



REGIONE AUTONOMA
VALLE D'AOSTA

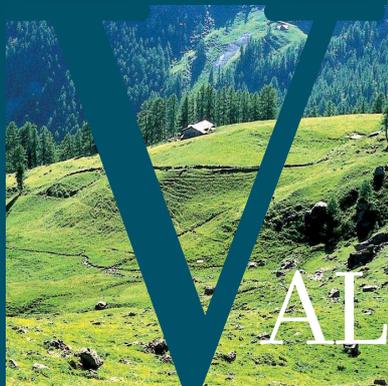


AMBIAMENTI

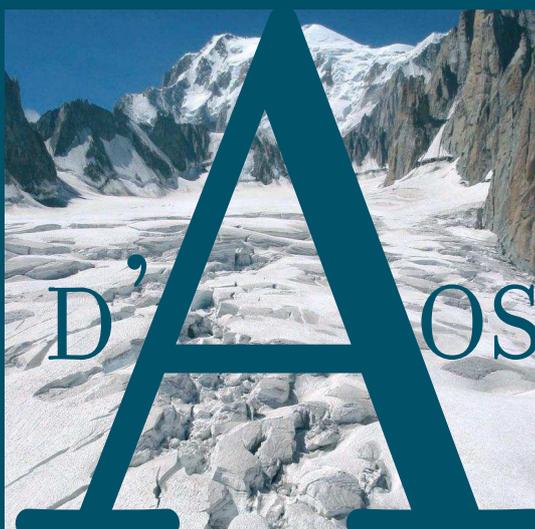


LIMATICI

IN



ALLE



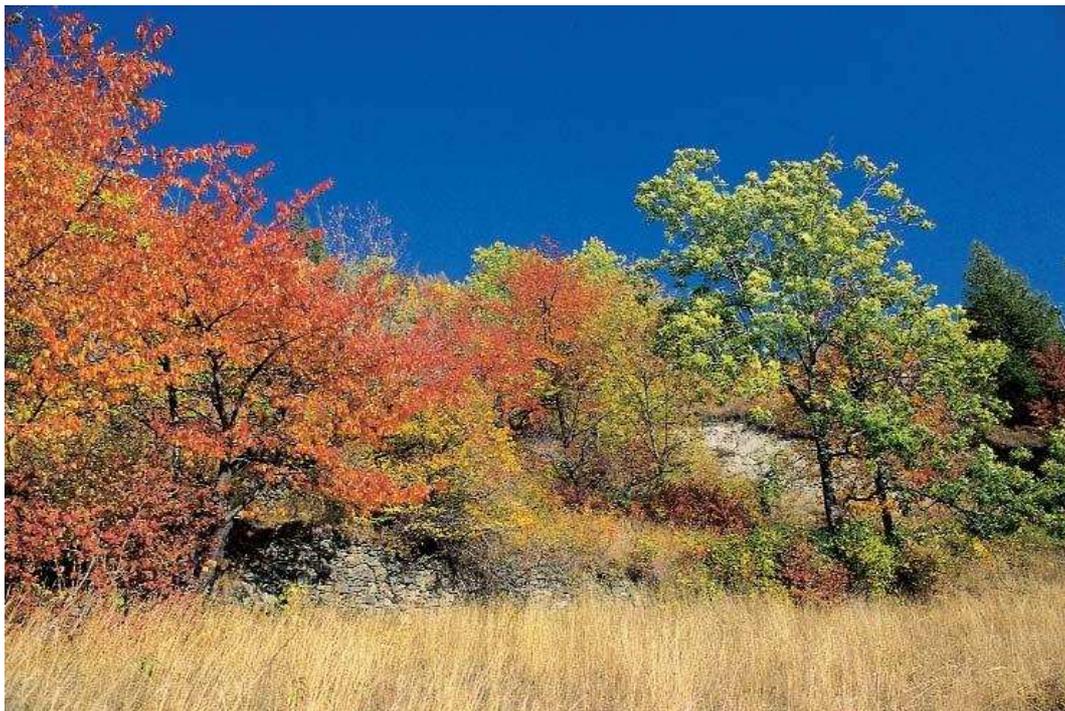
D' AOSTA



SOCIETÀ METEOROLOGICA SUBALPINA

CAMBIAMENTI CLIMATICI IN VALLE D'AOSTA

OPPORTUNITÀ E STRATEGIE DI RISPOSTA



Autunno nei dintorni del Col de Joux (11.10.2003)

REGIONE AUTONOMA VALLE D'AOSTA

PRESIDENZA DELLA REGIONE

RÉGION AUTONOME VALLÉE D'AOSTE

PRÉSIDENTE DE LA RÉGION



SOCIETÀ' METEOROLOGICA SUBALPINA

Sezione Alpi Occidentali della Società Meteorologica Italiana Onlus



ISBN 88-900099-9-3

Cambiamenti climatici in Valle d'Aosta: opportunità e strategie di risposta.

© Copyright 2006

Società Meteorologica Subalpina
Castello Borello, Bussoleno (TO), Italia
www.nimbus.it - info@nimbus.it

Elaborazione grafica copertina: Andrea Barberis Organista Design, Biella
Stampa e confezione: Graficat, Torino

Supervisione scientifica:

CLAUDIO CASSARDO, GIOVANNI BADINO

Dipartimento di Fisica Generale, Università di Torino

Coordinamento scientifico ed editoriale:

LUCA MERCALLI

Redazione: VALENTINA ACORDON,

DANIELE CAT BERRO, GENNARO DI NAPOLI

Revisione grafica e informatica: SOFIA MONTUSCHI

Desideriamo esprimere i nostri ringraziamenti a:

Presidenza della Regione Autonoma Valle d'Aosta

Assessorato Agricoltura e Risorse Naturali

Assessorato Sanità, Salute e Politiche Sociali

Assessorato Territorio, Ambiente e Opere Pubbliche

Assessorato Turismo, Sport, Commercio e Trasporti
nonché a tutti i membri del Comitato di Pilotaggio,
all'ARPA Valle d'Aosta e alla Compagnia
Valdostana Acque S.p.A. (CVA).

Tutte le fotografie sono degli Autori, salvo un'im-
magine in copertina e a p. 123 dello Studio
Guindani di Gressoney-St-Jean, a p. 79 di M.
Palomba, a p. 99 di M. Tron, a p. 124 di V.
Bertoglio, e a p. 139 della Compagnia Valdostana
Acque (CVA).

Dedichiamo questo lavoro a WILLY MÔNTERIN, da un
cinquantennio scrupoloso direttore
dell'Osservatorio Meteorologico di Gressoney-
D'Ejola, a quota 1850 m, così importante per le
analisi climatiche storiche in Valle d'Aosta.

Presentazione

LUCIANO CAVERI - Presidente Regione Autonoma Valle d'Aosta

Io l'ho visto il cambiamento climatico. Capisco che chiunque dica una cosa di questo genere possa essere preso per matto. Gli scienziati, ma anche gli storici, ci parlano sempre con grande cautela di secoli e millenni, che si fanno un baffo della breve durata della vita di ogni singolo essere umano.

Eppure io i cambiamenti li ho visti! Conosco diversi ghiacciai di cui ho constatato *de visu* la «sofferenza». Ho vissuto inverni *d'antan* con neviccate memorabili che non ho più visto. Ricordo certe primavere e certi autunni — da esatta descrizione come da libro delle elementari — ed oggi non li vedo più! Ho constatato l'invasività del bosco e i problemi crescenti nell'approvvigionamento dell'acqua.

Non lo dico con visione nostalgica e per altro ho la certezza che certi alti e bassi sono nella storia della Natura che ha forgiato la geografia della Valle e le caratteristiche del suo popolamento.

Questo studio nasce tuttavia da un'esigenza, quella previsionale. Per capire, nel limite del possibile, dove andremo a finire per decidere sui diversi temi: quale turismo, quale agricoltura, quale politica energetica e via di questo passo. Si tratta, per altro, anche nel nostro piccolo di applicare misure che invertano fenomeni di inquinamento e di degrado ambientale, che potrebbero - il condizionale resta d'obbligo - essere alla base di certi cambiamenti climatici.

Ringrazio tutti coloro che, in ogni struttura della Regione, hanno collaborato con Luca Mercalli, cui mi lega un'antica amicizia, un eguale amore per la montagna e anche una certa *vis polemica*, sempre a fin di bene!

Prefazione

MARTIN BENISTON - Université de Genève, Suisse

La situation géographique et la configuration des Alpes en font une région particulièrement intéressante pour de nombreuses études climatiques et environnementales dans la mesure où ce massif se situe à un «carrefour climatique» comprenant les influences océaniques, continentales, polaires, méditerranéennes et, à l'occasion, sahariennes.

Dans un climat qui change, la fréquence d'apparition de ces masses d'air se modifie également, avec des régimes secs ou humides, froids ou secs différents de ceux observés depuis plus d'un siècle. Les modèles de climat, appliqué à la région alpine, semblent s'accorder sur le fait que les hivers d'ici la fin du 21^e siècle seront plus doux (2-4°C de plus qu'aujourd'hui) et un peu plus humides, alors que les étés seront beaucoup plus chauds (4-6°C) et secs. Dans le même temps, certains événements extrêmes pourraient augmenter dans les Alpes, notamment les sécheresses et les pluies abondantes, mais aussi les vagues de chaleur et probablement les tempêtes de vent.

Aucune région alpine ne sera épargnée, que ce soit au nord des Alpes ou au sud, comme le Tessin ou le Val d'Aoste. L'environnement alpin sera fortement touché non seulement par l'amplitude des changements climatique mais aussi par leur rapidité. Ainsi, certains écosystèmes auront de réelles difficultés d'adaptation, alors que plus de la moitié des glaciers vont progressivement disparaître. La neige tombera à plus haute altitude avec un enneigement plus aléatoire pour les stations de ski et par conséquent des problèmes financiers à la clé. Enfin, l'hydrologie des bassins versants alpins sera fortement affectée par le climat futur ; la quantité d'eau et le caractère saisonnier des écoulements sera très différent d'aujourd'hui.

Comme il est peu vraisemblable de renverser la tendance au réchauffement en cours, vu l'inertie du système climatique, la seule stratégie que l'on peut adopter pour la protection de l'environnement passe par l'adaptation. Ceci nécessitera rapidement la mise en œuvre de choix politiques, économiques et technologiques pour faire face aux aspects négatifs du réchauffement du climat alpin.

Introduzione

LUCA MERCALLI - Presidente Società Meteorologica Italiana

Il cambiamento climatico, già evidente anche in Valle d'Aosta con l'aumento delle temperature e la rapida riduzione dei ghiacciai, propone al tempo stesso sfide e opportunità per il futuro delle regioni montane. Turismo, agricoltura, sanità, edilizia, riserve idriche, produzione energetica e trasporti saranno in qualche modo influenzati dai nuovi assetti climatici e ambientali che andranno delineandosi nel XXI secolo, quali che siano le cause, antropiche, naturali o verosimilmente una combinazione di entrambe. La Società Meteorologica Italiana cominciò a studiare il clima della Valle d'Aosta attorno al 1870 e — dopo un periodo di stasi — è ritornata a portare il proprio contributo di ricerca e di divulgazione a partire dal 1993, con l'attività della Società Meteorologica Subalpina, che ne costituisce il braccio operativo per le Alpi Occidentali.

Sono pertanto lieto che l'Amministrazione della Regione Autonoma Valle d'Aosta, nella persona del suo Presidente Luciano Caveri, uomo di cultura attento ai cambiamenti ambientali — con il quale da oltre un decennio ho condiviso queste problematiche tanto al tavolo dei convegni quanto sulle nevi del Trofeo Mezzalama — abbia voluto affidare alla nostra Associazione il compito di tracciare un quadro sugli scenari climatici del futuro valdostano.

La Valle d'Aosta diviene così tra le prime regioni in Italia, insieme alla Toscana, a dotarsi di uno studio di sintesi che descriva i rischi ma anche i potenziali vantaggi legati agli scenari climatici futuri, individuando soluzioni e strategie per la mitigazione di un problema complesso, in analogia a quanto già fatto da anni in altri paesi alpini.

Lungi dal voler dare risposte definitive ed esaustive a un problema che in Italia si apre da poco al dibattito pubblico, essendo stato perlopiù lasciato in balia di chiacchiere confuse, questo lavoro vuole semplicemente informare e sensibilizzare tecnici e amministratori locali sui problemi connessi con i cambiamenti climatici, in modo che possano operare le proprie scelte strategiche con piena coscienza dei principali caratteri evolutivi attesi nei prossimi decenni, effettuando eventualmente ulteriori studi e approfondimenti nei singoli settori applicativi. Sono certo infine, che oltre alla competenza tecnico-scientifica del gruppo di lavoro, da queste pagine emergerà anche il profondo coinvolgimento e l'appassionata affezione che tutti noi nutriamo per il meraviglioso territorio alpino della *Vallée*.

Sintesi delle tendenze e degli scenari di alcuni indicatori climatici in Europa e in Valle d'Aosta

<i>Indicatori</i>	<i>Punti chiave</i>
Clima e atmosfera	
<i>Gas serra</i>	A causa dell'attività antropica, la concentrazione di CO ₂ (biossido di carbonio) è aumentata del 36% dall'età pre-industriale, con una accelerazione nella crescita dal 1950. Attualmente il valore è di 381 ppmv, all'inizio dell'era industriale era 280 ppmv.
	La crescita complessiva della concentrazione di tutti i gas serra dall'era pre-industriale è di 170 ppmv di biossido di carbonio equivalente. L'anidride carbonica contribuisce per il 61%, il metano per il 19% , i CFC e HCFC per il 13% e l'ossido d'azoto per il 6%
	Se non vengono attuate politiche di contenimento, entro il 2100 si profila un ulteriore aumento fino a 650 -1215 ppmv di CO ₂
	Per conseguire l'obiettivo UE di contenere entro i 2 °C l'aumento della temperatura, le emissioni di gas serra devono essere ridotte sensibilmente rispetto ai livelli del 1990
<i>Temperatura dell'aria</i>	La temperatura media globale è aumentata di 0.7±0.2 °C negli ultimi 100 anni. Gli anni 1990 sono stati il decennio più caldo mai osservato.
	Il riscaldamento sulla regione alpina è stato maggiore di quello globale, con un aumento di circa 1 °C dal 1900. L'aumento di temperatura è stato più sensibile in inverno che in estate
	In Valle d'Aosta il 2003 è stato l'anno più caldo, seguito dal 2004 e dal 2002
	A livello globale tra il 1990 e il 2100 si prevede un aumento di temperatura tra 1.4 e 5.8 °C, e tra 1.5 e 5.4 °C in Valle d'Aosta. La soglia di 2 °C di aumento di temperatura rispetto all'età pre-industriale, sarà probabilmente superata intorno al 2050.
<i>Precipitazioni</i>	Il trend delle precipitazioni annuali in Europa tra il 1900 e il 2000 mostra un comportamento opposto tra il nord-Europa (più piovoso del 10-40%) e il sud-Europa (fino al 20% più secco). In gran parte d'Europa i cambiamenti sono stati più sensibili in inverno.
	In Valle d'Aosta appare una diminuzione delle precipitazioni dopo il 1940, con un aumento della frequenza degli anni meno piovosi della media, ma le tendenze sono poco evidenti.
	In futuro si prevede un aumento delle precipitazioni annuali del 1-2 % per decennio nell'Europa settentrionale e una diminuzione delle precipitazioni annuali del 1% per decennio nell'Europa meridionale, con punte fino al 5% di diminuzione per decennio nelle precipitazioni estive.
	L'effetto della diminuzione delle precipitazioni sull'Europa meridionale porterà a siccità più frequenti, con impatti considerevoli sull'agricoltura e sulla disponibilità d'acqua.
<i>Eventi estremi</i>	Negli ultimi 100 anni il numero di giorni di gelo è diminuito in gran parte d'Europa, compresa la Valle d'Aosta (meno 15-20% da metà anni 1970), mentre sono aumentati il numero di giorni con temperature superiori a 30 °C e la frequenza delle ondate di calore.
	La frequenza di giorni con precipitazioni intense è generalmente diminuita nell'Europa meridionale, mentre è aumentata nell'Europa centro-settentrionale. In Valle d'Aosta, nonostante la percezione comune, si evidenzia una lieve tendenza alla diminuzione degli eventi di pioggia intensa, in particolare nella stagione invernale.
	Si stima che gli inverni rigidi scompariranno quasi del tutto intorno al 2080, mentre le estati molto calde diventeranno più frequenti
	Si presuppone che intorno al 2080 sia le siccità che gli episodi di precipitazioni intense diventeranno più frequenti

Sintesi delle tendenze e degli scenari di alcuni indicatori climatici in Europa e in Valle d'Aosta (2° parte)	
Indicatori	Punti chiave
Neve e ghiacciai	
<i>Ghiacciai</i>	Dal 1850 al 1980 i ghiacciai alpini hanno perso un terzo della loro area e metà della loro massa. Dal 1980 i ghiacciai rimanenti si sono ridotti di un altro 20-30%, mentre solo nell'estate 2003 è stato perso il 10% della massa glaciale rimanente.
	La fusione dei ghiacciai alpini ha raggiunto oggi livelli superiori a quelli degli ultimi 5000 anni.
	In Valle d'Aosta la superficie glaciale si è ridotta del 50 % dal 1820 a oggi. Nel 1983 la superficie glaciale era pari a 202 km ² e nel 1999 misurava solo più 157 km ² , con una perdita del 23% in soli 16 anni.
	Si stima che nel 2050 il 75% dei ghiacciai Svizzeri sarà scomparso. La situazione potrebbe essere analoga anche per la Valle d'Aosta.
<i>Neve</i>	Nell'emisfero nord l'estensione della copertura nevosa annuale è diminuita del 10% dal 1966.
	La durata della neve al suolo sull'Europa centrale e sulla regione alpina si è accorciata in media di circa 9 giorni per decennio tra il 1971 e il 1994.
	In Valle d'Aosta negli ultimi 15 anni si è assistito ad un anticipo di circa 15 giorni della fusione primaverile.
	La copertura nevosa nell'emisfero nord diminuirà ulteriormente nel corso del XXI secolo. In Valle d'Aosta sulle zone di bassa montagna (quota inferiore a 1500 metri) si stima una diminuzione del 35% della durata dell'innevamento per ogni grado di aumento della temperatura .
Ecosistemi terrestri e biodiversità	
<i>Struttura del popolamento vegetale</i>	Il cambiamento climatico degli ultimi 30 anni ha causato una diminuzione delle popolazioni di specie vegetali in Europa.
	La diversità delle specie vegetali è cresciuta in Europa nord-occidentale a causa della migrazione verso nord delle specie meridionali termofile.
	Globalmente un gran numero di specie potrebbe estinguersi a causa delle future condizioni climatiche, anche per la combinazione con fattori non climatici, come la frammentazione degli habitat, che limitano le capacità di migrazione e adattamento dei vegetali.
<i>Distribuzione delle specie vegetali nelle regioni montane</i>	Le specie montane endemiche sono minacciate dalla migrazione verso l'alto di altre specie sub-alpine più competitive.
	Nelle Alpi la migrazione verso l'alto ha portato ad un incremento di specie vegetali in 21 su 30 vette, mentre nelle altre è diminuito o è rimasto costante.
	I cambiamenti termici stimati in Europa sono al di fuori del limite di tolleranza di molte specie alpine, che verranno sostituite da specie più competitive, con perdita di endemismi tipici delle regioni montane.
<i>Sequestro di carbonio terrestre</i>	Nel periodo 1990-1998 la biosfera terrestre europea è stata un assorbitore netto di carbonio che ha parzialmente compensato le maggiori emissioni antropogeniche di biossido di carbonio.
	Il sequestro di carbonio in Europa può essere incrementato con l'espansione e la cura delle foreste. Il potenziale aggiuntivo di sequestro di carbonio in Europa dovuto a agricoltura e foreste è tuttavia relativamente piccolo se confrontato con gli obiettivi del protocollo di Kyoto.
	L'aumento termico stimato ridurrà probabilmente in futuro il potenziale sequestro di carbonio da parte della biosfera terrestre europea.
<i>Fenologia e periodo vegetativo</i>	Mediamente il periodo vegetativo in Europa si è allungato di 10 giorni tra il 1962 e il 1995 e si ritiene che si dilaterà ulteriormente in futuro.
<i>Sopravvivenza dell'avifauna</i>	Gli effetti positivi dell'incremento termico sulla vegetazione saranno probabilmente vanificati da un aumento del rischio di siccità in Europa meridionale.
	I tassi di sopravvivenza di differenti specie di uccelli migratori in Europa sono aumentati negli ultimi decenni e si prevede che, a causa delle temperature invernali più miti, aumenteranno ulteriormente. Non è possibile tuttavia determinare quale impatto ciò possa avere sulle popolazioni di uccelli migratori e non.

Sintesi delle tendenze e degli scenari di alcuni indicatori climatici in Europa e in Valle d'Aosta (3° parte)	
Indicatori	Punti chiave
Acqua	
<i>Deflusso fluviale annuale</i>	Il deflusso annuale dei fiumi europei è cambiato negli ultimi decenni: in alcune regioni è aumentato, mentre in altre, come in Europa meridionale, è diminuito.
	L'effetto combinato dei cambiamenti della temperatura e delle precipitazioni amplificherà i cambiamenti nel deflusso annuale.
	Il deflusso annuale è destinato a ridursi fortemente in Europa meridionale con conseguenze per la disponibilità idrica.
	In Valle d'Aosta sarà possibile un anticipo della "morbida" tardo primaverile-estiva a causa di una più precoce fusione nivale, e una più pronunciata magra estiva a causa della diminuzione delle precipitazioni e dell'esaurimento della riserva glaciale.
Agricoltura	
<i>Produzione vegetale</i>	Le rese per ettaro dei principali prodotti agrari sono cresciute negli ultimi 40 anni grazie ai progressi tecnologici, mentre i cambiamenti climatici hanno avuto influenza marginale.
	L'agricoltura nell'Europa centro-settentrionale potrà potenzialmente beneficiare di temperature più elevate e maggiori concentrazioni di CO ₂
	L'area coltivata potrà espandersi verso nord.
	In molte zone dell'Europa meridionale l'agricoltura verrà minacciata dalla carenza idrica.
	Durante l'ondata di caldo del 2003 molti paesi dell'Europa meridionale hanno sofferto perdite di raccolto fino al 30%. In Valle d'Aosta l'estate 2003 ha causato perdite nella produzione foraggera di circa il 27%.
	Perdite di raccolto potranno diventare più frequenti a causa di un aumento di eventi meteorologici estremi (siccità, alluvioni, tempeste, grandinate) e della maggior diffusione di patologie da parte di funghi e insetti.
Economia	
<i>Perdite economiche</i>	In Europa il 64% di tutti gli eventi catastrofici a partire dal 1980 sono direttamente attribuibili a estremi climatici e assommano al 79% delle perdite economiche.
	Le perdite economiche causate da eventi climatici sono passate da 5 miliardi di dollari verso il 1980 agli attuali 11 miliardi di dollari.
	Il probabile aumento di eventi meteorologici estremi in futuro causerà un incremento dei danni.
Salute umana	
<i>Ondate di calore</i>	Più di 30000 vittime, in particolare tra la popolazione anziana, sono attribuibili all'ondata di caldo che ha investito l'Europa sud-occidentale nell'estate 2003.
	In Valle d'Aosta non sono stati segnalati significativi incrementi di mortalità nell'estate 2003.
	Le ondate di calore sono previste diventare più frequenti e intense nei prossimi decenni con aumento nel numero di decessi dovuti al caldo; la Valle d'Aosta potrebbe beneficiare di una maggior frequentazione estiva da parte delle popolazioni delle città padane soggette a forte aumento termico.
<i>Alluvioni</i>	Tra il 1975 e il 2001 sono state registrate in Europa 238 alluvioni rilevanti; in questo periodo il numero di eventi è aumentato.
	Il numero di persone coinvolte in alluvioni cresce significativamente con conseguenze negative sulla salute sia fisica sia psicologica.
	Le vittime causate da alluvioni sono diminuite, probabilmente a causa di migliori misure di prevenzione e soccorso.
	I cambiamenti climatici incrementeranno probabilmente la frequenza delle alluvioni, in particolare delle piene improvvise in territori montani, che sono quelli che presentano il maggior rischio di causare vittime.
<i>Parassiti e infezioni</i>	Non si rilevano in Valle d'Aosta cambiamenti apprezzabili.

Indicazioni per la programmazione politica nei confronti dei cambiamenti climatici

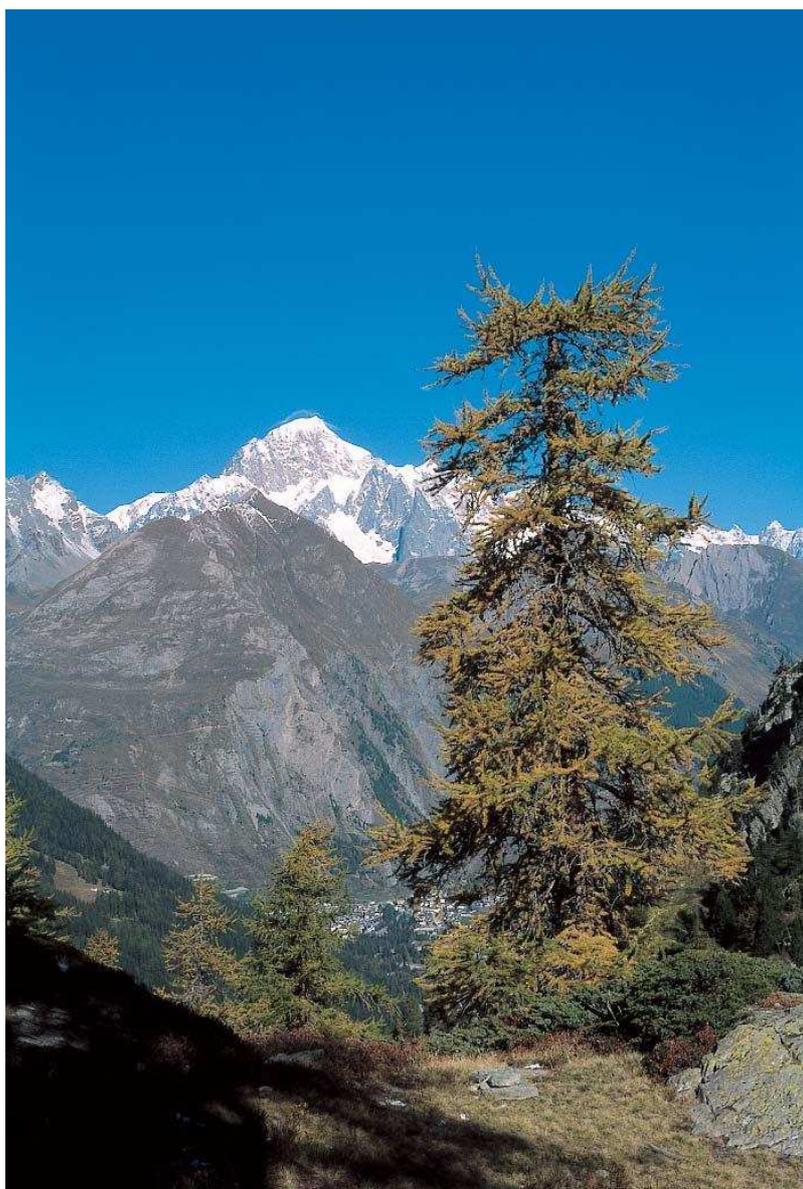
- | |
|---|
| 1) Potenziamento reti irrigue |
| 2) Risparmio idrico e cisterne domestiche per raccolta acqua piovana |
| 3) Massimo isolamento termico edifici secondo standard Casaclima (BZ) o Minergie (Svizzera) |
| 4) Massima incentivazione dell'uso di energia solare |
| 5) Utilizzo biomassa legnosa dimensionato con le potenzialità forestali |
| 6) Stabilizzazione impianti innevamento programmato senza nuove espansioni |
| 7) Minimizzazione della produzione di rifiuti e massima quota riciclabile |
| 8) Economia di filiera corta dove possibile (minimo trasporto) |
| 9) Salvaguardia reti di osservazione meteoidrologica |
| 10) Educazione e sensibilizzazione della cittadinanza al consumo critico |

Le tabelle di sintesi delle tendenze e degli scenari climatici delle pagine precedenti sono state desunte da «Impacts of Europe's changing climate» - EEA report 2/2004 - European Environment Agency, con integrazioni degli autori per la Valle d'Aosta.



La superficie crepacciata del ghiacciaio del Rutor, tra i maggiori apparati glaciali valdostani (08.10.1999, f. D. Cat Berro). Negli ultimi 150 anni, dalla fine della Piccola Età Glaciale, la superficie glacializzata - sulle Alpi intere come in Valle d'Aosta - si è ridotta della metà, e l'ulteriore riscaldamento atmosferico atteso per il XXI secolo potrebbe segnare la scomparsa dei ghiacci al di sotto dei 3500 m circa. Il venir meno di questo affascinante elemento del territorio montano locale, oltre a determinare un'alterazione nei regimi idrologici e nella disponibilità di acqua, imporrà anche una revisione dell'offerta turistica, che potrà orientarsi verso altre attrazioni naturali e culturali che certamente in Valle d'Aosta non mancano.

Il clima e i suoi cambiamenti



Colori e limpidezza autunnali in alta Valle d'Aosta: il Monte Bianco dal sentiero per il Rifugio Deffeyes, La Thuile (08.10.1999, f. D. Cat Berro).



«La valutazione integrata del cambiamento climatico a scala regionale sarà uno dei principali obiettivi della comunità scientifica nei prossimi anni. La regione alpina sembra molto favorita per giocare da questo punto di vista un ruolo fruttuoso. Possiede una forte tradizione nel coinvolgere il pubblico nei processi decisionali. E' una delle regioni economicamente più dinamiche e prospere del mondo. Comprende un grande ventaglio di differenti tradizioni culturali. Se una valutazione integrata ha successo nel mediare la discussione circa i conflitti reali o immaginari tra obiettivi sociali, economici e ecologici, vi sono buone possibilità che questa regione assuma una posizione pionieristica nell'adottare una strada praticabile verso il futuro sostenibile.»

CLAUDIA PAHL-WOSTL, 1998

«Il rispetto per l'opinione dell'uomo della strada è un importante elemento della tradizione politica nella regione alpina.»

MAX IMBODEN, 1962

«Indipendentemente da quello che si fa nei laboratori di ricerca, è la politica che deve trovare la soluzione, cominciando a comprendere che un conto è la valutazione del rischio, e un conto la vulnerabilità. In altre parole: che le Torri Gemelle fossero vulnerabili ad attacchi terroristici era ben noto, e poco conta quale fosse il rischio di una particolare forma di attacco.»

GUIDO VISCONTI, 2005

1. CHE COS'E' IL CLIMA

1.1 - Il clima terrestre dipende da una complessa rete di interazioni tra fattori quali l'energia solare, gli oceani, l'atmosfera, la biosfera. Qui sotto, nubi lenticolari al tramonto del 06.01.2000 a Estoul, Val d'Ayas (f. D. Cat Berro).

«Tutti gli aspetti del clima terrestre — il vento, la pioggia, le nubi, le temperature — sono il risultato dei trasferimenti e delle trasformazioni di energia all'interno dell'atmosfera, sulla superficie terrestre e negli oceani.»

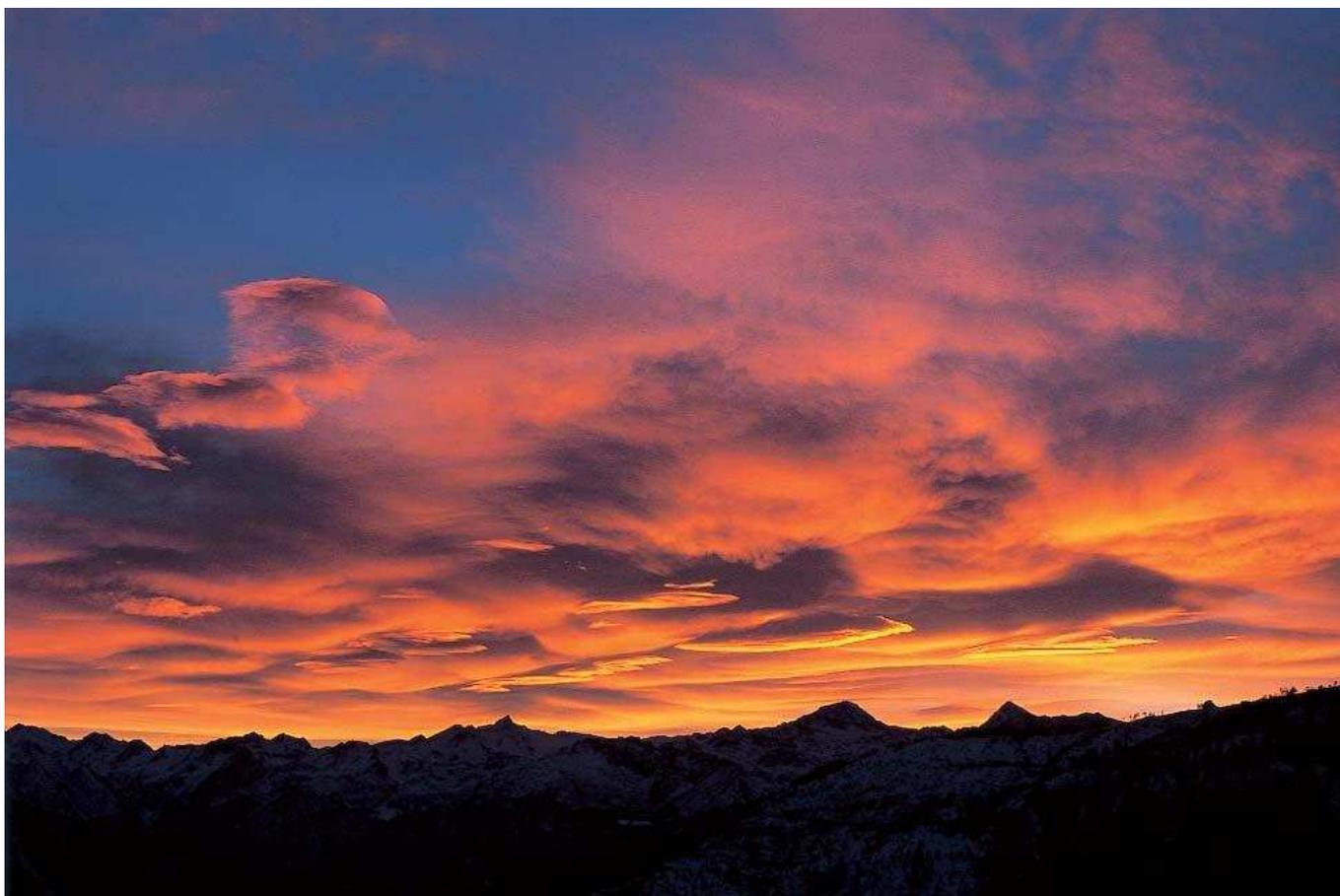
(WILLIAM BORROUGHS, 2003)

Una definizione: dal «tempo» al «clima»

Le situazioni climatiche e le loro variazioni permeano e influenzano la vita quotidiana e le attività economiche, locali e globali.

Che cosa si intende per clima?

Mentre ciò che chiamiamo «tempo» è rappresentato dall'insieme delle condizioni atmosferiche (stato del cielo, temperatura, umidità relativa, visibilità, velocità e direzione del vento, ecc...) osservate in un preciso momento su una località, il «clima» consiste nel comportamento atmosferico mediamente atteso su una regione, sulla base di misure e osservazioni quotidianamente condotte per un lungo periodo di tempo (di solito almeno un trentennio, in



accordo con le normative della Organizzazione Meteorologica Mondiale). In altre parole, «tempo» è ciò che puntualmente si osserva, «clima» è invece ciò che ci si aspetta di osservare in un dato periodo (giorno, mese, stagione, anno) e in dato un luogo.

Un esempio: ad Aosta il clima di luglio è solare, secco e assai ventilato; mediamente si totalizzano 35 mm di pioggia e la temperatura media si attesta a 21 °C. Questi dati provengono dall'osservazione del tempo atmosferico che si è succeduto nel mese di luglio negli ultimi 30 anni. Ma in realtà — tra un anno e l'altro — le condizioni variano più o meno ampiamente, scostandosi spesso dalla «norma climatica», talora in modo eclatante: ci sarà un luglio molto caldo e arido, bagnato appena da poche gocce di pioggia (come quello del 1994, che ad Aosta ebbe temperatura

media di 23 °C e 8 mm di precipitazione), magari seguito da un luglio instabile, fresco e piovoso (come quello del 1996, con 19.5 °C e 65 mm). Ecco dunque introdotti i concetti di **variabilità climatica** e di **estremi climatici**, che verranno trattati meglio nel capitolo 2.

Come funziona: una complessa rete di interazioni tra Sole, Terra e atmosfera

Il clima terrestre è il risultato di un insieme di **complesse interazioni tra l'energia in arrivo dal Sole** («motore» di tutti i processi climatici), **l'atmosfera, gli oceani, le nubi, i suoli, la biosfera e la natura della superficie terrestre** (copertura vegetale, presenza ed estensione dei ghiacci, superfici artificiali create dall'uomo, ecc...). Una descrizione adeguata di questi fenomeni richiederebbe una lunga trattazione, ma in questa sede ci limitiamo a descrivere schematicamente alcuni elementi — astronomici, geologici, geografici, chimico-fisici — che concorrono a rendere il clima terrestre così come oggi lo conosciamo, al fine di comprendere meglio i capitoli che seguiranno.

Aspetti astronomici: la posizione della Terra nel Sistema Solare (mediante a 150 milioni di chilometri di distanza dal Sole) e l'inclinazione dell'asse terrestre condizionano la quantità di radiazione in arrivo dal Sole. Al limite superiore dell'atmosfera l'in-

Etimologia di «clima»

Il termine «*clima*» deriva dal greco antico «*klima*», ovvero «*inclinazione*», appropriato riferimento al ruolo primario che l'altezza del Sole sull'orizzonte - nelle diverse stagioni e latitudini - ha nel determinare l'intensità della radiazione solare, dunque le temperature e di conseguenza tutti gli altri aspetti dei fenomeni atmosferici.

tensità della radiazione solare è mediamente pari a 1367 W/m^2 : questo valore è definito *costante solare* (cfr. pag. 6).

Riflettività del pianeta: la natura della superficie terrestre, nonché la copertura nuvolosa, determinano la quantità di energia solare riflessa o assorbita dal pianeta. La neve fresca appena caduta ha un'elevatissima *albedo* (frazione di radiazione incidente che viene riflessa da un corpo), circa 0.9: questo significa che il 90% della radiazione che la colpisce viene nuovamente riflessa verso lo spazio. Gli oceani invece hanno un'albedo molto bassa (circa 0.03), per questo assorbono molta energia termica proveniente dal sole.

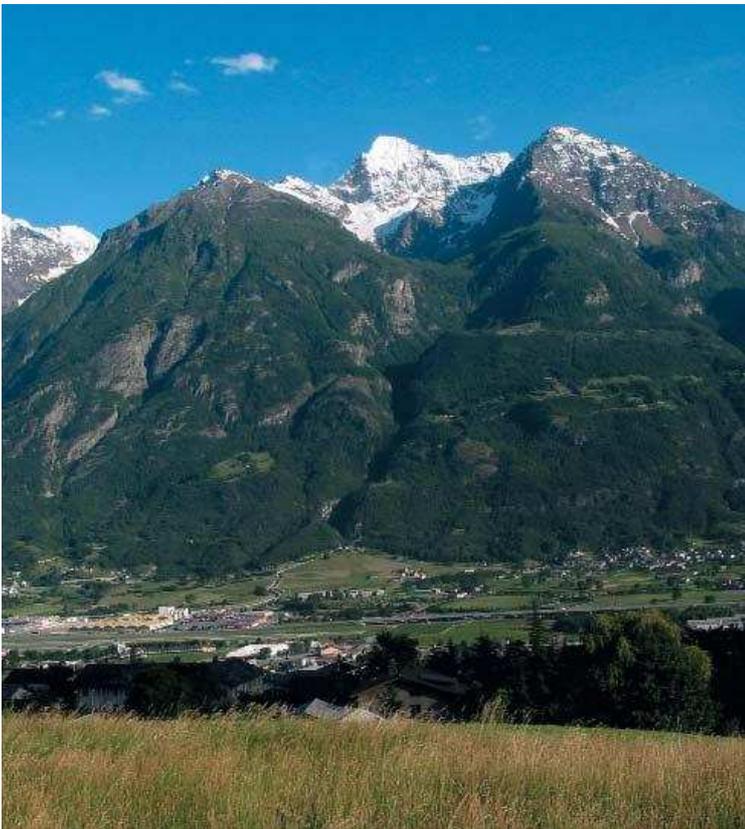
Sono le nubi il principale fattore di controllo dell'albedo terrestre, che globalmente

ammonta in media a 0.3: dunque il 30% della radiazione solare incidente sulla Terra viene immediatamente riflessa verso lo spazio per via delle caratteristiche ottiche delle superfici colpite (nubi, oceani, ghiacciai, foreste, deserti, città). L'albedo del pianeta Venere è molto elevata (0.78), per via della densa copertura nuvolosa che riflette buona parte della radiazione solare, ma l'atmosfera è composta per il 97% di CO_2 e la temperatura è di circa $450 \text{ }^\circ\text{C}$. In sintesi, l'albedo determina la quantità di energia assorbita o riflessa, dunque la temperatura, sia localmente (differenze nel riscaldamento di un prato rispetto a una strada asfaltata), sia a livello planetario.

Presenza dell'atmosfera: se la Terra non fosse circondata da un'atmosfera, la sua temperatura media in superficie sarebbe di $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ (255 K), considerando la sua albedo e la distanza dal Sole. Tuttavia, i gas atmosferici a effetto serra, quali il vapore acqueo e il biossido di carbonio (CO_2), assorbono parte della radiazione infrarossa a onda lunga ri-emessa dalla superficie terrestre, consentendo un guadagno termico di $33 \text{ }^\circ\text{C}$: infatti l'effettiva temperatura media del pianeta è di $15 \text{ }^\circ\text{C}$ (288 K). Oggi però le attività umane stanno modificando la composizione chimica dell'atmosfera, incrementando artificialmente l'effetto serra naturale e inducendo cambia-

1.2 - La posizione della Terra nel Sistema Solare, a 150 milioni di chilometri dal Sole, l'albedo (frazione di radiazione riflessa dal pianeta verso lo spazio, pari al 30%) e la composizione atmosferica concorrono in primo luogo a determinare la temperatura media terrestre, pari a circa $15 \text{ }^\circ\text{C}$.





1.3 - Il versante settentrionale del M. Emilius, incumbente sulla conca di Aosta, in una tersa giornata d'estate (11.06.2002, f. L. Mercalli). Intorno al 21 giugno si raggiunge la massima quantità di energia solare giornaliera ricevuta dall'emisfero Nord, circa 31 MJ/m^2 (8.6 kWh/m^2) nei giorni più limpidi alla latitudine della Valle d'Aosta e a quota 500 m.

menti climatici, in primo luogo un anomalo aumento delle temperature globali.

Gli oceani: la loro elevata capacità termica, ovvero la capacità di assorbire e immagazzinare (e dunque anche di rilasciare lentamente) enormi quantità di calore proveniente dal Sole — di gran lunga superiore a quella dell'atmosfera — ne fa uno dei principali fattori di regolazione del clima planetario: gli oceani infatti giocano un ruolo fondamentale nel ridistribuire il calore intorno alla Terra. La circolazione globale delle acque oceaniche è controllata dalla loro temperatura e salinità (*circolazione termalina*), le quali innescano un lento flusso (*Great Conveyor Belt*) che, nel volgere di un migliaio di anni, porta le acque superficiali del Pacifico set-

Quanta energia ci arriva dal Sole?

Il flusso di radiazione che raggiunge una superficie piana, esposta perpendicolarmente ai raggi solari al di fuori dell'atmosfera terrestre e alla distanza media Terra-Sole, è pari a 1367 W/m^2 , ed è denominato costante solare. Poiché però questa energia si distribuisce sulla superficie pressoché sferica della Terra, che ha estensione quattro volte superiore all'area della sezione circolare del pianeta, e poiché non tutte le zone sono investite con eguale intensità dai raggi, ne consegue che al limite superiore dell'atmosfera questo valore si riduce - in media - a 340 W/m^2 . Di questa quantità, però, soltanto il 51% viene effettivamente assorbito dalla superficie terrestre (circa 170 W/m^2), la rimanente porzione viene assorbita da atmosfera e nubi (19%), o riflessa dalla superficie terrestre, dalle nubi e dall'atmosfera (30%). Ad Aosta ogni anno si totalizza mediamente una radiazione solare globale di circa 4800 MJ/m^2 (MegaJoule per m^2), pari a circa 1333 kWh/m^2 ; il minimo mensile è di circa 80 MJ/m^2 in dicembre ed il massimo è di $680\text{--}690$ in giugno-luglio.

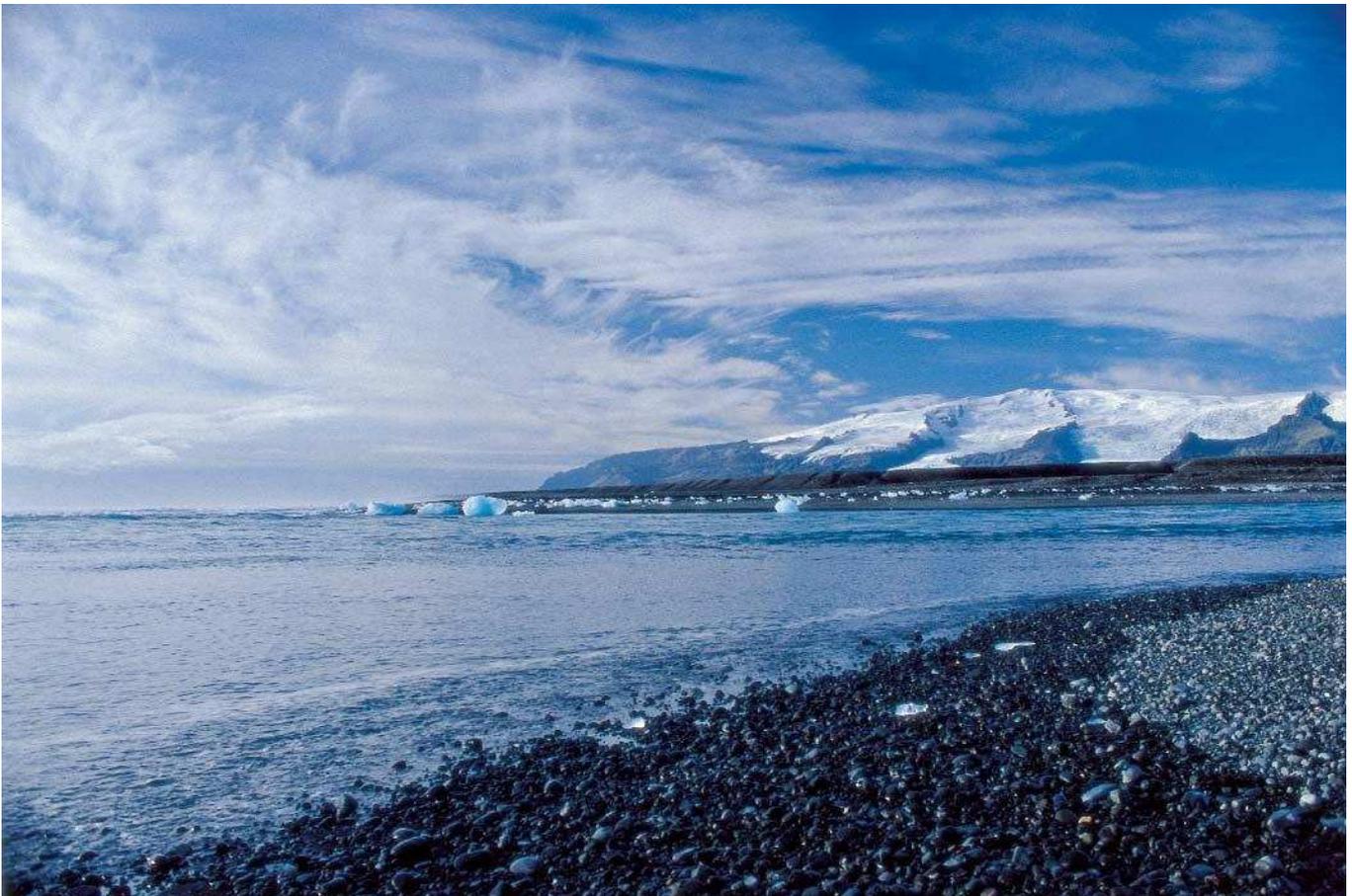
1.4 - Gli oceani sono tra i principali regolatori del clima terrestre, poiché sono in grado di accumulare e cedere enormi quantità di energia termica in tempi lunghi. A lato, l'Oceano Atlantico sulla costa meridionale dell'Islanda, dove giunge l'acqua mite della Corrente del Golfo.

tentrionale attraverso l'Oceano Indiano e l'Oceano Atlantico fin nei pressi dell'Islanda, dove si inabissano (a causa dell'aumento di densità, dovuto al loro raffreddamento e all'aumentata salinità) e invertono la rotta per ritornare, in profondità, nel Pacifico Settentrionale, dove riemergono in superficie.

Le correnti oceaniche possono influenzare fortemente il clima delle regioni costiere che lambiscono: la tiepida Corrente del Golfo, che attraversa il Nord Atlantico dal Golfo del Messico alla costa europea, rende il clima del Regno Unito e della Norvegia relativamente temperato rispet-

to a quello delle regioni poste alla medesima latitudine sull'opposta sponda dell'oceano (Canada, Groenlandia).

Ciclo dell'acqua: la radiazione solare attiva il ciclo dell'acqua, che è alla base della formazione di nubi e precipitazioni. La quantità d'acqua evaporata da oceani e terre emerse eguaglia quella delle precipitazioni, che globalmente durante l'anno ammontano a 496.000 km³ (13.000 volte il volume del Lago Maggiore). Durante i passaggi di stato (evaporazione, condensazione, fusione, solidificazione, sublimazione) che avvengono nell'ambito del ciclo



dell'acqua, si verificano importanti scambi di *calore latente*, assorbito durante l'evaporazione e la fusione o rilasciato durante la condensazione e la solidificazione in atmosfera: ciclo dell'acqua e scambi di energia termica in atmosfera sono dunque strettamente correlati.

Ciclo del carbonio: tra i cicli *biogeochimici*, quello del carbonio è particolarmente importante per il clima terrestre, in quanto partecipa alla regolazione della quantità di carbonio atmosferico che — sotto forma di CO₂ (biossido di carbonio o anidride carbonica) — concorre all'effetto serra, a sua volta strettamente legato alla temperatura dell'aria. Esiste un attivo stoccaggio di carbonio atmosferico da parte degli ecosistemi marini e terrestri (*pozzi di carbonio o carbon sinks*): si stima che negli Anni 1990 gli oceani abbiano assorbito mediamente 1.9 GtC (gigatonnellate di carbonio atmosferico, vale a dire 10¹² kg) per anno.

Foreste: sono una notevole sorgente di vapore acqueo, che viene immesso in atmosfera attraverso l'evapotraspirazione dalle piante. La fotosintesi clorofilliana consente la temporanea cattura del carbonio emesso in atmosfera dalle attività umane, ma in modo efficace soltanto nel caso di piante giovani, in fase di attivo

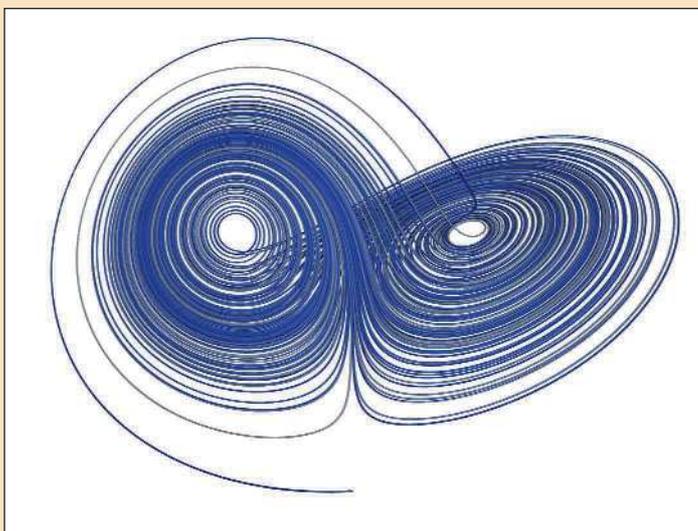
immagazzinamento del carbonio nei tessuti vegetali in crescita. Il taglio di estese porzioni di foresta può portare, specialmente nella fascia equatoriale, a sostanziali alterazioni nei regimi delle piogge, nonché a gravi perdite di suoli per erosione e dilavamento.

Vi è dunque una complessa rete di interazioni di natura fisica, chimica e biologica all'interno del sistema climatico, in cui i fattori elencati sopra sono solo alcuni tra i più importanti, e le cui dinamiche peraltro non sono ancora del tutto note in dettaglio, ragion per cui la comprensione della «macchina atmosferica» — e soprattutto la previsione del suo stato futuro — è questione assai difficile. Si tratta infatti di un sistema complesso, non lineare, nel quale la variazione di uno solo dei componenti può riflettersi sullo stato di tutto il sistema, in modo spesso difficilmente prevedibile. Proprio verso la migliore comprensione di queste interazioni oggi si concentrano grandi sforzi di ricerca scientifica.

Il fatto che vi siano ancora molte relazioni da chiarire e meccanismi di azione da comprendere, non riduce tuttavia il valore della gran quantità di argomenti ormai noti e la necessità di agire per proteggere il clima.

Caos e complessità del clima

Il clima terrestre è frutto di un continuo flusso di energia (proveniente dal sole) e materia (vapore acqueo, CO₂ e altri gas) tra atmosfera, oceani, vita animale e vegetale, suolo e vulcani. Nel corso delle ere geologiche il clima terrestre ha raggiunto diversi stati di equilibrio, come quello attuale, oppure quello delle ere glaciali, rispondendo a fattori «forzanti» naturali *esterni*, vale a dire variazioni nell'attività solare o differente geometria dell'orbita terrestre, e *interni*, come il contenuto atmosferico di gas serra o di ceneri vulcaniche.



La variegata combinazione di questi fattori fa del clima terrestre un sistema in perenne mutamento. Esso è dunque un sistema instabile ma non ciclico, nel senso che al suo interno mai si ripropongono condizioni identiche. In questo sta il significato del termine «complesso», che non vuol dire solo «complicato», ma significa che tutte le interazioni tra le molteplici variabili sono legate dalla dinamica *non lineare*, ovvero non sono riducibili a equazioni dove il rapporto *causa-effetto* è identificabile e prevedibile con accuratezza. E c'è dell'altro, nella dinamica

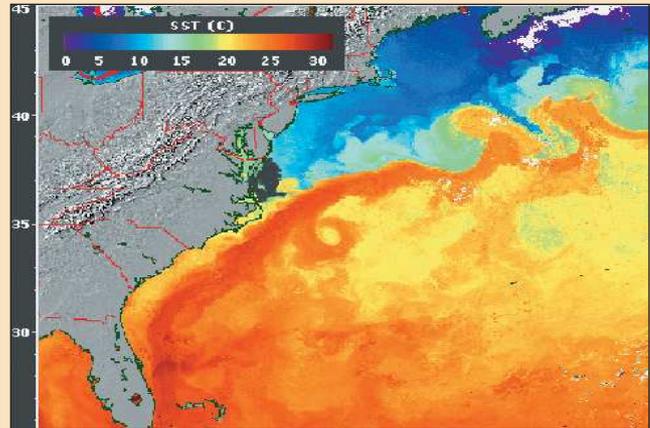
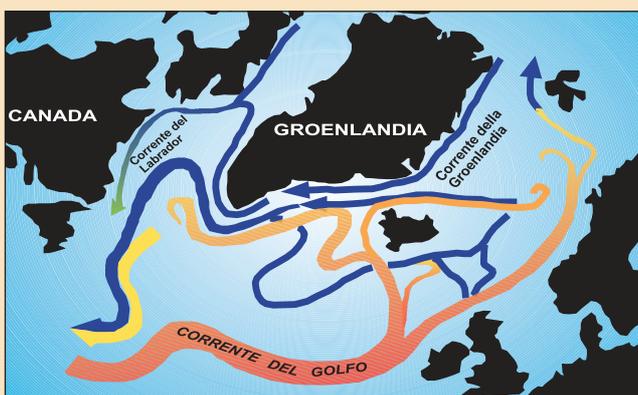
non lineare talora piccole cause possono dare grandi effetti, il noto *effetto farfalla* scoperto dal meteorologo Edward Lorenz.

Seguendo LUIGI SERTORIO (2002): «*Complesso include il clima, l'ecosistema, la collettività umana. Qui compaiono il concetto di biforcazione e il concetto di frattale. (...) le equazioni non lineari possono anche ospitare delle biforcazioni, come ad esempio degli scambi di stabilità, il che vuol dire che, modificando uno o più parametri regolatori, tutta l'architettura complessa delle soluzioni delle equazioni governanti può cambiare.*

E qui si tratta della comprensione dell'andamento globale di tutta la Terra, e di tutta la vita che essa ospita». Per questi motivi, alterare artificialmente i delicati equilibri che il clima ha costruito nel corso di millenni presenta rischi rilevanti legati non solo a una graduale variazione di una grandezza fisica (come la temperatura, o le precipitazioni...), ma anche alla possibilità di cambiamenti bruschi e di grande portata, che renderebbero estremamente difficile l'adattamento della società umana e degli ecosistemi.

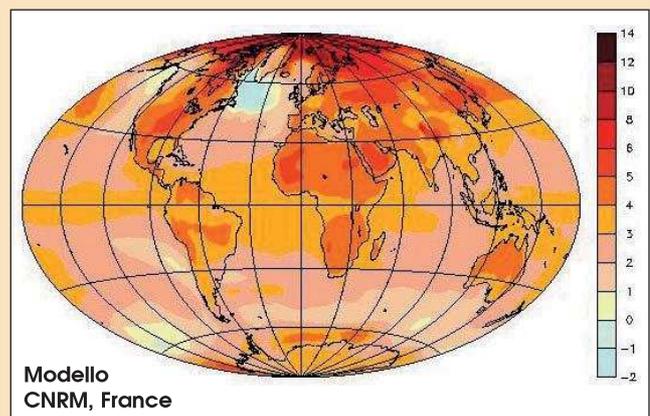
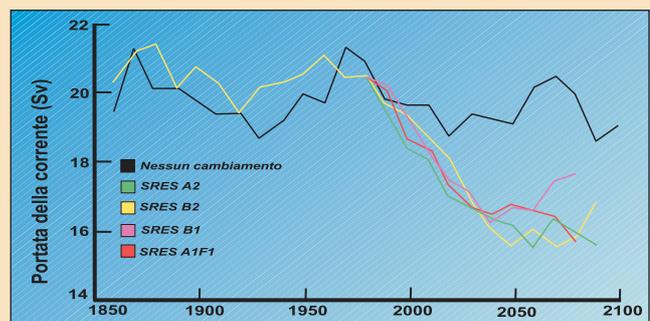
La Corrente del Golfo: probabile indebolimento?

La salinità delle acque del Nord Atlantico gioca un ruolo chiave nel mantenimento della *circolazione termohalina* (pag. 6), di cui la Corrente del Golfo è parte. Questa trasporta acqua calda superficiale dal Golfo del Messico verso l'Europa atlantica, mitigandone gli inverni. L'aumento delle precipitazioni in zona artica e la maggiore fusione della calotta glaciale della Groenlandia, incrementano l'afflusso di acqua dolce, riducono la salinità e la densità delle acque oceaniche che quindi si inabissano più difficilmente, rallentando il ritorno delle acque profonde verso il Golfo del Messico. Come già accaduto verso la fine dell'ultima glaciazione, circa 12 mila anni fa, la Corrente del Golfo potrebbe rallentare o interrompersi in un prossimo futuro, e molti temono che questo possa portare una nuova glaciazione sull'Europa. In realtà, il modello climatico HadCM3 dell'Hadley Center, pur prevedendo entro il 2100 una riduzione fino a un quarto della portata della corrente, ne esclude un collasso totale. Per l'Europa questo non significherebbe certo un'era glaciale, ma solo un riscaldamento inferiore ad altre zone del mondo.



1.5 (sotto a sinistra) - Schema della Corrente del Golfo. Le acque calde provenienti dal Golfo del Messico ($>20^{\circ}\text{C}$) giungono a lambire le coste europee, mentre le fredde correnti della Groenlandia e del Labrador ($5\text{-}10^{\circ}\text{C}$) discendono lungo le coste dell'Atlantico nord-occidentale. La netta distinzione tra le temperature superficiali del Nord Atlantico è visibile in fig. 1.6 (qui sopra, da <http://science.hq.nasa.gov>).

1.7 (qui sotto) - Modellizzazione della portata passata e futura della Corrente del Golfo, con previsione fino al 2100 (HadCM3, Hadley Center, UK), secondo differenti scenari di emissione di gas serra: la circolazione (nel grafico espressa in Sv - 1 Sverdrup = 1 milione m^3/s) potrebbe ridursi di circa un quarto rispetto a oggi (fonte: MetOffice). 1.8 (in basso) - Variazioni delle temperature medie previste entro il 2100 (modello CNRM, scenario A2). Modificazioni nelle correnti oceaniche potrebbero indurre un locale raffreddamento sull'Atlantico Nord-occidentale, ma non sull'Europa (<http://www.insu.cnrs.fr>).



2. VARIABILITÀ CLIMATICA ED EFFETTO SERRA

«Oggi, la quantità di gas serra ha superato i livelli dell'intero Quaternario e nessuno sa quali potranno essere le conseguenze. Sono convinto che il cambiamento in questi parametri essenziali del clima segni l'inizio di una nuova epoca geologica, e ho proposto di chiamarla Antropocene (dal greco *anthropos*, uomo).»

(PAUL J. CRUTZEN, 2005).

Variabilità climatica: naturale e indotta

Le condizioni climatiche in una località variano naturalmente tra un anno e l'altro, di solito entro un certo margine intorno ai valori «normali», ma talora vi si scostano anche in modo più netto, in occasione di fenomeni estremi/rari: si tratta della *variabilità naturale* del clima.

A questa, per via dell'alterazione della composizione chimica dell'atmosfera da parte dell'uomo, si può sovrapporre una *variabilità indotta*. In questa fase di cambiamento climatico, nel caso di eventi climatici importanti quali inondazioni, siccità oppure ondate di calore, è molto difficile riconoscere se essi rientrano ancora nella naturale variabilità del clima, oppure se siano già effetto — almeno in parte — del riscaldamento globale.

L'estate del 2003 è stata la più calda da

almeno 500 anni sulle Alpi, e ad Aosta la temperatura media del trimestre giugno-agosto ha superato la norma di 4.7 °C. Un'anomalia di questa portata, mai osservata in precedenza, secondo i climatologi non è più spiegabile ricorrendo alla sola variabilità climatica naturale, bensì sarebbe verosimilmente da attribuirsi agli effetti del *global warming*.

Perché il clima cambia? Forzanti naturali e antropiche

Nella storia geologica della Terra il clima è cambiato più volte, talora in maniera eclatante, per cause naturali: variazioni

2.1 - Grandi quantità di combustibili fossili (petrolio, carbone, gas naturale) vengono impiegate per le attività industriali, i trasporti, il riscaldamento degli edifici, e generano l'emissione di gas che incrementano artificialmente l'effetto serra naturale del nostro pianeta. Prima conseguenza è l'aumento delle temperature terrestri, già ben avvertito dagli strumenti (+1.1 °C negli ultimi 100 anni sulle Alpi) e confermato dal forte regresso dei ghiacciai.



2.2 - Schema-tizzazione del bilancio energetico tra Sole, Terra e atmosfera. Dei 342 W/m^2 in ingresso ai margini superiori dell'atmosfera, soltanto 168 W/m^2 in media vengono effettivamente assorbiti dal suolo, la rimanente parte viene assorbita dall'atmosfera oppure riflessa dalle nubi e dalla superficie terrestre (in varia misura a seconda dell'albedo). Dei 390 W/m^2 emessi dalla superficie, 235 vengono persi verso lo spazio, i restanti 155 W/m^2 vengono intercettati dai gas serra (effetto serra naturale) e restituiti insieme alla radiazione precedentemente assorbita dall'atmosfera (67 W/m^2), al calore di condensazione del vapor d'acqua (78 W/m^2) e a quello trasferito dalla convezione (24 W/m^2); tutti questi contributi vanno a costituire i 324 W/m^2 della radiazione di ritorno dall'atmosfera che vengono assorbiti dalla Terra.

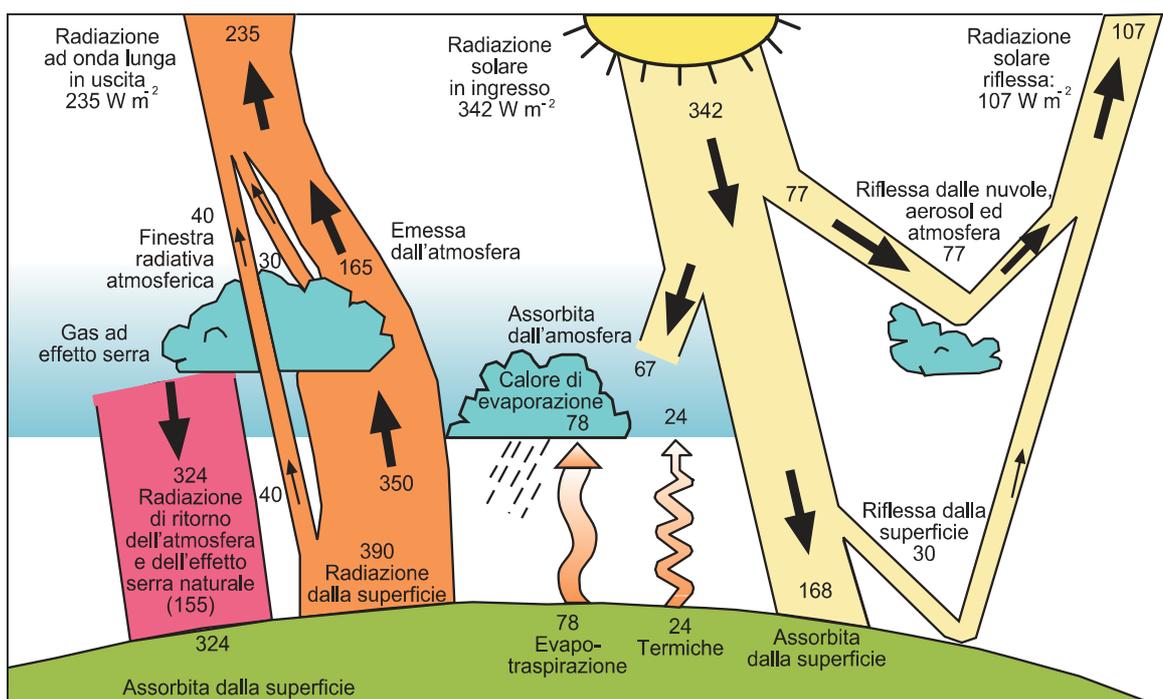
periodiche dell'attività solare, della distanza Terra-Sole, dell'inclinazione e dell'orientamento dell'asse terrestre, dell'eccentricità dell'orbita planetaria, tutti fattori che portano a cambiamenti nella quantità di energia ricevuta dal Sole, dunque in grado di dare inizio a una fase glaciale oppure di segnarne la fine.

Il geofisico serbo Milutin Milankovitch (1879-1958) studiò gli effetti combinati di questi fattori astronomici, e individuò una ciclicità di circa 100 mila anni nelle glaciazioni dell'Era Quaternaria (ultimo milione di anni); tuttavia le sue teorie non spiegano completamente tutte le variazioni climatiche osservate sulla Terra in questo lasso di tempo, ed alcuni aspetti rimangono da chiarire.

Anche le imponenti eruzioni vulcaniche

Perché effetto «serra»?

Si parla di effetto «serra» perché si accomuna l'effetto riscaldante di alcuni gas atmosferici con quello che si osserva sotto i vetri di una serra da giardino. In realtà, sotto il profilo fisico questo paragone non è corretto. Infatti, mentre in atmosfera il riscaldamento è dovuto all'assorbimento radiativo da parte di questi gas (vapore acqueo, biossido di carbonio, metano, ecc...) in particolari intervalli di lunghezze d'onda della radiazione emessa dal pianeta, sotto una serra l'aumento di temperatura si deve ricondurre all'assenza di scambi di aria con l'esterno, e soltanto marginalmente ad effetti di filtro radiativo.



2.3 - Andamento della concentrazione atmosferica di CO₂ all'Osservatorio del Monte Mauna Loa (Hawaii) nel periodo 1958-2004 (fonte: www.cdiac.ornl.gov). La tendenza è in aumento, e attualmente (2006) si è raggiunto il valore di 381 ppmv. Le regolari oscillazioni stagionali sono dovute al temporaneo sequestro estivo di CO₂ da parte della fotosintesi nelle foreste boreali di caducifoglie.

costituiscono una considerevole *forzante climatica naturale* interna al sistema terrestre, poiché il rilascio in atmosfera di milioni di tonnellate di aerosol e polveri è in grado di produrre un raffreddamento, solitamente per alcuni anni. Alle eruzioni dei vulcani El Chichon (Messico, 1982) e Pinatubo (Indonesia, 1991) sono in parte attribuite le temporanee flessioni delle temperature globali osservate nel 1984 e nel 1992-93.

Oggi a questi fattori naturali si sovrappongono però quelli *antropici*, essenzialmente l'emissione di gas che incrementano l'effetto serra, e di aerosol di origine industriale. L'uomo sta alterando la composizione dell'atmosfera e gli equilibri del clima, sistema già di per sé molto complesso e di difficile comprensione. Un pericoloso esperimento «a cielo aperto» condotto a scala globale, senza precedenti

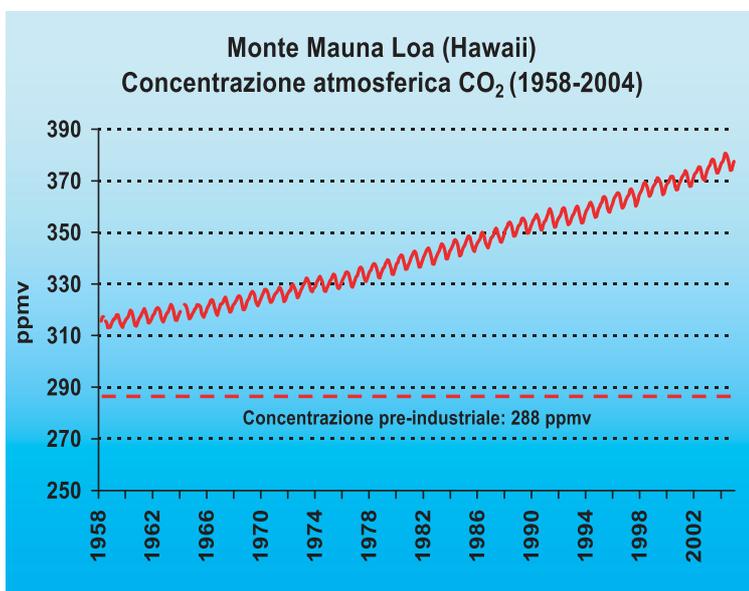
nella storia del nostro pianeta...

L'effetto serra naturale e il suo incremento da parte dell'uomo

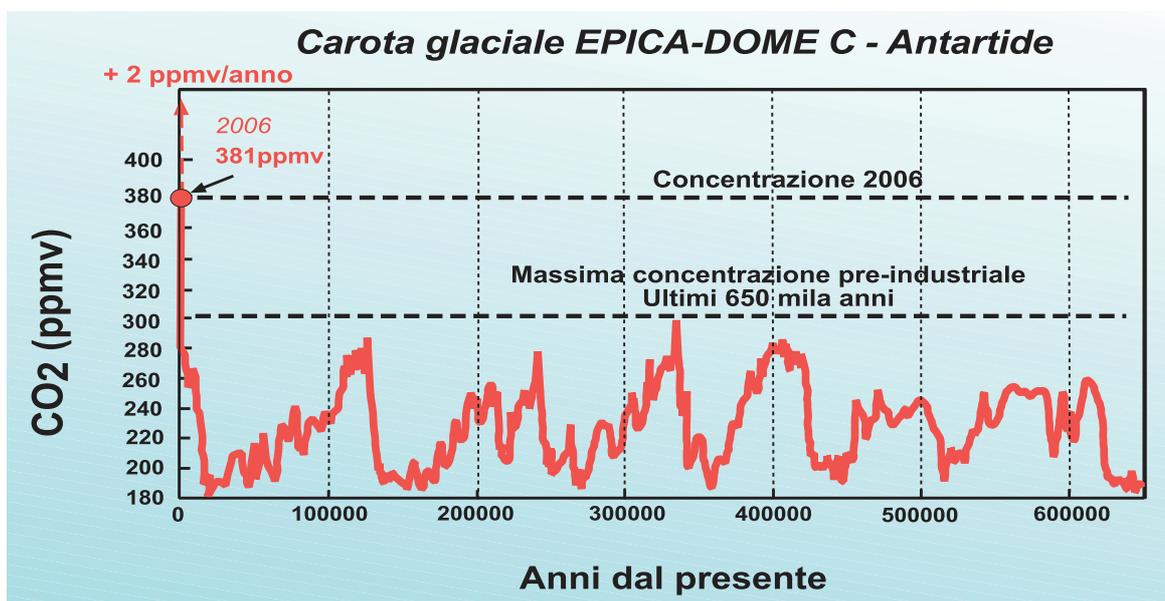
L'effetto serra è anzitutto un fenomeno *naturale* che comporta il trattenimento — all'interno dell'atmosfera terrestre — di una parte della radiazione termica solare che viene ri-emessa dal pianeta sotto forma di *raggi infrarossi a onda lunga* (6÷14 μm). Questa radiazione, in assenza di atmosfera e dunque di effetto serra naturale, verrebbe completamente dispersa nello spazio, e la Terra avrebbe una temperatura media di -18 °C, anziché i 15 °C attuali. Responsabili di questo fenomeno sono «gas a effetto serra» quali — in ordine di importanza tra quelli presenti in natura — il vapore acqueo, il biossido di carbonio (CO₂), il metano (CH₄), l'ozono (O₃), il protossido di azoto (N₂O): agiscono come una sorta di «coperta termica» che impedisce al calore terrestre di sfuggire completamente verso lo spazio.

Ora però l'effetto serra sta diventando un grave problema per gli ecosistemi terrestri e l'umanità, poiché le attività umane ne stanno aumentando artificialmente l'intensità. Conseguenza più evidente è l'incremento della temperatura globale del pianeta.

Con l'avvento dell'era industriale, nella



2.4 - L'estrazione della carota glaciale EPICA-DOME C dalla calotta antarctica (profondità 3270 m) ha consentito di ricostruire la composizione atmosferica e la temperatura negli ultimi 650.000 anni. Il grafico mostra l'andamento della concentrazione del biossido di carbonio (CO₂), ottenuta dall'analisi delle bollicine di aria intrappolate nel ghiaccio (figura in basso). Nel periodo considerato si sono succeduti sette periodi glaciali - identificabili con un calo delle temperature e dei livelli di gas serra - e soprattutto non si è mai superata la soglia delle 300 ppmv di CO₂, mentre oggi si sono toccate le 381 ppmv (SIEGENTHALER & al., 2005; SPAHNI & al., 2005).



seconda metà del 1700, l'uomo ha iniziato a utilizzare quantità crescenti di risorse energetiche fossili, prima *carbone*, e poi — dalla fine del 1800 — *petrolio* e *gas naturale*, la cui combustione comporta ingenti emissioni di gas serra, in particolare di CO₂, nonché di altri composti chimici e particolati (polveri fini) pure dannosi per l'ambiente e la salute.

I processi industriali liberano perfino nuove molecole ad effetto serra, non esistenti in natura: ad esempio i CFC (clorofluorocarburi), gas utilizzati come propellenti nelle bombolette spray o come refrigeranti; responsabili anche della distruzione dell'ozono stratosferico, ora sono banditi grazie al Protocollo di Montréal del 1987.

Ecco alcune caratteristiche dei principali gas a effetto serra (MERCALLI, 2000):

— **Vapore acqueo:** è il maggiore

responsabile dell'effetto serra naturale (60%), per la sua abbondanza in atmosfera e la sua efficacia. La sua concentrazione, assai variabile nello spazio ma relativamente stabile nel tempo, non è aumentata direttamente dalle attività umane, ma dipende dalla temperatura dell'aria.

— **Biossido di carbonio (anidride carbonica):** l'emissione antropica deriva dal consumo di combustibili fossili; è il gas serra in assoluto predominante tra le emissioni di origine umana, e fornisce il contributo maggiore (64%) al riscaldamento globale. Negli ultimi 650.000 anni la sua concentrazione atmosferica è variata da minimi intorno a 180 ppmv (parti per milione in volume) durante le fasi glaciali a massimi di poco inferiori a 300 ppmv durante gli interglaciali (SIEGENTHALER & al., 2005; SPAHNI & al., 2005); ma nel corso del-

2.5 - Riepilogo di alcune caratteristiche dei principali gas a effetto serra. In verde sono indicati i composti già presenti in natura, e la cui concentrazione è incrementata artificialmente dall'uomo; in giallo quelli prodotti dall'industria chimica. Alcuni gas, la cui molecola è molto più attiva del CO₂ nel determinare l'effetto serra, fortunatamente sono presenti in concentrazioni assai limitate, ad esempio l'es fluoruro di zolfo. Il biossido di carbonio, per la sua relativa abbondanza, resta il gas responsabile del maggiore contributo all'effetto serra antropico (64% del totale).

l'era industriale la concentrazione è artificialmente salita di pari passo con i consumi e il livello di benessere dei paesi occidentali, fino a raggiungere le attuali 381 ppmv (marzo 2006). Modeste variazioni stagionali o interannuali sono dovute all'interazione con la biosfera (fotosintesi) e gli oceani, che fungono da serbatoi di assorbimento (*sinks*). In assenza di politiche di controllo delle emissioni, il raddoppio della concentrazione (rispetto ai livelli preindustriali) avverrà entro il 2050. Anche la massiccia deforestazione e gli incendi comportano l'ingente rilascio, sotto forma di CO₂, del carbonio stoccato nei tessuti vegetali. Parallelamente, i cambiamenti d'uso dei suoli e la loro artificializzazione causano un calo della capacità di assorbimento della CO₂ atmosferica per fotosintesi.

— **Metano:** è rilasciato da fermentazioni anaerobiche (decomposizione) della sostanza organica, che avvengono in modo massiccio nei campi di riso allagati e nell'intestino degli animali d'allevamento.

L'incremento delle temperature terrestri causa pure ingenti emissioni di metano per la scomparsa del *permafrost* dai suoli delle regioni circumartiche (Siberia); si tratta di un meccanismo di *retroazione positiva* (*feedback*), in grado di «autoalimentare» il processo di riscaldamento atmosferico. La singola molecola è 21 volte più efficiente della CO₂ nel causare l'effetto serra, ma nel complesso contribuisce soltanto al 17% del riscaldamento antropico, per via della minor concentrazione. Negli ultimi 650.000 anni questa ha oscillato tra circa 350 ppbv (parti per miliardo in volume) durante le glaciazioni e 700-780 ppbv negli interglaciali (SIEGENTHALER & al., 2005; SPAHNI & al., 2005). Oggi ha toccato le 1776 ppbv, ma complessivamente la concentrazione pare stabilizzarsi.

— **Protossido di azoto:** l'emissione antropica deriva principalmente dalla produzione di fertilizzanti azotati e di acidi industriali. Assai attivo (una molecola agisce come 230 molecole di CO₂) ma presente in modeste tracce (280 ppbv nell'e-

Caratteristiche dei principali gas a effetto serra

Gas	Formula	Concentr. pre-industriale	Concentr. attuale (2004)	Trend annuo %	Tempo di permanenza in atmosfera (anni)	Contributo % riscald. tot.	Effetto potenziale rispetto a CO ₂ in 100 anni
Biossido di carbonio	CO ₂	288 ppm	377 ppm	0.5	120	63.8	1
Metano	CH ₄	848 ppb	1776 ppb	0.2	12	19.2	21
Protossido di azoto	N ₂ O	285 ppb	319 ppb	0.3	120	5.7	310
CFC-11	CCl ₃ F	-	254 ppt	-0.5	50-102	10.5	3800-8100
HCFC-22	CHClF ₂	-	164 ppt	3.4	12	0.4	1500
Es fluoruro di zolfo	SF ₆	-	5.4 ppt	4.0	3200	0.3	23900
Perfluoroetano	C ₂ F ₆	-	3.0 ppt	3.3	10000	*	9200

Combustibili ed emissioni di CO₂

Trasporti, riscaldamento degli edifici e produzione di energia elettrica rientrano tra i settori più coinvolti nell'emissione di gas serra, poiché alimentati in gran parte da fonti energetiche fossili. Ecco le emissioni specifiche di CO₂ per alcuni combustibili tradizionali:

1 kg di carbone = 3.66 kg CO₂

1 kg di benzina = 3.13 kg CO₂ (2.35 kg CO₂/l)

1 kg di gasolio = 3.14 kg CO₂ (2.66 kg CO₂/l)

1 kg di metano = 2.60 kg CO₂ (1.86 kg CO₂/m³) *

* Normal metro cubo, a pressione = 1013 hPa e temperatura = 0 °C.

ra preindustriale, 319 ppbv oggi), contribuisce per il 6% al riscaldamento globale.

— **Esafluoruro di zolfo:** di origine artificiale, è estremamente raro (0.003÷0.004 ppbv) ma attivissimo come gas serra (24 mila volte più potente della CO₂).

— **CFC:** categoria di composti prodotti artificialmente dal 1950 e impiegati come refrigeranti, propellenti nelle bombole spray, ed estinguenti negli impianti antincendio. Sono 16 mila volte più potenti del CO₂ nel causare l'effetto serra. Responsabili anche della distruzione dell'ozono stratosferico, le loro emissioni sono state nettamente ridotte con l'applicazione del Protocollo di Montreal (1987). Tuttavia, alcuni gas che li hanno sostituiti (idrofluorocarburi, perfluorocarburi) sono pure gas a effetto serra.

L'efficacia di un gas nel determinare l'effetto serra dipende dal tipo di molecola, dal tempo di permanenza in atmosfera e dalla porzione di spettro radiativo assorbita (alcune bande possono risultare già saturate). Per esprimere univocamente le emissioni totali di gas serra, i contributi di ciascun gas (con efficacia diversa tra uno e l'altro nel determinare il riscaldamento globale) vengono tradotti in tonnellate di CO₂ equivalente. Attualmente ogni anno vengono emesse nel mondo 28 miliardi di tonnellate di CO₂ equivalente, con distribuzione geografica delle emissioni assai variabile in base alla situazione socio-economica di ciascuna nazione (HENGEVELD & *al.*, 2002). Le maggiori intensità di emissione pro-capite appartengono ai paesi con elevati livelli di consumi e forte industrializzazione: nel 2003 sono



2.6 - St-Oyen, 17.05.1995 (f. L. Mercalli). La vegetazione in fase di crescita è in grado di catturare una porzione netta della CO₂ emessa dall'uomo (6,24 t di carbonio/anno per ogni ha di nuova foresta), ma ciò è ampiamente insufficiente a tamponare le imponenti emissioni antropiche (attualmente circa 7.6 miliardi di t/anno di carbonio).

2.7 - Emissioni pro-capite di gas a effetto serra in alcuni Paesi del mondo, espresse in t di CO₂ equivalente. Sono considerati i seguenti composti: CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC, SF₆. I valori sono tutti riferiti al 2003, eccetto quello del Bangladesh, riferito al 1997 (comunque relativamente stabile nel tempo). In Australia e USA, dove la popolazione è concentrata in alcune grandi città energivore, le emissioni pro capite ammontano a oltre 20 t CO₂/anno.

Il valore della Cina, in recente forte aumento, è ancora relativamente basso in virtù dell'elevata popolazione su cui si distribuisce l'enorme carico di emissioni. Fonte: <http://unfccc.int/resource/docs/2005/sbi/17e/17f.pdf>.

Il ruolo degli aerosol in atmosfera

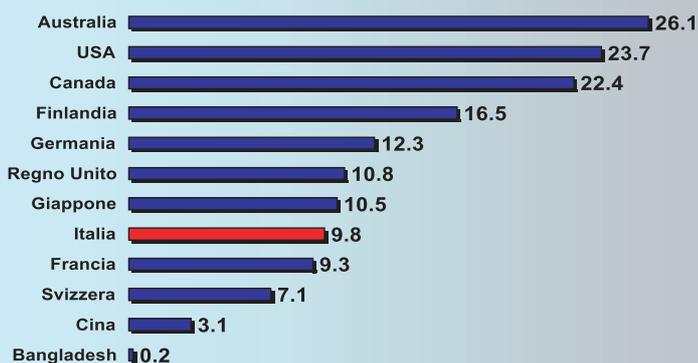
Oltre ai gas a effetto serra, vi sono anche altri agenti di origine antropica che possono alterare il clima: ad esempio gli *aerosol*, fini particolati in sospensione nell'atmosfera. Alcuni di questi, come gli *aerosol solfati* (che derivano dal biossido di zolfo, SO₂), riflettono parte della radiazione solare e determinano un raffreddamento al suolo, che può attenuare in parte i reali effetti del riscaldamento globale. Altri invece generano un aumento di temperatura, come ad esempio la *caligine*. Il loro ruolo costituisce dunque uno dei punti di incertezza sull'entità del riscaldamento futuro. Tuttavia, accoppiando gli incrementi previsti di gas serra e aerosol solfati, il modello HadCM2 ha restituito una stima dell'aumento termico previsto entro il 2100 inferiore tra un terzo e un quarto. Si tratta comunque di stime grossolane, poiché i possibili scenari di emissione di SO₂ individuati da IPCC per il XXI secolo sono molto variabili tra loro. Poiché gli aerosol dimorano in atmosfera da qualche giorno a qualche settimana, la loro distribuzione è irregolare, e sono più concentrati vicino alle zone di emissione (HENGEVELD & *al.*, 2002).

state emesse 26.1 t/pro-capite in Australia, 23.7 negli Stati Uniti, 22.4 in Canada; tra i paesi europei, 16.5 in Finlandia, 12.3 in Germania, 10.8 nel Regno Unito, 9.8 in Italia, 9.3 in Francia, 7.1 in Svizzera (fonte: UNFCCC). Questi dati non tengono conto del cambiamento

d'uso dei suoli e dell'abbattimento delle foreste, processi che — si stima — riversano ulteriormente ogni anno nell'atmosfera da 800 milioni a 2.4 miliardi di tonnellate di carbonio.

Complessivamente, la variazione netta di forzatura radiativa sul sistema climatico intervenuta dal 1880 al 2003 è di **+1.8 W/m²**, considerando l'effetto combinato dei gas serra, dell'attività solare, degli aerosol, dei cambiamenti d'uso del suolo, dell'albedo terrestre (HANSEN & *al.*, 2005). L'incertezza di ± 0.85 W/m² intorno a questo valore è in buona parte attribuibile al ruolo degli aerosol, ancora poco noto. I gas a effetto serra contribuiscono con una forzatura di +2.75 W/m², mentre gli

Emissioni pro capite di gas serra nel 2003
(tonnellate di CO₂ equivalente)



Tutti d'accordo sul cambiamento climatico?

Il pensiero di scettici e «negazionisti»

La grande maggioranza della comunità scientifica internazionale è concorde sulla pesante responsabilità dell'uomo nel cambiamento climatico: i tassi di incremento rilevato dei gas serra in atmosfera corrispondono bene alle emissioni antropiche, e sono i più elevati da almeno 650.000 anni, e il meccanismo di azione dei gas serra è ben noto da oltre un secolo. Tuttavia, nonostante le numerose evidenze, una minoranza di scienziati contesta che le attività umane abbiano svolto un ruolo significativo nell'alterare il clima terrestre, sostenendo talora che i modelli climatici sovrastimino la portata dei possibili cambiamenti futuri. Essi mantengono dunque una posizione di *scetticismo*, talora di aperto *negazionismo*. Le incertezze che effettivamente esistono su come e quanto il clima potrebbe cambiare nel prossimo futuro, portano inoltre a un acceso dibattito politico e pubblico sulle azioni che dovrebbero essere intraprese. Gruppi di ricercatori scettici o negazionisti sono emersi soprattutto negli Stati Uniti, in Australia, ma anche nel Regno Unito e in Germania. E' da rilevare come le argomentazioni avanzate da costoro siano talora carenti sotto il profilo scientifico, o comunque derivanti dall'analisi incompleta di un problema molto complesso quale è quello del cambiamento climatico. Tra le fila dei negazionisti non mancano tuttavia figure di scienziati autorevoli, come Richard Lindzen (docente al *Massachusetts Institute of Technology*, Boston), secondo cui l'effetto «contrario»

delle nubi di vapor d'acqua potrebbe nettamente ridurre gli effetti termici derivanti dall'incremento dei gas serra (HENGVELD & *al.*, 2002), e l'attuale surriscaldamento sarebbe in minima parte attribuibile alle attività umane; queste posizioni sono state peraltro sostenute durante il convegno «I cambiamenti climatici», tenutosi a Roma il 20 giugno 2005 sotto l'egida del Ministero dell'Ambiente, evento che tuttavia ha provocato un'accesa reazione dei ricercatori italiani, citata anche dalla prestigiosa rivista *Nature*. Recentemente, tesi negazioniste sono pure comparse nel romanzo *Stato di paura* di Michael Chrichton, un'opera tuttavia di dubbia qualità che riporta confusamente dati scientifici avulsi dal loro adeguato contesto, in un intreccio spesso infarcito da contraddizioni ed errori non trascurabili... ampiamente confutati sul sito www.realclimate.org. Al di là dei dubbi, che pur sempre fanno parte di un percorso di indagine scientifica, la comunità scientifica internazionale ritiene che la gran mole di prove a sostegno del ruolo umano nel cambiamento climatico, suggerisce piuttosto di agire in modo rapido e coordinato, a livello sia locale sia internazionale, per contenerne quanto meno le conseguenze entro livelli accettabili. Nel 1988 la WMO (World Meteorological Organization) e l'UNEP (United Nations Environment Program) hanno fondato l'**IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)**, coordinamento che ha lo scopo di valutare le basi scientifiche del cambiamento climatico, gli scenari futuri, l'impatto sulla società, l'economia, l'ambiente (www.ipcc.ch).

aerosol producono un'azione contraria raffreddante pari a -1.4 W/m^2 , che dunque solo in parte contrasta il riscaldamento dovuto ai gas climalteranti. Nei circa 125 anni considerati il contributo derivante dall'attività solare ammonta soltanto a $+0.22 \text{ W/m}^2$, ed è di gran lunga meno importante rispetto a quello dato dalle forzanti di origine antropica, a conferma della responsabilità umana nell'attuale cambiamento climatico (sebbene secondo SCAFETTA & WEST, 2006, il contributo dell'attività solare al riscaldamento del periodo 1900-2000 salirebbe al 45÷50%). Si tenga inoltre presente che la sensibilità globale della temperatura è di $0.75 \text{ }^\circ\text{C}$ per ogni W/m^2 ; il valore è stato calcolato in base alle forzanti climatiche in gioco durante le ere glaciali, pari a -6.6 W/m^2 , associate a una temperatura inferiore di circa $5\div 6 \text{ }^\circ\text{C}$ rispetto a oggi (HANSEN & *al.*, 2005). Attualmente il cambiamento climatico è già percepibile con un vistoso incremento delle temperature globali, che **negli ultimi 100 anni sono aumentate di $0.6 \pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$, e i modelli climatici prevedono un ulteriore aumento compreso tra 1.4 e $5.8 \text{ }^\circ\text{C}$ entro il 2100**, in assenza di politiche di riduzione delle emissioni (fonte: UNFCCC). Il riscaldamento ha subito una brusca accelerazione negli ultimi due decenni, benché la presenza degli aerosol solfati e del particolato che rende più

opaca l'atmosfera possa avere in parte mascherato la reale entità dell'aumento termico (vedi approfondimento a pag. 17). La comunità scientifica è concorde nell'attribuire una considerevole parte di responsabilità all'azione umana. Infatti l'entità e soprattutto la rapidità dei cambiamenti climatici già osservati (gli Anni 1990 sono stati i più caldi dell'ultimo millennio) non è più spiegabile solamente all'interno della naturale variabilità del clima; ci sono infatti molte evidenze per affermare che gran parte dell'aumento termico misurato negli ultimi 50 anni sia attribuibile all'attività dell'uomo.

Il livello dei mari è già aumentato da 10 a 20 cm negli ultimi 100 anni, sia per la dilatazione termica degli oceani, sia per la maggiore fusione delle calotte glaciali, e un ulteriore incremento tra 9 e 88 cm è previsto entro il 2100 (fonte: UNFCCC): questo aspetto tuttavia non riguarderà direttamente la Valle d'Aosta, la cui altitudine minima è di 300 m (Pont-St-Martin).

Gli effetti del futuro cambiamento climatico potranno ripercuotersi pressoché in ogni ambito degli ecosistemi terrestri (con estinzione delle specie animali e vegetali che non riusciranno ad adattarsi in tempo), dell'agricoltura, dell'economia e della società umana, intimamente legati da una fitta trama di relazioni.

I capitoli che seguono sono dedicati all'a-

nalisi delle potenziali conseguenze di queste alterazioni ambientali in Valle d'Aosta, distinguendo in particolare gli effetti legati a cambiamenti nelle temperature, nelle precipitazioni e nell'innervamento. Si individueranno strategie di mitigazione dei rischi e di adattamento, ma anche eventuali opportunità legate a nuovi scenari ambientali.

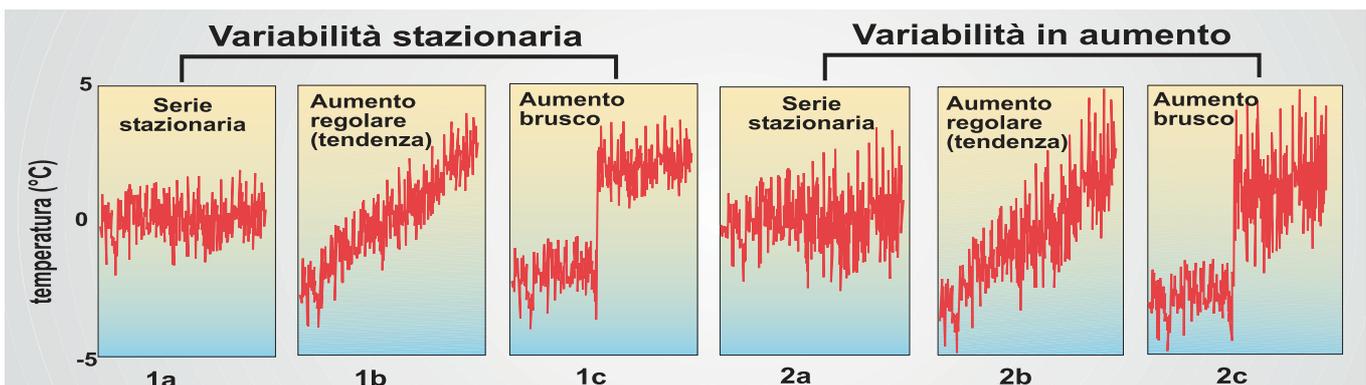
2.8 - Il cambiamento climatico potrebbe alterare non soltanto i valori medi dei parametri, bensì anche la loro variabilità e la distribuzione degli estremi. I grafici qui sotto esemplificano differenti tipologie di evoluzione della temperatura: stazionaria sul lungo periodo (1a), in aumento costante (1b) e brusco (1c), ma con variabilità costante; nei disegni 2a, 2b e 2c ai medesimi andamenti è invece associato un aumento nella variabilità. (BORROUGHS, 2003, ridis.).

Leggere i grafici: tendenze, fluttuazioni, variabilità

Sia che si parli di clima passato sia che si parli di clima futuro, la rappresentazione grafica dei risultati e la loro corretta interpretazione è fondamentale. Al di là della grande variabilità interannuale tipica dei parametri climatici (che si traduce in un andamento del grafico molto irregolare, a denti di sega), ciò che conta davvero è la loro *tendenza* su un lungo periodo di tempo. Infatti, i segnali del cambiamento si colgono più efficacemente sulle fluttuazioni a lungo termine piuttosto che sulle singole anomalie giornaliere, stagionali o

annuali che si osservano in una località. Ad esempio, una nevicata tardiva su Aosta in aprile inoltrato, oppure una giornata di luglio fresca e piovosa, sono fenomeni temporanei e locali solo apparentemente in contrasto con le evidenze del riscaldamento globale, e in realtà non è affatto detto che lo smentiscano.

Il cambiamento climatico può riservare differenti tipologie di evoluzione di un parametro, ad esempio la temperatura, come illustrato nei grafici qui sotto: gli scenari 1a-1b-1c mostrano rispettivamente un andamento stazionario, in costante aumento, e infine un brusco aumento imputabile a un cambiamento sostanziale nel sistema climatico, ma in un ambito di variabilità immutata nel tempo. Nei grafici 2a-2b-2c, invece, alle medesime evoluzioni del punto (1) è associato anche un notevole incremento della variabilità interannuale del parametro, evoluzione peraltro verosimile in futuro, che potrebbe portare alla frequente alternanza di forti anomalie climatiche di segno opposto.



3. VULNERABILITÀ E ADATTAMENTO

«Le misure di adattamento sono le attività che riducono al minimo gli impatti negativi del cambiamento climatico o che ci permettono di ottenere un profitto dalle nuove occasioni che ne derivano.»

(WARREN F.J. & al., 2004)

Occupazione del territorio, crescita economica e vulnerabilità

Tra il 29 settembre e il 13 ottobre 1996 un'eruzione del vulcano subglaciale Grimsvotn, ricoperto dalla calotta islandese del Vatnajökull, determina la fusione di svariati miliardi di metri cubi di ghiaccio: l'accumulo delle acque nella caldera si protrae, sebbene con afflussi minori, anche dopo l'eruzione, fino a raggiungere i 4 miliardi di metri cubi. All'alba del 5 novembre l'attesa *jökullhlaup* (alluvione derivante dalla rotta di un serbatoio d'acqua glaciale) irrompe sulla desolata pianura antistante lo Skeidararjökull, una tra le numerose lingue glaciali che si protendono verso l'Oceano Atlantico: il massimo deflusso raggiunge i 45 mila m³/s, all'incirca la portata del fiume Congo. Il colossale volume d'acqua si riversa verso Sud alluvionando interamente lo Skeidararsandur, desolata pianura costiera di fini sabbie vulcaniche. Nonostante si sia trattato di una tra le più imponenti alluvio-

ni della storia recente, i danni prodotti sono stati relativamente contenuti, avendo questa interessato una zona disabitata, con poche e rare infrastrutture: un ponte abbattuto, due gravemente lesionati, 10 km di strada e svariati tratti di linee elettriche e telefoniche spazzati via, nessuna vittima umana, per un totale di «appena» 31 milioni di dollari US. Un episodio di questa entità sulla pianura padana, territorio diffu-



3.1 a, b - I danni prodotti da un evento naturale sono strettamente correlati alla vulnerabilità del territorio, che cresce all'aumentare della densità abitativa e della presenza di infrastrutture. In alto, la deserta pianura di fronte al ghiacciaio Skeidarar in Islanda, spazzata da una imponente piena glaciale nell'autunno 1996, che tuttavia ha recato danni relativamente contenuti in virtù della scarsa antropizzazione del territorio (03.10.2002, f. D. Cat Berro). In basso gli effetti dell'alluvione dell'ottobre 2000 sul fondovalle della Dora Baltea presso Champdepraz (AO): le acque esondate hanno interferito con insediamenti industriali, abitazioni, strade e ferrovia (f. Prof. Civ. Reg. Aut. Valle d'Aosta).

samente abitato e ricoperto da una fittissima rete di infrastrutture (edifici, insediamenti industriali, rete stradale e della distribuzione di elettricità, acqua e gas, ecc...), avrebbe prodotto una catastrofe di proporzioni inimmaginabili. A titolo di esempio, l'alluvione dell'ottobre 2000, durante la quale il Po ha raggiunto una massima portata di 12.000 m³/s a Cremona (quattro volte inferiore a quella della piena islandese), ha recato danni per un totale di circa 5.7 miliardi di Euro nel bacino padano (l'evento è risultato circa 200 volte più «costoso»).

Ecco introdotto, con questo esempio, il concetto di **vulnerabilità**, che è strettamente legato all'occupazione del territorio da parte dell'uomo. La vulnerabilità dipende sia dalla **sensibilità** dell'ambiente (il grado di risposta a un cambiamento di una data entità), sia dall'**adattabilità** delle specie (uomo, animali, vegetali) che lo popolano.

In caso di eventi naturali straordinari, è la presenza umana a fare la differenza: da un lato si può avere una piena spettacolare che invade una pianura disabitata senza causare problemi di sorta, dall'altro un semplice temporale estivo che manda sott'acqua un popoloso quartiere di una città, la cui rete di drenaggio magari è sottodimensionata oppure otturata da detriti, con conseguenti notevoli perdite economiche. Solitamente, tanto maggiore è la densità di popolazione, tanto più elevata sarà la vulnerabilità. Anche la crescita economica e delle infrastrutture influisce pesantemente sull'esposizione al **rischio**: a parità di pericolo (vedi la definizione dei concetti di pericolo, esposizione e rischio nel riquadro), i danni potenziali crescono con l'aumentare dei beni esposti.

La scienza giudica la *magnitudo* degli eventi naturali secondo grandezze fisiche, mentre gli uomini tendono a giudicarli in base ai danni osservati, che tuttavia non

3.2 - Schematizzazione dei concetti di pericolo, esposizione, rischio e preoccupazione

Pericolo	<i>Proprietà intrinseca ad un fenomeno di produrre un danno (es. piena fluviale, valanga)</i>
Esposizione	<i>Misura quantitativa; affinché ci sia esposizione il pericolo deve essere presente in una certa quantità.</i>
Rischio	<i>Probabilità matematica che il fenomeno provochi un danno.</i> Rischio = pericolo x esposizione
Preoccupazione	<i>Timori e paure del pubblico in merito a un pericolo, che non necessariamente derivano da evidenze scientifiche né sono correlate al grado di rischio.</i>



Vulnerabilità	<i>Grado per cui un sistema rischia di subire o di essere interessato negativamente dagli effetti dei cambiamenti climatici, compresa la variabilità climatica e i fenomeni estremi. La vulnerabilità dipende dalle caratteristiche, dall'entità e dalla velocità dei cambiamenti climatici a cui il sistema è esposto, nonché dalla sua sensibilità e dalla sua capacità di adattamento.</i>
Sensibilità	<i>Livello degli effetti positivi o negativi provocati in un sistema da parte di forzanti legate al clima. L'effetto può essere diretto (variazioni nel rendimento agricolo a seguito dell'aumento della temperatura media o della variabilità termica, ad esempio) o indiretto (danni causati dall'aumento di frequenza di inondazioni).</i>
Adattabilità	<i>Capacità di un sistema di far fronte alle conseguenze del cambiamento climatico (compresa la variabilità e gli estremi climatici), attenuando i potenziali effetti negativi e sviluppando le opportunità.</i>
Vulnerabilità = Caratteristiche cambiamento + Sensibilità + Adattabilità	

3.3 - Schematizzazione dei concetti di vulnerabilità, sensibilità e adattabilità (da WARREN F.J. & al., 2004).

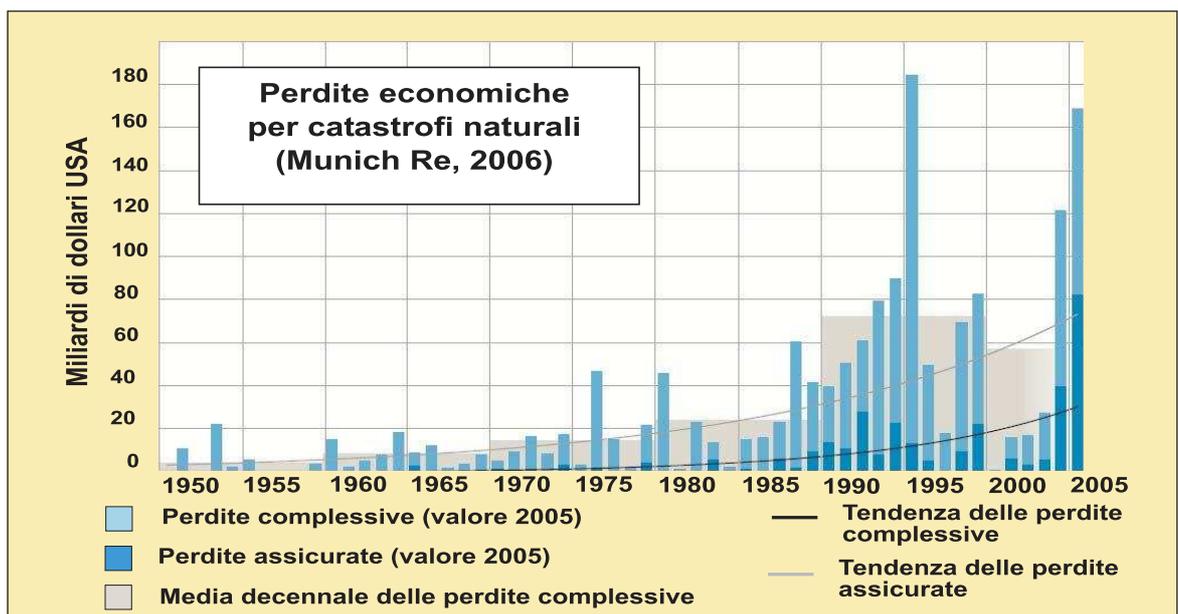
sempre rispecchiano le dimensioni fisiche del fenomeno.

Osservando le statistiche sull'entità dei disastri naturali compilate dalle compagnie assicurative, si osserva una vistosa tendenza all'aumento negli ultimi decenni: dal 1960 a oggi a livello planetario l'entità delle perdite dovute a catastrofi naturali è aumentata, in valore reale, di un fattore 7.9, e i danni a beni assicurati di un fattore 13.6. Ciò è in gran parte spiegabile con l'in-

cremento della vulnerabilità dovuto alla crescita demografica ed economica, mentre il ruolo di un reale cambiamento nell'assetto climatico oggi non è ancora chiaramente distinguibile, ma è verosimile che si presenti in futuro (AA.VV., 2002).

Dunque la vulnerabilità varia non solo nello spazio, da un tipo di ambiente a un altro, ma cambia fortemente anche nel tempo: nella Valle d'Aosta del 1600, ad esempio, una piena torrentizia/fluviatile erodeva

3.4 - Andamento delle perdite economiche (barre azzurre) e dei soli danni a beni assicurati (barre blu) recati dalle catastrofi naturali dal 1950 al 2005, in miliardi di dollari USA (MUNICH RE, 2006). Buona parte dell'aumento delle perdite è spiegabile con la crescita economica e demografica, dunque con l'aumento della vulnerabilità.



Strategie di adattamento (livello crescente da 1 a 6)			
	Categoria	Situazione	Esempio
1	Presenza in carico dei costi	Niente da fare per ridurre la vulnerabilità e le perdite economiche	Impossibilità di irrigare durante una siccità, abbandono delle piante all'appassimento/morte
2	Riduzione al minimo delle perdite	Adozione di misure per ridurre la vulnerabilità	Potenziamento degli impianti di irrigazione per far fronte alla siccità estiva
3	Diluizione o distribuzione delle perdite	Condividere/distribuire le perdite tra diversi sistemi produttivi/popolazioni	Stipula di un'assicurazione
4	Cambiamento di attività	Sostituzione delle attività che non sono più sostenibili nelle nuove condizioni climatiche	In località solamente sciistica, conversione - differenziazione delle attività turistiche in base alla stagione (es. escursionismo, equitazione in primavera-estate)
5	Cambiamento di sito	Spostamento dell'attività in luoghi più favorevoli	Spostamento di colture sofferenti il caldo/secco su versanti più ombrosi, freschi e umidi
6	Miglioramento della capacità di adattamento	Incremento della solidità del sistema al fine di accrescere l'adattabilità	Riduzione dell'inquinamento, oculate scelte di pianificazione del territorio (no edificazione in aree ad alto rischio)

3.5 - Schematizzazione di possibili strategie di adattamento al cambiamento climatico, elencate in ordine crescente di efficacia e sostenibilità sul lungo periodo (da WARREN F.J. & al., 2004).

sponde, prati e campi, tratti di mulattiera o di selciato, abbatteva passerelle provvisorie in legno e mulini, qualche casolare. Oggi, una piena della stessa intensità troverà lungo il suo percorso molti più beni da danneggiare: strade asfaltate e ponti in cemento, tralicci dell'alta tensione, condomini e alberghi, piloni di impianti di risalita, talora stabilimenti industriali e supermercati. I danni lamentati dalle comunità saranno certamente più gravi. Le stesse considerazioni valgono per una valanga: se oggi dovessero ripetersi le situazioni degli inverni 1885 o 1888, le perdite materiali e umane sarebbero probabilmente ancora superiori, a causa della più intensa frequentazione invernale della montagna a fini turistici, e ciò nonostante l'effetto sicuramente positivo della maggiore disponibilità di informazione (bollettini di allerta, delimitazione delle aree a rischio). Si consideri anche che negli ultimi decenni i numerosi

interventi di protezione da piene e valanghe — che tuttavia non possono fornire una protezione assoluta — hanno generato spesso un eccessivo senso di sicurezza, che talora ha indotto amministrazioni e imprese a progettare infrastrutture in aree a rischio, aumentando così le potenzialità di subire danni in caso di eventi gravi (AA.VV., 2003). Indubbiamente vi sono anche aspetti positivi nella crescita economica per quanto riguarda la vulnerabilità: ad esempio, la mondializzazione del commercio oggi consente di far fronte più facilmente ad annate di crisi nella produzione alimentare locale dovute a fenomeni climatici, che invece nei secoli passati pote-

«L'adattamento non è una novità: gli esseri umani si sono sempre adattati al cambiamento, e continueranno a farlo in futuro.» (WARREN F.J. & al., 2004)

«Stipuliamo assicurazioni contro gli incendi della nostra casa, e sulla nostra salute. Abbiamo bisogno di un'assicurazione anche sulla sostenibilità planetaria.»

(STEPHEN H. SCHNEIDER, 2005)

vano comportare gravi carestie e aumento della mortalità tra la popolazione.

Adattarsi ai cambiamenti

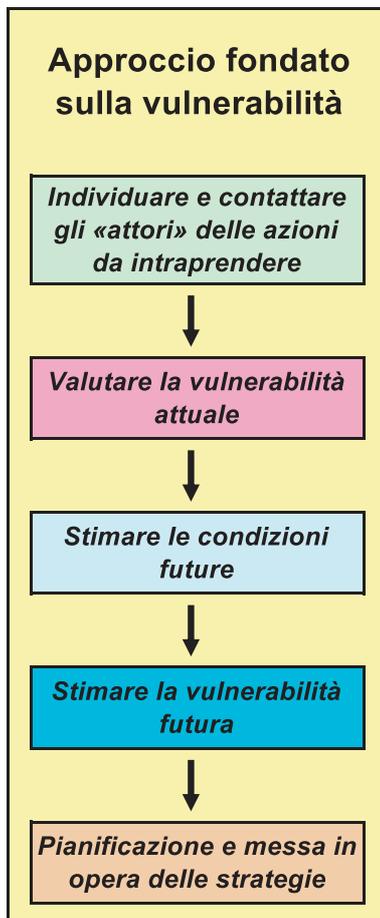
In vista di cambiamenti climatici è assolutamente necessario contenere le cause che li generano con misure di **attenuazione**, vale a dire la riduzione delle emissioni di gas serra e la stabilizzazione a lungo termine della loro concentrazione atmosferica.

Ma poiché il tempo di residenza di queste molecole in atmosfera è assai lungo (da decenni a millenni, a seconda della molecola) e poiché gli oceani reagiscono con lentezza a variazioni nell'assetto climatico terrestre, l'aumento della temperatura glo-

bale e gli effetti relativi continueranno comunque a farsi sentire, probabilmente per secoli. Ecco che allora si deve intervenire anche con una diminuzione della vulnerabilità del territorio e della società umana, attraverso misure di **adattamento** e di **mitigazione** del rischio, da raggiungere attraverso opportune pianificazioni in ogni settore, dall'agricoltura al turismo, dall'edilizia alla sanità, dalla produzione di energia alla pianificazione delle infrastrutture pubbliche, ecc... La programmazione e la messa in opera delle misure di mitigazione e adattamento dovranno tenere conto dell'evoluzione dinamica degli eventi naturali, nonché della stima della *vulnerabilità attuale e futura*, e dovranno essere condotte nel senso dello sviluppo sostenibile e duraturo (ecologico, economico e sociale). Si dovranno privilegiare possibilmente misure che al tempo stesso comportino ricadute positive anche in altri

3.6 - Elenco di fattori economici e sociali che influiscono sulla capacità di una società di adattarsi al cambiamento climatico (WARREN F.J. & al., 2004).

Fattori influenti sulla capacità di adattamento	
Risorse economiche	<i>Maggiori sono le risorse economiche, più grande è la capacità di adattamento</i>
Tecnologie	<i>La carenza di tecnologie limita la scelta delle azioni</i>
Informazione e competenze	<i>La presenza di popolazione e tecnici ben preparati e qualificati aumenta la capacità di adattamento. Migliore è l'accesso all'informazione, maggiori sono le possibilità di mettere in pratica le misure di adattamento nei tempi opportuni</i>
Infrastrutture	<i>Una rete di infrastrutture diversificate può offrire maggiori possibilità di adattamento, e anche le loro caratteristiche e la loro localizzazione sono determinanti</i>
Istituzioni	<i>Solide istituzioni sociali aiutano a ridurre l'impatto dei cambiamenti climatici e ad aumentare l'adattamento</i>
Equità	<i>Un'equa distribuzione delle risorse accresce la capacità di adattamento, così come la disponibilità e l'accessibilità delle medesime sono fattori importanti</i>



3.7 - Percorso di azione per individuare opportune strategie di fronte al cambiamento climatico, basato sull'analisi della probabile evoluzione futura della vulnerabilità (WARREN F.J. & al., 2004).

settori (strategie *win-win*), e che lascino — una volta realizzate — un ampio margine di flessibilità nella gestione.

Le principali insidie poste alla capacità umana di adattarsi a nuovi scenari ambientali potrebbero essere la *velocità del cambiamento previsto* dai modelli climatici, che non ha riscontri precedenti nella storia dell'umanità, nonché il *probabile aumento della frequenza e dell'intensità dei fenomeni estremi*. Inoltre, uno

tra maggiori rischi dati dai cambiamenti climatici risiede nel fatto che una variazione in un sistema sensibile come quello alpino può portare a conseguenze ben più importanti rispetto alle cause che le hanno generate, per cui fenomeni nuovi e più gravi potrebbero prodursi in zone in cui prima tali episodi erano pressoché sconosciuti (AA.VV., 2003). In queste circostanze, capitale importanza assume l'**educazione** della popolazione, nonché dei *decision makers* e dei tecnici chiamati a pianificare l'assetto del territorio (vedi cap. 12). Le misure di attenuazione, adattamento e mitigazione si compongono di scelte «dall'alto» (strate-

gie «*top-down*», per dirla con JARED DIAMOND, 2005), vale a dire di natura politica, come una legislazione adeguata ed efficace che favorisca a sua volta scelte e comportamenti virtuosi nella vita di tutti i giorni tra la popolazione (strategie «*bottom-up*», «dal basso»). Si pensi, ad esempio, alla migliore progettazione delle infrastrutture (localizzazione in aree a basso rischio, coibentazione per minimizzare il dispendio energetico), al progressivo passaggio verso fonti energetiche rinnovabili, alla conversione delle attività turistiche, all'ottimizzazione dei trasporti e della gestione dei rifiuti. Tutte queste strategie verranno analizzate più in dettaglio nel cap. 13. Si tratta di interventi che richiedono disponibilità di tecnologia e risorse finanziarie, ma soprattutto cooperazione costruttiva tra ogni settore della ricerca, della politica e della società. Il cambiamento climatico infatti non va visto solamente in chiave negativa: è possibile una pianificazione che minimizzi i costi degli impatti negativi e massimizzi i profitti di quelli positivi. Il *global warming* è sì la più grande sfida che la civiltà umana si troverà a dover affrontare nel XXI secolo, ma potrà anche essere fonte di sviluppo di nuove opportunità.

Recita un proverbio cinese: «*Quando cambia il vento, alcuni costruiscono muri, altri costruiscono mulini.*» Noi dobbiamo costruire gli uni e gli altri, ciascuno al posto giusto...

4.1 a, b - Intorno al 1800 la lingua del ghiacciaio della Brenva appariva turgida, pura e ancora priva di detriti, in un disegno del pittore e incisore JEAN ANTOINE LINK. Nel XX secolo, per la deglaciazione e l'enorme frana del 1920, la superficie si è ampiamente coperta di detrito, e la «Pierre à moulin», finestra rocciosa che nel 1800 era appena visibile tra i seracchi, oggi separa completamente il ghiacciaio in due settori distinti.

4. LEZIONI DAL PASSATO

«I cambiamenti ambientali e i loro impatti sulle risorse che sostengono l'umanità hanno avuto in passato un ruolo dominante nel provocare le migrazioni dei popoli».

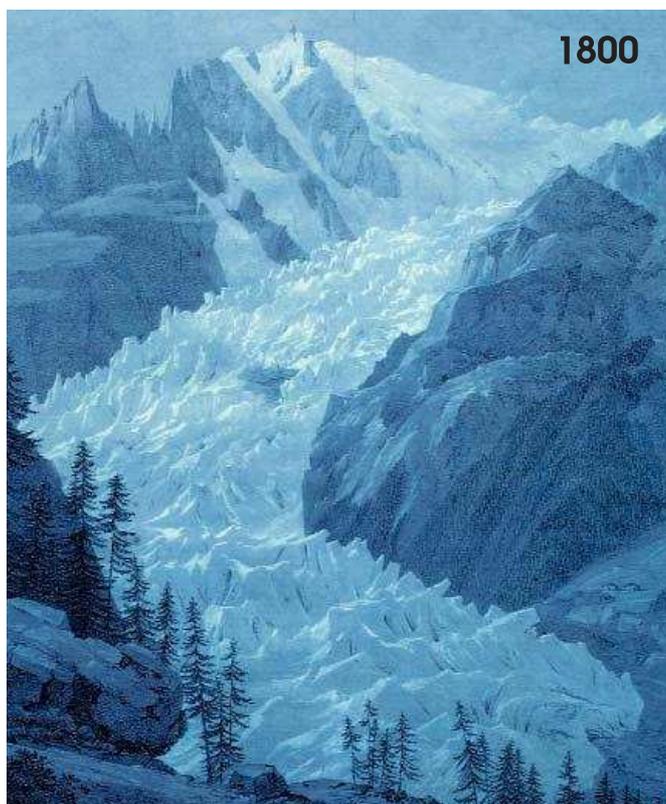
(MARTIN BENISTON, 2004)

La ricostruzione del clima antico

I dati meteorologici strumentali consentono di ricostruire con buona precisione l'andamento climatico degli ultimi due-tre secoli: la serie continua e omogenea più antica è la *Central England Temperature* (inizio dei dati a risoluzione mensile nel 1659, di quelli giornalieri nel 1772). Sulle Alpi il primo osservatorio

venne istituito nel 1817 al colle del Gran San Bernardo, e ad Aosta Georges Carrel iniziò le misure di temperatura nel 1840. Per le epoche anteriori, in assenza di dati strumentali, occorre fare riferimento a metodi indiretti, che prendono in considerazione parametri geo-ambientali correlati all'andamento climatico (*proxy-data*), ad esempio:

- *anelli di accrescimento degli alberi (dendrocronologia)*, la cui ampiezza è indice dell'andamento climatico della stagione vegetativa (secoli);
- *esame dei pollini (palinologia)*, per lo più in torbiere, che fornisce un'idea della



1800



2005

distribuzione delle specie vegetali nell'intorno (da secoli ad alcuni millenni);

— *carotaggi glaciali profondi*, da cui è possibile analizzare campioni di aria «fossile», rimasta intrappolata e inalterata anche per centinaia di migliaia di anni, ottenendo la concentrazione di gas serra, e l'andamento delle temperature attraverso i rapporti isotopici dell'ossigeno e dell'idrogeno.

Quest'ultimo metodo consente di ottenere

ricostruzioni paleo-climatiche molto antiche, nel caso di carotaggi effettuati in particolari settori delle calotte polari (interno dell'Antartide, *inlandsis* della Groenlandia) in cui non vi è flusso orizzontale che alteri le successioni cronologiche del ghiaccio stratificatosi. Il progetto italo-francese EPICA (*European Project for Ice Coring in Antartica*), sviluppato alla base di Dome Concordia (Antartide orientale, 3233 m), ha consentito

L'importanza dei dati meteorologici storici: la situazione valdostana, un patrimonio da salvaguardare

L'acquisizione continuativa, omogenea e regolare dei parametri atmosferici è alla base di ogni studio sul cambiamento climatico. La compilazione del presente rapporto è stata possibile grazie alla disponibilità, in Valle d'Aosta, di un'ampia banca dati meteorologica, già interamente recuperata dal gruppo di lavoro della Società Meteorologica Subalpina per la pubblicazione dell'Atlante Climatico della Valle d'Aosta (AA.VV., 2003). In particolare, la lunga serie storica di Aosta-città consente di estendere le considerazioni fino al 1840, mentre l'installazione di numerose stazioni in quota - presso le dighe idroelettriche - negli Anni 1920-30, tuttora operative, consente analisi di dettaglio sull'evoluzione climatica delle zone di montagna, specialmente nei riguardi dell'innevamento e delle risorse idriche. La fitta e preziosa rete di strumenti afferenti all'Ufficio Idrografico del Po (ente istituito nel 1913) raggiunse l'apice della funzionalità negli Anni 1930-60, quando erano attive circa 60 stazioni termo-pluviometriche, mentre in seguito è andata progressivamente degradandosi fino alla definitiva soppressione dell'ente



4.2 - Le stazioni meteorologiche automatiche attive all'aeroporto di Saint-Christophe. La serie dei dati aeroportuale è omogenea dal 1974.

nel 2003. Tali gravi lacune sono state almeno in parte colmate dalla nuova installazione, a partire dagli Anni 1980-90, di sensori automatici da parte del Servizio Protezione Civile e del Dipartimento Territorio, Ambiente e Risorse Idriche, anche se in alcuni siti (anche di grande interesse, come Champorcher, Courmayeur, Champoluc) la perdita di omogeneità nelle serie storiche è stata comunque inevitabile.

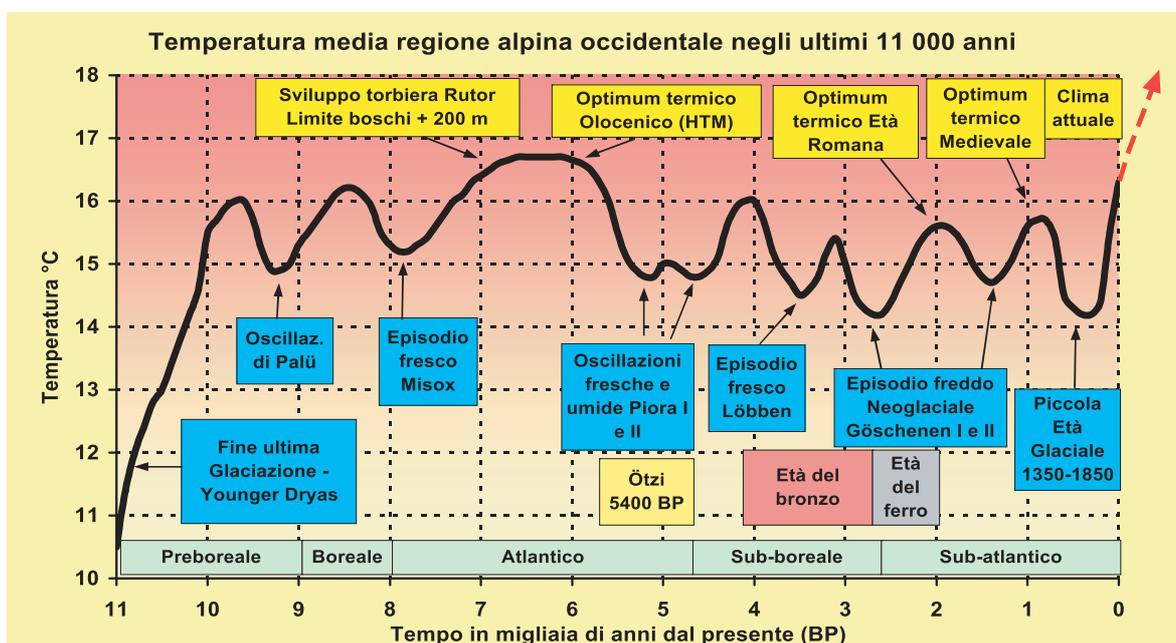
4.3- Ricostruzione dell'andamento approssimativo delle temperature medie nella regione alpina occidentale negli ultimi 11.000 anni, desunta dai risultati pubblicati da diversi Autori, in particolare OROMBELLI (1998), LISTER & al. (1998), HORMES (2001), BURGA (1995), DAVIS (2003), MOBERG (2005). L'inizio dell'Olocene è stato caratterizzato da un netto aumento termico (circa 5°C nell'arco di un millennio), responsabile della fine delle glaciazioni. In seguito il clima si è stabilizzato su un assetto temperato, con fluttuazioni comprese entro 2.5 °C circa, tra l'Optimum termico olocenico di 6.000-7.000 anni fa circa e i minimi degli episodi Neoglaciali (circa 2500 anni fa) e della Piccola Età Glaciale (1350-1850 d.C.). Le temperature attuali hanno raggiunto, e molto probabilmente ormai superato, i valori già miti degli Optimum termici secondari dell'Età romana e del Medioevo.

finora di ricostruire l'andamento delle concentrazioni di biossido di carbonio, metano e della temperatura terrestre negli ultimi 650.000 anni (SIEGENTHALER & al., 2005; SPAHNI R. & al., 2005), e costituisce dunque una tra le fonti più preziose oggi a disposizione per la conoscenza del clima passato. Il grafico di pag. 14 mostra l'andamento ricostruito del CO₂, che peraltro consente di evidenziare l'alternanza di almeno 7 fasi glaciali (riconoscibili per il calo di concentrazione del gas serra), le quali sulle Alpi hanno portato i ghiacciai a raggiungere talora gli sbocchi in pianura sul versante padano, e altrettante fasi interglaciali, compresa quella attuale (aumento del gas serra). Ma uno dei risultati più impressionanti riguarda la presenza dei gas serra in atmosfera: in oltre mezzo milione di anni — fino all'era preindustriale — la concentrazione di CO₂ non era mai salita oltre le 300 ppmv, oggi siamo giun-

ti a 381 ppmv, e questo fornisce un'idea dell'importanza del cambiamento ambientale e climatico che oggi stiamo vivendo.

Dalla fine delle glaciazioni a oggi

Per la regione alpina occidentale, i risultati ottenuti dagli studi paleo-climatici di diversi autori, in particolare OROMBELLI (1998), LISTER & al. (1998), HORMES (2001), DAVIS (2003), MOBERG (2005), consentono di tracciare un quadro approssimativo dell'andamento delle temperature medie degli ultimi 11 mila anni, riportato nel grafico 4.3. Allo studio del clima alpino in epoca storica hanno pure contribuito analisi polliniche condotte in Valle d'Aosta, presso la torbiera del Rutor (BURGA, 1995). Tra 11.000 e 10.000 anni fa la temperatura media aumentò di circa 5°C, segnando la fine dell'ultima glaciazione e l'inizio dell'Olocene (l'epoca geologica in cui oggi viviamo); i ghiacciai si

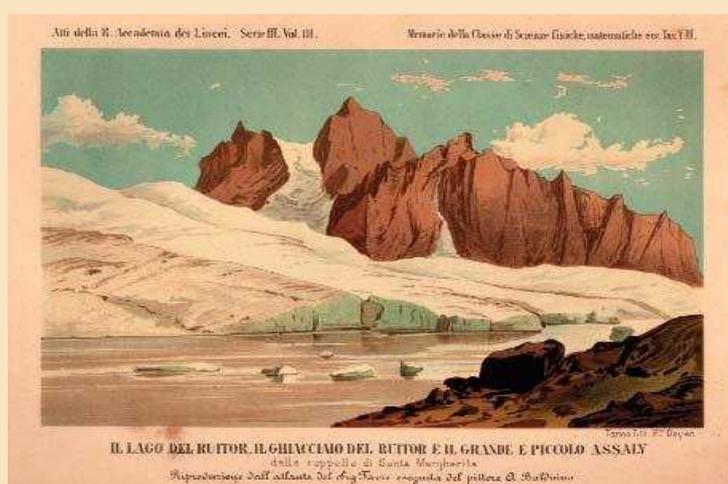


ritirano ad alta quota, e il clima si stabilizza su un assetto temperato simile a quello attuale, che favorisce la colonizzazione umana delle valli alpine, nonché l'affermarsi dell'agricoltura e dell'allevamento verso 6500-7000 anni fa (BP = *before present*), proprio durante l'*Optimum termico olocenico*, periodo mite durante il quale peraltro si forma anche la torbiera del Rutor. La fluttuazione delle temperature medie tra questa fase mite e altre successive più fresche, come l'episodio Neoglaciale «Göschenen I» (3000-2500 BP) e la Piccola Età Glaciale (1300-1850 d.C.), rimangono contenute entro 2.5 °C circa. Dati provenienti dalla larghezza degli anelli di accrescimento degli alberi, da dati archeologici e datazioni al radiocarbonio, da fonti storiche, hanno permesso di ricostruire le oscillazioni storiche dei ghiacciai svizzeri dell'Aletsch, del Gorner, e di Grindelwald inferiore (HOLZHAUSER & *al.*, 2004): sono emerse avanzate pressoché simultanee dei tre apparati nel 1000-600 a.C. (Göschenen I), 500-600 d.C. (Göschenen II), 800-900, 1100-1200 e 1300-1860 d.C. Queste fluttuazioni si collocano in fase con le oscillazioni di livello di laghi della Francia orientale (Jura e Prealpi) e dell'altipiano svizzero. Inoltre il confronto tra le oscillazioni dell'Aletsch e i dati del ¹⁴C mostra il ruolo delle variazioni nell'attività solare come forzante climatica principale durante l'Olocene. Gli ultimi 1000-1200 anni di storia hanno conosciuto una fase mite nel Medioevo, collocabi-

le tra il 900 e il 1200 d.C. circa, seguita da un raffreddamento più pronunciato tra la fine del XIII e la metà del XIX secolo, periodo diffusamente conosciuto come «Piccola Età Glaciale» (approfondimento a p. 32). Di entrambi i momenti storici sono disponibili documenti e cronache che attestano gli effetti delle mutate condizioni climatiche sulle comunità alpine, sulle vie di comunicazione, sull'agricoltura, la cui interpretazione va però effettuata con cautela. Quanto al **periodo mite medievale**, si trovano cenni del più agevole passaggio attraverso alcuni valichi alpini rispetto a oggi (Colle di Teleccio tra Valnontey e la Valle Orco; Colle del Teodulo tra il Breuil e Zermatt), e della diffusa coltivazione di specie tipicamente mediterranee quali la vite e l'ulivo anche in Valle d'Aosta, testimonianze che talora avevano indotto a ritenere — troppo semplicisticamente — che a quei tempi le temperature fossero nettamente più elevate di oggi. Il fatto che durante il Medioevo alcuni valichi alpini fossero praticabili non esclude necessariamente l'esistenza di ghiacciai, così come la coltivazione di specie termofile, magari spinta in condizioni marginali e con mediocre produttività, non implica per forza un clima più mite dell'attuale (peraltro anche oggi vite e ulivo prosperano sui versanti della Valle centrale rispettivamente fino a 500-600 e 700-800 m di quota). Secondo recenti analisi paleo-climatiche, ad esempio quella condotta da OSBORN & BRIFFA

(2006), l'anomalia positiva di temperatura registrata tra l'890 d.C. e il 1170 d.C. è sì in accordo con la definizione di Optimum termico medievale, tuttavia **il riscaldamento osservato nella seconda metà del XX secolo mostra un'intensità, una rapidità e un'esten-**

sione spaziale di importanza ancora maggiore, e costituisce la più notevole caratteristica dell'evoluzione climatica negli ultimi 1200 anni (fig. 4.6), peraltro in fase con le massime concentrazioni di gas serra in atmosfera. Dunque vi sono serie evidenze per ritenere



4.4 - Il lago di Santa Margherita, nelle cui acque si immerge la fronte del ghiacciaio del Rutor, in una raffigurazione tratta da BARETTI (1879).

del ghiacciaio del Rutor in avanzata. Almeno dodici casi si sono contati dal 1430 al 1680, di cui quattro in anni consecutivi dal 1594 al 1597. Su incarico di Carlo Emanuele I, duca di Savoia, l'ingegnere Giacomo Soldati propose la costruzione di una diga a valle del lago per contenerne le acque di svuotamento (capienza fino a 4 milioni di m³), mentre l'ingegnere svizzero Tubinger propose la costruzione - sul fondo del lago - di una galleria di drenaggio lunga 400 metri per prevenirne la formazione, ma entrambi i progetti non vennero realizzati per via dei costi elevati. Dunque gli svuotamenti continuarono... Per scongiurare il fenomeno, nel XVII secolo vennero addirittura portate in processione fino al ghiacciaio le reliquie di San Grato, patrono di Aosta. Nell'agosto 1751, cinque milioni di metri cubi d'acqua vennero rilasciati in 6-7 ore, e la piena si propagò per 30 km. Un ultimo svuotamento di 100.000 m³ d'acqua si produsse nel 1933, dai laghi proglaciali «Nuovo» e «Nuovissimo», ma senza più recare danni a valle (fonte: archivio GRIDABASE, progetto EU Glaciorisk - <http://glaciorisk.grenoble.cemagref.fr/>). Ora, con il regresso del ghiacciaio questo tipo di pericolo dovrebbe essere scongiurato, ma il riscaldamento atmosferico in atto provoca nuovi cambiamenti in alta montagna (formazione di laghi epiglaciali, crollo di ghiacciai pensili), imponendo una rinnovata sorveglianza.

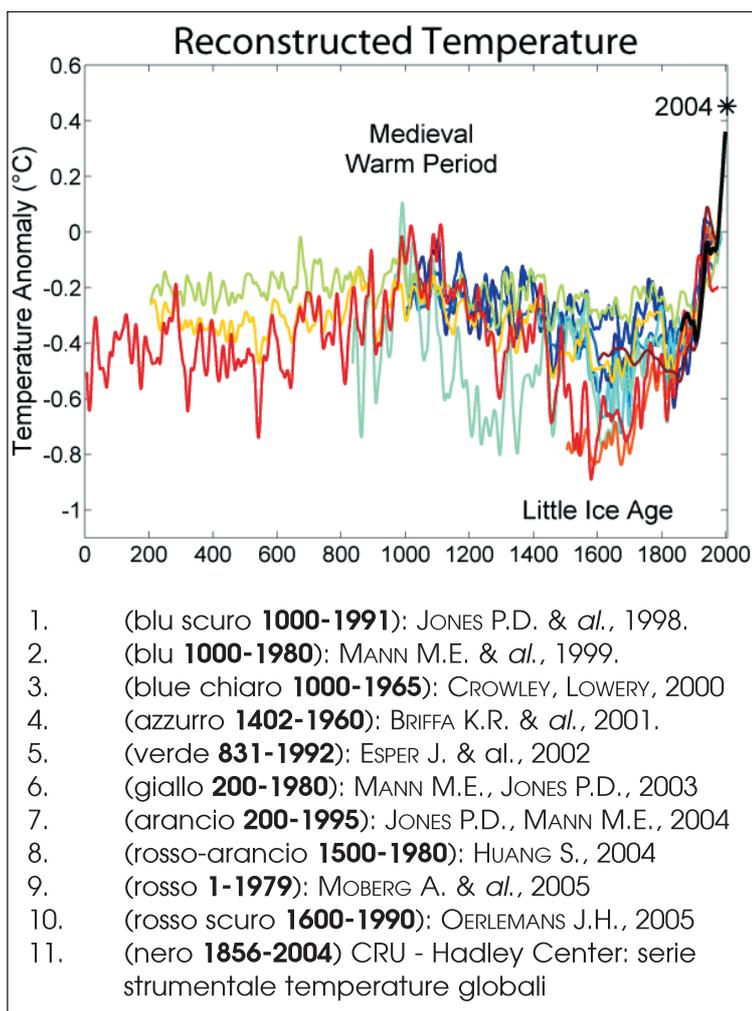
Le rotte glaciali: la storia turbolenta del lago di Santa Margherita al Rutor

In una regione alpina come la Valle d'Aosta il rischio connesso alla presenza dei ghiacciai si è fatto parecchio sentire in passato, specialmente durante la Piccola Età Glaciale. I fenomeni che più hanno segnato la storia locale dell'alta valle sono stati forse i ripetuti svuotamenti del lago di Santa Margherita, formatosi più volte per lo sbarramento del torrente da parte della lingua

La Piccola Età Glaciale

Il periodo intercorso tra la fine del XIII e la metà del XIX secolo (1300-1850 d.C.) è stato caratterizzato, sia sulle Alpi, sia a livello planetario o quanto meno emisferico, da un netto raffreddamento climatico e dalla più importante avanzata dei ghiacciai in epoca storica, dopo la fine delle grandi glaciazioni circa 11.000 anni fa. Questa fase è genericamente indicata con il termine di «Piccola Età Glaciale» (PEG). Si tratta di un concetto che - sotto il profilo climatico e glaciologico - oggi è fonte di vivaci discussioni nell'ambiente scientifico: alcuni autori lo considerano inappropriato, inutile, auspicandone perfino la cessazione dell'uso, per via di differenze e asincronie nello sviluppo delle fasi climatiche tra diverse regioni del globo; questo periodo in effetti non fu uniformemente freddo né nel tempo né nello spazio (JONES & MANN, 2004; MATTHEWS & BRIFFA, 2005). Tuttavia, il suo utilizzo rimane ampiamente diffuso e verrà mantenuto anche nel presente rapporto, per l'elevato impatto che questa fase più fredda e piovosa/nevosa ha avuto sul territorio e sulla civiltà alpina in pieno sviluppo. Ne restano ampie testimonianze in documenti storici, leggende e tradizioni, che parlano di comunicazioni più difficili attraverso gli alti valichi per l'espandersi di nevati e ghiacciai, di pessime annate agrarie e carestie, di pascoli perduti per l'avanzata dei ghiacci (specialmente sul massiccio del Monte Bianco, dove le lingue glaciali giunsero a lambire i fondovalle

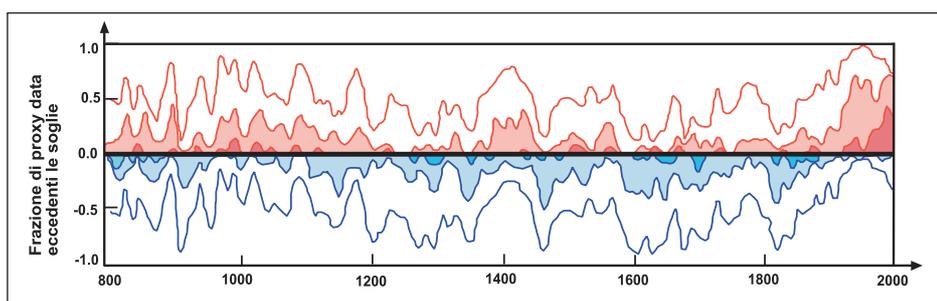
presso Courmayeur e Chamonix). Si trattò di un periodo di crisi, cui le popolazioni di montagna - avvezze a vivere in un territorio difficile - seppero tuttavia adattarsi. Sulle Alpi l'espansione dei ghiacciai raggiunse l'apice almeno in tre fasi attorno al 1600, al 1820 e al 1850, quando la superficie glacializzata era circa doppia rispetto a oggi (MERCALLI & CAT BERRO, 2005). Di alcuni grandi ghiacciai delle Alpi occidentali, come la Mer de Glace e il ghiacciaio inferiore di Grindelwald, benché soltanto dal XIX secolo siano iniziate misure accurate, è possibile ricostruire l'andamento negli ultimi 400-500 anni utilizzando fonti storiche, cronache e disegni. ZUMBÜHL & al. (2006) hanno concluso che la Mer de Glace raggiunse il massimo sviluppo nel 1821, cui seguì una pulsazione minore culminata nel 1852-53, mentre per il ghiacciaio inferiore di Grindelwald (Alpi Bernesi) l'avanzata più importante della fase PEG si sarebbe avuta nel 1600. In Val d'Aosta si conoscono le variazioni frontali del ghiacciaio del Lys (Gressoney, Monte Rosa) fin dal 1812: in questo caso la PEG culminò con due pulsazioni pressoché equivalenti nel 1821 e 1859-60, di cui la prima più avanzata di circa 50 m rispetto alla seconda (MONTERIN, 1932). Il regresso glaciale successivo, che prosegue tuttora, è stato innescato dal calo delle precipitazioni e dall'aumento delle temperature (tendenze spesso non in fase tra una regione e l'altra): l'incremento termico è stato evidente nel XX secolo, e valutato, sulle Alpi, in $1.1 \div 1.4$ °C da AUER & al. (2005).



che gli Anni 1990 siano stati i più caldi del millennio, e probabilmente anche degli ultimi 2000 anni, come si evince dal grafico 4.5, che mostra i risultati di diverse ricostruzioni climatiche.

Clima storico e uomo: un rapporto complesso, fatto di crisi e adattamenti

Lungo tutto il corso della sua presenza sulla Terra (come bipede da circa 2 milioni di anni fa, con la comparsa di *Homo erectus*), l'uomo ha dovuto confrontarsi più volte con i cambiamenti del clima, in passato unicamente legati a cause naturali. Durante le ultime pulsazioni glaciali del Pleistocene l'uomo era già presente come cacciatore-raccoglitore in Europa centro-meridionale, ma il nomadismo e la semplicità dell'organizzazione sociale favoriva in un certo senso l'adatta-



4.5 (in alto) - Confronto tra diverse ricostruzioni delle temperature medie globali negli ultimi duemila anni, ed elenco dei rispettivi autori. I dati di ogni ricostruzione sono stati smussati con media mobile pesata (gaussiana $\sigma = 5$ anni). Alla fine del XX secolo le temperature medie terrestri hanno superato i valori già miti dell'Optimum Termico Medievale, risultando dunque le più elevate da almeno duemila anni (http://en.wikipedia.org/wiki/Temperature_record).

4.6 (qui sopra) - Da OSBORN & BRIFFA (2006): frazione di serie di proxy-data utilizzate in cui, per ciascun anno, si supera rispettivamente la media (anomalie positive o negative, linea rossa e blu), 1 (aree ombreggiate in rosso e blu) e 2 unità di deviazione standard (area in rosso e blu intenso) calcolate su ciascuna serie. Lo studio fornisce le evidenze di fasi significativamente calde durante l'Optimum termico medievale e significativamente fredde durante la Piccola Età Glaciale, ma il segnale più forte e diffuso nello spazio appare nella seconda metà del XX secolo: alla fine del periodo di analisi (1995), il 70% dei valori delle 14 serie di proxy-data utilizzate era in anomalia positiva rispetto alla media (linea rossa), e il 35% superava la soglia delle due unità di deviazione standard (area rosso intenso).

bilità in caso di mutamenti nell'assetto ambientale. Terminata la glaciazione, e una volta colonizzati i siti in posizione morfologica più favorevole, con l'aumento demografico le popolazioni alpine hanno iniziato a colonizzare luoghi viepiù marginali e a quote superiori, fino ad arrivare al picco di popolazione che si è registrato durante il XIX secolo, quando, malgrado l'ostilità climatica delle fasi finali della Piccola Età

Glaciale (maggiore permanenza della neve, più freddo, ghiacciai più estesi), la pressione demografica spinse allo sfruttamento, specialmente per il pascolo estivo, di località assolutamente marginali, magre e poco produttive, fin presso i ghiacciai e in situazioni morfologiche poco felici, e non sempre al riparo da piene torrentizie, erosioni e valanghe. In Valle d'Aosta non mancano casi di alpeggi a quote molto elevate, ad esempio l'alpe Tsa de Tsan a 2610 m in alta Valpelline: ai tempi della sua costruzione, sicuramente durante la fase PEG, i magri pascoli sovrastavano addirittura l'ampia lingua valliva dell'omonimo ghiacciaio. Da sempre le genti valdostane, come tutti i popoli delle Alpi, si sono trovate a fronteggiare un ambiente e un clima talora ostili, adattandosi di volta in volta con l'ingegno e i mezzi a disposizione. Perfino il drammaturgo canavesano GIUSEPPE GIACOSA (1847-1906) ricorda, nella sua novella «*I paesi delle valanghe*» (in «*Novelle e paesi valdostani*», 1886), l'esposizione del montanaro agli elementi severi del clima alpino: «*Ma quale vita! E quale lavoro! Quel poco pane il villano deve cercarselo dove lo trova, contendendolo al sole, alla neve, alle frane, ai torrenti divoratori, al vento gelido di tramontana, alle brinate primaverili*». Non che oggi le condizioni siano molto cambiate sotto questo aspetto: il clima continua e continuerà a condizionare fortemente le attività produttive, special-

mente in montagna, ma quanto meno la maggiore facilità degli scambi commerciali a scala continentale e i sussidi stanziati in caso di calamità naturali possono contenere i danni di un'annata negativa, mentre nei secoli passati questa poteva comportare una grave carestia a livello locale. Data la fragilità dell'economia rurale alpina, in passato l'uomo ha messo in atto una serie di accorgimenti per una gestione del territorio il più possibile ottimale, che, anche oggi, andrebbero riscoperti e valorizzati, in vista di nuovi cambiamenti climatici e ambientali. Si veda ad esempio, nel caso valdostano, la rete dei *ru* (canali) per l'irrigazione dei versanti aridi affacciati sulla valle centrale, già testimoni della difficoltà nell'approvvigionamento idrico estivo in tempi remoti: il loro ripristino e potenziamento potrebbe tornare utile in caso di estati future ancora più secche di quella del 2003, laddove l'irrigazione «a pioggia» si rende difficile per ragioni logistiche e morfologiche. Quanto agli insegnamenti che si possono trarre dallo studio degli eventi climatici del passato, grande rilievo rivestono anche le cronache di alluvioni, valanghe, frane, e rotte glaciali: benché il cambiamento climatico possa proporre fenomeni «nuovi» in tempi e luoghi diversi rispetto a un tempo, in ogni caso la conoscenza degli episodi passati consente di individuare le aree più a rischio e di comprendere la potenziale evoluzione futura del territorio.

5. LA PREVISIONE DEL CLIMA FUTURO

«Non chiedere ai modelli climatici ciò che non possono dare».

(MAURIZIO MAUGERI, 2005)

Come si fa a prevedere il clima? I modelli numerici e i loro limiti

L'unico mezzo oggi a disposizione per effettuare delle previsioni sull'evoluzione futura del clima è dato dai modelli numerici. Si tratta di sistemi basati su complesse equazioni differenziali che descrivono le interazioni fisiche tra gli elementi del sistema climatico, e consentono di individuare le tendenze future nel suo comportamento. Concettualmente funzionano come i modelli di previsione meteorologica a breve-medio termine, ma in questo caso

non possono fornire con precisione le condizioni del tempo in un dato luogo e in un giorno preciso, bensì soltanto una tendenza climatica generale sul lungo periodo.

I modelli climatici, globali o regionali che siano (approfondimento a pag. 36), operano tramite una griglia tridimensionale a maglia larga in cui la circolazione atmosferica e quella oceanica sono rappresentate da complesse equazioni fisiche, che servono a prevederne il futuro comportamento. Dopo i primi tentativi negli Anni 1960-70, sono stati migliorati via-via nel tempo introducendo parametrizzazioni riguardanti anche altre componenti, come la natura della superficie terrestre (terre emerse, calotte glaciali, banchisa) e

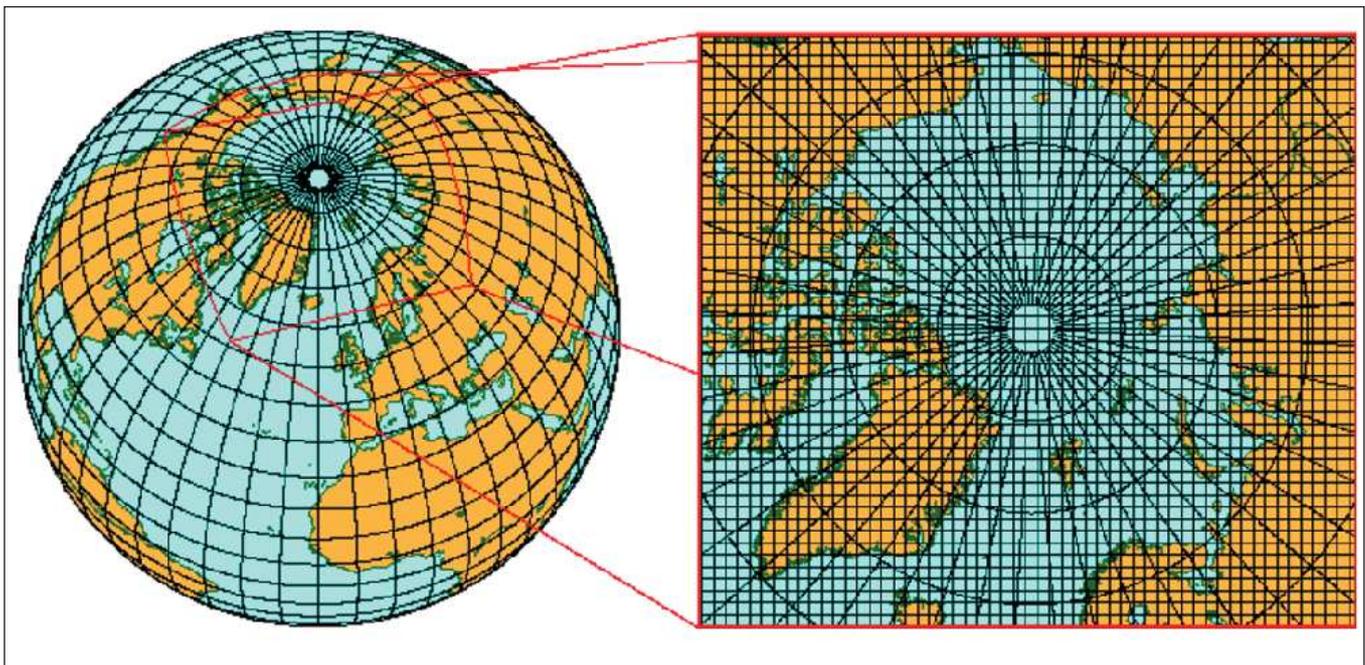
5.1 - Riepilogo delle caratteristiche delle principali categorie di modelli climatici (Fonte: Hadley Center, Met-Office, UK).

Principali categorie di modelli climatici (fonte: Hadley Center, Met-Office, UK)	
Categoria	Funzione
AGCMs – Atmosphere General Circulation Models (Modelli di Circolazione Generale dell'Atmosfera)	Studio dei processi atmosferici e della variabilità climatica
OGCMs – Ocean General Circulation Models (Modelli di Circolazione Generale dell'Oceano)	Studio della circolazione oceanica, dei processi interni agli oceani e loro variabilità
Modelli del ciclo del carbonio	Comprensione di importanti meccanismi di retroazione (<i>feedback</i>) legati al ciclo del carbonio (fertilizzazione piante da CO ₂ , assorbimento CO ₂ da oceani)
Modelli di chimica dell'atmosfera	Comprensione dei processi chimici che regolano la formazione e distruzione di O ₃ e CH ₄ nella bassa atmosfera.
AOGCMs – Coupled Atmosphere-Ocean General Circulation Models (Modelli accoppiati di Circolazione Generale Atmosfera-Oceano)	I più complessi oggi in uso. AGCM accoppiato a OGCM. Previsione della velocità di cambiamento del clima e della concentrazione dei componenti atmosferici in risposta a emissioni e cambiamento climatico (se accoppiato con modello di chimica atmosferica).
RCMs – Regional Climate Models (Modelli climatici regionali)	Risoluzione spaziale più elevata (maglia 50 km in genere) per prevedere meglio le peculiarità locali. Inizializzati con i risultati dei modelli climatici ad area globale.

Modelli globali e modelli regionali

Per studiare l'evoluzione futura dell'atmosfera, sia nel breve termine, ai fini della previsione meteorologica, sia nel lungo termine a scopi climatologici, bisogna risolvere le equazioni che ne regolano il moto e che determinano le interazioni tra i vari parametri atmosferici. Queste sono numerose e complesse, e la loro risoluzione richiede l'uso di modelli numerici che «girano» su potenti calcolatori. Non essendo inoltre possibile, come richiederebbe la meccanica classica, studiare lo stato e l'evoluzione di tutti i punti dell'atmosfera (praticamente infiniti), anche perchè occorrerebbe conoscerne tutte le condizioni iniziali, questa deve essere modellizzata attraverso un grigliato tridimensionale; le equazioni del moto vengono, quindi, applicate e risolte solo sui nodi della griglia e il risultato viene poi esteso a tutta l'atmosfera. Ne deriva che, tanto più fitto è il grigliato (cioè tanto maggiore è il numero dei nodi), tanto migliore è l'approssimazione dello stato reale dell'atmosfera. Ovviamente, aumentando la risoluzione del grigliato, aumentano parallelamente i tempi e i costi di calcolo, per cui bisogna trovare il modo di avere una descrizione accettabile dello stato e dell'evoluzione dell'atmosfera in tempi relativamente brevi. La soluzione adottata al giorno d'oggi è di avere un numero limitato di modelli, i cosiddetti **modelli globali** (GCM), che, partendo dalle misure dei parametri meteorologici effettuate dalle reti di rilevamento terrestri e da satellite (inizializzazione del modello), risolvono le

equazioni del moto su tutta l'atmosfera per un periodo intorno ai 5-10 giorni; data la vastità del dominio da simulare e l'estensione temporale che si raggiunge, per esigenze di calcolo la distanza tra i punti griglia rimane piuttosto elevata (dell'ordine di 50 km) e di ciò risente l'accuratezza con cui questo tipo di modelli descrive eventuali effetti locali, dovuti in primo luogo all'orografia. Nel caso dei **modelli climatologici**, che devono tenere conto anche delle interazioni tra atmosfera e oceano, e devono simulare periodi di tempo molto lunghi (fino a un secolo) bisogna adottare un grigliato più ampio (dell'ordine di 300 km) e semplificare ulteriormente le equazioni del moto trascurando i fenomeni alle scale più piccole. Per ottenere risultati più sensibili agli effetti locali, si è quindi sviluppato un secondo tipo di modelli, i **modelli regionali**, che considerano solo una porzione limitata di territorio e possono quindi avere un grigliato più fitto, con una risoluzione dell'ordine di 50 km (ma fino a 1-10 km per i modelli meteorologici locali), che meglio simula l'orografia. La minore estensione spaziale permette, inoltre, di potersi concentrare anche su alcuni particolari fattori climatici, come ad esempio il ciclo idrologico: in questo modo si può arrivare a una migliore previsione di eventi climatici potenzialmente dannosi a scala locale, come piogge intense, uragani e tempeste di vento. I modelli regionali non sono però indipendenti, ma vengono innestati sui modelli globali, utilizzando come inizializzazione le uscite dei modelli a grande scala.



5.2 - Relazione tra un modello climatico globale e regionale. Il modello climatico globale simula l'evoluzione della circolazione generale dell'atmosfera e delle interazioni tra atmosfera e oceano su tutto il globo terrestre con una risoluzione spaziale piuttosto bassa. Il modello regionale partendo dai risultati del modello globale, considera solo una porzione limitata di territorio, ma ad una risoluzione maggiore (fonte www.awi-potsdam.de).

la biosfera (vegetazione): così sono nati i *modelli accoppiati oceano-atmosfera*, oggi i più utilizzati nella ricerca di punta, che integrano i diversi fattori del sistema climatico, migliorando così le prestazioni.

Dati gli elevati tempi di calcolo necessari, nonostante l'impiego dei più potenti calcolatori disponibili, i modelli globali non possono che lavorare su una griglia ancora piuttosto grossolana, di 300 km di lato per ciascuna «maglia» nel caso dei modelli accoppiati atmosfera-oceano. I risultati ottenuti differiscono in base al tipo di modello e agli scenari utilizzati per l'inizializzazione, cioè delle previsioni di possibili future emissioni di gas a effetto serra e aerosol, più o meno ingenti a seconda dello sviluppo economico, demografico, tecnologico, sociale (riquadro a p. 38).

Per verificare l'attendibilità delle simulazio-

ni, il modello viene sottoposto a un test che consiste nel ricostruire il clima passato, le cui fluttuazioni sono conosciute. Se la ricostruzione è sufficientemente fedele alla realtà nota, allora si può «affidare» al modello anche la previsione delle condizioni future.

E' a partire da questo insieme di modellizzazioni che l'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), nel suo rappor-

«Gli scenari rappresentano uno dei mezzi principali di cui disponiamo per indagare sull'evoluzione dei sistemi complessi, che - per la loro stessa natura - sono imprevedibili; inoltre li conosciamo in modo insufficiente, e sulla loro comprensione persistono grandi incertezze scientifiche.» (CARTER & al., 2001)

Scenari di emissione IPCC-SRES

L'IPCC ha individuato nell'ambito del suo *Special Report on Emission Scenario* (SRES), 40 scenari futuri, che non tengono presente strategie internazionali per l'abbattimento delle emissioni di gas e aerosol climalteranti; sono raggruppati in quattro categorie, di cui due orientate verso una crescente globalizzazione (A1 e B1), e due verso una crescente regionalizzazione delle politiche economiche, sociali e ambientali (A2 e B2).

A1 - Scenari della «*Rapida crescita convergente*». Rapida crescita economica, picco demografico verso il 2050 e successivo declino, rapida introduzione di tecnologie nuove e più efficaci, riduzione delle disparità socio-economiche tra i continenti;

A2 - Scenari del «*Mondo frammentato*». Rapido sviluppo demografico, ma sviluppo economico e tecnologico frammentato e lento, forti differenze tra le regioni del mondo (emissioni più elevate);

B1 - Scenari della «*Sostenibilità ambientale globale*». Come in A1, picco demografico verso il 2050 e successivo declino, ma rapido cambiamento nella struttura economica, sviluppo sostenibile e transizione verso una società dei servizi e dell'informazione, livellamento delle disparità tra i continenti, rapida introduzione di tecnologie efficaci e pulite (emissioni più basse);

B2 - Scenari della «*Sostenibilità locale*». Crescita economica e demografica più lenta e moderata rispetto allo scenario A2; soluzioni locali alla sostenibilità ambientale, economica e sociale.

Fonte: <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/sres/index.html>

ti del 2001, prevede entro il 2100 un ulteriore aumento delle temperature terrestri variabile tra 1.4 e 5.8 °C, a seconda degli scenari di emissioni di gas serra e aerosol considerati.

Recentemente, grandi sforzi in termini di miglioramento dei modelli e di calcolo sono stati profusi per l'elaborazione del IV rapporto IPCC, la cui pubblicazione è pre-

vista entro l'autunno 2007, dopo le precedenti edizioni del 1990, 1995 e 2001. Vi hanno lavorato 14 gruppi di simulazione coordinati in un grande sforzo internazionale; l'insieme delle simulazioni realizzate è stata estesa di molto, permettendo così di studiare in modo più approfondito l'impatto regionale dei cambiamenti del clima. Tuttavia, benché la potenza dei calcolato-

«Nonostante le numerose incertezze e gli aspetti ancora da comprendere, oggi vi è un ampio consenso intorno al reale pericolo che un brusco riscaldamento globale potrebbe costituire per un ampio spettro di sistemi ambientali, sociali ed economici, sia globalmente sia regionalmente, come sulle Alpi».
(MARTIN BENISTON, 2005)

5.3 a, b - Data la mole e la complessità dei calcoli da eseguire, i modelli climatici e meteorologici devono girare su supercalcolatori, disponibili solo nei grandi centri meteorologici internazionali: a sinistra, il supercomputer Fujitsu VPP 5000 installato nel 1999 alla sede di Météo France a Toulouse, come appariva nel 2001. Ha una potenza di 250 miliardi di operazioni al secondo (250 GigaFlop). A destra, sempre presso la sede di Météo France, il vecchio CRAY in attività nel 1992 (f. L. Mercalli).

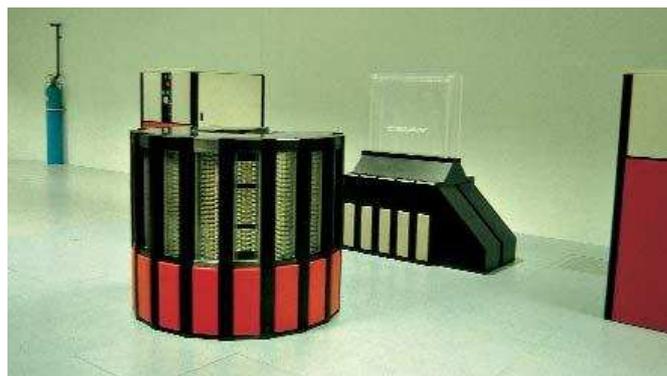
ri sia in continuo aumento, i tempi di elaborazione rimangono considerevoli: per effettuare le nuove simulazioni sul XX e XXI secolo, presentate nel giugno 2005 in vista della stesura del IV rapporto IPCC, i supercalcolatori di Météo France e dell'Institut Pierre Simon Laplace (consorzio francese di ricerca del Centre National de la Recherche Scientifique), hanno lavorato in totale per ben 42.600 ore nell'arco di 8-12 mesi...!

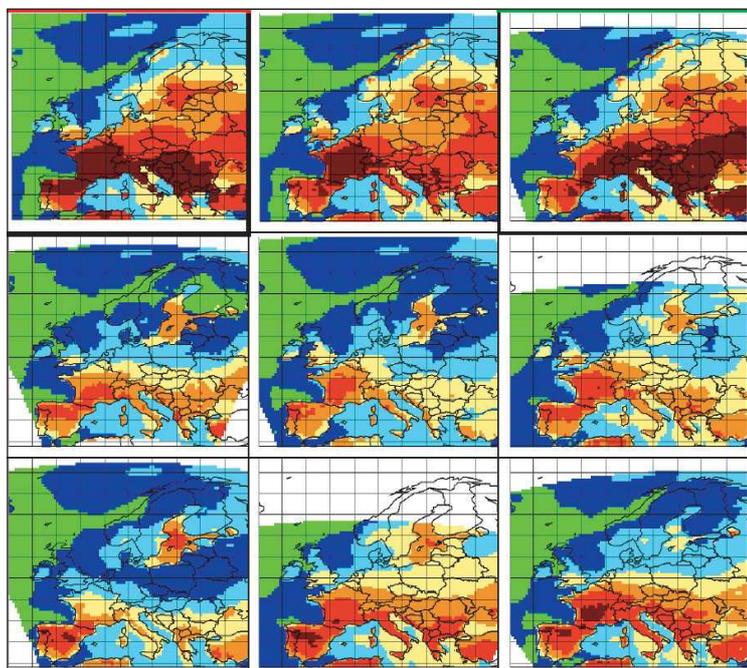
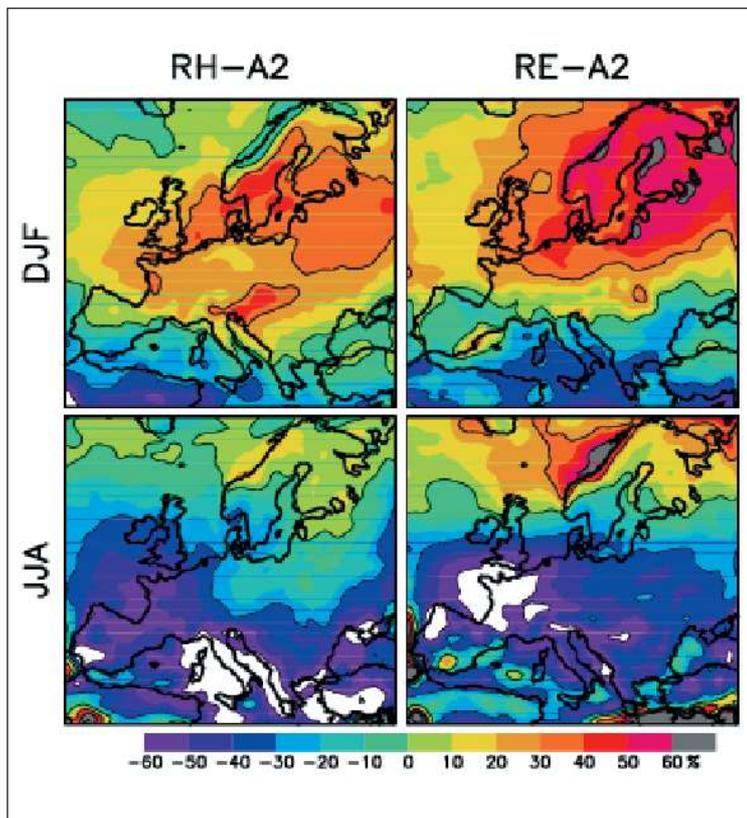
I due modelli impiegati dal gruppo di lavoro Météo France - IPSL (Météo France, CNRS, CEA, 2005) hanno entrambi restituito una previsione di aumento medio globale

di 4 °C entro il 2100, nel caso dello scenario di emissione più pessimistico (SRES-A2).

Rispetto al precedente rapporto IPCC del 2001, il guadagno in qualità della prossima edizione sarà soddisfacente, per via del numero di modelli impiegati, dell'investimento in termini di ore di calcolo e dell'ampiezza della base di dati. I risultati si tradurranno in una migliore comprensione degli impatti a livello regionale, e nella caratterizzazione degli eventi estremi.

L'affidabilità dei modelli climatici è in aumento, essendo stati in grado di simulare correttamente l'aumento di temperatura intervenuto nel corso del XX secolo. Significative incertezze permangono in merito al ruolo delle nubi e degli aerosol nei confronti della radiazione solare. Anche i più sofisticati modelli sono semplificazioni di un sistema estremamente complesso quale è quello atmosferico. Sono per nulla infallibili, ma sono il migliore mezzo oggi a disposizione per effettuare delle previsioni ragionevolmente verosimili sul futuro climatico della Terra.





5.4, 5.5 - Esempi di uscite di modelli climatici, tratti dall'archivio del progetto Prudence. In alto, previsioni della variazione delle precipitazioni estive e invernali in Europa secondo lo scenario IPCC-SRES-A2 (periodo 2071-2100): sulle Alpi si profila un aumento della piovosità invernale e una diminuzione di quella estiva. Qui sopra, alcune possibili evoluzioni dell'anomalia di temperatura massima estiva in Europa, prospettate dai modelli «membri» del progetto Prudence: la media delle previsioni dei singoli modelli rappresenta lo scenario futuro più probabile, vale a dire un aumento di temperatura di 2.8 °C sulla Svizzera meridionale in estate.

Nonostante le progressive migliorie, le numerose retroazioni — anche non lineari — che agiscono all'interno del sistema climatico, difficilmente rappresentabili a livello modellistico, fanno sì che sia illusorio attendersi in un futuro prossimo una diminuzione sostanziale dell'incertezza che ancora permane intorno alla previsione climatica, specialmente a livello di dettagli regionali e locali. Tuttavia non vi sono dubbi sul fatto che i modelli siano in grado di fornire comunque preziose indicazioni sull'evoluzione climatica del futuro, base indispensabile per effettuare opportune scelte strategiche a livello economico, politico e territoriale (HENGEVELD & *al.*, 2002). Per il presente lavoro, in assenza di precedenti studi dettagliati sui cambiamenti climatici futuri in Valle d'Aosta, si farà riferimento, in particolare, alle stime numeriche riportate da FREI (2004) per temperatura (cap. 6) e precipitazioni (cap. 7) nella vicinissima Svizzera meridionale (versante sudalpino), desunte dai risultati del progetto PRUDENCE (*Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects*), <http://prudence.dmi.dk/>.

Caldo, freddo, pioggia, neve: cosa è cambiato e cosa cambierà



Il regresso dei ghiacciai è tra gli effetti più visibili del cambiamento climatico in Valle d'Aosta: il lago alla fronte del ghiacciaio occidentale del Gran Neyron (Valsavarenche), su cui incombe la mole piramidale dell'Herbetet (15.08.1999, f. D. Cat Berro). Il lago si è formato a seguito del ritiro della fronte, che dal 1980 al 2001 ha totalizzato 75 m.



«Il problema non è di trovare un colpevole, ma di comprendere come l'uomo interagisce con il suo ambiente, e soprattutto quali siano le soluzioni strategiche per evitare una crisi ecologica.»

ERIC LAMBIN, 2004

«La nozione di catastrofe climatica ha rimpiazzato la nozione di cambiamento climatico. Tuttavia, questa voce sembra influenzare solo minimamente i processi politici.»

CLAUDIA PAHL-WOSTL, 1998

«E' più che evidente che la scienza non ci può illuminare più di tanto sul nostro futuro prossimo venturo. Ovvero, non ci può dire molto sui dettagli (sarà più conveniente nel 2050 villeggiare sul Lago Maggiore o a San Vito Lo Capo?). Ma basta solo un modesto studente di meteorologia per dirvi che, a mano a mano che la concentrazione dei gas serra aumenta, la temperatura della Terra sale, e questo non corrisponde a niente di buono.

Accade ciò che capita al fumatore incallito, sicuro che il vizio del fumo non lo porterà mai ad ammalarsi seriamente.

Per la Terra, le cose andranno sempre peggio. E la rapidità con cui questo avverrà, non è compatibile con i nostri ecosistemi e con le nostre infrastrutture.»

GUIDO VISCONTI, 2005

6. LA TEMPERATURA

«E' inevitabile. La temperatura media della superficie terrestre è aumentata di 0.6 °C nell'ultimo secolo, principalmente per causa nostra. Finora il riscaldamento è stato piuttosto limitato, ma gli effetti già si vedono a occhio nudo.»

PAUL J. CRUTZEN (premio Nobel per la chimica), 2005

Quali segnali di cambiamento?

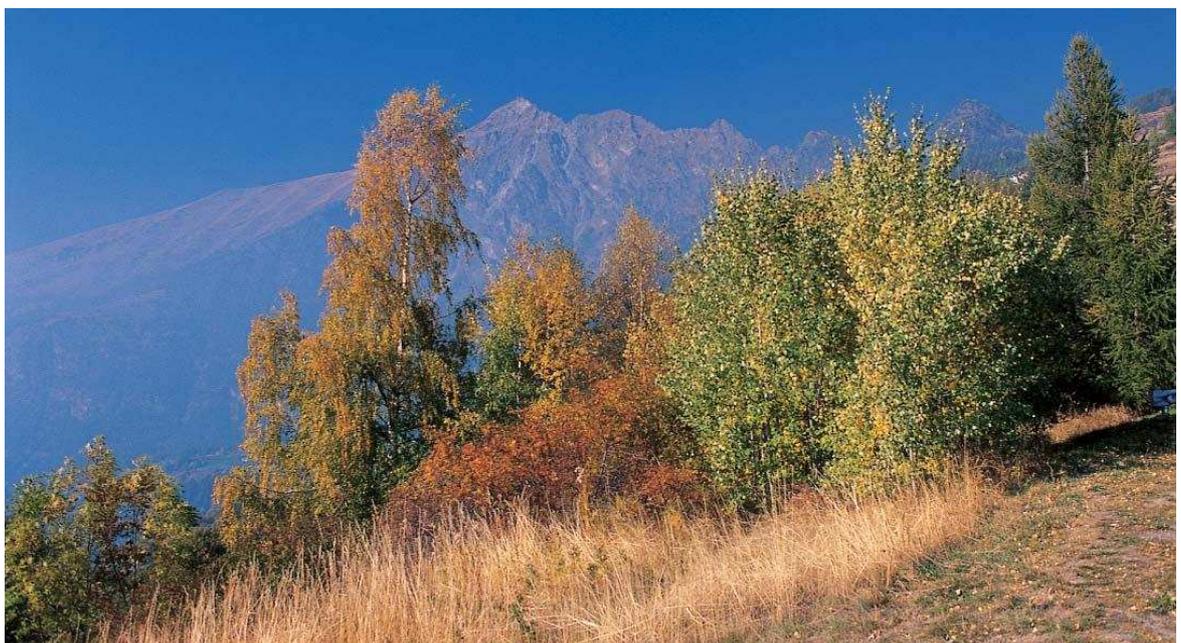
La temperatura è il parametro climatico che più direttamente mostra le prime evidenze del cambiamento del clima anche in Valle d'Aosta. Mentre gli effetti sulle precipitazioni non sono ancora chiaramente distinguibili dalla naturale variabilità climatica (cfr. cap. 7), l'aumento significativo

delle temperature nel corso del XX secolo, specialmente dalla metà degli Anni 1980, è ben testimoniato dalle registrazioni strumentali, ed è peraltro confermato dall'evoluzione di importanti indicatori naturali come i ghiacciai, pressoché ovunque in forte regresso da circa 150 anni.

Durante il XX secolo le temperature globali sono cresciute di 0.6÷0.7 °C, ma con differenze tra una regione e l'altra del globo.

Sulle Alpi l'incremento è stato di molto superiore, con +1.1 °C dal 1890, come riportato da BÖHM & al. (2001) e da BRUNETTI & al. (2006). Anche la vicina Svizzera ha sperimentato un riscaldamento nettamente più consistente della media globale nel XX secolo: +1.0 °C nel Canton Ticino, +1.3

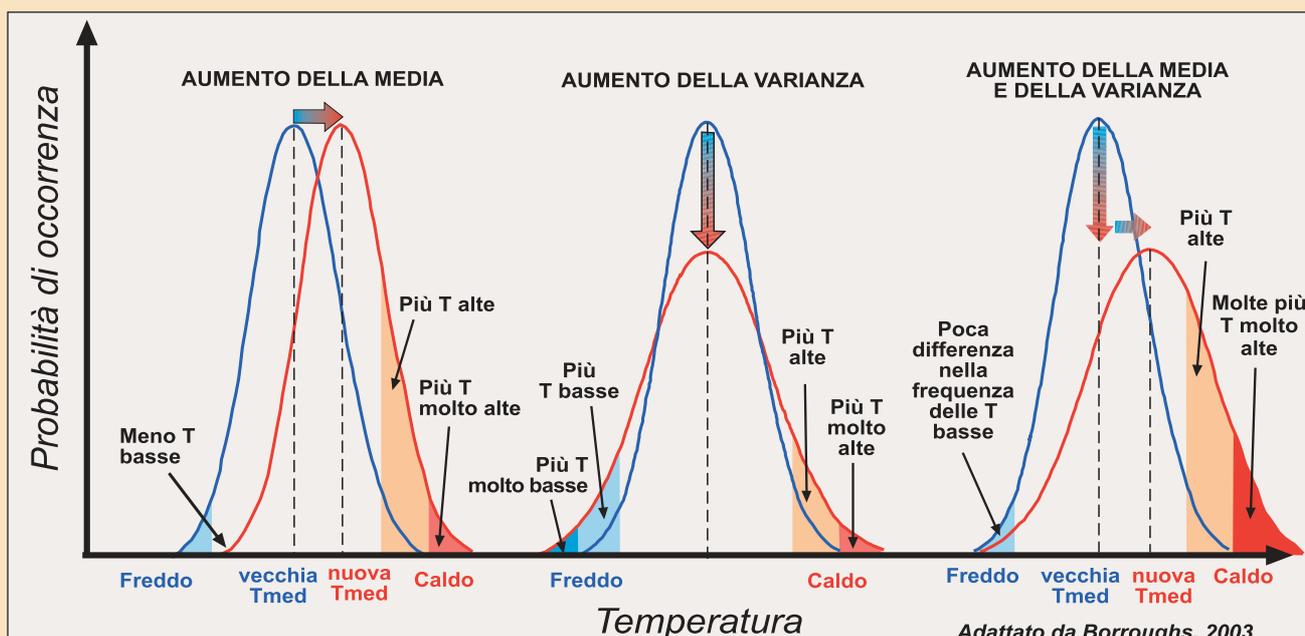
6.1 - Calda atmosfera autunnale l'11.10.2003 a Petit Rhon (Emarese), sulle pendici del Col de Joux. Fino alla fine degli Anni 1990 l'autunno era la sola stagione a non mostrare significativi aumenti di temperatura, dopodiché è iniziata una serie di stagioni più calde del normale, culminata in particolare negli autunni 2001 e 2004 (f. D. Cat Berro).



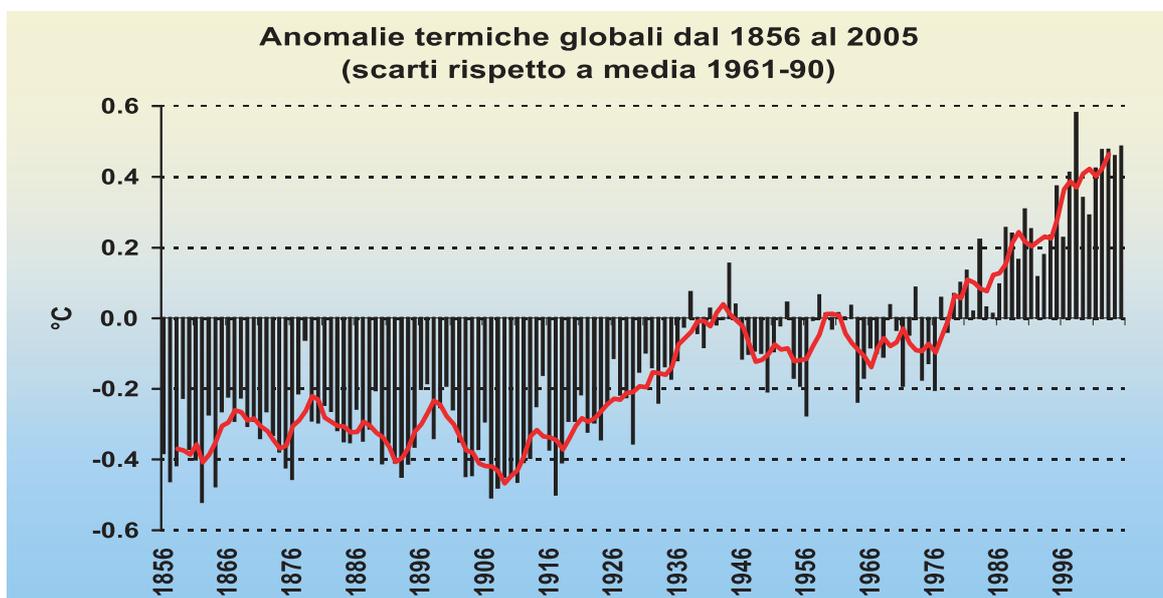
Cambiamento climatico e distribuzione statistica delle temperature

I valori di un campione di misure di un parametro omogeneo (ad esempio la temperatura) si distribuiscono secondo la curva di Gauss o «*distribuzione normale*» o «*gaussiana*». Il valor medio coincide con il massimo della curva ed è il valore più probabile, cioè quello che, nell'insieme delle misure, presenta la più alta frequenza di accadimento. La dispersione dei valori di temperatura intorno al valor medio è data dalla *varianza* (σ); serie di misure caratterizzate da una grande varianza si traducono in una curva più «larga» rispetto a quelle caratterizzate da una piccola varianza. Consideriamo l'insieme delle misure di temperatura; se la temperatura aumenta la distribuzione normale può variare in tre modi diversi (figura sotto, 6.2):

- Aumento della temperatura senza cambiamento nella varianza:** la nuova distribuzione avrà la stessa forma della precedente ma sarà semplicemente tralata verso destra. Ne risulta un aumento nella frequenza delle temperature elevate e molto elevate, mentre diminuisce la frequenza delle temperature molto basse.
- Aumento della varianza senza aumento della temperatura media:** la nuova distribuzione appare più larga e schiacciata; in questo caso, nonostante la temperatura media sia uguale, aumenta la probabilità di avere sia temperature molto elevate sia molto rigide.
- Aumento della media e della varianza:** la nuova distribuzione è tralata verso destra ed appare anche più «larga» e «schiacciata». Oltre ad aumentare la temperatura media, aumenta anche notevolmente la probabilità di avere temperature molto elevate, mentre non ci sono variazioni significative nella frequenza di occorrenza delle temperature basse.



6.3 - Anomalie termiche globali dal 1856 al 2005, rispetto alla media del trentennio di riferimento 1961-90. Evidente il forte riscaldamento successivo agli Anni 1970. L'anno più caldo è stato il 1998, con uno scarto di +0,58 °C dalla media. Fonte: CRU - Univ. East Anglia, UK.



Negli ultimi 100 anni 0.6 °C in più: tanto o poco?

Perché preoccuparsi di un aumento di temperatura che - in fondo - è assai inferiore alle variazioni che di solito si osservano tra un anno e l'altro in una località? In realtà, solo in apparenza si tratta di un cambiamento trascurabile, poiché si parla di una variazione media calcolata su un lungo periodo di tempo e a scala planetaria, già in grado di recare vistosi cambiamenti ambientali, facendo alzare l'isoterma 0 °C di 100 m sulle Alpi, Valle d'Aosta compresa; circa la metà della superficie glaciale presente nella prima metà del XIX secolo (massimo della Piccola Età Glaciale) è infatti scomparsa. Inoltre non si ha riscontro di un cambiamento climatico tanto rapido almeno negli ultimi 2000 anni di storia terrestre (MOBERG & *al.*, 2005). Circa 11.000 anni fa sono bastati circa 6 °C di incremento termico per passare dalle grandi glaciazioni - che ricoprivano ogni valle aostana con un mantello di ghiaccio spesso fino 800-1000 m - a condizioni temperate simili a quelle attuali.

°C sui cantoni nord-orientali e ben +1.6 °C in quelli occidentali. Questo comportamento particolare sulla regione alpina potrebbe spiegarsi in parte con la retroazione positiva indotta dalla minore permanenza della neve (minore albedo, maggiore assorbimento di radiazione solare), e dalla sovrapposizione di altre fluttuazioni climatiche come la NAO (cfr. approfondimento a pag. 52), e d'altra parte sarebbe in linea con il maggiore riscaldamento previsto nelle zone interne e fredde dei continenti (IPCC, 2001, in AA.VV., 2002).

Il Novecento e gli Anni 1990 sono stati rispettivamente il secolo e il decennio più caldi da 1000, probabilmente 2000 anni (cfr. cap. 4), e il 1998 è stato l'anno più caldo sicuramente almeno dal 1856 a livello planetario. Complessivamente, il riscaldamento osservato finora è stato più intenso nell'emisfero settentrionale e di notte.

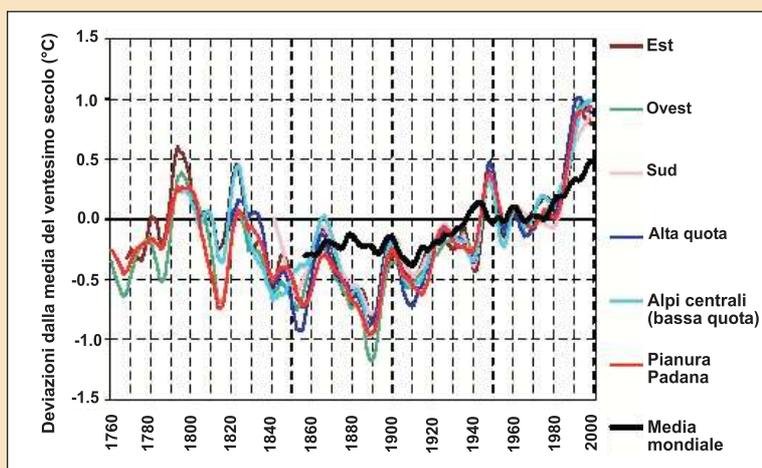
L'incremento termico molto rapido degli ultimi 50 anni non è più spiegabile ricorrendo soltanto alla variabilità naturale del clima, ma — secondo l'IPCC — sarebbe in

gran parte da attribuirsi alle azioni umane; in questo periodo, considerando i soli fattori naturali forzanti il clima, ci si sarebbe dovuti attendere invece un lieve raffred-

L'isola di calore urbana e le disomogeneità nei dati.

Fonti di incertezza sul riscaldamento globale?

Non sempre le serie storiche di dati meteorologici, specialmente quelle di temperatura, sono affidabili e utilizzabili così come sono desunte dai registri degli osservatori: vi sono talora delle disomogeneità che ne compromettono l'utilizzo, dovute a una collocazione degli strumenti non ottimale (termometro investito dalla radiazione solare), a problemi di taratura, a cambiamenti nelle condizioni ambientali intorno alla stazione (crescita di alberi, costruzione di nuovi edifici), a negligenza dell'osservatore, ecc... Il lavoro del climatologo consiste anche nell'analizzare e «filtrare» tali serie climatiche, procedendo a un attento lavoro di correzione e omogeneizzazione, oppure scartandone l'utilizzo qualora i difetti siano gravi. Dunque soltanto le serie climatiche di buona qualità devono rientrare nelle banche dati per lo studio dei cambiamenti del clima. Spesso i detrattori del riscaldamento globale (cfr. p. 18) sostengono che buona parte dell'aumento di temperatura rilevato dagli osservatori meteorologici nel XX secolo in realtà sia dovuto all'intensificazione dell'«isola di calore» urbana, piuttosto che a un reale riscaldamento atmosferico. Ciò non corrisponde al vero, poiché il fenomeno dell'isola di calore era già noto anche nel 1700, e gli strumenti da sempre collocati nei centri cittadini generalmente non hanno subito gravi modificazioni nel loro intorno. Inoltre, l'aumento di temperatura si osserva anche in località rurali (si veda il caso di Vercelli-Cascina Boraso, in CAT BERRO & al., 2005) e di alta montagna, laddove l'influenza disturbatrice della città non si fa sentire. L'aumento di temperatura osservato in superficie d'altra parte è confermato anche da



un aumento misurato dalle radiosonde nell'alta atmosfera (AA.VV., 2006), dalle analisi degli anelli di accrescimento degli alberi e dalla riduzione nell'estensione della copertura nevosa e glaciale.

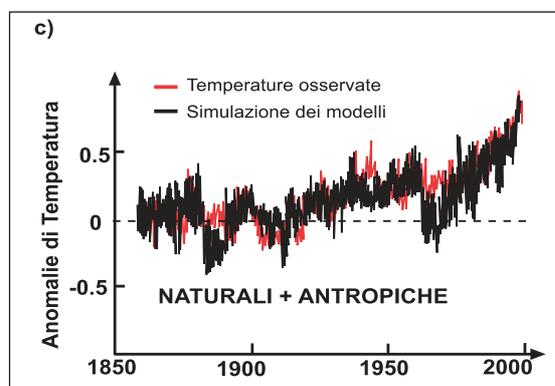
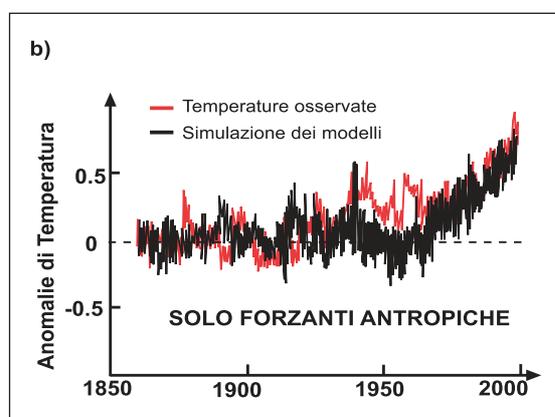
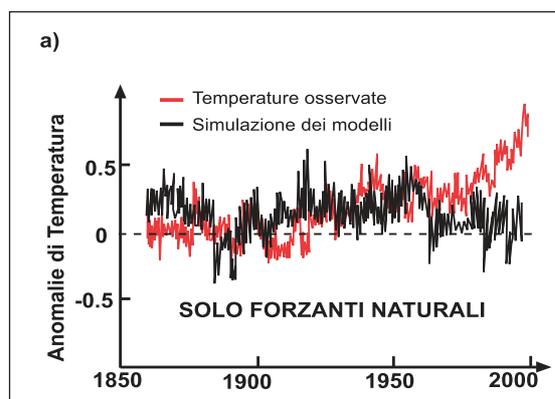
6.4 - Le curve delle anomalie termiche rilevate su diversi settori delle Alpi mostrano negli ultimi decenni un incremento di temperatura del tutto analogo a quello riscontrato nelle città della pianura padana (linea rossa), smentendo le critiche che vorrebbero i dati delle serie storiche inficiati dall'isola di calore urbana (BÖHM & al., 2001).

6.5 a, b, c - Confronti tra le anomalie di temperatura globali osservate e quelle ricostruite tramite i modelli climatici. Le simulazioni sono distinte separando l'evoluzione attesa considerando soltanto le forzanti climatiche naturali (a), soltanto quelle antropiche (b), oppure entrambe (c). Si noti come le sole forzanti naturali avrebbero dovuto addirittura produrre un lieve calo delle temperature nella seconda metà del XX secolo (a), in contraddizione con quanto misurato strumentalmente. Soltanto prendendo in considerazione anche le forzanti antropiche (c) la ricostruzione dei modelli si avvicina molto alla realtà (da HENGEVELD & al., 2002, *ridis.*).

damento a causa della minore attività solare, e dell'intensa attività vulcanica (HENGEVELD & al., 2002).

Contrariamente a quanto si riteneva fino ad alcuni anni fa, l'aumento di temperatura si è fatto sentire non soltanto al suolo, ma a tutti i livelli della troposfera (fino a 10÷12 km di altezza), come indicano le versioni più recenti di tutte le serie di dati ottenuti da satelliti e radiosonde, recentemente oggetto di uno studio da parte dell' U.S. *Climate Change Science Program*, che ne ha finalmente corretto errori e imprecisioni dovuti alle diverse tarature degli strumenti impiegati (AA.VV., 2006). In superficie il riscaldamento più importante ha avuto inizio attorno al 1976: le temperature globali sono aumentate di 0.12 °C per decennio dal 1958, e di 0.16 °C dal 1979, mentre quelle troposferiche sono aumentate di 0.14 °C e di 0.10÷0.20 °C per decennio nei due rispettivi periodi.

Oltre alla coerenza dei dati di temperatura (cfr. approfondimento sull'affidabilità dei dati a p. 46), il riscaldamento in atto è confermato soprattutto dalla riduzione dei ghiacciai, che in circa 150 anni sulle Alpi hanno perso circa la metà della superficie, dall'aumento dei livelli marini di 10÷20 cm, dall'estensione della copertura nevosa, che sull'emisfero Nord è scesa del 10% dagli Anni 1960, e da quella della banchisa artica, ridottasi del 10÷15% dagli Anni



1950 (HENGEVELD & al., 2002).

La situazione in Valle d'Aosta

Le analisi statistiche mostrano le prime evidenze strumentali del riscaldamento climatico in Valle d'Aosta. La base di dati utilizzata comprende tutte le stazioni termometriche della regione, tramite le quali è stato possibile calcolare gli indici di anomalia

standardizzata a livello regionale (SAI = *Standardized Anomaly Index*), ma — data la loro elevata significatività territoriale, e per la loro buona qualità ed omogeneità — maggiore attenzione è stata riservata alle serie termometriche di Aosta-St-Christophe (544 m) e di Gressoney-D'Ejola (1850 m), ben rappresentative delle zone di fondovalle e di media montagna.

Andamento delle anomalie termiche dal 1818 al 2005: fa più caldo

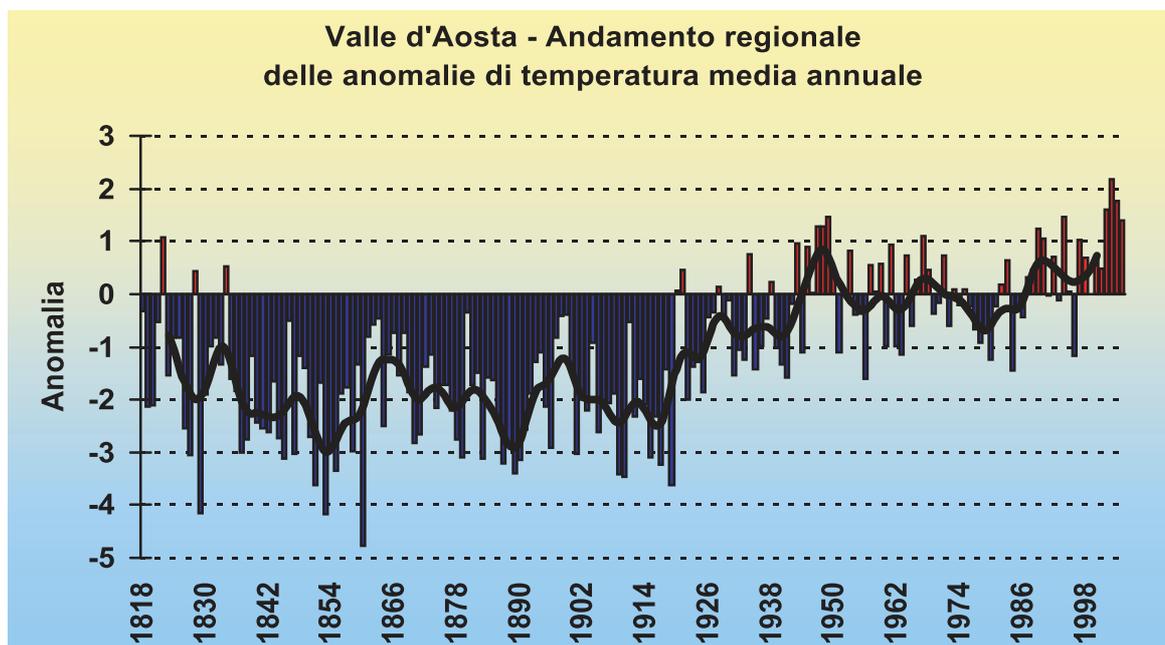
Grazie alla disponibilità di lunghe serie storiche di misura in Valle d'Aosta, è stato possibile elaborare l'indice regionale di anomalia (SAI = *Standardized Anomaly Index*) delle temperature medie (annuale e stagionale) per il periodo dal 1818 al 2005. Si tenga presente però che fino al 1839 era attivo soltanto l'osservatorio del Gran San

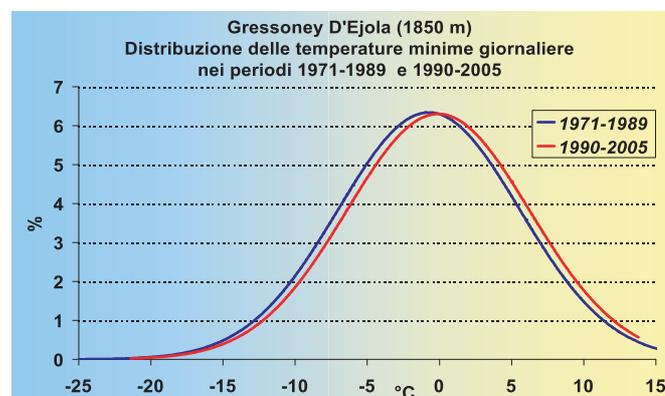
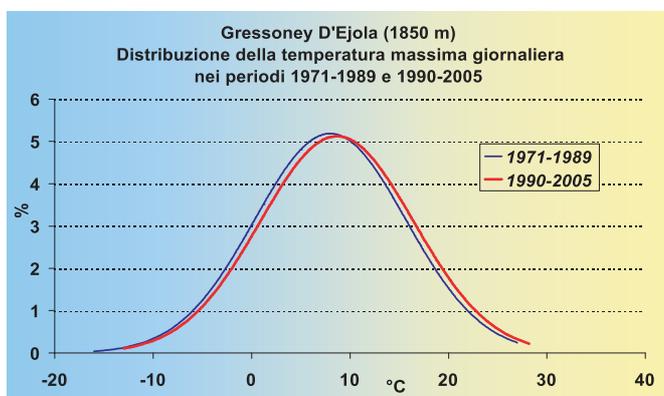
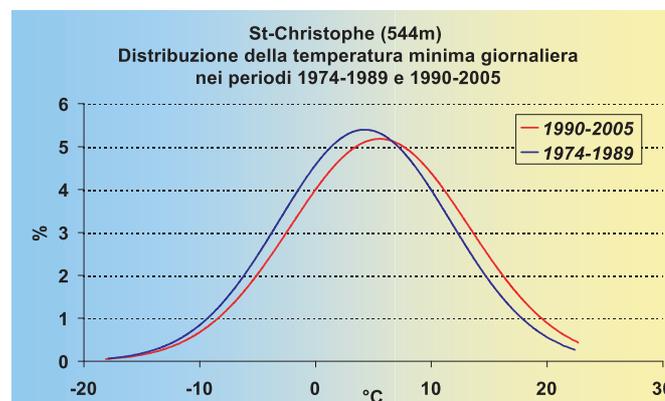
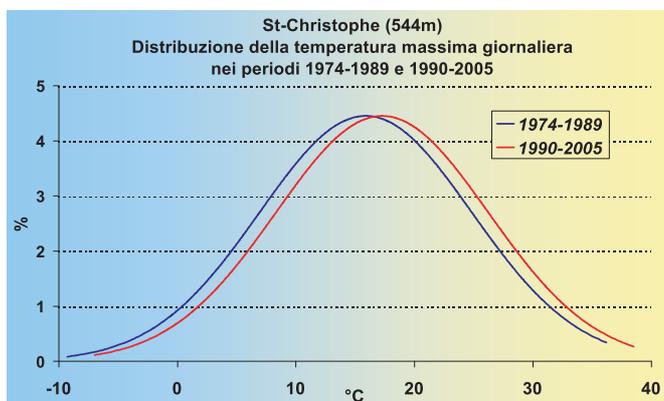
Bernardo, cui si aggiunse quello di Aosta nel 1840, e soltanto dal 1925 il numero di stazioni termometriche disponibili cresce fino a portarsi intorno alle 10-15 unità nell'ultimo trentennio del XX secolo.

L'esame condotto sulle temperature medie annuali di tutte le serie disponibili evidenzia una lunga fase fredda dal 1818 al 1920 circa, con ricorrenti e accentuate anomalie negative rispetto alla media del trentennio di riferimento 1971-2000 (fig. 6.6).

In seguito, gli anni più freddi divengono meno frequenti, e si alternano a sequenze di anni più caldi del normale. L'eccesso termico del periodo 1943-1950, con un picco positivo nel 1949, è comune a molte serie termometriche sia regionali sia europee, ed è particolarmente evidente tra Valle d'Aosta e alto Piemonte. Una nuova

6.6 - Indice standardizzato di anomalia (SAI) delle temperature annuali in Valle d'Aosta, calcolato dal 1818 al 2005. Si tenga presente che l'indice è stato calcolato sulla sola stazione del Gran San Bernardo dal 1818 al 1839, cui si è aggiunta quella di Aosta dal 1840, e solo dagli Anni 1920 il numero di stazioni considerate aumenta. Il 2003 è stato l'anno più caldo, il 1860 il più fresco.





6.7, 6.8, 6.9, 6.10 -
Variazione nelle distribuzioni delle temperature minime e massime giornaliere a St-Christophe (tra i periodi 1974-89 e 1990-2005) e Gressoney-D'Ejola (tra i periodi 1971-89 e 1990-2005).

fase più fresca si rileva nel periodo 1968-1980, poi dalla metà degli Anni 1980 ha inizio una marcata tendenza al riscaldamento, tuttora in corso, la più importante nel periodo qui considerato. Oltre agli anni — già assai caldi — di metà XX secolo (1947 e 1948), particolarmente anomali risultano il 1989, 1994 e tutto il periodo 2002-2005; il 2003 è stato l'anno complessivamente più caldo in Valle d'Aosta. Inoltre, nel decennio 1996-2005, solo il 1996 è risultato più fresco del normale.

Distribuzione di frequenza delle temperature minime e massime: verso il caldo

Considerando due stazioni meteorologiche rappresentative della situazione nei

fondovalle e in montagna, rispettivamente St-Christophe (544 m) e Gressoney-D'Ejola (1850 m), e analizzando la variazione della distribuzione delle temperature minime e massime giornaliere tra i periodi 1971-1989 e 1990-2005 (fig. da 6.7 a 6.10), si evidenzia in entrambi i casi un aumento della temperatura (spostamento della curva verso destra), più evidente nella stazione a bassa quota. Nel caso di Gressoney si nota invece una drastica diminuzione della frequenza dei valori minimi estremi, inferiori cioè a -20°C .

Andamento delle temperature durante l'anno: più caldo, eccetto l'autunno

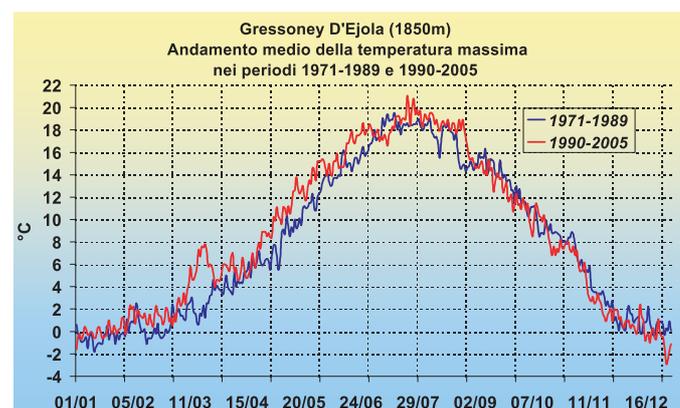
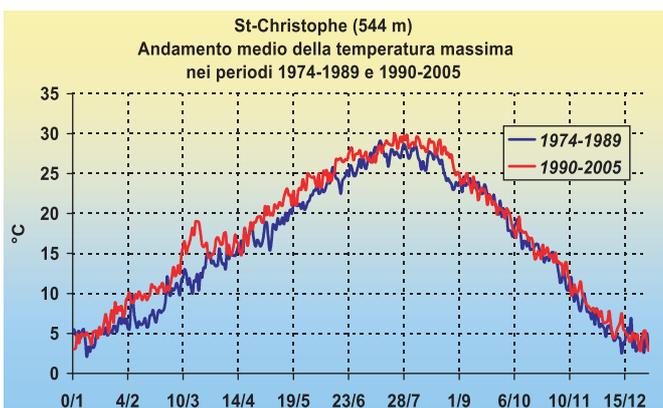
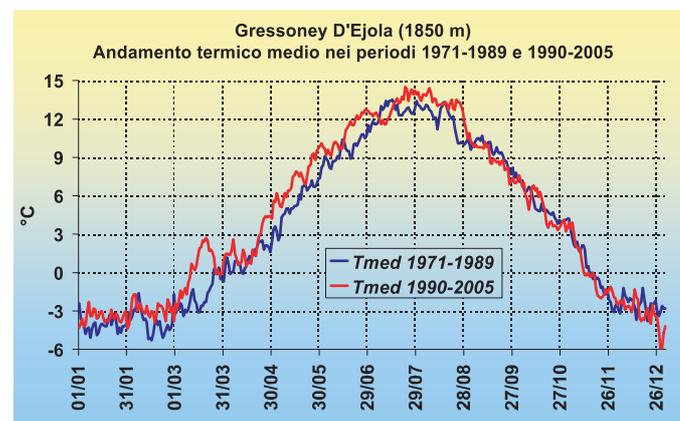
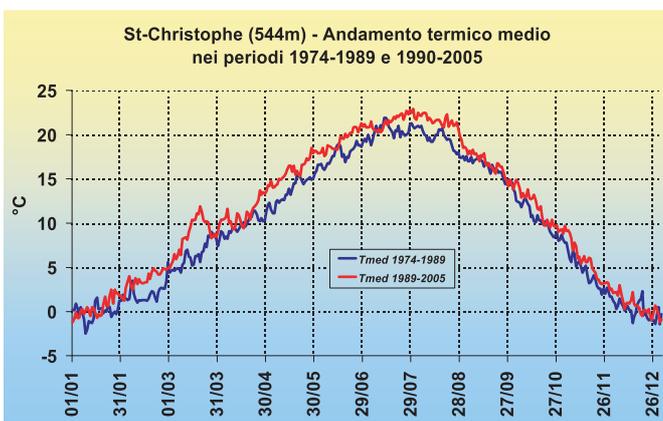
Anche l'andamento medio delle tempera-

6.11, 6.12, 6.13, 6.14 -
 Variazioni nell'andamento medio delle temperature massime e medie giornaliere durante l'anno a St-Christophe e Gressoney - D'Ejola. In entrambi i siti il periodo 1990-2005 è stato più caldo del ventennio precedente, specialmente in primavera ed estate. Si noti in particolare il precoce tepore sopraggiunto intorno alla metà di marzo. Assai meno pronunciato il riscaldamento autunnale.

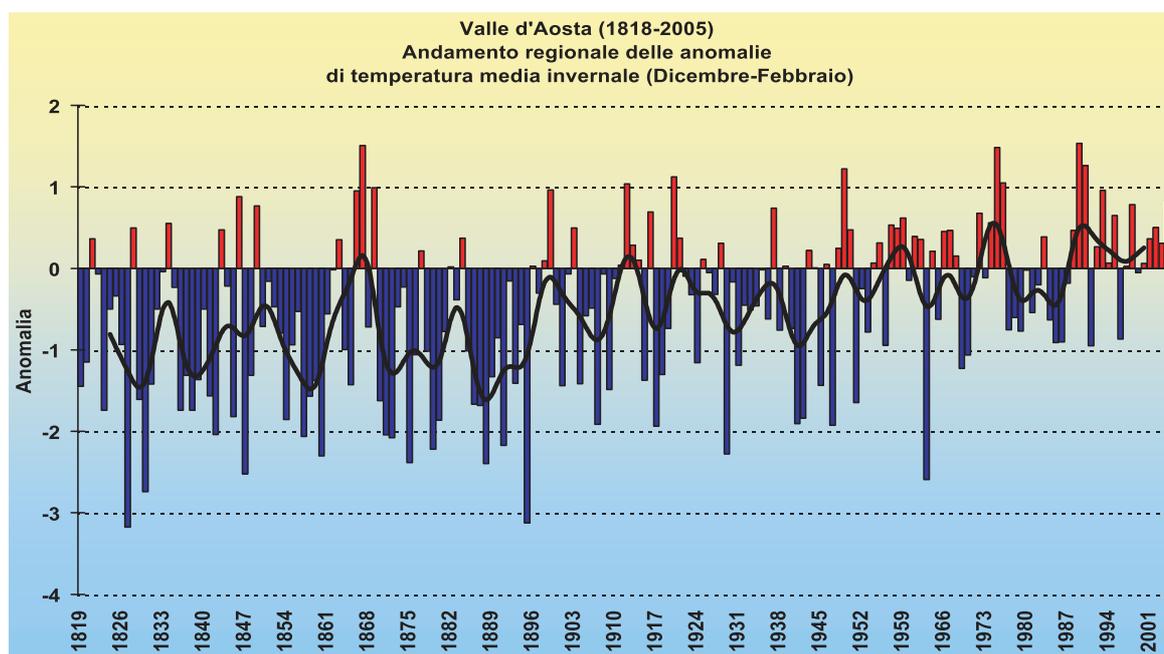
ture nell'arco dell'anno, ottenuto considerando la temperatura media di ciascun giorno dal 1° gennaio al 31 dicembre nei due periodi di riferimento (fino al 1989 e dal 1990 al 2005), mostra come, negli ultimi 15 anni, le giornate siano state mediamente più calde rispetto ai quindici anni precedenti (fig. 6.11 e 6.12). L'aumento è più evidente in primavera ed estate, con un netto riscaldamento a febbraio ed un picco pronunciato nel mese di marzo, sia nelle stazioni in quota sia a fondovalle, mentre in autunno l'incremento della temperatura è stato più contenuto, anzi, nelle stazioni in quota si è registrato perfino un leggero calo.

Analoghe considerazioni si possono trarre osservando l'andamento medio durante l'anno della temperatura massima giornaliera (fig. 6.13 e 6.14).

Inoltre è interessante notare come, nei casi sia delle temperature medie sia delle temperature massime, è sempre presente una brusca transizione dalla stagione estiva a quella autunnale (la cosiddetta «rottura dell'estate»), all'arrivo di temporali e venti più freschi dall'Atlantico: in entrambi i periodi di riferimento, verso la fine dell'estate si registra un calo improvviso della temperatura, mediamente anche di 5-6 °C in pochi giorni. Questo fenomeno, che negli Anni 1970 e 1980 avveniva in media verso



6.15 - Indice standardizzato di anomalia (SAI) delle temperature medie invernali in Valle d'Aosta, calcolato dal 1818 al 2005. La variabilità interannuale è forte, ma si nota una tendenza al riscaldamento, con inverni miti più frequenti nella seconda metà del XX secolo.



la metà di agosto, di recente sembra essere ritardato di 10-15 giorni, slittando così tra gli ultimi giorni di agosto e i primi di settembre.

Variazioni nelle temperature stagionali

Considerando le serie degli indici di anomalia regionale, il riscaldamento atmosferico durante il XX secolo è pure evidente a livello stagionale, ma risulta più accentuato in primavera e poco significativo in autunno.

Inverno: quasi sempre mite di recente

Stagioni invernali più rigide di quelle recenti si ritrovano soprattutto tra la fine degli Anni 1920 e la metà degli Anni 1950, seguite da una fase più mite fino alla fine degli Anni 1960, ma con una punta di freddo «glaciale» nell'inverno 1962-63 (fig. 6.15).

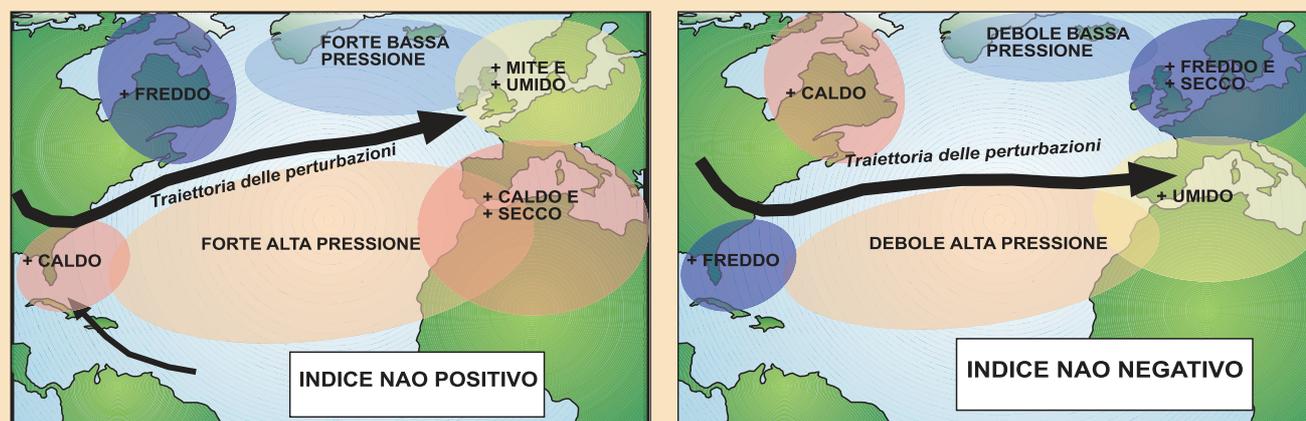
In seguito, dopo un periodo più freddo tra il 1977 e il 1987, gli inverni sono divenuti più temperati: il più mite è stato il trimestre dicembre 1988-febbraio 1989. Negli ultimi quindici anni gli unici inverni più freddi del normale sono stati il 1990-91, il 1995-96 e, benché non ancora incluso in fig. 6.15, il 2005-06.

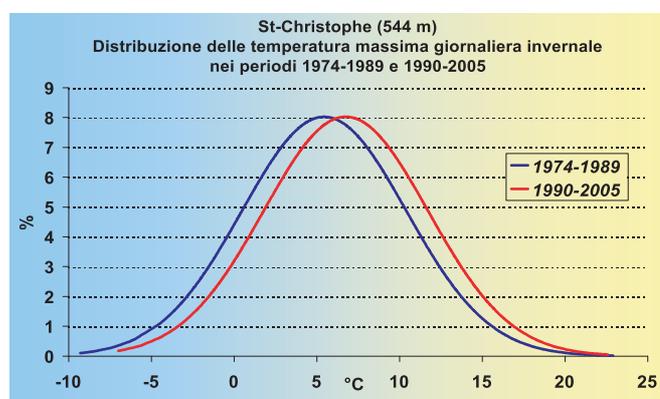
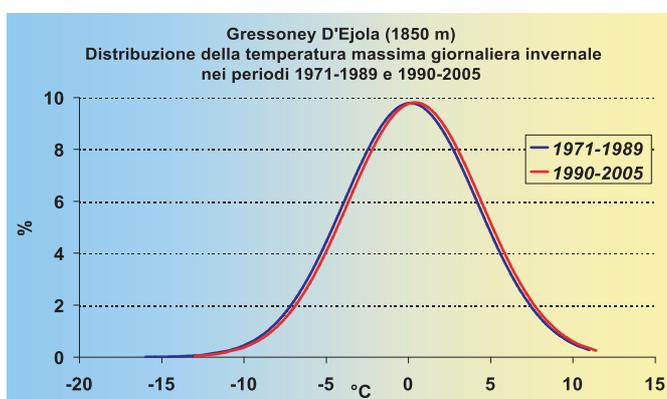
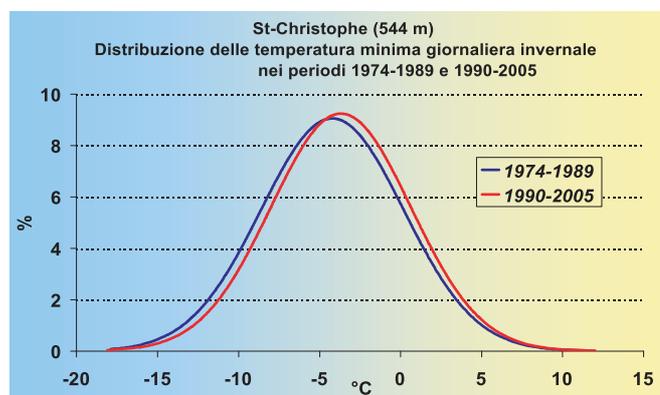
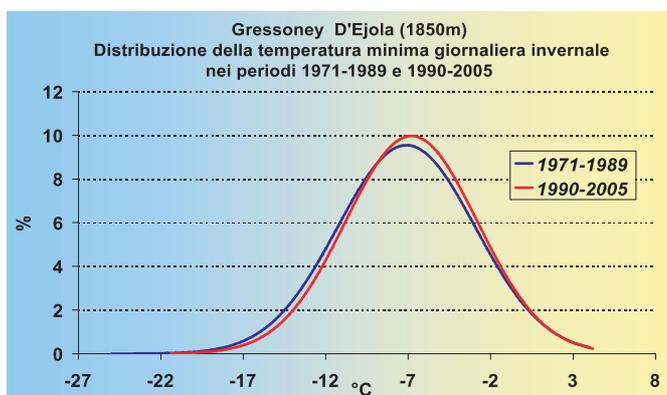
Anche l'analisi della distribuzione delle temperature minime e massime giornaliere in inverno a Gressoney D'Ejola e a St-Christophe mostra l'aumento termico degli ultimi trent'anni: questo è più sensibile a St-Christophe, mentre nuovamente a Gressoney si evidenzia più che altro il drastico calo della frequenza di giornate invernali con minime estremamente rigide ($< -20^{\circ}\text{C}$) (fig. da 6.18 a 6.21).

Il clima invernale in Valle d'Aosta è strettamente correlato all'andamento della NAO

La North Atlantic Oscillation (NAO)

Nell'emisfero nord, la circolazione sull'Atlantico è caratterizzata dalla presenza di una zona di alta pressione sub-tropicale (anticiclone delle Azzorre), e di una zona di bassa pressione alle latitudini più settentrionali (depressione d'Islanda). Queste due figure bariche presentano spesso un comportamento opposto: nei periodi in cui la pressione alle Azzorre è più alta della media, si osservano valori più bassi della media in Islanda, e viceversa. Questa oscillazione, denominata NAO (*North Atlantic Oscillation*), viene descritta da un indice ottenuto dalla differenza tra la pressione al suolo tra le Azzorre e l'Islanda. L'indice NAO è positivo (fig. 6.16) quando si ha mediamente un forte gradiente di pressione tra l'Atlantico settentrionale e meridionale, cioè quando l'alta pressione subtropicale è più forte ed è estesa più a Nord del normale. In queste condizioni il flusso dei venti da Ovest si accentua sull'Europa centro-settentrionale, dando origine a stagioni miti e umide, mentre l'Europa centro-meridionale, e quindi la regione alpina, rimane sotto l'influenza dell'Anticiclone delle Azzorre, in condizioni prevalenti di clima caldo e secco. L'indice NAO è negativo (fig. 6.17) quando l'anticiclone delle Azzorre e la depressione d'Islanda sono più «deboli» del normale, e l'Europa centro-meridionale rimane maggiormente sotto l'influenza dell'anticiclone Russo-Siberiano, con condizioni di tempo freddo ma secco. La North Atlantic Oscillation è uno dei più importanti fattori di controllo della variabilità climatica a scala decennale e ha una grande influenza sulle temperature e le precipitazioni in Europa occidentale, soprattutto nei mesi invernali. A Zurigo il 56% della varianza della pressione nel periodo 1901-99 è spiegabile attraverso il comportamento NAO, così come il 72% della varianza della temperatura minima nel periodo 1961-99. Il segnale climatico legato a questi fattori a scala continentale è più percepibile in alta quota, mentre nei fondovalle e in pianura tende a essere mascherato da situazioni locali (effetti orografici, presenza di grandi città, ecc...). Secondo WANNER & al. (1997) e BENISTON (1997), l'elevata frequenza di sistemi di alta pressione riscontrata sulle Alpi negli Anni 1980 e all'inizio degli Anni 1990 è da mettere in relazione a un aumento dell'indice NAO.



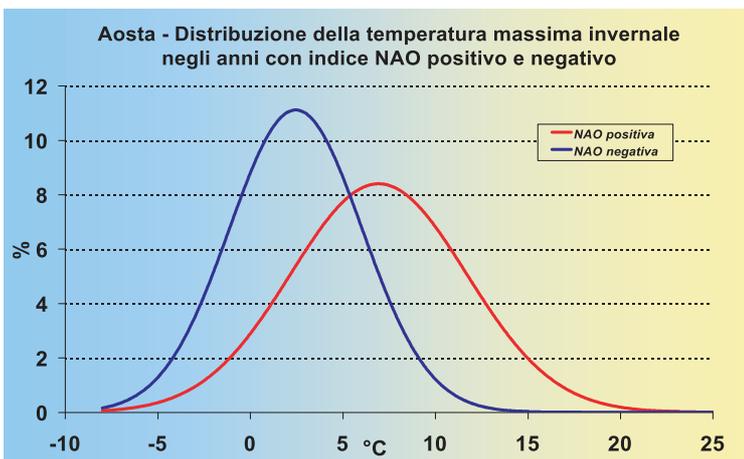
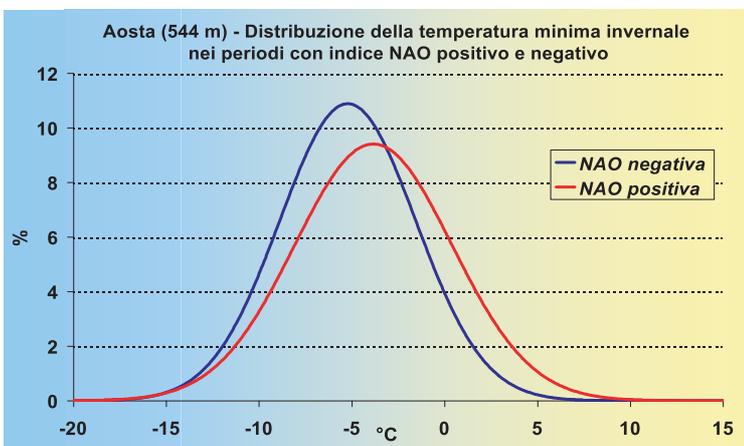
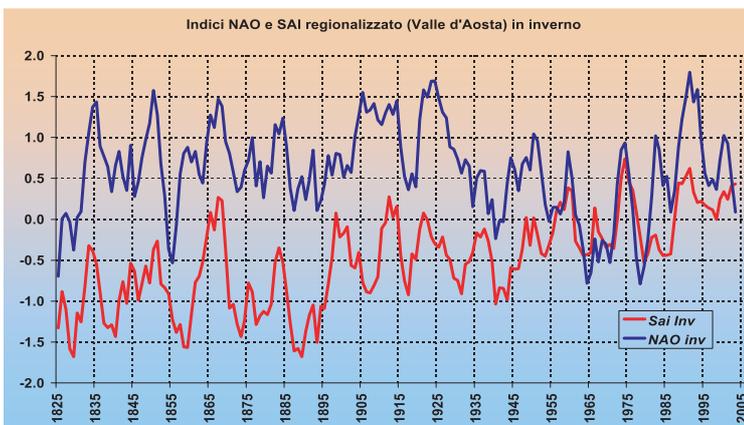


6.18, 6.19, 6.20, 6.21 - Variazioni nella distribuzione delle temperature minime e massime giornaliere invernali a St-Christophe e Gressoney-D'Ejola. Evidente l'aumento registrato a St-Christophe nelle massime del periodo 1990-2005 rispetto al precedente periodo 1974-89.

(North Atlantic Oscillation): gli inverni con indice NAO positivo tendono ad essere più miti di quelli con indice NAO negativo. Questo è evidente confrontando gli andamenti invernali delle anomalie regionalizzate (SAI) e dell'indice NAO, filtrati con una media mobile di ordine 5 (fig. 6.22). La distanza tra le due curve negli anni anteriori al 1970 deriva dal fatto che il SAI è stato calcolato rispetto al periodo di riferimento 1971-2000, ma l'andamento appare in fase. Anche analizzando la distribuzione delle temperature minime e massime giornaliere invernali a St-Christophe in inverni con notevole anomalia positiva o negativa dell'indice NAO (indice NAO < -2 e > 2.5) si mette in luce come gli inverni con indice NAO positi-

vo abbiano una temperatura sensibilmente più mite (fig. 6.23 e 6.24).

Questo comportamento è particolarmente evidente nel caso della temperatura massima (fig. 6.24), che, negli inverni con NAO fortemente positiva, mostra un aumento di quasi 5 °C rispetto a quelli con NAO fortemente negativa. In particolare, aumenta notevolmente la frequenza di giornate con temperature massime particolarmente elevate per la stagione, superiori a 17 °C, a causa dei più frequenti episodi di föhn caldo associato a flussi occidentali. Anche negli inverni con indice NAO negativo la Valle d'Aosta è soggetta a episodi di föhn, ma questi sono associati a flussi in prevalenza più freddi da Nord, quindi il riscaldamento



6.22 - Correlazione tra gli indici invernali NAO e SAI delle temperature medie stagionali in Valle d'Aosta. A inverni con NAO positivo corrispondono condizioni più miti e viceversa.

6.23, 6.24 - Differenze nella distribuzione delle temperature minime e massime ad Aosta in base all'indice NAO. Molto evidente l'aumento delle massime negli inverni con NAO positivo, dovuto alla frequenza di föhn caldo da Ovest.

to per compressione sul versante sud-alpino in questi casi è più limitato rispetto a quanto avviene con le correnti occidentali oceaniche,

che, più miti. Studi recenti (SHINDELL & *al.*, 1999) mostrano come, in futuro, ci si attenda una prevalenza di configurazioni con indice NAO positivo, con inverni più miti sulle Alpi valdostane.

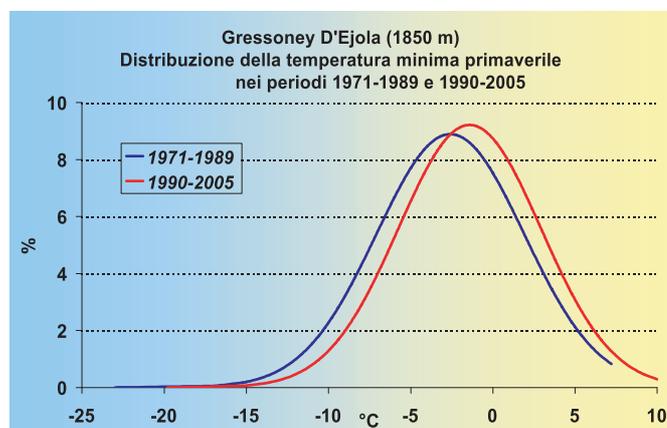
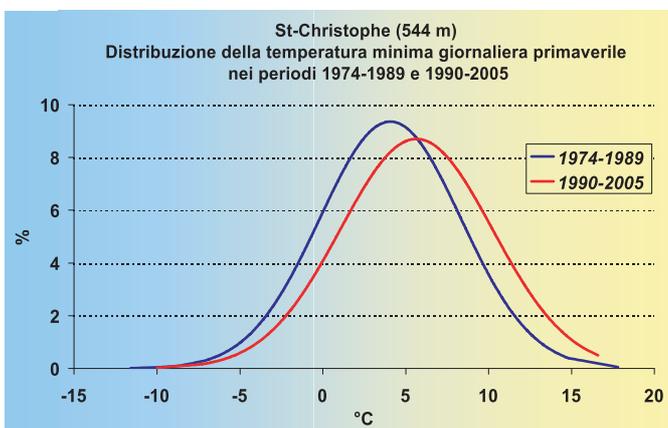
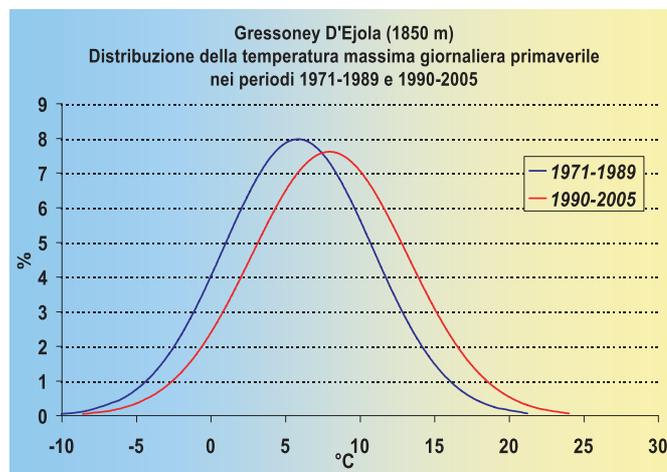
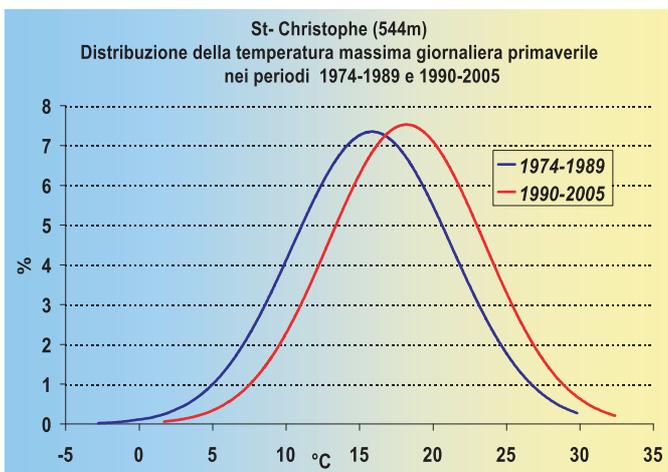
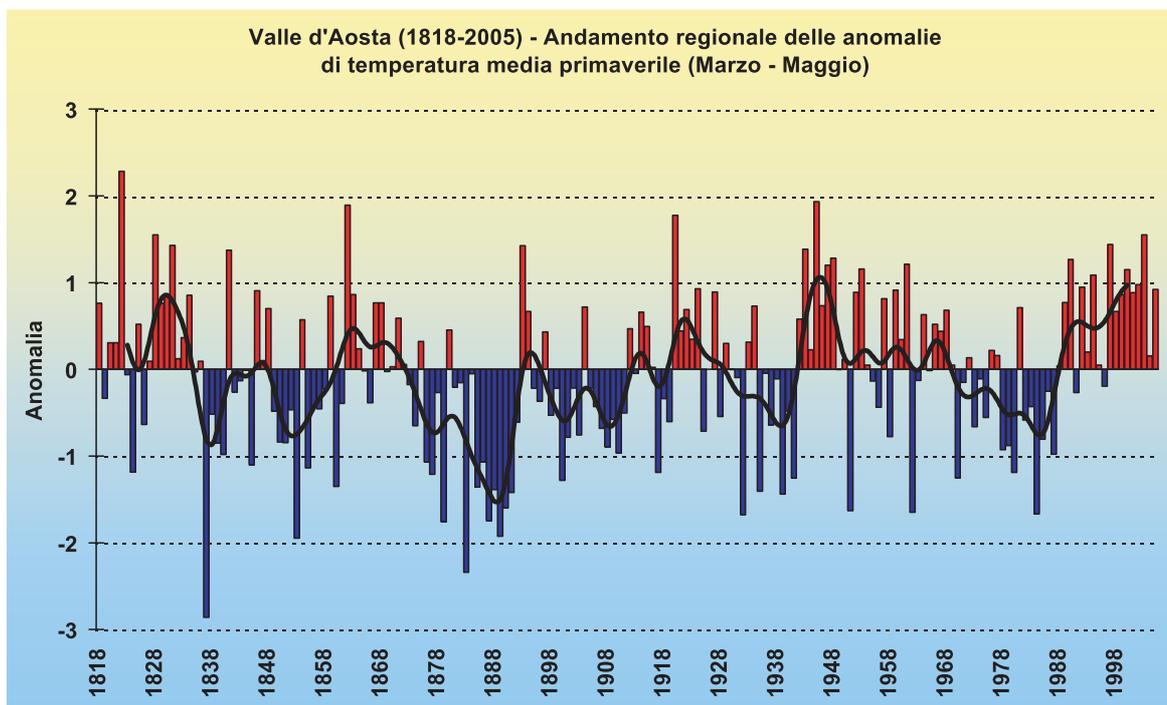
Primavera: brusco riscaldamento da fine Anni 1980

L'andamento delle anomalie termiche primaverili mostra come, anche in questa stagione, negli ultimi 15 anni si siano avute temperature ben superiori alla media, con le sole eccezioni del 1991 e del 1996, le uniche annate che presentano una debole anomalia negativa (fig. 6.25). In precedenza si era avuta un'altra fase con primavere calde, tra il 1942 e il 1968, ma intervallata da alcune stagioni molto più fredde del normale (1951 e 1962).

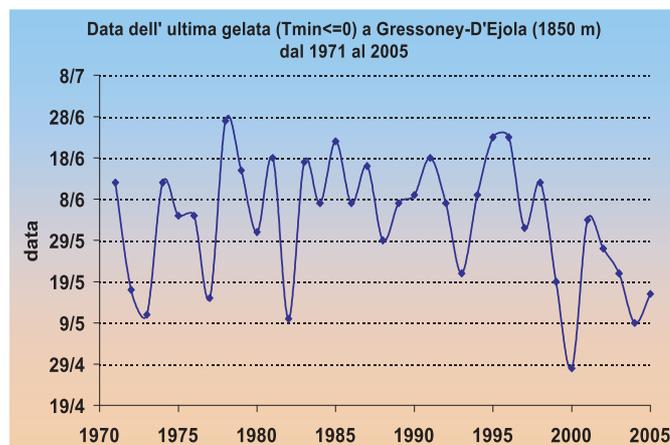
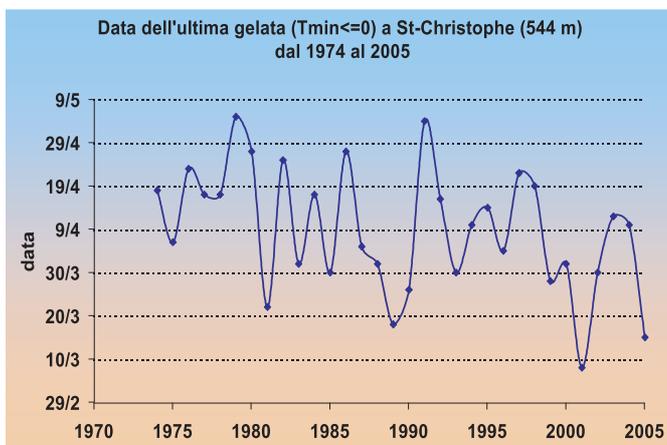
Negli ultimi 30 anni, la primavera è la stagione che presenta la tendenza al maggior aumento di temperatura.

Analizzando la distribuzione delle temperature massime giornaliere nel trimestre marzo-maggio nel periodo 1990-2005 rispetto al quindicennio precedente, si nota (fig. 6.26 e 6.27) come queste siano aumentate di 2.4 °C a St-Christophe e di 2.1 °C a Gressoney-D'Ejola; anche la temperatura minima giornaliera è aumentata, ma in modo più contenuto, rispettivamente di 1.5 °C a St-Christophe e 1.2 °C a Gressoney (Fig. 6.28 e 6.29).

6.25 - Indice standardizzato di anomalia (SAI) delle temperature medie primaverili in Valle d'Aosta, calcolato dal 1818 al 2005. Dal 1989 le primavere sono sempre state più miti del normale, salvo lievi anomalie negative nel 1991 e nel 1996.



6.26, 6.27, 6.28, 6.29 - Variazioni nella distribuzione statistica delle temperature minime e massime giornaliere primaverili a St-Christophe e Gressoney-D'Ejola.



6.30, 6.31 - Evoluzione delle date dell'ultima gelata primaverile a St-Christophe e Gressoney-D'Ejola. La tendenza all'anticipo è un po' più marcata sulla fascia alpina rispetto a fondovalle.

Gelate primaverili meno frequenti

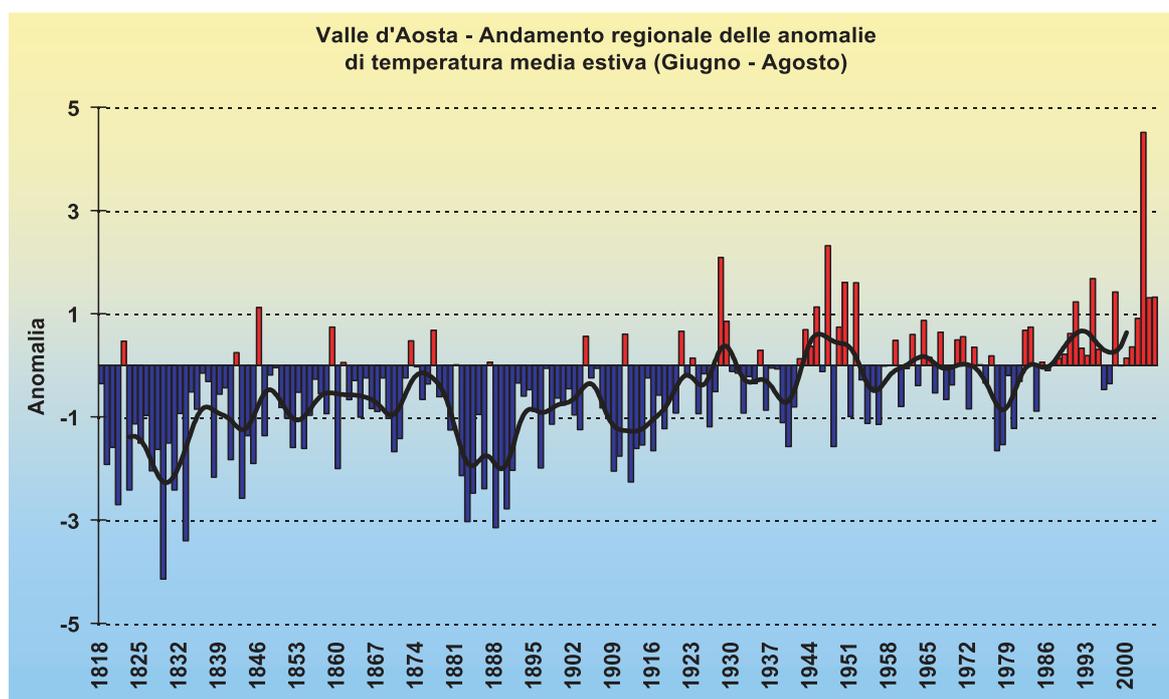
Le fig. 6.30 e 6.31 mostrano la data dell'ultima gelata primaverile a St-Christophe e Gressoney: l'andamento oscillante della curva mostra come, nonostante l'aumento delle temperature, siano ancora possibili gelate tardive, anche se con una frequenza minore rispetto al passato. La diminuzione relativa dei geli primaverili è più evidente in quota, al di fuori dello strato di inver-

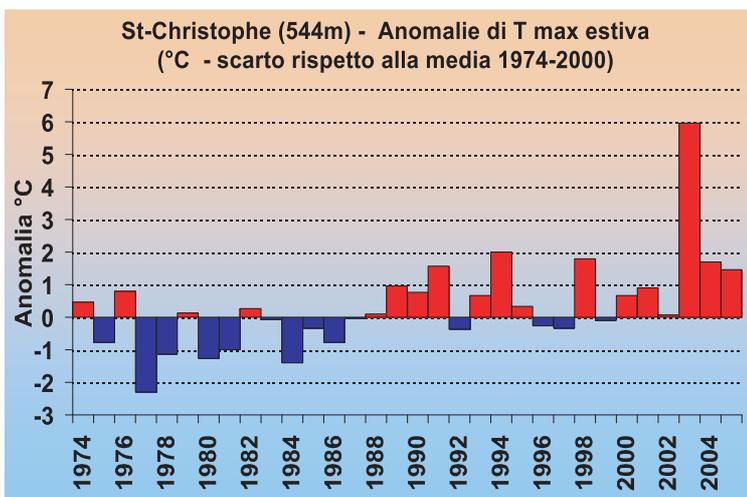
sione termica; in particolare a Gressoney, negli ultimi dieci anni è diminuito sensibilmente il numero delle gelate in giugno, evento in passato piuttosto frequente.

Estate: roventi negli ultimi anni

Anche dall'andamento dell'indice SAI nel trimestre estivo (fig. 6.32) si nota come, negli ultimi decenni, l'unico periodo con frequenti estati fresche si sia collocato

6.32 - Indice standardizzato di anomalia (SAI) delle temperature medie estive in Valle d'Aosta, calcolato dal 1818 al 2005. Le estati calde divengono molto frequenti a partire dalla metà degli Anni 1940 (salvo la tendenza fresca degli Anni 1970, caratterizzata dall'ultima breve avanzata glaciale). Spicca l'anomalia eccezionale dell'estate 2003, con indice SAI regionalizzato = 4.5.





6.33 - Anomalie delle temperature massime estive a St-Christophe rispetto alla media 1974-2000. Dopo le fresche estati degli Anni 1970-inizio 1980, iniziano a prevalere nettamente le stagioni calde, culminate nell'estate 2003 (scarto: + 6 °C).

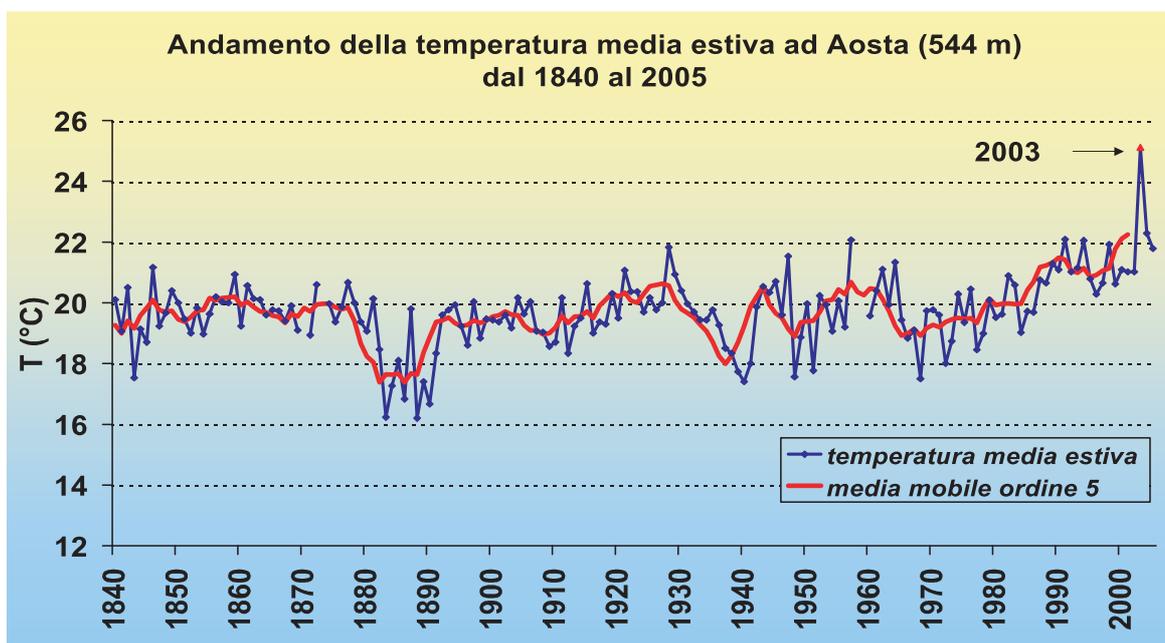
negli Anni 1970, quando infatti si osservò una breve avanzata dei ghiacciai alpini; dopo il 1990, invece, solo le estati del 1996 e del 1997 sono state relativamente più fresche della media, mentre spicca la persistenza di calori anomali nel periodo 2003-2005. In particolare, l'estate 2003 è stata la più calda in assoluto, con un'anomalia doppia rispetto ai massimi precedenti.

La fig. 6.33 mostra gli scarti dalla norma

(°C) delle temperature medie massime estive dal 1974 al 2005 a St-Christophe: dalla metà degli Anni 1980 prevalgono le estati calde, con un picco estremo nel 2003, quando la deviazione rispetto alla media del periodo 1974-2000 ha toccato i 6 °C. Per la Valle d'Aosta, e per le Alpi in generale, si è trattato dell'estate più calda da almeno 500 anni (LUTERBACHER & *al.*, 2004).

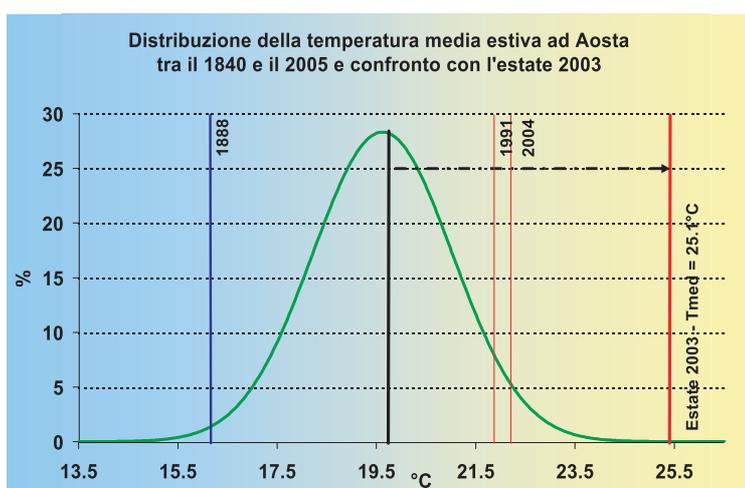
Volendo estendere l'analisi anche a tempi più remoti, si può ricostruire l'andamento delle temperature medie mensili ad Aosta dal 1840, integrando i dati rilevati dagli antichi osservatori cittadini con quelli misurati dal 1974 all'aeroporto di St-Christophe. Dal momento che le due serie non sono direttamente confrontabili, poiché l'una è ottenuta da dati rilevati in città, e l'altra, più recente, da dati rilevati in periferia, per

6.34 - Evoluzione delle temperature medie estive ad Aosta dal 1840 al 2005. Il confronto tra la serie cittadina (1840-1973) e quella aeroportuale (1974-2005) è stato possibile tramite l'applicazione di un fattore di correzione stimato dal confronto tra le stazioni meteo automatiche di St-Christophe e P.za Plouves.



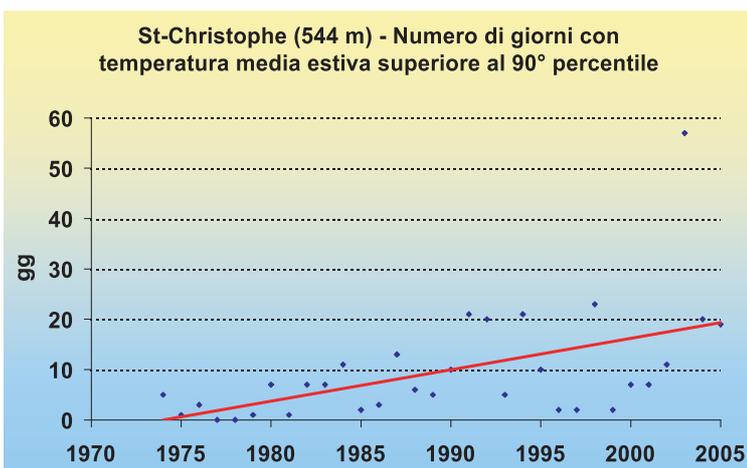
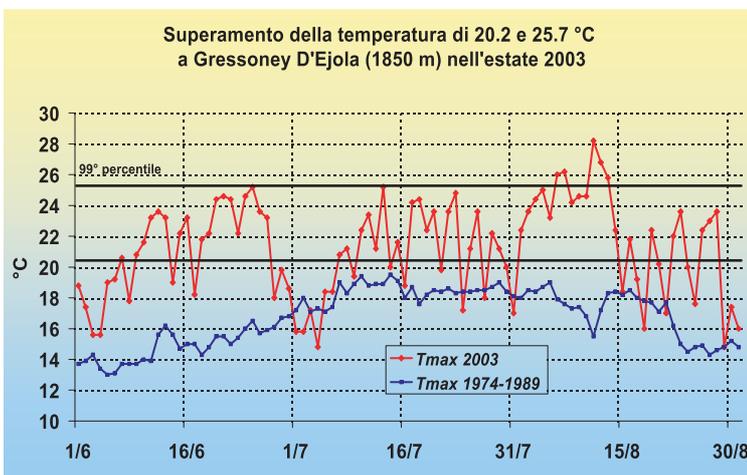
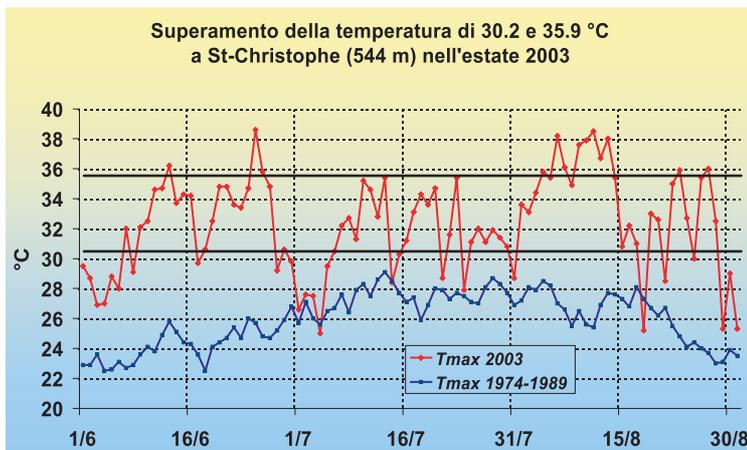
Estate tropicali: il caso del 2003

Nel trimestre giugno-agosto 2003 sull'Europa centro-meridionale si è sviluppata una serie di ondate di calore eccezionali, di entità mai osservata prima, a causa del prolungato dominio di forti anticicloni nord-africani: scarti di almeno 3 °C sulle temperature medie stagionali si sono osservate su un'area che va da dalla Spagna all'Ungheria e dall'Islanda alla Grecia, con anomalie fino a 5 unità di deviazione standard. Valori statisticamente molto improbabili, anche tenendo presente l'attuale riscaldamento (SCHÄR & *al.*, 2004). Secondo LUTERBACHER & *al.* (2004) si è trattato dell'estate più calda da almeno 500 anni. Proprio le Alpi hanno sperimentato le anomalie termiche maggiori: in Svizzera, mediamente, un giorno su due nel trimestre ha avuto temperature superiori al 90° percentile, sia sulle minime sia sulle massime (REBETZ, 2004), ma all'aeroporto di Aosta addirittura nel 63% delle giornate si è superata tale soglia sulle temperature medie. In Valle d'Aosta si sono misurati estremi di 26.3 °C a Pont-Valsavarenche il 13 agosto, 28.2°C a Gressoney-D'Ejola l'11 agosto, 31.0 °C a Cogne-Gimillian il 4 agosto, 38.6 °C a St-Christophe il 28 giugno e 38.5 °C l'11 agosto, valori mai rilevati in precedenza. Si stima che i ghiacciai alpini, specialmente quelli meno estesi, abbiano perso il 5-10% del loro volume durante questa sola estate. Una situazione di questo tipo esula sicuramente dalla naturale variabilità del clima, e per trovarne una spiegazione occorre chiamare in causa il riscaldamento indotto dall'uomo. Secondo le ricostruzioni dei modelli numerici, episodi di questo tipo potrebbero divenire sempre più frequenti, specialmente nella seconda metà del XXI secolo (BENISTON, 2004a; BENISTON & DIAZ, 2004). Per la descrizione degli effetti combinati del caldo e della siccità eccezionali sull'ambiente valdostano, si veda il cap. 7.



6.35 - Aosta, posizione delle temperature medie estive degli anni 1888 (estate più fresca), 1991, 2003 e 2004 nella distribuzione dei valori misurati dal 1840 al 2005. I 25.1 °C del 2003 mostrano una probabilità di accadimento estremamente bassa, e si collocano all'estremità destra della distribuzione statistica. I ricercatori svizzeri attribuiscono questa anomalia ai primi segni significativi del cambiamento climatico.

integrarle è stato necessario individuare dei fattori di correzione, confrontando le misure effettuate a St-Christophe e Piazza Plouves in centro-città tra il 1994 e il 2002: nei mesi da giugno ad agosto lo scarto medio tra i due siti è stato rispettivamente di +0.76 °C, +0.78 °C e +0.72 °C (più caldo in centro-città); così si è ricostruita la serie completa di temperature medie estive utilizzando i dati di Aosta-città dal 1840 fino al 1973 e successivamente i dati di St-Christophe corretti tramite il fattore ricavato. Si tenga presente che si tratta soltanto

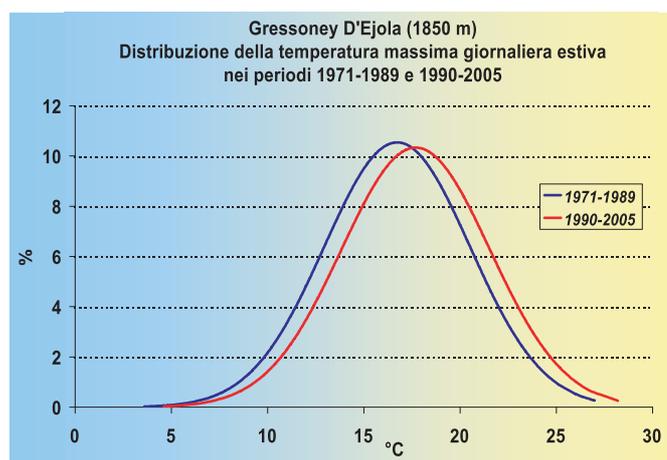
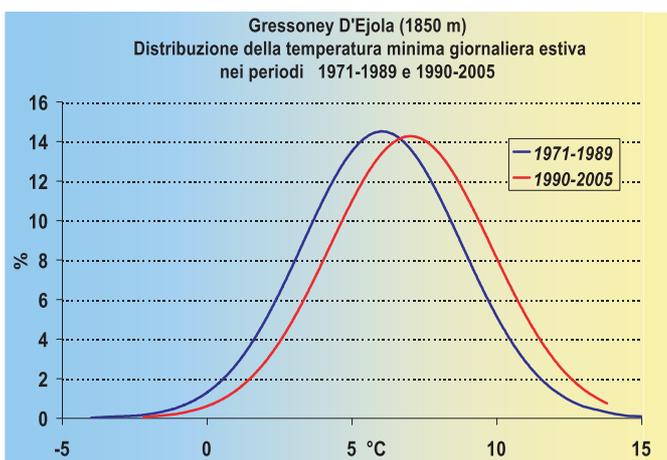
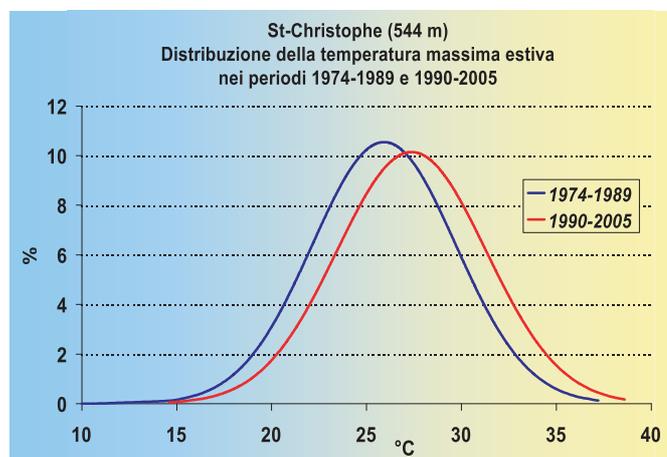
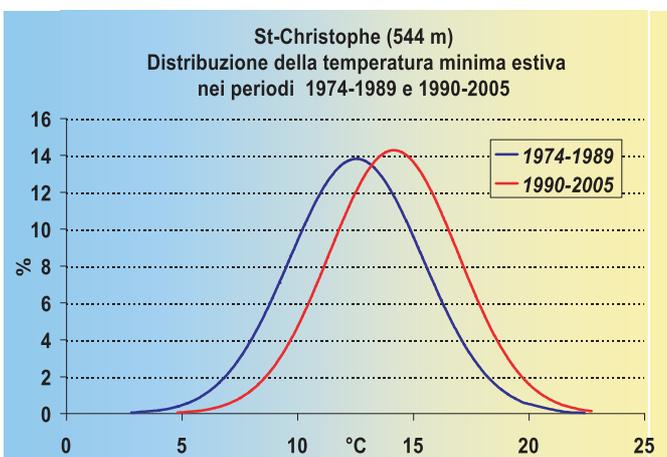
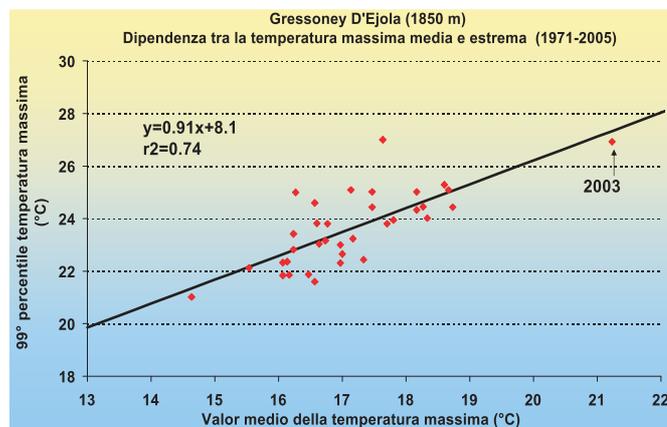
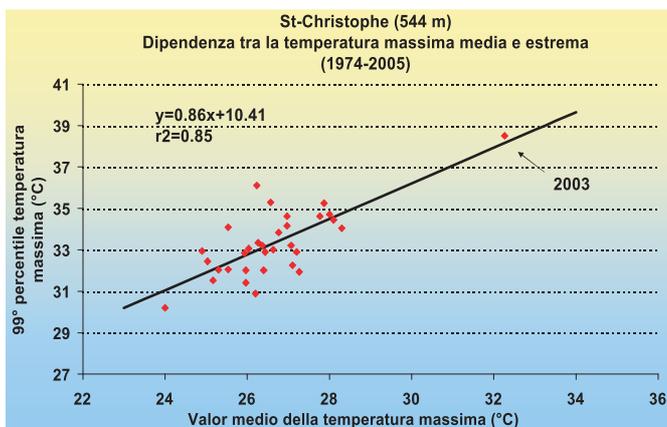


6.36, 6.37 - Andamento delle temperature massime giornaliere a St-Christophe e Gressoney-D'Ejola nell'estate 2003 (linee rosse), e confronto con i valori normali (linee blu). Le linee rette nere indicano le soglie del 90° e del 99° percentile, valori superati rispettivamente soltanto nel 10% e nell'1% dei casi, in media. Si noti come invece nel 2003 il 90° percentile sia stato superato con grande frequenza durante la stagione, nel 63% dei giorni a St-Christophe e nel 62% dei giorni a Gressoney.

6.38 - Numero di giorni con temperatura media estiva superiore alla soglia del 90° percentile a St-Christophe, dal 1974 al 2005. La tendenza è in aumento, e spiccano in particolare i giorni osservati nel 2003.

di un primo tentativo di omogeneizzazione, ancora troppo semplicistico, qui presentato solo per valorizzare l'informazione derivante dalla lunga serie termometrica di Aosta, ancora oggi attiva presso il sito aeroportuale. L'andamento della temperatura media estiva dal 1840 al 2005 è riportato in fig. 6.34.

Le stagioni estive in assoluto più fresche sono state quelle intorno agli Anni 1880, con valori di poco superiori ai 16 °C, ma anche quelle tra gli Anni 1930 e 1940 e quelle degli Anni 1970. Dagli Anni 1980, invece, si sono succedute estati vieppiù calde, con temperature medie sempre superiori a 20 °C dal 1987 in poi. La più calda di tutte è stata l'estate 2003, con 25.1 °C di temperatura media stagionale, ben 4.7 °C al di sopra della media 1974-2000. L'eccezionalità di tale stagione emerge pure considerando la temperatura media stagionale nell'ambito della distribuzione dei valori del periodo 1840-2000 (fig. 6.35): si nota come il valore del 2003, superiore alla media di circa 4 unità di deviazione standard, si situi nell'estremità destra del grafico, dunque con probabilità di accadimento così bassa da apparire addirittura al di fuori della distribuzione statistica. Le estati del 1991 e del 2004, rispettivamente la seconda e terza più calda ad Aosta, si collocano sempre nella coda destra della distribuzione, con probabilità



6.39, 6.40 (in alto) - Relazione tra le temperature medie ed estreme massime estive a St-Christophe e Gressoney-D'Ejola. All'aumentare di 1 °C della media stagionale anche il valore estremo aumenta di circa 1 °C.

6.41, 6.42 (al centro), 6.43, 6.44 (qui sopra) - Variazioni nella distribuzione statistica delle temperature minime e massime giornaliere estive a St-Christophe e Gressoney-D'Ejola in due periodi successivi, 1971-1989 e 1990-2005.

di accadimento tra il 5 e il 10%. Al contrario, l'estate più fredda, nel 1888, riportata nella parte sinistra della figura, ha una probabilità di accadimento sempre molto

bassa, ma comunque intorno al 2%.

Le temperature massime giornaliere dell'estate 2003 a St-Christophe (fig. 6.36) sono state spesso > 30.2 °C, e in 8 casi > 35.9 °C;

questi due valori sono rispettivamente il 90° e il 99° percentile della distribuzione di temperatura massima giornaliera estiva tra il 1974 e il 2000, rappresentano cioè i valori-soglia superati rispettivamente nel 10% e nell'1% dei casi che compongono il campione di 26 anni. Sono pertanto valori che si manifestano raramente.

Anche a Gressoney-D'Ejola l'estate 2003 è stata la più calda della serie, con una anomalia positiva di circa 4 °C rispetto alla media 1971-2000, e le temperature massime giornaliere sono state spesso superiori al 90° percentile (20.2 °C), risultando in 4 casi più elevate anche del 99° percentile (25.7 °C) (fig. 6.37).

Le fig. 6.39 e 6.40 mostrano la dipendenza tra il valor medio ed estremo (99° percentile) delle temperature massime estive per

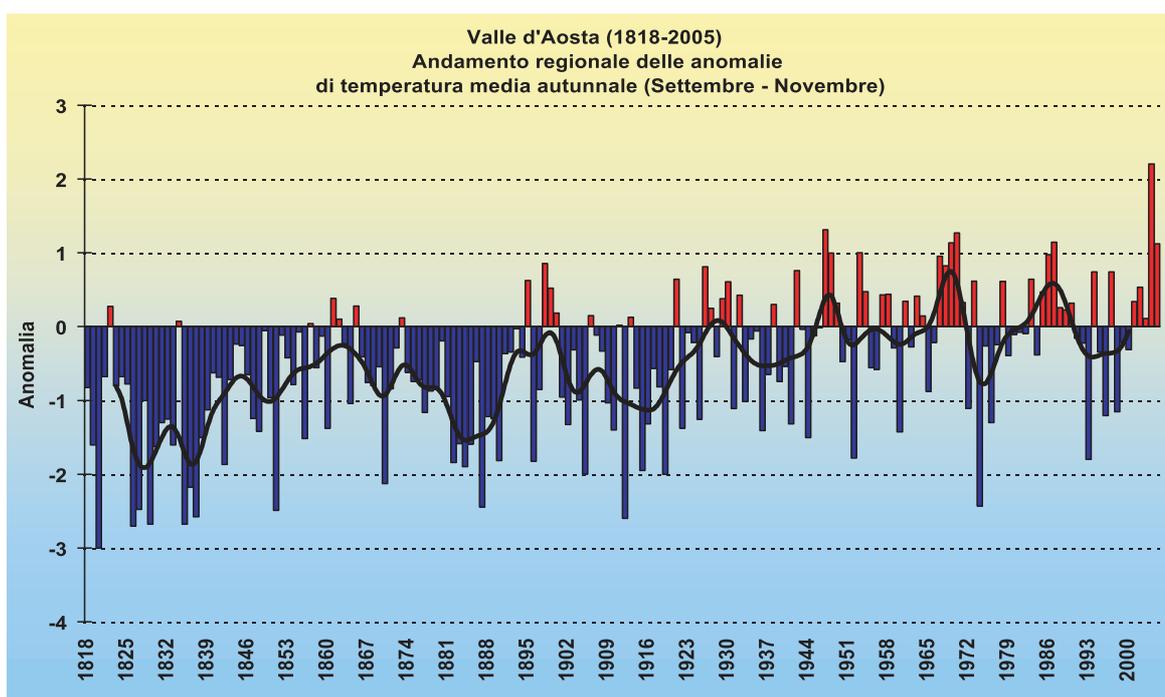
St-Christophe e Gressoney-D'Ejola. In entrambi i casi, per un aumento di 1 °C nella temperatura media massima ci si attende un aumento di circa un grado anche nei valori estremi massimi, risultato confrontabile con quanto ottenuto da BENISTON (2004).

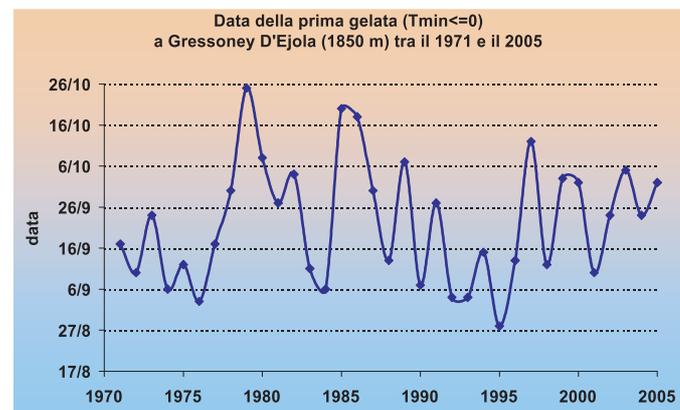
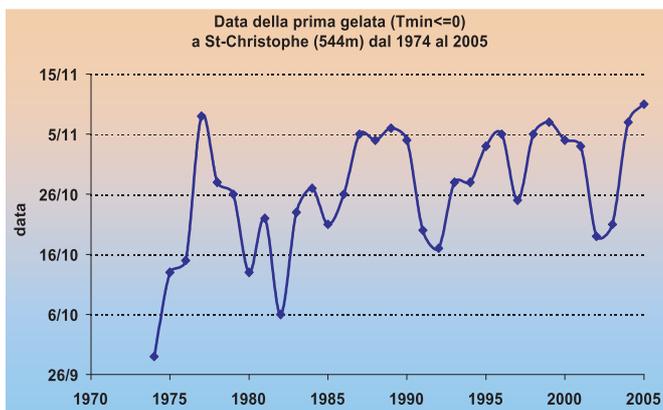
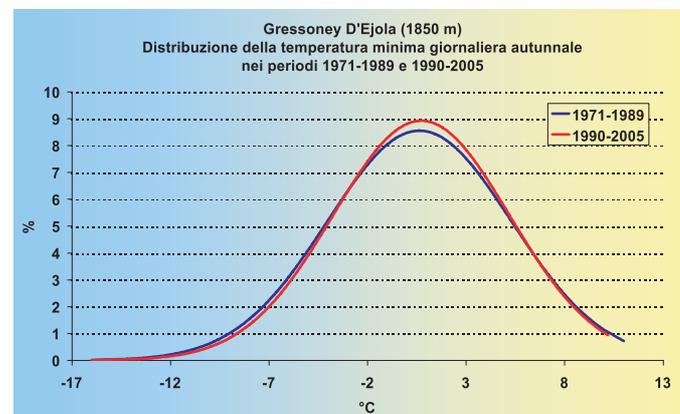
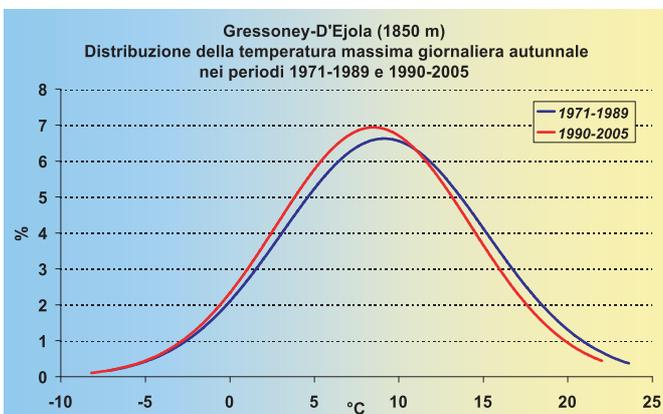
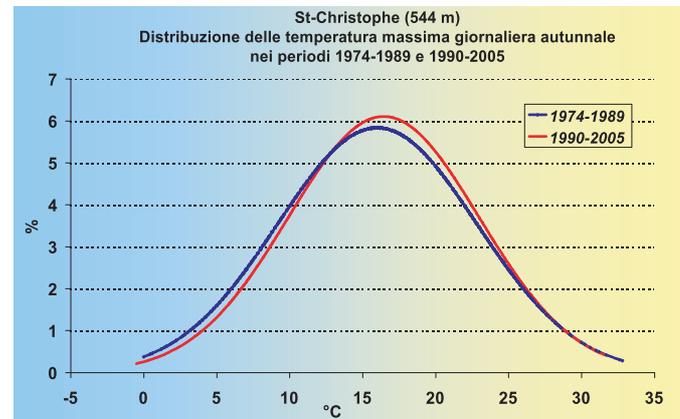
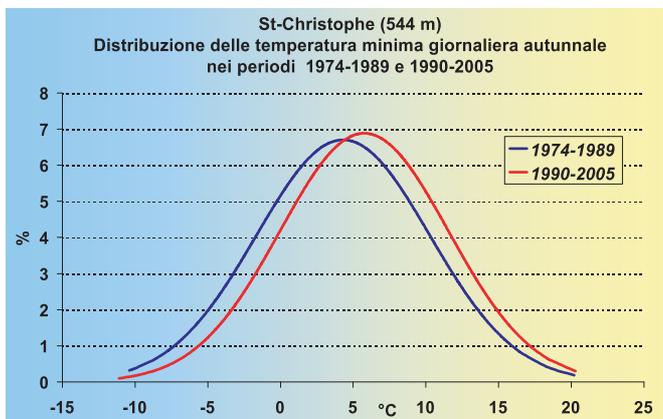
La variazione nella distribuzione delle temperature minime e massime (fig. da 6.41 a 6.44) mette in evidenza a St-Christophe un aumento di quasi 2 °C sia nelle minime sia nelle massime. A Gressoney l'aumento è più contenuto, circa 1 °C.

Autunno: pochi segnali fino al 2000

La stagione autunnale era, fino al 2000, l'unica a mostrarsi di frequente fresca anche negli Anni 1990, dopo la fase calda degli Anni 1980. Spiccavano a tal proposito i

6.45 - Indice standardizzato di anomalia (SAI) delle temperature medie autunnali in Valle d'Aosta, calcolato dal 1818 al 2005. Alcune stagioni fresche si sono presentate negli Anni 1990 (specialmente il 1993), ma poi dal 2001 è iniziata una più netta fase di riscaldamento. L'autunno 2004 è stato il più caldo della serie in Valle d'Aosta.





6.46, 6.47, 6.48, 6.49 - Variazioni nella distribuzione delle temperature minime e massime autunnali a St-Christophe e Gressoney-D'Ejola.
6.50, 6.51 - Evoluzione delle date della prima gelata autunnale.

freddi e piovosi autunni del 1993 e del 1996, e quello pure freddo — ma più asciutto — del 1998 (specie per i precoci rigori invernali di novembre). Il periodo 2001-05 ha invece mostrato un'inversione di tendenza, presentando cinque stagioni con mitezza anomala, particolarmente pronunciata nell'autunno 2004 (fig. 6.45).

La variazione della distribuzione della temperatura (fig. da 6.46 a 6.49) tra i periodi 1971-1989 e 1990-2005 mostra a St-Christophe un aumento di 0.4 °C nelle temperature massime e di 1.5 °C nelle temperature minime. A Gressoney si ha invece un aumento impercettibile della temperatura media minima (+0.1 °C), e un calo della

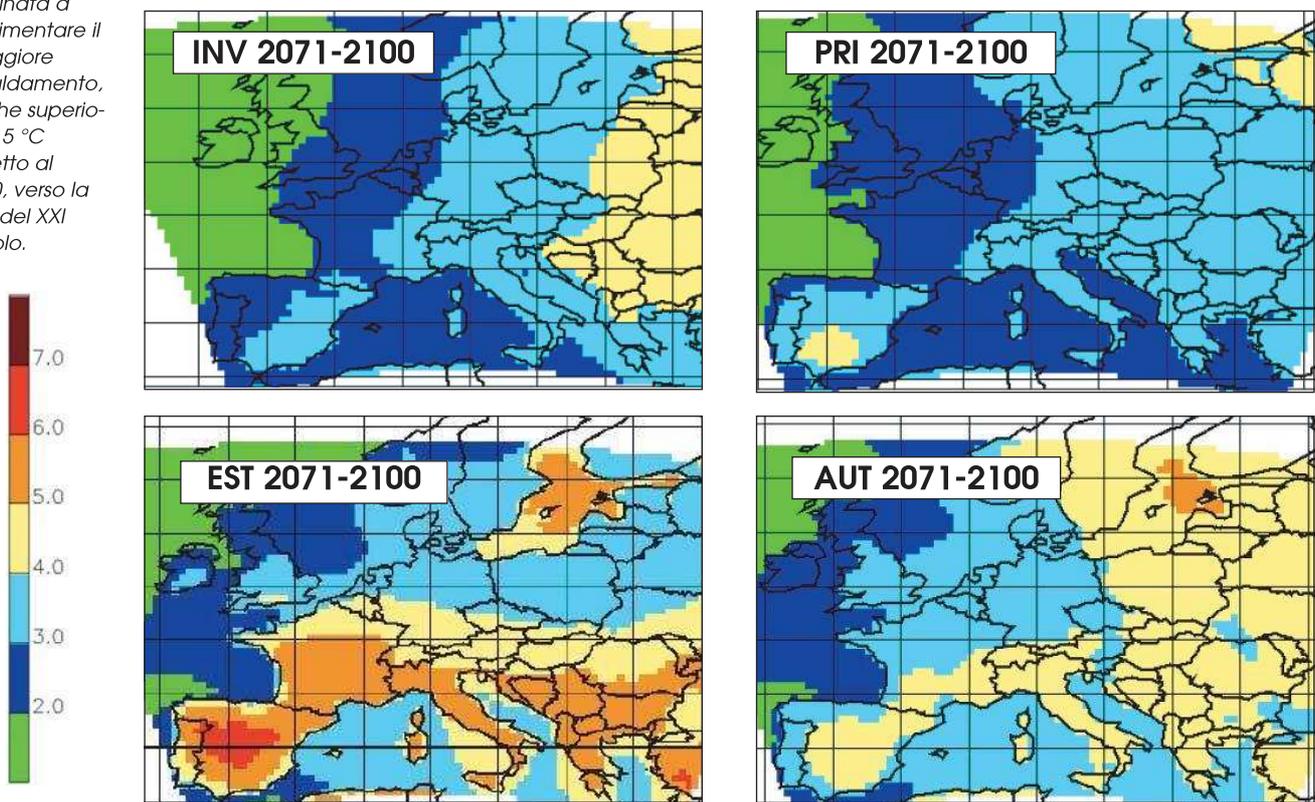
temperatura media massima autunnale di $-1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, dovuto alla maggiore influenza degli autunni freschi degli Anni 1990 rispetto alle cinque stagioni calde 2001-05. Il fatto che la stagione autunnale sia quella in cui meno è evidente l'aumento di temperatura è confermato anche dalle fig. 6.50 e 6.51, che mostrano la data della prima gelata a Gressoney e a St-Christophe negli ultimi 30 anni; solo all'aeroporto si può evidenziare una lieve tendenza ad avere gelate più tardive negli ultimi anni.

6.52 a, b, c, d - Media dei risultati delle simulazioni condotte nell'ambito del progetto PRUDENCE sugli aumenti stagionali di temperatura previsti in Europa per il trentennio 2071-2100. L'estate sarebbe la stagione destinata a sperimentare il maggiore riscaldamento, anche superiore a $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ rispetto al 1990, verso la fine del XXI secolo.

Cosa prevedono i modelli climatici per il futuro? Ancora più caldo

L'IPCC ha individuato una famiglia di sce-

nari futuri (cfr. pag. 38, cap. 5) che si traducono in un **aumento di temperatura globale previsto tra $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $5.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ entro il 2100**, rispetto al 1990. Tuttavia sono disponibili dati da simulazioni più dettagliate a scala regionale, come quelli ottenuti nell'ambito del progetto europeo **PRUDENCE** coordinato dall'Istituto Meteorologico Danese (<http://prudence.dmi.dk/index.html>), già ripresi da FREI (2004) e da BENISTON (2004), e cui si è fatto riferimento in questo rapporto. In tab. 6.53 sono riportati, secondo diversi livelli di probabilità, i valori di aumento termico medio stagionale previsti per il 2050 nel Sud della Svizzera. Possiamo ritenere che i valori previsti per la Svizzera meridionale siano applicabili anche alla vicinissima

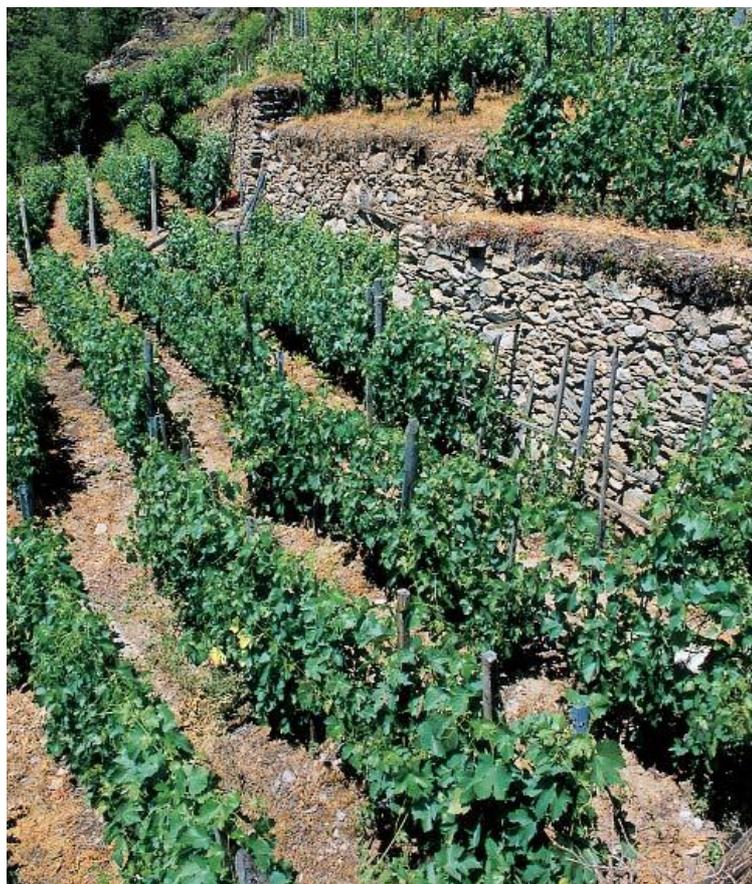


6.53 - Aumenti di temperatura previsti sulla Svizzera meridionale entro il 2050, secondo differenti livelli di probabilità. I dati sono desunti dal progetto PRUDENCE, e riportati in FREI (2004). Lo scenario più probabile ($P = 0.5$) indica aumenti compresi tra 1.8 °C in inverno e primavera, e 2.8 °C in estate. $P=0.975$ indica scenari rari ($\leq 2.5\%$) sulla coda destra della distribuzione.

Previsione aumento temperature medie stagionali secondo diversi livelli di probabilità (da Progetto Prudence, in Frei, 2004)								
	Prob.	0.025	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.975
Svizzera Sud	Inv	0.9	1.1	1.3	1.8	2.3	2.6	3.1
	Pri	0.9	1.1	1.3	1.8	2.4	2.8	3.3
	Est	1.5	1.9	2.2	2.8	3.7	4.1	4.9
	Aut	1.2	1.4	1.7	2.2	2.8	3.1	3.7

regione valdostana, pertanto questi sono stati impiegati per le considerazioni riportate in questo studio. Lo scenario più probabile ($P=0.5$) vede incrementi termici di 1.8 °C in inverno e primavera, 2.8 °C in estate e 2.2 °C in autunno. Questi risultati derivano da 16 diverse combinazioni di modelli, ciascuna

contenente un modello globale, un modello regionale e uno scenario di emissione di gas serra. La base modellistica comprendeva quattro modelli globali, e otto modelli regionali con risoluzione di 50 km (FREI, 2004). Per ragioni di praticità si considera qui lo scenario più probabile ($P=0.5$), ma si tenga presente l'esistenza anche di scenari più ottimistici (da $P=0.025$ a $P=0.2$) e più pessimistici (da $P=0.8$ a $P=0.975$); secondo questi ultimi, vi sarebbe il 2.5% di probabilità che l'aumento termico estivo raggiunga i 4.9 °C entro il 2050, mentre lo scenario più ottimistico prevederebbe comunque un aumento non trascurabile di 1.5 °C in estate, dell'ordine di quanto già osservato sulle Alpi finora dalla fine della Piccola Età Glaciale.



6.54 - Vigneti su versanti terrazzati ad Aise, sotto il sole del 18.06.2005 (f. D. Cat Berro). La vite, specie termofila adatta ai climi caldi, dovrebbe sopportare bene l'aumento di temperatura previsto, e l'adattamento potrà essere favorito da opportune scelte varietali.

COSA POTREBBE ACCADERE IN VALLE D'AOSTA: EFFETTI, STRATEGIE E OPPORTUNITÀ

Di seguito si illustrano i potenziali effetti che l'aumento delle temperature potrà avere nei diversi settori dell'economia, dell'ambiente e del territorio valdostano. Per ciascuno di questi verranno individuate anche possibili strategie di mitigazione dell'impatto, di adattamento, e anche eventuali oppor-

6.55 - Orto di montagna ad Avise, 18.06.2005 (f. D. Cat Berro). In futuro l'agricoltura valdostana potrebbe soffrire soprattutto della combinazione negativa di aumento delle temperature estive e siccità più frequenti. All'incremento dell'evapotraspirazione potrebbe corrispondere un calo nella disponibilità delle risorse idriche, dovuto alla diminuzione delle precipitazioni estive e al cambiamento nei regimi di deflusso torrentizio e fluviale. Una opportuna strategia di consolidamento della rete irrigua potrà mitigare tale scenario.

tunità legate ai nuovi scenari ambientali.

1) Agricoltura: delicato equilibrio tra conseguenze positive e negative

E' certamente tra i settori economici più direttamente legati all'andamento climatico, dunque l'esposizione agli effetti di un suo cambiamento è elevata.

Dati i numerosissimi fattori in gioco, è assai difficile stabilire se un clima più caldo potrà rappresentare complessivamente un beneficio oppure un danno per la produzione agricola valdostana.

Potenziali effetti positivi / opportunità:

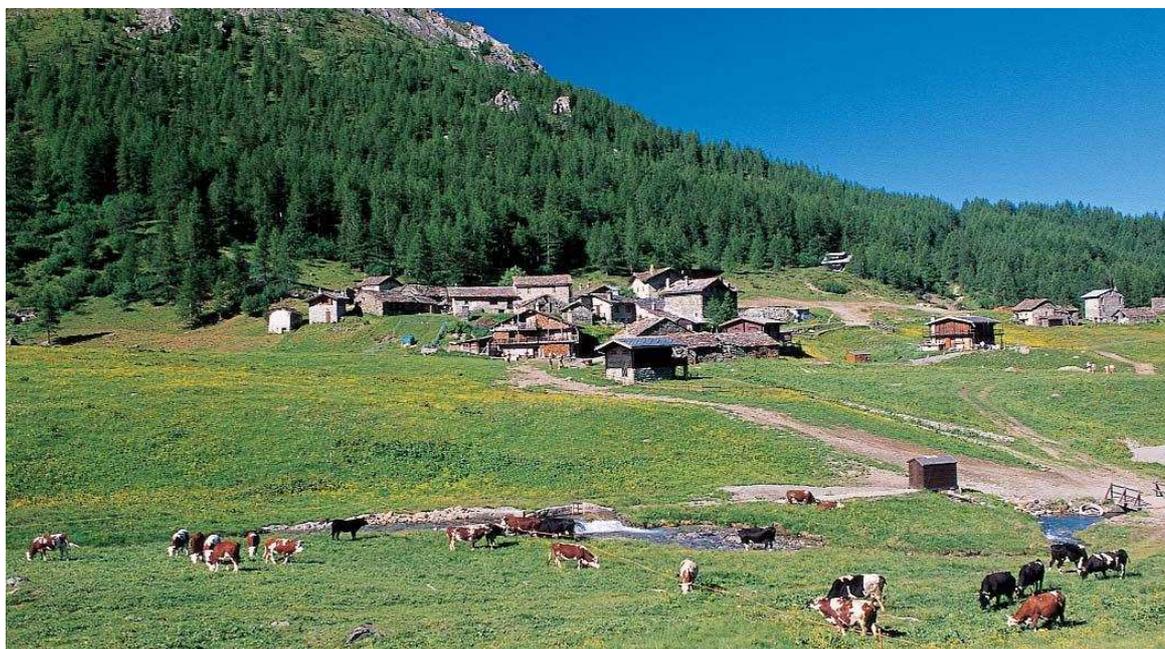
- Maggiori rendimenti per il prolungamento della stagione vegetativa e per la maggiore disponibilità di CO₂.
- Estensione della possibilità di coltivare a quote più elevate.
- Gelate. Il rischio di danni da gelo sulle colture orticole potrà diminuire, ma soltanto se le epoche di semina rimarranno inalterate; infatti, l'aumento delle temperature medie primaverili e la minore durata dell'innevamento può indurre gli agricoltori ad anticipare le semine, esponendo così le colture a maggiore rischio in caso di eventi estremi — pur sempre possibili — benché in media il clima sia più mite. Le gelate invernali non hanno importanza per l'agricoltura in Valle d'Aosta, giacché le piante locali sono ben adattate a valori molto bassi durante la fase di quiescenza;



soltanto colture tipicamente mediterranee come l'ulivo e la vite possono soffrire di geli particolarmente intensi, quali ad esempio quelli registrati nel gennaio 1985 (punta di -17.9 °C a St-Christophe). Nemmeno le gelate precoci sono in grado di recare danni importanti, piuttosto sono assai temibili quelle tardive in primavera. L'entità dei danni varia sensibilmente a seconda dello stadio fenologico (il fiore in pieno sviluppo è assai più delicato di una gemma che si appresta appena a schiudersi) e anche della durata dell'episodio.

Per il futuro si può prevedere una diminuzione complessiva della frequenza del gelo, peraltro già individuata in primavera con un anticipo delle date dell'ultimo episodio con $T_{min} \leq 0$ °C negli anni recenti (fig. 6.30 e 6.31), ma la situazione è complicata dalla difficile prevedibilità di numerosi fattori determinanti (ad esempio, come evolverà la copertura nuvolosa notturna, che limita il raffreddamento?). Tuttavia, per le ragioni esposte sopra (anticipo del

6.56 - Mandrie al pascolo a Cheneil (Valtournenche) il 22.06.2003. E' solo l'inizio di un'estate caldissima, che ha conosciuto temperature medie stagionali di circa 5 °C superiori alla norma (f. D. Cat Berro).



risveglio vegetativo e delle semine), questo non è sufficiente per stabilire con certezza se in futuro vi saranno meno danni da gelate: inoltre, è sufficiente una sola notte di forte gelo per produrre danni immensi all'agricoltura di un'intera regione. Un recentissimo esempio di gelata dannosa molto tardiva è quello del 1° giugno 2006, quando, a seguito dell'afflusso di aria artica — complice la serenità del cielo e l'aria secca — si è avuta la formazione di brina al suolo a partire dai 600-800 m circa su molte valli delle Alpi occidentali, con notevole danno alle colture orticole. Temperature così basse nei primi giorni di giugno (minima di 3.1 °C a St-Christophe il giorno 1) non si misuravano da almeno 30 anni. Questo dimostra che, anche in epoca di riscaldamento globale, gli estremi di freddo possono comunque manife-

starsi.

Potenziali effetti negativi:

- Spostamento degli areali di diffusione di malerbe, parassiti e insetti responsabili di fitopatologie per via del clima più caldo, con arrivo di specie prima sconosciute nella regione.
- Diminuzione della qualità dei foraggi all'aumentare della temperatura (IPCC, 2001 - in AA.VV., 2002).
- Necessità di maggiori risorse idriche per l'irrigazione estiva, a causa dell'aumento dell'evapotraspirazione e del calo di precipitazioni.
- Con un precoce risveglio vegetativo delle piante da frutto, dovuto alle temperature mediamente più elevate, aumenta la probabilità di avere danni da gelo nelle settimane successive. In Svizzera, dal 1951 al 1998 si è notato un anticipo

medio di 11.6 giorni delle fasi fenologiche primaverili (cacciata delle foglie, fioritura), ma un ritardo di soli 1.7 giorni delle fasi autunnali (colorazione e caduta delle foglie), in accordo con il maggiore riscaldamento della primavera rispetto all'autunno, riscontrato anche in Val d'Aosta (DEFILA & CLOT, 2001, in AA.VV, 2003).

6.57 - La posizione geografica di Aosta, in un fondovalle alpino solare, ventilato e asciutto, garantisce condizioni climatiche piuttosto salubri rispetto, ad esempio, alla vicina pianura padana, in cui l'atmosfera è più umida e spesso stagnante. Sotto il profilo sanitario questo è senz'altro un vantaggio in vista di futuri cambiamenti climatici. Sotto, sole splendente sui tetti di Aosta il 02.07.1999 (f. L. Mercalli).

Strategie di mitigazione e adattamento:

Appropriate misure di adattamento preventivo, con diversificazione delle colture e introduzione di nuove tecnologie, permetteranno di ridurre la vulnerabilità globale dell'agricoltura valdostana all'aumento delle temperature. Gli effetti negativi potranno essere limitati con opportune scelte colturali e varietali, miglioria e sviluppo dei sistemi di irrigazione, pianificazione dell'utilizzo agricolo dei suoli, ecc...

2) Sanità: disagio da caldo, ma la Valle d'Aosta, è più favorita

La modificazione delle condizioni termiche

«Il problema della salute umana è una delle ragioni più importanti per studiare gli effetti del cambiamento climatico planetario. Le incidenze combinate sull'ambiente fisico, gli ecosistemi, l'economia e la società si riflettono sulla salute...» (OMS, 2000).

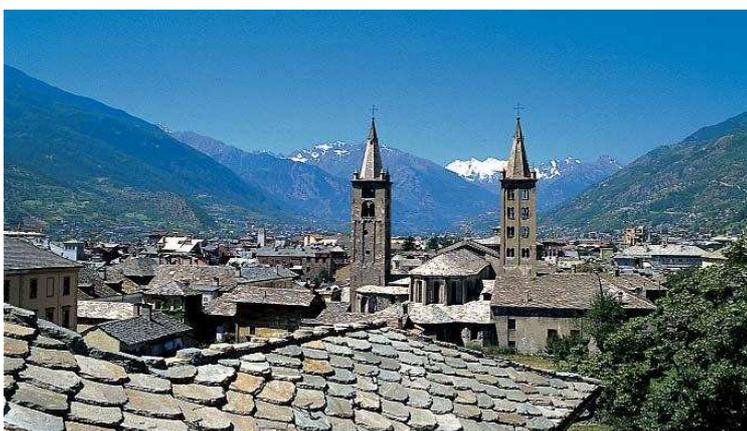
e ambientali potrà avere conseguenze anche nel settore sanitario (qualità dell'aria, benessere fisico, diffusione di patogeni).

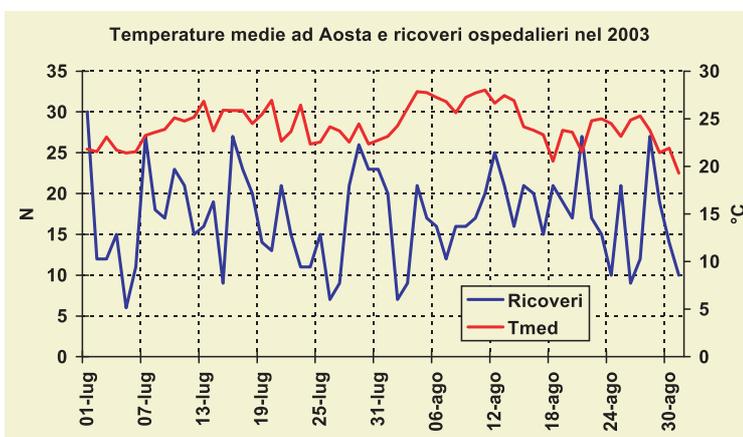
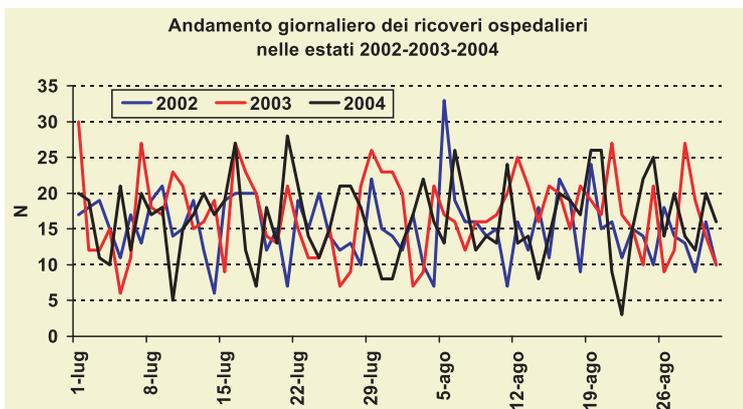
Potenziali effetti positivi / opportunità:

- Minore disagio invernale da freddo.

Potenziali effetti negativi:

- Disagio/mortalità da caldo: è teoricamente prevedibile un aumento dei ricoveri e dei decessi in caso di aumento di frequenza di grandi ondate di calore estive, ma solamente a fondovalle e in città, con maggiore stress su bambini, anziani e persone affette da malattie cardio-vascolari. Aumento dei colpi di calore, insolazioni, spossamenti; aggravamento dei problemi sanitari già esistenti. Tuttavia, è da rilevare come la Valle d'Aosta si trovi in una situazione privilegiata sotto questo aspetto, per l'elevata altitudine media e per la presenza di vivaci brezze termiche pomeridiane (che spirano con velocità talora di 40-50 km/h) in grado di portare ampio sollievo





6,58, 6,59 - In alto, numero di ricoveri ospedalieri estivi ad Aosta nel periodo 2002-2004. Nel 2003 non si nota un comportamento particolare rispetto agli altri anni, meno caldi, e anche dal grafico qui sopra, non emergono correlazioni significative tra ricoveri e temperature. Ciò può essere dovuto anche alla vivace ventilazione, che attenua il disagio fisico da caldo (fonte: Ass. Sanità, Salute e Politiche Sociali, Reg. Aut. Valle d'Aosta).

anche nelle giornate dal caldo più intenso. Ne è dimostrazione l'andamento dei ricoveri osservato ad Aosta durante la tropicale estate 2003: mentre in Europa sono stati osservati oltre 30.000 decessi in più rispetto alle condizioni normali (ROUSSEAU, 2005), e anche nel vicino Piemonte si è registrato un netto aumento della mortalità in corrispondenza dei picchi di caldo (a Torino dal 1° giugno al 31 agosto l'incremento rispetto alla «media» è stato del 33%, con punte del 45% nella categoria degli ultrasettantacinquenni; in IVALDI & al.), in Valle d'Aosta non si è notata una correlazione significativa tra temperature e ricoveri ospedalieri (fig. 6.58 e 6.59), segno che il caldo, ben-

ché intenso e di intensità mai rilevata in precedenza, è stato retto relativamente bene dalla popolazione anche grazie alle favorevoli condizioni ambientali.

— Probabile aumento della concentrazione estiva di ozono a fondovalle, responsabile di problemi respiratori e di irritazione ai polmoni. Aumento degli aerosol durante le più frequenti siccità estive.

— Maggiore esposizione della popolazione ai raggi ultravioletti per allungamento della stagione calda (abiti più leggeri).

— Alterazione delle fasi fenologiche e allungamento della stagione di pollinazione.

— Rischio di diffusione di nuovi patogeni, prima sconosciuti in zona, verso i quali le comunità locali non hanno ancora sviluppato la naturale resistenza; modifica degli areali di diffusione di malattie derivanti da insetti.

Strategie di mitigazione e adattamento:

Nonostante le condizioni ambientali privilegiate della Valle d'Aosta, sarà comunque opportuno prevedere:

— un potenziamento dell'assistenza sanitaria e sociale in caso di forti ondate di calore, attraverso piani di tutela e assistenza dei soggetti deboli (bambini, anziani, persone affette da disturbi respiratori e cardio-vascolari).



6.60 - Le piste per lo sci estivo di Plateau Rosa minacciate dal gran caldo del 12.08.2003 (f. L. Mercalli). Le porzioni di ghiacciaio circostanti sono ormai prive di neve residua ed esposte alla radiazione solare, anche qui a quota 3500 m. Una situazione sempre più frequente.

- Sviluppo di programmi sanitari che prevedano la sorveglianza di nuove malattie in potenziale sviluppo.
- Educazione mirata a corretti comportamenti personali in ambito sanitario, potenziamento del controllo della qualità dell'aria e dell'acqua.

3) Turismo: venite a cercare il fresco in Valle d'Aosta

Anche il turismo potrà risentire notevolmente dell'aumento della temperatura; le destinazioni turistiche che basano la loro attività sulle risorse naturali del territorio, specialmente quelle di montagna, sono soggette a un maggiore impatto rispetto a quelle basate, ad esempio, su attrazioni culturali o storiche. Ma la progressiva conversione di attività potrà rendere maggiormente adattabile il settore in vista di nuovi scenari ambientali.

D'altra parte il turismo stesso contribuisce in maniera non trascurabile, con i trasporti, alle emissioni di gas climalteranti: si stima che in Svizzera il traffico legato alle vacanze rappresenti il 60% dei movimenti totali delle persone (MÜLLER H., in AA.VV., 2002).

Potenziati effetti positivi / opportunità:

- La Valle d'Aosta come «riserva» di frescura. Maggiore afflusso turistico estivo da pianure e città verso le temperature più supportabili dei monti valdostani. Condizioni favorevoli per il lancio di nuovi slogan turistici come: «*Venite a cercare il fresco in Valle d'Aosta!*», oppure «*Il fresco? In Valle d'Aosta lo trovate ancora...!*».
- Possibilità di insediamento temporaneo, in prevalenza estivo, di attività professionali favorite dal telelavoro (giornalisti, artisti, scrittori), alla ricerca di maggiore benessere fisico rispetto all'afosa pianura/città. Importante garantire a tutte le località montane il collegamento alle reti veloci di comunicazione internet, anche *wireless*.
- Necessità/opportunità di sviluppo di soluzioni turistiche alternative nelle località di montagna che in passato avevano puntato in prevalenza sugli sport invernali. Sviluppo di un turismo «*Quattro Stagioni*», più versatile e adatto alle nuove situazioni: promozione dell'escursionismo, agriturismo, equitazione, turismo culturale.