci ricorda Guido Caroselli) equivale a ben 110 mila kilometri cubi ma solo 9.000 sono effettivamente disponibili nelle zone abitate. Come se non bastasse, la distribuzione è molto disuguale: regioni troppo piovose da una parte, regioni aride dall'altra. Il risultato è che ogni anno almeno tre milioni e mezzo di persone, in gran parte bambini, perdono la vita per la cattiva qualità dell'acqua (secondo altre stime si sale a 10 milioni). I cambiamenti climatici legati all'effetto serra rischiano di peggiorare il quadro. Anche per questo il meteorologo ha molto da dire in difesa di un pianeta a misura d'uomo.

SCHEDA 2.3 - Diagrammi termopluviometrici

La descrizione dei climi di determinate località si può essere effettuare mediante i climogrammi termo - pluviometrici. Sono raffigurazioni grafiche basate sui valori medi mensili della temperatura dell'aria e delle precipitazioni, ricavati dalle elaborazioni statistiche dei dati rilevati da stazioni meteorologiche che, in quelle stesse località, abbiano funzionato per qualche decennio. Consideriamo, quali esempi, i dati riportati nelle **tabb. 2.1** (relativi ad alcune località rappresentative delle diverse regioni climatiche nel Mondo) e **2.2** (relativi ad alcune località italiane suddivise in zone climatiche).

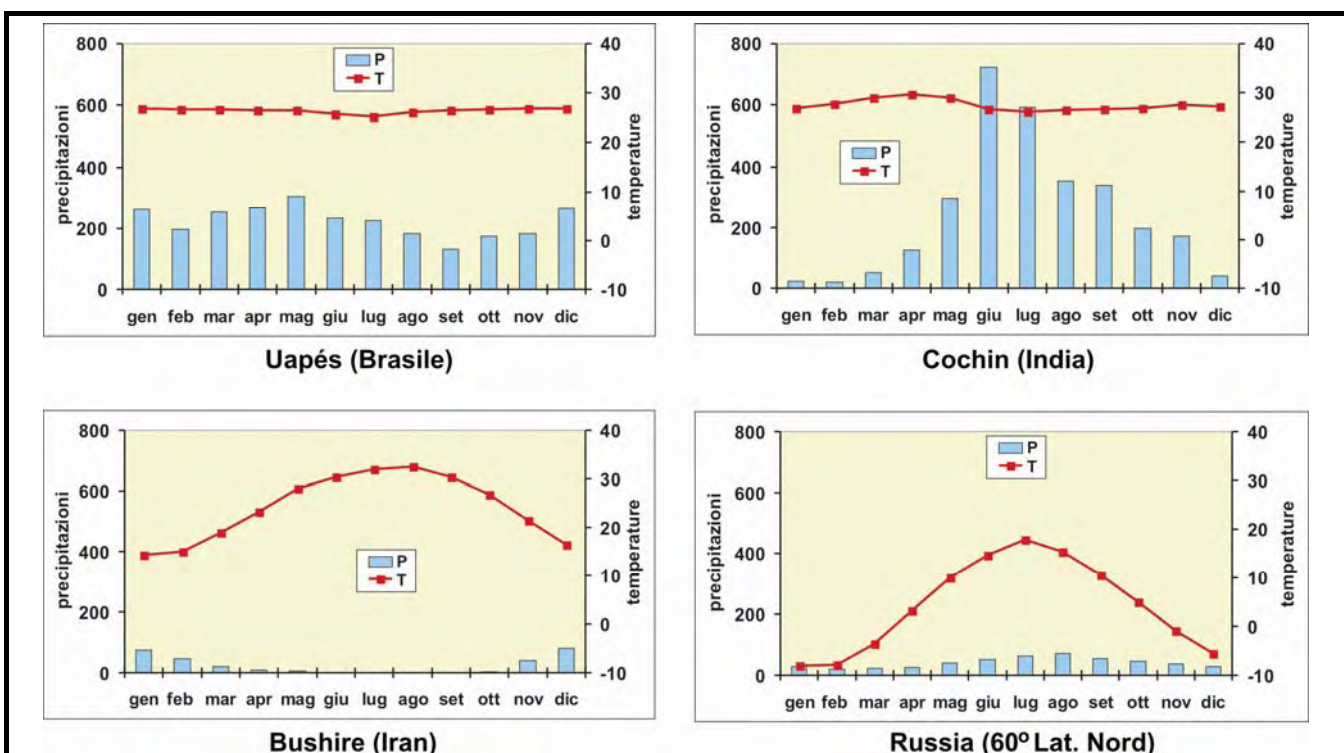


Fig. 2.8 - Climogrammi termo - pluviometrici di alcune località esemplificative di alcune regioni climatiche (in **tab. 2.1**). Sono rappresentati i valori medi mensili della temperatura dell'aria [°C] e delle precipitazioni [mm].

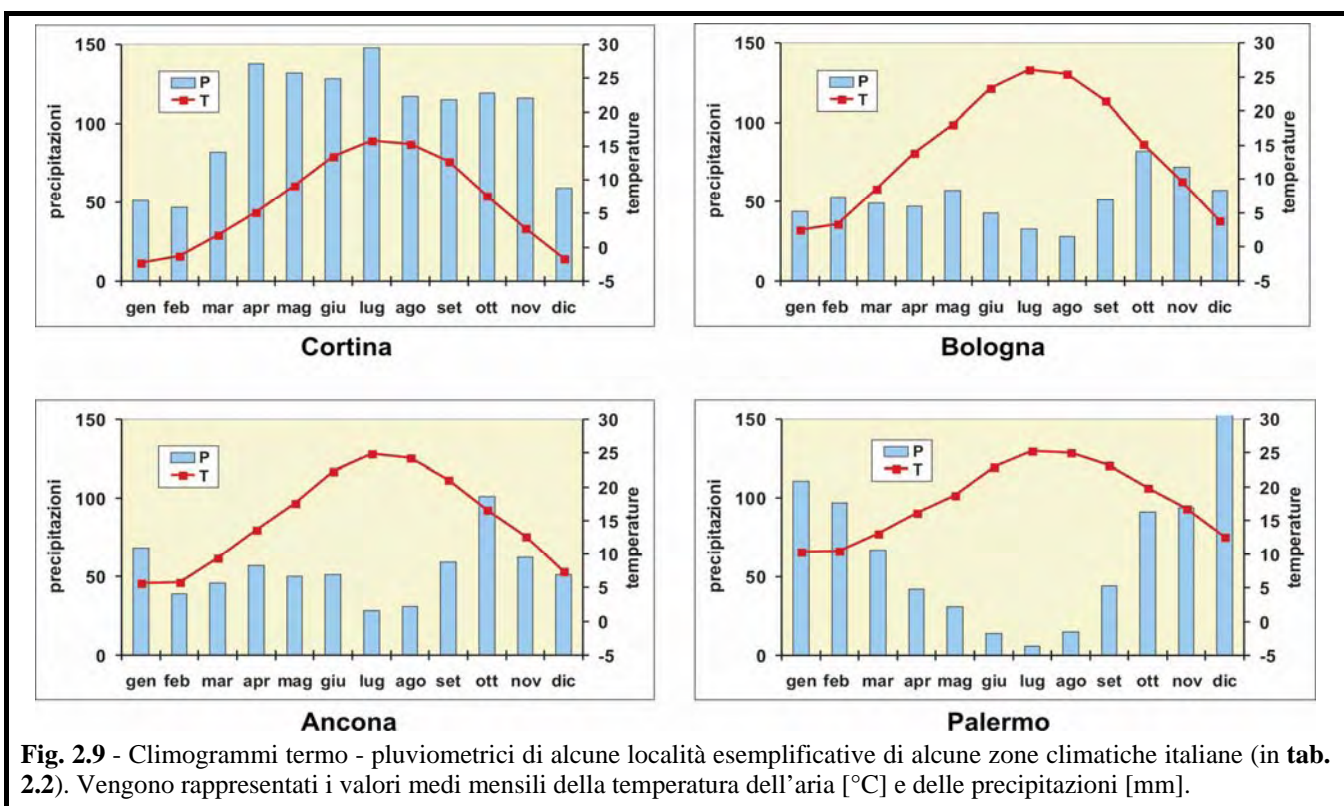
La **fig. 2.8** illustra, quali esempi, i climogrammi di Uaupés (Brasile), di Cochin (India), di Bushire (Iran) e di una località della Russia continentale. Sull'asse orizzontale (ascisse) è riportata la successione dei dodici mesi, da gennaio a dicembre. In corrispondenza di ciascun mese vengono elevati istogrammi di colore azzurro di altezza proporzionale ai valori medi delle precipitazioni (*regime pluviometrico medio*). Utilizzando le stesse ascisse si rappresentano (questa volta pur punti e quindi con una linea rossa spezzata) le temperature medie mensili (*regime termico medio*). Si possono utilizzare le scale che si ritengono più opportune, al fine di fornire un risultato grafico gradevole e comprensivo, ma quando si tratta di effettuare confronti fra climi diversi conviene utilizzare scale identiche.

Uaupés si trova in zona equatoriale, caratterizzata da precipitazioni abbondanti per tutto l'anno e con un minimo relativo di 130 mm nel mese di settembre (paragonabile ai valori dei mesi più piovosi nell'Italia settentrionale). Il totale annuo di precipitazione è quasi 2.700 mm, il triplo della media della penisola italiana. Il regime termico è "piatto", senza sostanziali differenze stagionali, tanto che l'escursione media annua (differenza fra i valori termici medi mensili dei mesi più caldo e più freddo) è di appena 1,6 °C. È una località con clima caldo e piovoso (umido equatoriale).

Cochin si trova in India, soggetta a clima monsonico. Il regime termico è relativamente costante, tanto che l'escursione media annua (3,2 °C) è poco superiore a quella di Uaupés. Il regime pluviometrico presenta invece una evidente oscillazione. Infatti mentre il totale annuo (poco oltre 2.900 mm) risulta poco superiore di quello della precedente località, risulta una stagione estiva molto piovosa (con un massimo di oltre 700 mm in giugno) ed una stagione invernale con scarse precipitazioni (appena 20 mm in febbraio). Questa particolare situazione è dovuta ai monsoni estivi caratterizzati da venti umidi provenienti dal mare ed ai monsoni invernali secchi provenienti dal continente asiatico.

Bushire (Iran) è una località con una evidente oscillazione del regime termico, con temperature relativamente basse nell'inverno (14 °C in gennaio) e decisamente elevate nell'estate (quasi 33 °C in agosto) e con una escursione media annua (18,3 °C) nettamente superiore di quelle precedenti, come è tipico dei climi continentali. Il regime pluviometrico è molto appiattito in basso ed in effetti la precipitazione media annua è di appena 280 mm, con quattro mesi mediamente asciutti (da giugno a settembre) e scarse precipitazioni nell'inverno (fino ad un massimo di 80 mm in dicembre). Si tratta di un clima tropicale stepico desertico.

Nel cuore della Russia a 60 ° Lat. Nord fa molto freddo; le temperature medie mensili di gennaio e febbraio sono intorno a - 8 °C, ma durante l'estate esse salgono a valori (quasi 18 °C in luglio) che potremmo definire caldo - primaverili. L'escursione termica media annua è quindi molto elevata (23,3 °C). La precipitazione media annua (quasi 500 mm) è paragonabile a quella delle località italiane meno piovose, con una stagione estiva più umida (70 mm ad agosto) ed una invernale più asciutta (minimo di 20 mm in febbraio).



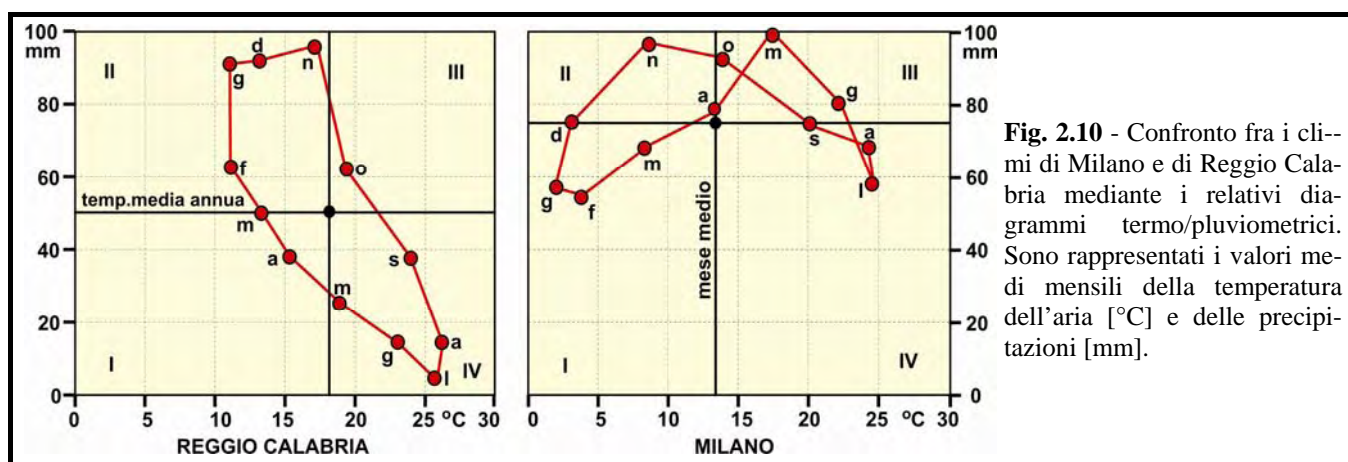
La **fig. 2.9** illustra, a titolo esemplificativo) i diagrammi termo - pluviometrici di quattro località italiane sulla base dei dati riportati nella **tab. 2.2**. Dall'esame di tali grafici si esprimono alcune considerazioni generali:

- le precipitazioni risultano abbondanti per tutti i mesi dell'anno in montagna (soprattutto nell'arco alpino orientale) e, ciò che più conta, piove anche in estate, quando l'acqua è maggiormente necessaria alla natura ed all'uomo;
- il regime termico caratterizzato dalla maggiore escursione media annua (23,5 °C) risulta quello di Bologna, località maggiormente continentale tra quelle considerate;

- Bologna ed Ancona presentano precipitazioni meno abbondanti di Cortina (rispettivamente 906 mm e 643 mm i totali medi annui) ed in estate le situazioni di aridità (e quindi di carenze idriche) non sono particolarmente accentuate;
- la precipitazione media annua di Palermo è pari a 765 mm, quindi una disponibilità idrica complessiva piuttosto consistente; tuttavia risulta un massimo di oltre 150 mm in dicembre ed un minimo di appena 6 mm in luglio; per il trimestre invernale risulta un totale di 361 mm, quasi la metà di tutta la pioggia annuale, mentre in estate si hanno gravi problemi di deficit idrici;
- Cortina presenta le più basse temperature, con valori medi mensili negativi nei mesi centrali dell'inverno; essa è la località di più elevata altitudine (1.275 m s.l.m.) fra quelle considerate;
- le più elevate temperature estive sono simili per le località Bologna, Ancona e Palermo; il clima mite di quest'ultima non dipende tanto dai valori dei massimi, ma piuttosto da quelli poco rigidi invernali.

Un altro sistema per rappresentare i diagrammi termo - pluviometrici consiste nell'utilizzare i valori medi mensili delle temperature e delle precipitazioni mediante diagrammi a dispersione. Per ogni mese, i valori di temperatura e di precipitazione costituiscono una coppia di coordinate che individuano un punto sul diagramma suddiviso in quattro quadranti da due linee rappresentanti la temperatura media annua quella orizzontale ed il mese medio (la media dei dodici valori pluviometrici) quella verticale; l'intersezione delle due linee rappresenta l'anno medio (**fig. 2.10**)

I mesi invernali di Reggio Calabria (dicembre, gennaio e febbraio) risultano nel secondo quadrante che indica, per quella località, un clima relativamente freddo e umido. La primavera (marzo e aprile) è rappresentata dal secondo quadrante, con minori precipitazioni e con temperature che aumentano rapidamente. Maggio, per Reggio Calabria, può già essere considerato un mese estivo in quanto cade nel IV quadrante, con temperature più elevate e con precipitazioni meno copiose rispetto all'anno medio. Ma è il trimestre giugno - luglio - agosto che caratterizza la calda ed asciutta estate di tale località; settembre si trova ancora nello stesso quadrante. L'autunno (ottobre nel III quadrante) risulta una stagione breve, caratterizzata da un rapido abbassamento delle temperature e da una spiccato aumento delle precipitazioni. Infine il mese di novembre, il più piovoso dell'anno, apre alla stagione invernale.



Milano è una località con clima tipico continentale della pianura padana. La stagione fredda è relativamente lunga (dicembre ÷ marzo), ma i mesi veramente invernali sono gennaio e febbraio, durante i quali sono possibili manifestazioni meteorologiche che fanno assumere ai paesaggi della pianura fisionomie simili a quelle con climi più rigidi (**fig. 2.11**). Il mese di aprile si caratterizza per gli incrementi delle piogge e delle temperature, fino ad arrivare a maggio, il più piovoso dell'anno, ma ancora in giugno le precipitazioni sono relativamente elevate. Agosto e luglio (IV quadrante) costituiscono la vera estate milanese, soprattutto per le elevate temperature, in quanto le precipitazioni, seppure poco abbondanti, sono superiori a quelle invernali. Settembre è un mese ancora relativamente caldo, con caratteristiche in parte estive. L'autunno comincia in ottobre (III quadrante) con incremento delle piogge e soprattutto con una netta diminuzione delle temperature, fino ad arrivare al novembre (II quadrante), il mese che precede il brusco passaggio alla situazione invernale.

SCHEDE 2.4 - Clima e storia

Il duro inverno 1977 che colpì gli Stati Uniti (grande freddo all'Est e grave siccità all'Ovest), le anomalie climatiche del 1972 (duro inverno seguito da una secca estate in Russia, la mancanza del monzone in India, le siccità in Africa e in altre regioni), la diminuzione della produzione nelle grandi aree agricole (negli USA, in Russia e, in misura più limitata, in Europa) a partire dagli anni '60 per la maggiore variabilità climatica, gli inverni particolarmente rigidi del 1963 e del 1964 nell'Europa Nord Occidentale, la maggiore frequenza in inverno di masse d'aria più settentrionali sul Mediterraneo Occidentale e soprattutto l'intensificazione degli eventi meteorologici eccezionali di questi ultimi anni,... sono tutti segni che, secondo i climatologi, dimostrerebbero un peggioramento del clima sulla Terra. Questa tendenza potrebbe essere la porzione discendente di un'ampia oscillazione verso il caldo che ha caratterizzato il trentennio 1930 ÷ 1960 e che ha coinciso con un aumento della produzione agricola. Un maggior numero di climatologi sostiene invece che dalla fine del 1800 la tendenza generale è un aumento delle temperature, quale conseguenza soprattutto delle attività umane.

La fase climatica di questi ultimi cento anni (documentata da rilevazioni strumentali) segue un altro periodo, molto freddo, tra il 1430 e il 1850, detto **piccola era glaciale**. I ghiacciai in Europa avanzarono decisamente e alcuni villaggi nei pressi di Chamonix, in Francia, furono sopraffatti dal ghiaccio. Il fiume Tamigi, a Londra, gelò frequentemente, mentre in certe annate andava in secca tanto da essere difficilmente navigabile. L'agricoltura in Europa andò in crisi e i vigneti sparirono dall'Inghilterra. Questi citati sono una parte dei segni che caratterizzarono la piccola era glaciale, in un periodo storico e in una Europa lacerata da conflitti e da malattie che furono forse esasperate anche dal particolare clima rigido.

La piccola era glaciale fu preceduta da due secoli con clima assai variabile. Questo, che va dal 1200 al 1400, fu un periodo di transizione tra quello freddo successivo e quello precedente caldo e secco iniziato dal 500 a.C. e che poté consentire la coltivazione dei vigneti in Inghilterra. Questa lunga fase calda, durata circa 1.700 anni e interrotta da un ritorno al freddo dal 700 al 900, potrebbe aver favorito l'invasione dei vichinghi, nel IX secolo, dalla Scandinavia alla Russia, all'Europa Nord occidentale fino all'Islanda; i loro viaggi dopo la scoperta della Groenlandia (più sgombra di oggi dai ghiacci) sono tuttora controversi e secondo il climatologo CALDER (1974) *".....non c'era alcuna valida ragione climatica per la quale non dovessero riuscire nella traversata per il Nord America....."* Questo periodo di caldo (caratterizzato dal ritiro dei ghiacciai, dall'innalzamento del livello marino, dall'assenza o quasi di temporali sull'oceano Atlantico e sul mare del Nord) fu preceduto da un altro periodo freddo (dal 1300 a.C. al 500 a.C.) durante il quale sulle Montagne Rocciose, su quelle dell'Alaska, in Svezia, in Patagonia, si riformarono ghiacciai precedentemente scomparsi.

Dal 1300 a.C. ad oggi, in poco più di 3.200 anni, si sono quindi susseguiti periodi climatici diversi (come durata e intensità dei fenomeni) a dimostrare che la storia del clima è caratterizzata dalla alternanza di fasi fredde e calde. Più indietro nel tempo le notizie storiche sono più frammentarie. In particolare fra il 4000 a.C. e il 3000 a.C. (in coincidenza della nascita della civiltà mesopotamica e della fondazione della prima dinastia egiziana) il clima era più rigido dell'attuale e seguiva a un altro periodo che, dal 10.000 a.C., fu caratterizzato da elevate temperature con punte record, intorno al 5000 a.C., di due o tre gradi in più in Europa rispetto all'attuale.

La storia umana senza dubbi è influenzata dalla variabilità climatica; se poco o tanto è difficile quantificarlo. La piccola era glaciale contribuì a rendere difficili le condizioni di vita in un'Europa dilaniata da epidemie e da carestie. Però tentativi di spiegare gli eventi storici alla sola luce dei cambiamenti climatici sono aleatori. Ma, a titolo di cronaca, ricordiamo che gli imperi di Asoka in India, della dinastia Ch'in in Cina e dei romani in Europa *".....sono tutti cresciuti durante il periodo più caldo che ebbe inizio attorno al 500 a.C. I rivali dei romani nell'Africa del Nord e nel Mediterraneo orientale potrebbero essere stati indeboliti dalle generali condizioni di siccità e i miglioramenti successivi nel Nord non possono essere stati altro che d'aiuto ai 'barbari' che alla fine distrussero l'Impero Romano....."* (CALDER, 1974).

I fattori climatici dovevano, più indietro nella storia, essere in grado di condizionare i modi di vita di intere popolazioni. Nel tardo Paleolitico, nella piana alluvionale del Nilo, il comportamento del grande fiume (le sue variazioni cicliche a lungo termine, le inondazioni annuali, la portata e la velocità della corrente) era determinato da eventi climatici che si verificavano in Africa orientale; secondo lo storico SMITH (1976) *"....la piovosità locale, la temperatura e il comportamento degli affluenti che scorrevano attraverso la pianura scendendo dalle sorgenti situate sulle colline del mar Rosso,.... erano gli effetti prodotti dal tipo di circolazione esistente nell'emisfero settentrionale, nel quale si faceva ancora sentire l'influenza dei ghiacciai europei. Entrambi questi fattori si combinavano poi con la geomorfologia della pianura e delle aree adiacenti. Il risultato era un mosaico di microambienti e di habitat in una ristretta zona geografica...."* In un ecosistema instabile del genere, quando l'una o l'altra variabile subiva una modificazione, ci si poteva attendere il verificarsi di *"....improvvisi variazioni nell'assortimento di piante e di animali e nei metodi di sfruttamento delle colture umane che da quelle traevano i loro mezzi di sussistenza...."* (SMITH, 1976).

Più di 12.000 anni fa la Terra era ancora stretta in una morsa di freddo. In particolare l'escursione termica annuale della Grecia meridionale era probabilmente molto simile a quella attuale delle zone montuose della Grecia settentrionale. Seguì un graduale aumento di temperatura e di umidità; secondo lo storico JACOBSEN, (1976) *"....quando la coltre di ghiaccio si ritirò, il livello del mare crebbe lentamente....Gli alberi popolarono il paesaggio.... finché la steppa si trasformò in una regione di boschi e radure. Questo mutamento di clima sembra aver avuto una grande influenza sulla vita dei cacciatori - raccoglitori nell'Argolide...."* come dimostrato dai numerosi reperti archeologici trovati nella caverna di "Fracchthi" della Grecia meridionale.

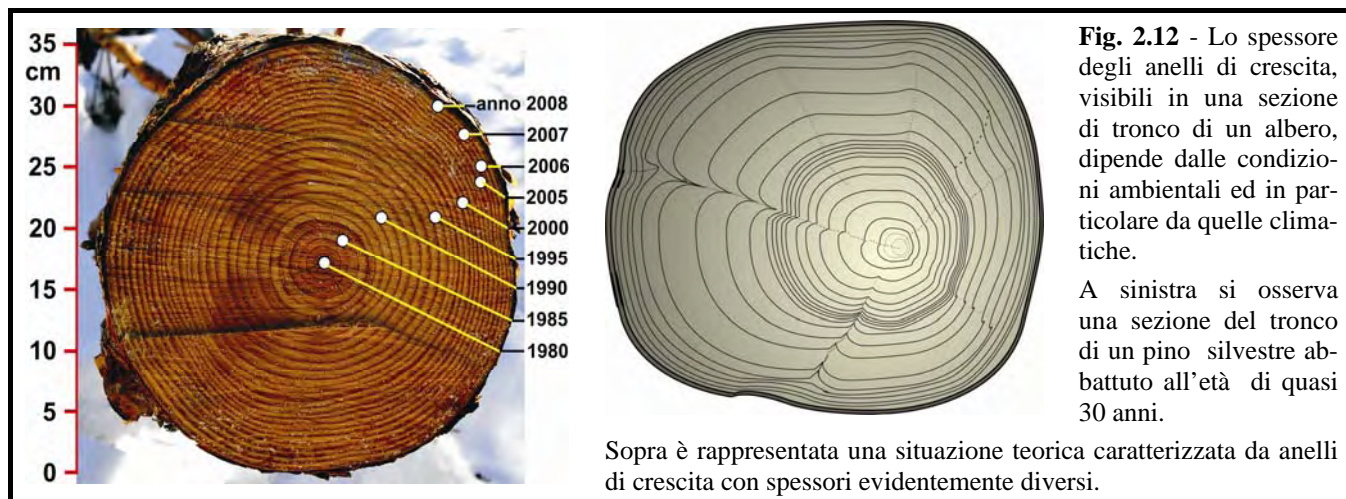
Lo studio degli ultimi 12.000 anni di storia dimostra che la Terra ha attraversato fasi calde e fredde, documentate anticamente dalle vicende umane (documenti storici, reperti archeologici e fossili) e più recentemente, da rilievi scientifici di parametri meteorologici. Più indietro nel tempo, più frammentarie sono le informazioni ed è più difficile datare l'inizio e la fine dei periodi climatici. Tenendo conto di tali limiti e utilizzando tecniche particolari è possibile andare più indietro nella storia della Terra, fino a qualche centinaia di migliaia di anni, con buona approssimazione.



Fig. 2.11 - Nella pianura padana possono verificarsi, nell'inverno, eventi meteorologici eccezionali, tali da conferire al paesaggio delle grandi città un aspetto simile a quello di località nordiche (Torino, inverno 1986).

SCHEDA 2.5 - La dendroclimatologia

Tra i metodi utilizzati per lo studio delle fluttuazioni climatiche in epoche storiche, la dendroclimatologia, sviluppatasi a rango di vera scienza a partire dagli anni 1950, è tra le più importanti, una delle tecniche più significative nelle determinazioni cronologiche. Ogni sezione trasversale del tronco di un albero evidenzia una serie di anelli di crescita concentrici; se ogni anello rappresenta la crescita annuale dell'albero, contando il numero degli anelli, si risale all'età dello stesso. Se l'insieme degli anelli di crescita ha valore cronologico, ciascun anello ha valore climatico, perché riflette le condizioni meteorologiche che hanno influito sulla sua crescita. Ogni anello è una specie di annotazione climatica dell'anno in cui si è formato (**fig. 2.12**). Se su un diagramma si riportano in ascissa gli anni e in ordinata l'incremento dello spessore degli anelli, si ottiene la "curva di crescita dell'albero". L'interpretazione corretta di tale curva fornisce indicazioni utili sulla successione di eventi meteorologici favorevoli o sfavorevoli che hanno caratterizzato la vita dell'albero.



L'interpretazione corretta di una curva di crescita presuppone alcune considerazioni; cosa significa condizioni meteorologiche favorevoli o sfavorevoli? Qual è il fattore critico principale nell'ostacolare la crescita dell'anello, la temperatura, le precipitazioni?... Molto dipende dalla fisiologia dell'albero e dal luogo in cui si trova. Alberi sistemati in modo diverso (esposti al vento o al riparo di una conca, presso un corso d'acqua o nel bosco,...) sono diversamente vulnerabili agli effetti del tempo. In un clima caldo un abbassamento termico estivo può giovare alla pianta, mentre per gli alberi che si trovano nelle zone climatiche fredde più è caldo meglio è. Annate negative possono influire su quelle seguenti. Ad ostacolare la crescita degli anelli sono anche la competizione con altri alberi per la luce e per l'acqua, i parassiti, ecc.... Sono fattori biologici che, molto spesso, agiscono nei confronti delle piante analogamente agli eventi meteorologici sfavorevoli. Tenendo conto di tutti questi fattori, scegliendo un elevato numero di alberi molto longevi (i *Pinus aristata*, per esempio, sono conifere che, sulle White Mountains della California, possono sopravvivere per più di 4.000 anni) e in diverse zone con opportune elaborazioni, si compiono correlazioni crescita/clima statisticamente attendibili. Tuttavia con la dendroclimatologia si effettuano correlazioni climatiche che, se anche precise, sono limitate all'ultimo millennio.

SCHEDA 2.6 - Il plancton

Le acque dei mari e dei bacini lacustri sono popolate (soprattutto nella zona fotica, cioè quella vicino alla superficie, dove la luce è abbondante) da piccoli organismi animali e vegetali (**plancton**), nella maggior parte dei casi unicellulari, che si lasciano trasportare passivamente dalle correnti essendo incapaci, soprattutto per le ridotte dimensioni, di eseguire veri e propri spostamenti autonomi. Le comunità di plancton sono diverse a seconda dei caratteri ambientali (temperatura, salinità, disponibilità di nutrienti,...) dei mari e dei laghi diversamente distribuiti sulla superficie della Terra. Molte specie del plancton sono protette da strutture rigide silicee o calcaree che possono conservarsi come spoglie o residui dopo la morte degli organismi (**fig. 2.13**).

Sui fondali marini avviene una vera e propria "pioggia" di quei residui che si accumulano e si conservano (fossili) formando, insieme ai fanghi, sedimenti che portano la testimonianza dei mutamenti di vita che si verificano in superficie. Con il tempo si sovrappongono sedimenti a formare strati dove si trovano, in basso, tracce di vita più antica e, in alto, più recente. Campioni di sedimenti possono essere prelevati median-

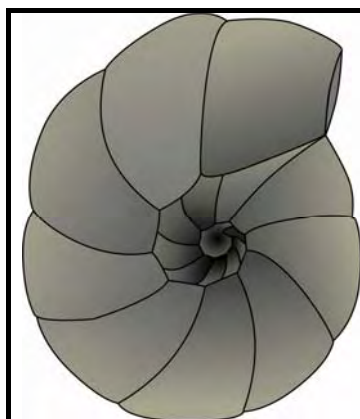


Fig. 2.13 - Rappresentazione (fortemente ingrandita) del guscio di un Foraminifero, organismo unicellulare (protozoo) facente parte del plancton marino. Erano organismi molto numerosi milioni di anni fa ed hanno importanza in micropaleontologia, specialmente in rapporto alle ricerche petrolifere. Parte dei fondali oceanici (2.000 ÷ 5.000 m di profondità) è ricoperta di scheletri di Foraminiferi del genere *Globigerina*; essi formano i cosiddetti *fanghi a globigerine*.

te cilindri molto lunghi (carote) per mezzo di navi oceanografiche in grado di “perforare” i fondali senza modificazioni della stratigrafia originaria. Analizzando le successioni di faune conservate nelle carote campionate in diversi punti, i ricercatori tentano di stimare la storia della vita del plancton che ha popolato le acque in passato. Si tenta cioè di individuare, nelle stesse località, successioni di popolazioni caratteristiche di ambienti caldi e freddi a testimonianza di mutamenti climatici che, andando indietro nel tempo, condizionarono la vita presso la superficie delle acque marine e lacustri.

SCHEDA 2.7 - Il ghiaccio ricorda

L'acqua è un composto formato da molecole, ciascuna costituita da un atomo di ossigeno e da due di idrogeno; la formula chimica è perciò H_2O . L'atomo di ossigeno ha numero atomico 8: 8 protoni e 8 neutroni nel nucleo e 8 elettroni orbitanti. Il numero di massa (numero totale di particelle nucleari) è 16. In natura non tutti gli atomi di ossigeno hanno numero di massa 16; ve ne sono alcuni “anomali” che hanno due neutroni in più (quindi con numero di massa 18) che costituiscono soltanto lo 0,2 % in media dell'ossigeno totale. Una piccola parte delle molecole d'acqua dei mari anziché H_2O^{16} ha formula H_2O^{18} che è più “pesante”. Nei laboratori di chimica, attrezzati con spettrometri di massa, si può stimare, in un campione d'acqua, le quantità di O^{16} e di O^{18} e quindi calcolare il rapporto O^{18}/O^{16} . Da studi condotti da numerosi ricercatori si è visto che il rapporto O^{18}/O^{16} è minore nell'acqua sottoforma di umidità nell'atmosfera rispetto a quella contenuta negli oceani. Lo stesso rapporto diminuisce nell'umidità di una massa d'aria che si sposta da una zona a clima caldo a un'altra a clima freddo. Questi fenomeni sono spiegabili se pensiamo che le molecole più pesanti (H_2O^{18}) “evaporano” meno facilmente delle altre, per cui sono in percentuale maggiore nello stato liquido. Allo stesso modo dallo stato di gas tendono a “condensare”, cioè a ritornare allo stato liquido più facilmente, tanto più bassa è la temperatura. Nella circolazione generale dell'atmosfera una massa d'aria umida diretta a Nord, cioè a una zona più fredda della Terra, scaricando parte della propria umidità durante il viaggio, arriverà man mano tanto più povera di ossigeno “pesante” quanto più diminuisce la temperatura.

Le precipitazioni sui ghiacci dei poli e della Groenlandia sono esclusivamente nevose con più basso rapporto O^{18}/O^{16} rispetto alle precipitazioni su altre parti della Terra in estate e ancora più basso, per le temperature più rigide, in inverno. La neve che cade in un anno su queste aree non fonde tutta, rimane sepolta da quella delle annate seguenti e si trasforma in ghiaccio, conservando quasi inalterate le proprie caratteristiche fisico - chimiche, compreso il rapporto O^{18}/O^{16} . Nello spessore dei ghiacci dei poli e della Groenlandia sono perciò sovrapposti strati che, come le pagine di un libro, sono il risultato della storia climatica degli eventi passati; quanto più gli strati sono profondi tanto più sono antichi. Il ghiaccio caratterizzato da un rapporto O^{18}/O^{16} più basso è dovuto alla neve caduta in un anno con clima più freddo e viceversa. Se teniamo conto che i vari strati di ghiaccio formano le immense masse delle calotte polari, questo metodo consente di risalire a ricostruzioni paleoclimatiche molto lontane nel tempo.

Non possibile risalire nel passato oltre la nascita delle attuali calotte glaciali (qualche milione di anni fa). In realtà il limite è più vicino. Supponendo, come minimo, un accumulo medio di neve di 10 grammi per centimetro quadrato all'anno, su una calotta artica costituitasi da un milione di anni, si arriverebbe a spessori di ghiaccio assolutamente impossibili, dell'ordine di 100 km (lo spessore medio attuale della calotta artica è circa 2 km). Numerosi meccanismi regolatori intervengono per eliminare il ghiaccio via via che si accumula; il più importante di questi è il deflusso per scorrimento verso i bordi della calotta dove si perde nell'oceano, sia per fusione, sia sotto forma di iceberg. Le ricerche in questo settore sono oggi arrivate, con buona approssimazione, a determinare l'alternanza di fasi climatiche fino ad alcune centinaia di migliaia di anni fa.

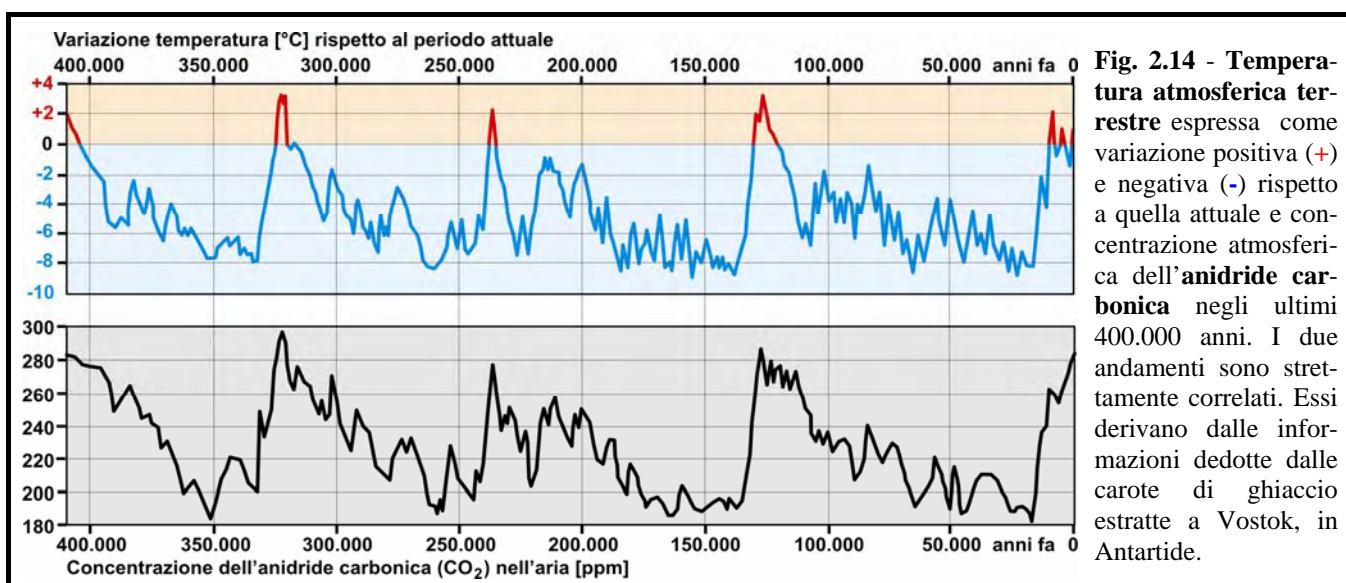


Fig. 2.14 - Temperatura atmosferica terrestre espressa come variazione positiva (+) e negativa (-) rispetto a quella attuale e concentrazione atmosferica dell'anidride carbonica negli ultimi 400.000 anni. I due andamenti sono strettamente correlati. Essi derivano dalle informazioni dedotte dalle carote di ghiaccio estratte a Vostok, in Antartide.

Il rapporto isotopico O^{18}/O^{16} può essere determinato anche dai gusci di carbonato di calcio ($CaCO_3$) degli organismi planctonici che sono stati costruiti con gli stessi atomi di ossigeno “pesante” presenti nell'acqua del mare. Più alto è tale rapporto nei gusci di un campione di sedimenti dei fondali marini, maggiore era la quantità di ghiaccio continentale presente all'epoca in cui il sedimento venne a depositarsi.

Nel ghiaccio sono presenti piccole bolle d'aria che, tra l'altro, lo rendono più "leggero" (minore densità) rispetto all'acqua liquida su cui galleggia. Quelle bolle contengono l'aria presente nel momento in cui il ghiaccio si è formato. Analizzando la composizione dei gas costituenti l'aria imprigionata nelle carote ottenute mediante campionamenti degli strati di ghiaccio polari e groenlandesi, si risale al tenore di anidride carbonica (CO₂) dei vari momenti della storia recente della Terra e si possono stabilire interessanti correlazioni con l'andamento termico (**fig. 2.14**). Una stretta correlazione tra questi due parametri risulta anche dai modelli numerici elaborati mediante potenti calcolatori che gli scienziati hanno messo a punto per studiare l'evoluzione del clima. Sebbene tali modelli siano semi-empirici e imperfetti, essi riescono comunque a risalire indietro nel tempo ricostruendo una storia climatica della Terra abbastanza simile a quella che deduciamo dalle osservazioni dirette. Non è chiaro, però, quale tra i due parametri (concentrazione dei gas serra in atmosfera e temperatura media del pianeta) sia la causa e quale l'effetto, cioè se negli ultimi 400.000 anni (periodo sul quale abbiamo dati di entrambi) sia stato l'aumento dei gas serra a causare il riscaldamento globale o viceversa. Si ritiene che le glaciazioni siano state avviate da altri fattori (in particolare dalle periodiche variazioni astronomiche dei parametri orbitali terrestri) e che ciò abbia in qualche modo influenzato il contenuto nell'atmosfera dei gas serra, amplificando enormemente le variazioni di temperatura. L'effetto serra si combina con altri cicli climatici globali e con una varietà di cicli interni di azione e retroazione operanti su differenti scale temporali. È perciò difficile riuscire a capire gli effetti combinati dei tanti elementi in gioco agenti sul clima. Tuttavia, l'opinione scientifica corrente riconosce la possibile esistenza di una forte connessione causale tra l'intensificazione dell'effetto serra dovuta all'attività umana e il fatto che la Terra si stia riscaldando.

Le cause del riscaldamento globale sono responsabili anche di altri effetti, conseguenza diretta dell'aumento della temperatura e della quantità di energia "intrappolata" nell'atmosfera biosfera:

- aumento della piovosità e dei fenomeni meteorologici estremi (temporali, trombe d'aria, uragani, estati torride,...);
- lento e progressivo innalzamento del livello medio dei mari, che entro il 2100 potrebbe salire anche di due metri, allagando varie città costiere del mondo;
- spostamento dei confini delle zone climatiche (e delle malattie ad esse legate), il quale provoca la tropicalizzazione o la desertificazione di nuove regioni del globo e una perdita della biodiversità di piante e animali, incapaci di adattarsi a novità così rapide.

Questi e altri cambiamenti sono già in atto, e il loro corso andrà probabilmente accelerando nei prossimi anni e decenni, in seguito all'aumento nell'atmosfera dell'anidride carbonica e di altri gas serra normalmente presenti in tracce e che si stanno ora invece accumulando progressivamente a causa delle attività umane.

SCHEDA 2.8 - Metodi palinologici

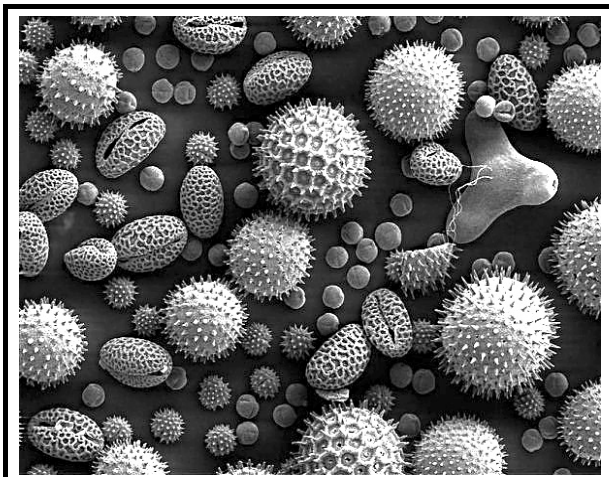


Fig. 2.15 - I granuli di polline hanno dimensioni microscopiche (decimi e centesimi di millimetro) ed hanno forme molto varie a seconda delle specie vegetali (piante superiori) che li producono.

I granelli di polline sono strutture microscopiche di riproduzione; sono gametofiti maschili particolarmente ridotti delle piante superiori (Angiosperme e Gimnosperme) con dimensioni da centesimi a decimi di millimetro (**fig. 2.15**). L'involucro protettivo dei granuli ha una grande resistenza agli agenti fisici e chimici; ciò è all'origine dell'attitudine delle spoglie di questi "microrganismi" a conservarsi a lungo nei sedimenti sotto forma di fossili.

I pollini sono diffusi dalle piante nell'ambiente circostante con vari meccanismi: dal vento (anemofili), da animali (insetti, uccelli, molluschi,...) o dall'acqua (idrofilo). Sono le piante forestali ad impollinazione anemofila (abeti, pini e larici) che producono la maggior quantità di materiale pollinico. La produzione annuale dei piceti della Svezia ammonta a circa 75.000 tonnellate; i granuli possono essere trasportati dal vento fino a oltre 50 km dalla sede di produzione. Nelle aree forestali l'aria è ricca di polline; si ha una vera e propria "pioggia" sui terreni intorno, compresi i bacini lacustri, lagunari e costieri, tipici ambienti dove avviene la sedimentazione.

Alcuni di questi bacini, con vita sufficientemente lunga, sono stati testimoni dei mutamenti climatici che hanno "recentemente" coinvolto la Terra. A condizioni climatiche variabili corrisponde-

vano essenze forestali diverse come densità e come specie (adatte cioè a climi caldi o freddi; **scheda 2.10**) e quindi a diversa produzione di tipi di polline che si raccoglieva insieme ai sedimenti in fondo ai bacini.

La cave di torba e di carbone sono antichi bacini dove sono raccolte notevoli quantità di materiali fitogeni e costituiscono i sedimenti più ricchi di polline. Eseguendo dei campionamenti (al solito gli strati più bassi sono i più antichi e viceversa) e facendo opportune analisi al microscopio in laboratorio, si può classificare e stimare la successione temporale dei pollini contenuti nei diversi strati e quindi delle associazioni vegetali che li hanno prodotti. Ma tali associazioni sono funzione del tipo di clima che caratterizzava l'ambiente in cui vivevano. Questo tipo di ricerca ("palinologia" utilizzata proficuamente in archeologia) ha fornito risultati molto utili alla comprensione delle vicende climatiche della storia recente della Terra.

SCHEDA 2.9 - Le varve glaciali

Vengono indicate con il termine “varve” (dallo svedese *varving* = ciclo) argille fittamente e regolarmente stratificate, in una serie di sedimenti, dove a strati chiari si alternano strati scuri. Le varve glaciali costituiscono i sedimenti che si accumulano sul fondo di bacini alimentati da corsi d’acqua derivanti dallo scioglimento di ghiacciai.

La sedimentazione è dovuta a due contributi. Uno al materiale morenico derivato dal ghiaccio. L’altro contributo è dovuto all’accumulo, sul fondo, di materiale organico che deriva dai cicli biologici propri dei bacini e da apporti alloctoni. La sedimentazione di materiale morenico è abbondante durante l’estate, per la maggior quantità di ghiaccio che fonde e praticamente nulla in inverno quando addirittura può gelare la superficie del bacino.

La sedimentazione del materiale organico non cessa mai durante tutto l’anno anche se più abbondante sul finire dell’estate e in autunno al termine del ciclo biologico produttivo. In questo modo i sedimenti che si formano in estate sono più chiari perché più ricchi di sabbia e di argilla, più scuri in autunno perché più ricchi di sostanza organica e meno di materiale morenico (le temperature più basse limitano la fusione del ghiacciaio). Nell’inverno vi è mancanza di deposizione di materiale morenico e si ha solo quello organico che, essendo comunque limitato, forma un piccolo straterello nero (fig. 2.16).

In una serie sedimentaria formatasi in un antico bacino, una varva è costituita da uno strato chiaro più spesso (estate), da un altro più scuro e di minore spessore (autunno) e infine da una pellicola quasi nera (inverno) che fa da limite al sovrastante strato chiaro dell’estate successiva e costituente la varva di un anno più giovane. In una serie sedimentaria, una successione di varve più chiare e più potenti denunciano un periodo climatico più caldo (per il maggior apporto di detrito morenico conseguenza della maggior fusione dei ghiacci), mentre una successione di varve più scure e meno potenti è caratteristica di un periodo climatico più freddo. L’analisi delle varve permette una datazione assoluta ma di valore limitato. Si è riusciti a sincronizzare tra loro numerose serie locali, in modo da capire quanto tempo impiegarono i ghiacciai dell’ultima glaciazione a fondere e a ritirarsi dalle posizioni occupate dalle loro fronti nel periodo di massima estensione fino alla loro estinzione.

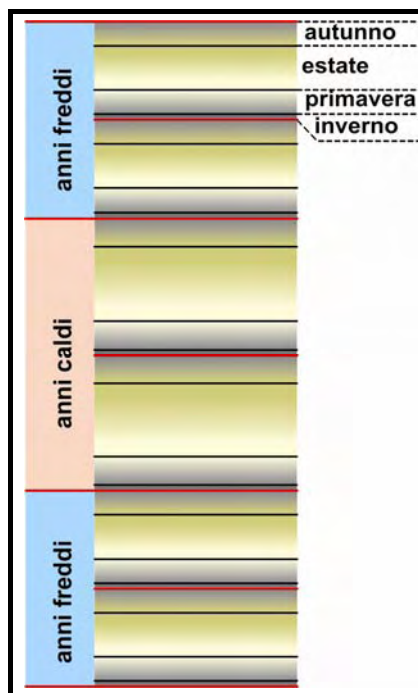
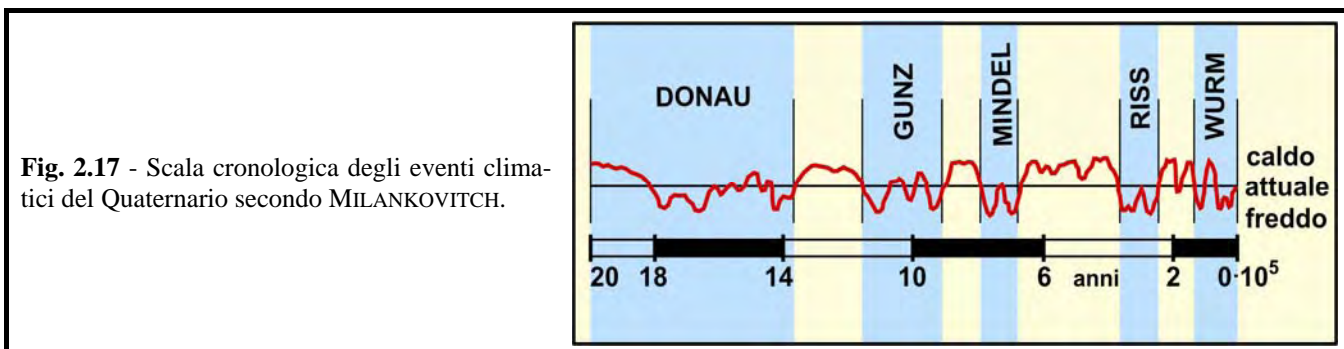


Fig. 2.16 - La varva (sedimento che si forma sul fondale di un bacino alimentato dalla fusione di ghiacciai) è tipicamente costituita da uno straterello molto scuro (quasi nero) in basso (che si forma nell’inverno per sedimentazione nettamente prevalente di materia organica). In primavera ed ancor più in estate, aumenta la sedimentazione di sostanza organica, ma aumenta in misura ben maggiore quella di detriti minerali portati dalle acque di fusione dei ghiacci, con conseguente formazione di straterelli più spessi e più chiari. Le varve più spesse (soprattutto nelle loro porzioni più chiare) indicano fasi climatiche più calde.

SCHEDA 2.10 - Aspetti biologici

Le oscillazioni climatiche del quaternario sono state messe in relazione non solo con fattori fisico - geografici, come le variazioni in altitudine delle masse continentali, la trasparenza dell’aria, la posizione dei poli sulla superficie terrestre, ma anche con “fattori astronomici” (precessione degli equinozi, variazioni dell’inclinazione dell’asse terrestre, variazioni dell’eccentricità dell’orbita terrestre). Lo studio di questi fenomeni ha permesso di costruire l’andamento della temperatura fino a due milioni di anni fa, definendo in modo soddisfacente una cronologia così come l’aveva già formulata MILANKOVITCH nel XIX secolo (fig. 2.17).



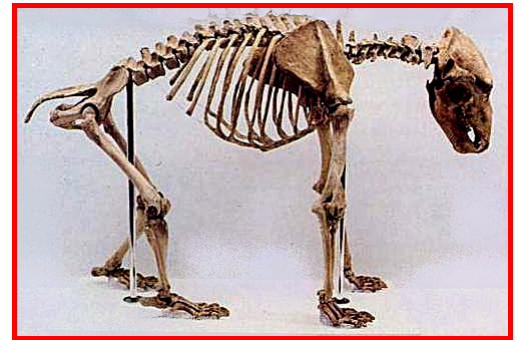
Nelle Alpi i fenomeni glaciali portarono ad un abbassamento medio del limite delle nevi persistenti di 1.200 metri rispetto all’attuale. Ciò pare fosse dovuto non tanto a sostanziali variazioni delle temperature invernali, quanto ad un abbassamento di 6 °C delle temperature medie estive e ad un aumento delle precipitazioni. In tale situazione le nevi non fondevano

completamente nell'estate cosicché, anno dopo anno, il limite delle nevi persistenti si abbassava e i ghiacciai, alimentati in modo sempre più cospicuo, avanzarono notevolmente (**fig. 2.5**). Le glaciazioni furono intervallate da periodi a clima caldo, con notevoli regressioni delle fronti glaciali. Il clima dunque ha subito, in un intervallo relativamente breve, fluttuazioni intense che ebbero influenze sulla distribuzione degli organismi. In tutto il Quaternario assistiamo a sostituzioni di flore e di faune per migrazione. A causa delle frequenti e profonde oscillazioni climatiche la storia biologica presenta problemi assai complessi per cercare di risolvere i quali possiamo interpretare i dati fornitici dalla paleoclimatologia (**schede 2.5 ÷ 2.9**). Le maggiori e più documentate informazioni ci sono date dall'analisi dei resti fossili; essi sono concentrati normalmente in depositi sedimentari di bacini lacustri o nelle grotte, gli unici ambienti continentali nei quali prevalgono i processi di sedimentazione e di conseguente inglobamento di resti organici che altrimenti, in ambienti subaerei, verrebbero distrutti.



Fiore di *Linnaea borealis*.

Le ondate successive di freddo e le avanzate dei ghiacciai provocarono modificazioni anche nella composizione delle faune; da una parte una corrente migratoria verso zone più calde dei Mammiferi insopportabili del freddo, dall'altra la scomparsa di molte specie che vennero sostituite da forme più evolute di probabile provenienza asiatica. Fra gli orsi scomparvero l'*Ursus etruscus* e l'*Ursus deningeri*, mentre il successivo *Ursus spelaeus* si adattò al freddo ed alla vita in caverna fino alla sua estinzione con l'avvento dell'Olocene. Questa specie è la più conosciuta per aver lasciato numerose testimonianze fossili; non c'è anfratto o grotta nelle Alpi che non abbia restituito resti dell'orso delle caverne. In passato alcuni Autori, proprio a causa di ciò, hanno parlato di esplosione demografica nel tardo pleistocene di questa specie. Il ricercatore attento tuttavia non deve farsi abbagliare dalla frequenza dei resti rinvenuti; infatti essi appartengono, per lo più, ad individui molto anziani o molto giovani. È verosimile che solo gli orsi malati e deboli siano morti in caverne dove hanno cercato riparo, mentre gli adulti sani, morti al di fuori dei ripari, non ci hanno lasciato tracce. Di fatto abbiamo una ricca documentazione che ci consente di asserire che l'*Ursus spelaeus* non dovette rappresentare un successo evolutivo; tutti gli individui mostrano di essere stati affetti da malattie (casi di gotta, rachitismo, varie alterazioni dei denti associate ad infiammazioni delle mascelle) spesso letali. Una mascella infiammata significa una cattiva estate, scarsa possibilità di nutrimento e conseguente scarso immagazzinamento di grasso per l'inverno e, nel caso di femmine, morte sicura per i piccoli che, analogamente agli orsi attuali, vengono allattati proprio nel periodo invernale.



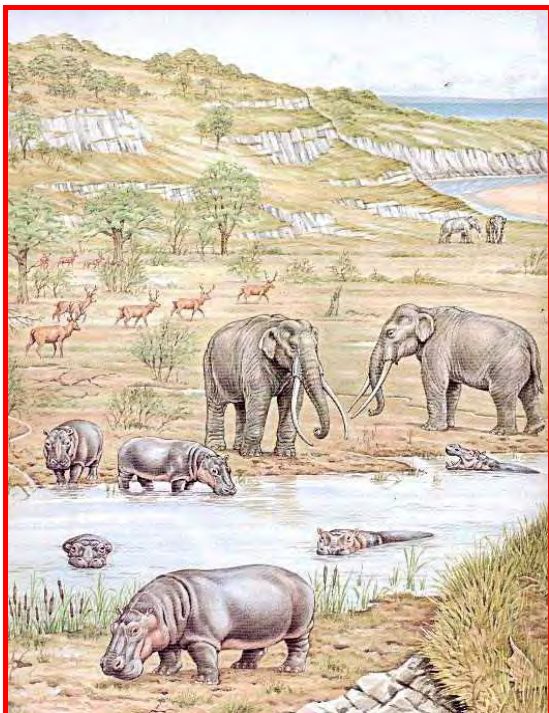
Scheletro completo di *Ursus spelaeus*.



Ricostruzione del *Megantereon cultridens* (felide con denti a sciabola).

Quali sono dunque i principali fattori che determinarono l'estinzione dell'orso delle caverne? A rigore di logica raramente gli orsi sarebbero stati uccisi da altri animali; gli unici antagonisti potevano essere felidi quali il leone delle caverne (*Felis leo spelaea*) ed il leopardo (*Felis pardus*). Gli Autori non sono concordi, ma possiamo esprimere alcune considerazioni. Come specie questo orso ha sempre occupato una regione geografica molto ristretta (grosso modo centro Europa) non solo ma, nell'ambito di questa limitata diffusione, sono documentate numerose razze locali subnormali, il che di per se stesso è sufficiente a votare a sicura estinzione numerose popolazioni. A ciò aggiungiamo che, alle soglie dell'Olocene, vi fu un notevole incremento di mortalità giovanile, conseguenza della trasformazione della tundra/tai-ga subartica in foresta, cioè di improvviso cambiamento d'ambiente che vide, come contraccolpo, scendere il numero degli

animali al di sotto del minimo critico di sopravvivenza. A ciò contribuì anche l'uomo? E in che misura? Difficile rispondere, anche se sappiamo per certo che l'uomo conobbe l'orso delle caverne (fanno fede i graffiti rupestri) e forse ne entrò in competizione sia per il possesso dei rifugi naturali sia per predazione. Fra gli elefanti che popolavano in mandrie numerose le pianure, scomparve ben presto l'*Elephas meridionalis*, tipico del Pleistocene inferiore; esso venne sostituito dall'*Elephas antiquus*, che resistette fino all'ultima glaciazione, benché non particolarmente adattato al freddo e da *Elephas throgotherii* ed *Elephas primigenius* (mammut), che si adattarono al freddo. I grandi ippopotami e rinoceronti, che negli interglaciali popolavano l'Italia, sparirono e sopravvissero solo in Africa; cavalli di tipo antico vennero sostituiti dall'attuale *Equus caballus*; durante il freddo Würm comparvero l'alce e la renna.



Ricostruzione dell'ambiente in fase calda interglaciale. Sono rappresentati l'*Elephas antiquus*, l'*Hippopotamus amphibius* ed il *Cervus elaphus*.

uno orientale (es. camoscio e stambecco) con forme provenienti dall'Asia in seguito a migrazioni iniziate alla fine del Terziario. Con l'avvento dell'Olocene termina la crisi biologica che ha portato all'estinzione numerose specie tipiche del Pleistocene, quali mammut, rinoceronte lanoso, orso delle caverne. Altre estinzioni si sono verificate anche in seguito; ad esse ha contribuito l'uomo (per esempio *Bos primigenius*, uro dei romani, progenitore degli attuali bovini). In epoca storica si segnala l'estinzione anche del leone in Europa.

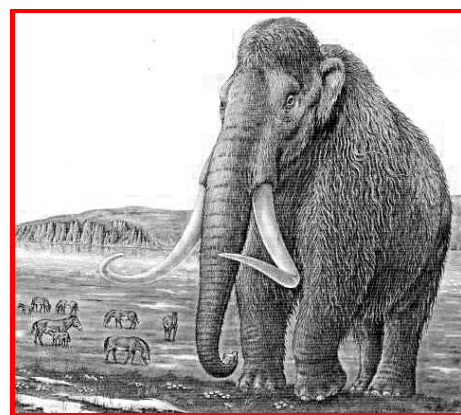
In che modo si inserisce, in questo panorama, la comparsa dell'uomo (fig. 2.18)? E da dove veniva e per quale motivo ha sentito l'esigenza di occupare habitat apparentemente così inospitali? A questi interrogativi, con le attuali conoscenze, è difficile fornire risposte esaurienti. Va premesso che i resti umani sono molto scarsi e questo a causa del fatto che l'uomo è il "peggiore fossile" che sia mai esistito; non solo perché vive in ambiente terrestre (non acquatico) ma anche perché, a causa della sua intelligenza, difficilmente restava vittima di trappole naturali che potevano causarne la morte ed un rapido seppellimento. Tuttavia possediamo "documenti" a testimonianza della sua presenza, come tracce di insediamenti, manufatti e, quasi in epoca storica, inumazioni. L'uomo "veramente antico" è stato sulle Alpi? Probabilmente sì, ma le glaciazioni ne hanno distrutto le prove. Sono state rinvenute tracce di bivacchi di cacciatori musteriani della cultura di Levallois nell'interstadio Würmiano più accentratato a 1.477 m s.l.m. in Svizzera, associate a molti resti di orso delle caverne ed altre tracce fino a 2.477 m s.l.m. (Buca del Drago) databili a 51.000 anni fa.



Il leone delle Caverne in un dipinto di Heinrich Harder.

La portata dell'ultima glaciazione è meglio documentata, dal punto di vista faunistico, nell'Italia centrale e meridionale. In particolare in terra d'Otranto (grotta Romanelli) in una breccia ossifera, unitamente a ossa umane, si sono trovati resti di *Alca impennis*, un grande pinguino antico, estinto in epoca storica (gli ultimi due individui furono uccisi in Islanda nel 1844), noto fossile anche a Gibilterra. I resti di questo uccello, abituato a climi freddi, confermano la rigidità del clima durante le fasi glaciali del Quaternario le quali, con il loro rigore, dettero il colpo di grazia a molte specie che sparirono dall'Europa o si estinsero del tutto. Anche la diffusione dello stambecco (*Capra ibex*) in Europa durante il Pleistocene è da collegare con le oscillazioni climatiche. La massima diffusione di questa specie e la sua migrazione da Est a Ovest (dalle zone eurasiatiche originarie fino ai Pirenei) sono collegate all'epoca della glaciazione Riss, attraverso le basse regioni a Nord delle Alpi che, in quell'epoca, erano coperte da praterie di muschi e licheni e fungevano da ponte tra Asia e Europa. In seguito le varie popolazioni di stambecchi seguirono le fasi di ritiro e di espansione dei ghiacciai portandosi, alla fine del Würm, verso le cime dei monti. Alcuni gruppi si trovarono isolati geneticamente e si differenziarono in forme locali che, secondo alcuni Autori, hanno valore di sottospecie (Carpatica, Alpina, Pirenaica, Numidica) soggette a rapida riduzione dei branchi.

Oggi la composizione della fauna alpina potrebbe essere il risultato dell'interazione e sovrapposizione di elementi diversi; uno autoctono preglaciale rappresentato da animali preesistenti alle glaciazioni (es. arvicola delle nevi), uno oloartico, costituito da animali spinti dall'espansione dei ghiacci scandinavi verso Sud (es. lepre bianca) ed



Ricostruzione di *Elephas primigenius*.

Dunque in piena glaciazione wurmiana la presenza dell'uomo è documentata ad altitudini piuttosto elevate. Più in basso, tra quote comprese tra gli 850 e 1.200 metri, le tracce sembrano risalire alla fine della glaciazione Riss (130.000 ÷ 120.000 anni fa). Si tratta di *Homo sapiens*, l'uomo attuale.

I musteriani del Paleolitico antico affrontarono la montagna per utilizzarne le risorse in una economia decisamente di rapina e si spinsero fino a 54 gradi di latitudine Nord, in Russia, in prossimità dell'immane calotta glaciale pleistocenica. Non stupisce dunque la presenza dell'uomo sul Monfenera (Piemonte) che, nel Pleistocene, fu esposto più volte alle oscillazioni del vicino ghiacciaio valsesiano alimentato dal monte Rosa. A farne le spese furono l'orso delle caverne, lo stambecco, il camoscio, la marmotta, le alci, le renne, i cinghiali, le iene, le volpi, i leoni che hanno lasciato tracce nei focolari primitivi unitamente a resti di uccelli e di pesci che dovevano costituire la dieta abituale dei paleolitici. Il carattere di bivacco ci è inoltre certificato

dalla presenza di resti di cervi e di bisonti, animali da pianura che, probabilmente, venivano uccisi e trasportati in questi insediamenti e che fungevano da scorta alimentare. Il Monfenera documenta una storia che, iniziata in età prewurmiana, seguirà il Paleolitico, il Neolitico, le età del Bronzo e del ferro fino ai tempi storici.

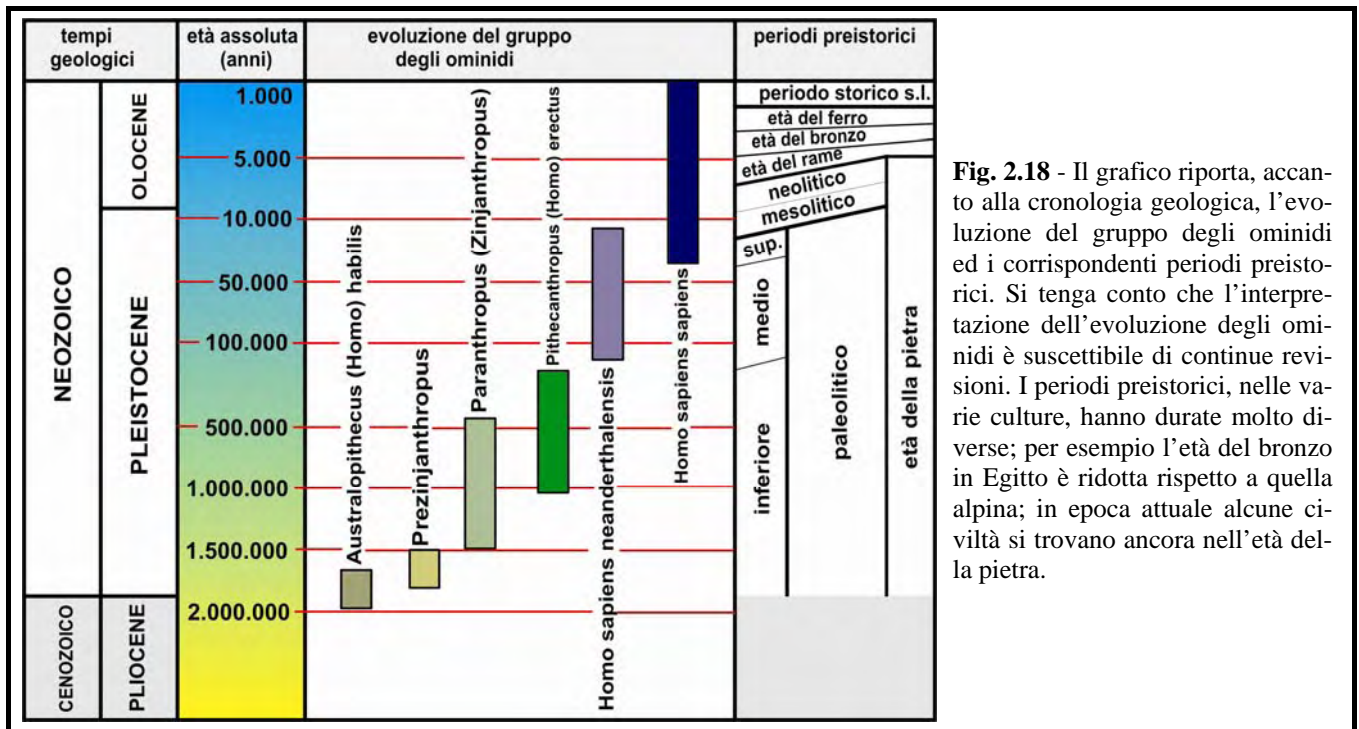


Fig. 2.18 - Il grafico riporta, accanto alla cronologia geologica, l'evoluzione del gruppo degli ominidi ed i corrispondenti periodi preistorici. Si tenga conto che l'interpretazione dell'evoluzione degli ominidi è suscettibile di continue revisioni. I periodi preistorici, nelle varie culture, hanno durate molto diverse; per esempio l'età del bronzo in Egitto è ridotta rispetto a quella alpina; in epoca attuale alcune civiltà si trovano ancora nell'età della pietra.

I ghiacciai ebbero l'ultima grande espansione con uno spessore di centinaia di metri tra il 16.000 e il 14.000 a.C., periodo che sembra coincidere con la deposizione delle morene frontali wurmiane più esterne nelle Alpi. A questi fenomeni corrisponde un brusco calo altimetrico delle frequenze umane, rarefazione che dura molto tempo, durante il quale gli strati ci hanno restituito solo resti di micromammiferi. Poi segue una risalita durante le fasi finali del Würm parallelamente a quella della vegetazione arborea e delle faune montano - forestali. Nel Tardiglaciale l'uomo risale sulle montagne; la sua organizzazione è ormai complessa, di tipo tribale (culture maddaleniane). È possibile che in tutta l'Europa la foresta sia diventata un ostacolo alla mobilità dei cacciatori il che spiega, tra l'altro, la loro graduale frammentazione in gruppi locali, che portarono all'affiorare di divergenze culturali fra i due versanti delle Alpi. In sintesi il popolamento alpino, attraverso più stadi, caratterizzati da una evoluzione biologica e culturale, si avvicina al 5.000 a.C., con la presenza di ceramiche e del frumento che ci riportano in epoca storica.

Mai prima dell'uomo una specie dominante e di grossa mole era stata in grado di espandersi su tutta la Terra. Gli esseri umani poterono compiere tale impresa perché riuscirono ad adattare le esigenze di una creatura tropicale in condizioni molto variabili. In altri termini l'adattamento e l'inventiva culturale ridussero la necessità di competizione biologica in ambienti diversi, introducendo un fattore disgregatore notevole negli equilibri ecologici di tutto il globo. Secondo l'antropologo MC NEILL (1976) "...lasciandosi alle spalle gli ambienti tropicali, i nostri progenitori sfuggirono a molti parassiti e organismi patogeni ai quali i loro predecessori ed i loro stessi contemporanei erano sottoposti. Di conseguenza se ne avvantaggiarono la salute ed il vigore e il moltiplicarsi del numero degli esseri umani assunse una dimensione fino allora mai raggiunta".