



Fondazione Lombardia
per l'Ambiente



Regione Lombardia

PROGETTO KYOTO LOMBARDIA

**Per vincere la sfida dei cambiamenti
climatici nella regione
più industrializzata d'Italia**



RICERCHE & RISULTATI

Valorizzazione dei progetti di ricerca

PROGETTO KYOTO LOMBARDIA

**Per vincere la sfida dei cambiamenti climatici
e del controllo dei gas serra
nella regione più industrializzata d'Italia**

© 2008 Fondazione Lombardia per l'Ambiente

Proprietà letteraria riservata

Nessuna parte di questo volume può essere riprodotta o utilizzata sotto nessuna forma, senza permesso scritto, tranne che per brevi passaggi in sede di recensione e comunque citando la fonte come di seguito indicato:

“Progetto Kyoto Lombardia, edizione Fondazione Lombardia per l'Ambiente, 2008 (volume di presentazione dei risultati della ricerca finanziata da Regione Lombardia, Fondazione Lombardia per l'Ambiente, APAT e ERSAF Lombardia e promossa da Regione Lombardia, Fondazione Lombardia per l'Ambiente e ARPA Lombardia).”

Indice

	Pag.
Presentazioni	
<hr/>	
INSIEME CON ENERGIA	5
Giovanni Bottari, Presidente Fondazione Lombardia per l'Ambiente Roberto Formigoni, Presidente Regione Lombardia	
Introduzione	
<hr/>	
OBIETTIVI E RISULTATI DI UNA RICERCA UNICA IN ITALIA	8
Antonio Ballarin Denti, coordinatore scientifico della Fondazione Lombardia per l'Ambiente	
La testimonianza di uno scienziato	
<hr/>	
LA SCIENZA HA FATTO CHIAREZZA, ORA DOBBIAMO AGIRE	10
Giulio De Leo, responsabile della linea di ricerca Esternalità	
Dall'ONU alla Lombardia	
<hr/>	
IL PROTOCOLLO DI KYOTO, GLI ACCORDI INTERNAZIONALI E LA STRATEGIA DELL'UNIONE EUROPEA	12
Mita Lapi, ricercatrice della Fondazione Lombardia per l'Ambiente	
Questa ricerca	
<hr/>	
GLI ENTI PROMOTORI, I FINANZIATORI E I PROTAGONISTI PRINCIPALI DEL PROGETTO KYOTO LOMBARDIA	14
Capitolo 1	
<hr/>	
CLIMATOLOGIA	17
Come sta cambiando il clima in Lombardia	
Capitolo 2	
<hr/>	
EMISSIONI DI GAS SERRA	53
Questa è oggi la situazione in Lombardia	

Capitolo 3

L'ASSORBIMENTO DEI GAS SERRA	79
Come suoli e foreste possono aiutarci	

Capitolo 4

IMPATTI	111
Le conseguenze dei cambiamenti climatici sull'uomo, sugli ecosistemi, sul sistema economico, sul turismo	

Capitolo 5

SCENARI E POLITICHE	181
Piani di intervento, di mitigazione e di controllo a livello regionale	

Postfazione

DALLA SCIENZA ALLA CONOSCENZA E ALL'AZIONE	247
Salvatore Giannella, giornalista, consulente editoriale per l'opera	

Glossario essenziale

LE PAROLE CHIAVE DELLA RICERCA	251
---------------------------------------	-----

Tutti i protagonisti della ricerca

NOMI E COGNOMI DEI RICERCATORI COINVOLTI	259
---	-----

Avviso ai n@viganti

LINK, LIBRI, INDIRIZZI UTILI PER SAPERNE DI PIÙ	269
--	-----

www.kyotolombardia.org

A questo indirizzo internet sono disponibili i testi integrali della ricerca più il servizio on line per i lettori curiosi per natura.

Presentazioni

Insieme con energia

Questa pubblicazione **Progetto Kyoto Lombardia** presenta la ricerca che ha impegnato la nostra Fondazione e la Regione Lombardia dal 2005 al 2008. È la conclusione di un ciclo di studi e ricerche iniziato negli anni 1994-1996 con il progetto: La qualità dell'aria nell'area metropolitana milanese e i suoi effetti sulla salute dell'uomo interamente finanziato dalla nostra Fondazione per un milione di euro. Era l'inizio di un impegnativo percorso, da noi individuato per tempo, con un obiettivo ben preciso: lo studio dell'inquinamento atmosferico in Lombardia. Ha fatto seguito il progetto Piano Regionale per la Qualità dell'Aria (PRQA) negli anni 1998-2000 con un contributo della Regione Lombardia di 1.200.000 euro e di 800.000 euro da parte della Fondazione.

Questa ricerca Kyoto Lombardia è stata finanziata dalla Regione Lombardia per 1.600.000 euro (compreso un apporto da parte di APAT – Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici per 530.000 euro e di ERSAF – Ente Regionale per i Servizi all'Agricoltura e alle Foreste per 50.000 euro) e dalla nostra Fondazione per 600.000 euro.

Scopo di questa importante ricerca è stato l'esame del territorio lombardo con riguardo soprattutto ai seguenti aspetti: • climatologia; • emissioni di gas serra; • assorbimenti e stoccaggio di carbonio (suolo e foreste); • conseguenze sull'uomo, fauna, agricoltura, turismo; • scenari emissivi e politiche per ridurre i gas climalteranti.

I risultati principali della ricerca – l'unica effettuata sino a oggi in Italia – sono stati raccolti in un CD disponibile presso gli Enti finanziatori mentre i testi integrali sono consultabili sul sito internet www.kyotolombardia.org.

A lavori conclusi abbiamo ritenuto utile e opportuno realizzare una sintesi molto chiara e documentata di questa ricerca ponderosa passando dai mezzi elettronici al cartaceo, cioè tradurre gli elaborati informatici in uno strumento di facile consultazione.

Questo libro è quindi da considerarsi come una piccola tessera di quel grande mosaico di un ambiente più a misura d'uomo, che si sta costruendo faticosamente e tra mille difficoltà, giorno dopo giorno e al quale stanno lavorando in ogni parte del mondo istituzioni scientifiche e studiosi. Questa edizione sarà diffusa in migliaia di copie, a cura della Fondazione. È riservata a coloro che, ai vari livelli di responsabilità, nelle istituzioni pubbliche e private, come negli Enti, nelle Imprese e nelle Associazioni, sono interessati a questi problemi e ad affrontarli con mezzi conoscitivi adeguati.

La tutela dell'ambiente riguarda noi tutti, quindi tutti dobbiamo sentirla, in qualche misura, come una sfida e anche come un'opportunità da vivere in prima persona.

Auspicio che si possano continuare gli studi condotti nell'ambito di questa ricerca, attraverso nuove iniziative che contribuiscano a realizzare gli obiettivi fissati dal Protocollo di Kyoto per il 2012.

Concludo con un vivo ringraziamento alla Regione Lombardia (in particolare al suo Presidente On. Roberto Formigoni) che ha dato un determinante contributo affinché questa ricerca vedesse la luce.

Grazie all'azione comune di Regione e Fondazione Lombardia per l'Ambiente, in Lombardia questa alleanza è diventata realtà da diversi anni. L'adozione di strategie efficaci e preventive ha permesso, in un territorio particolarmente critico come quello del bacino padano, di conciliare la crescita competitiva del sistema economico con le esigenze sempre più forti di qualità della vita e di salvaguardia e tutela dell'ambiente.

Aggiungo un sentito grazie alle Università lombarde, agli Enti di ricerca e alle Istituzioni scientifiche che hanno dato il loro qualificato e importante apporto.

Per ultimo il mio pensiero grato e affettuoso va a tutti gli studiosi e ricercatori che hanno lavorato con grande impegno ed entusiasmo alla buona riuscita di questa ricerca: i loro nomi sono tutti citati nelle varie pagine del libro.

***Fondazione Lombardia per l'Ambiente
Il Presidente
Giovanni Bottari***

L'impegno della Regione Lombardia

L'impegno della Regione Lombardia a favore del Protocollo di Kyoto precede di qualche anno la sua approvazione da parte del governo nazionale. Infatti già nell'Accordo Quadro che la Regione Lombardia aveva sottoscritto con il Ministero dell'Ambiente nel febbraio 2002 era inserito un robusto programma di ricerca che aveva come obiettivo non solo lo studio della variazione del clima a livello regionale e dei suoi impatti, ma anche la valutazione di adeguate politiche di mitigazione e di adattamento al cambiamento climatico globale.

Del resto, nel nostro Piano Regionale per la Qualità dell'Aria (PRQA) del 2000 si erano delineate, già sulla fine degli anni Novanta (proprio nello stesso periodo in cui veniva concepito l'accordo di Kyoto), una serie di analisi e di interventi per contrastare l'inquinamento atmosferico che implicavano parallele misure rivolte alle emissioni di gas serra.

Successivamente si affermava, nella governance regionale dei problemi ambientali, uno sforzo di integrazione di differenti politiche settoriali aventi in comune tanto il controllo della qualità dell'aria in relazione alla tutela della salute dell'uomo e degli ecosistemi, quanto la mitigazione delle emissioni dei gas climalteranti nella direzione richiesta dagli impegni internazionali del nostro Paese.

Veniva così prodotta, anche a seguito di altre importanti ricerche (sul particolato fine e sull'ozono), la legge n. 24 del 2006 che affidava, per la prima volta in Italia, a un'amministrazione regionale gli strumenti per una politica integrata di miglioramento della qualità dell'aria coordinando in tal senso anche le azioni degli enti di governo locali.

Nel settore energetico veniva poi varato un organico Piano d'Azione per l'Energia (2007) mirato non solo all'incremento del potenziale di produzione energetica della regione, ma anche alla sua riqualificazione sotto il profilo della tutela ambientale e del controllo delle emissioni. Infine, nel settore agro-forestale, che gioca un ruolo chiave nell'assorbimento dei gas serra, venivano avviati progetti – come quello relativo ai 10.000 ettari di riforestazione in Lombardia – che si collocavano tra gli obiettivi più ambiziosi della convenzione internazionale sui cambiamenti climatici.

Lo studio sull'applicazione del Protocollo di Kyoto in Lombardia (prima Regione in Italia ad affrontare organicamente questo impegno internazionale), che ora si conclude, rappresenta quindi un coronamento, certamente non esaustivo ma comunque qualificante, di uno sforzo che intende porre la Regione Lombardia all'avanguardia, tra le più virtuose regioni europee, nell'impegno di salvaguardia degli equilibri ambientali del nostro Pianeta in una prospettiva di sviluppo solidale e sostenibile.

Si ringrazia la Fondazione Lombardia per l'Ambiente per la preziosa e apprezzata collaborazione e per la realizzazione di questa importante pubblicazione.

Regione Lombardia
Il Presidente
Roberto Formigoni

Introduzione

Obiettivi e risultati di una ricerca unica in Italia

di Antonio Ballarin Denti*

Il Progetto Kyoto Lombardia nasce come sviluppo del Piano Regionale per la Qualità dell'Aria (PRQA), svolto dalla Fondazione nella seconda metà degli anni Novanta, su incarico della Regione Lombardia, con l'obiettivo di fornire conoscenze e strumenti valutativi per le politiche di controllo dell'inquinamento atmosferico.

In quel periodo era stato approvato il Protocollo di Kyoto (1997) e si era pertanto deciso di estendere anche ai gas climalteranti, oggetto di questo accordo, l'inventario delle emissioni INEMAR, uno dei prodotti più innovativi scaturiti dal PRQA. Si era inoltre considerato che qualità dell'aria e controllo dei gas serra sono aspetti strettamente collegati per comuni fonti di emissioni, per impatti congiunti sulla salute dell'uomo e degli ecosistemi e per possibili integrazioni di politiche con evidenti co-benefici. Il recepimento del Protocollo di Kyoto avrebbe poi certamente implicato una serie di azioni di mitigazione/adattamento al cambiamento climatico da svilupparsi anche a livello locale.

La Fondazione aveva quindi costituito un comitato scientifico di autorevoli esperti a livello europeo con il compito di proporre, dopo un adeguato studio di fattibilità, un progetto esecutivo di durata triennale. Il bacino padano dal punto di vista orografico e territoriale si presenta fortemente problematico per la realizzazione di programmi a favore dell'ambiente.

La questione del cambiamento climatico era già critica, ma al contempo ancora poco percepita dai cittadini. Il problema quindi era tanto delicato politicamente quanto socialmente gravoso. Uno dei primi passi della Regione è stato l'acquisizione di solide e innovative conoscenze scientifiche su cui poter fondare le proprie politiche. Gli obiettivi del progetto erano ambiziosi e dovevano affrontare sfide non facili. Tutti gli studi finora svolti sul cambiamento climatico (a partire da quelli in ambito IPCC) si erano sempre svolti su scala globale o, al più, a livello delle grandi regioni geografiche del Pianeta. Si trattava ora di scendere a un livello ancora inferiore in un'area - quella delle regione Lombardia - ancor più ridotta del bacino climatico e aerologico di appartenenza (la Pianura Padana). La valutazione degli impatti e degli scenari a livello regionale era resa complessa dalla mancanza di definiti confini fisici ed economici e l'individuazione delle relative politiche di intervento richiedeva scale temporali ben più lunghe di quelle tipiche di altri settori tradizionali. Occorreva infine reperire e integrare, sugli obiettivi del progetto, competenze tecnico-scientifiche molto diversificate che, seguendo una politica storica della Fondazione, si volevano individuare entro il sistema delle università e dei centri di ricerca presenti sul territorio regionale.

Il progetto è stato articolato in cinque linee di indagine.

La linea **climatologia**, attraverso il recupero e l'omogeneizzazione delle serie storiche di

*Coordinatore scientifico della Fondazione Lombardia per l'Ambiente

temperature e precipitazioni (molte delle quali risalenti a oltre un secolo), ha permesso una robusta analisi delle tendenze in atto anche nella loro distribuzione territoriale. Si sono estese le conoscenze sulle variazioni dei ghiacciai lombardi e di parametri utili per la valutazione del dissesto idrogeologico e della produttività agricola. Si sono inoltre analizzate le variazioni in frequenza e intensità degli eventi meteorologici estremi che rappresentano uno degli aspetti più critici del cambiamento climatico anche a scala locale.

La **linea emissioni** ha completato l'inventario INEMAR estendendolo a tutti i gas serra previsti dal Protocollo di Kyoto, armonizzandolo con le procedure IPCC e aggiornandolo al 2005. Particolare attenzione è stata rivolta alle emissioni dal comparto energetico attraverso un'accurata analisi dei flussi di combustibili e dei loro impieghi entro il territorio regionale.

La **linea stima e mappatura dei carbon sinks e stocks** è stata dedicata alla stima, anche attraverso campagne di misura dei flussi di carbonio tra suolo, vegetazione e atmosfera, della capacità di assorbimento (sinks) e degli stoccaggi (stocks) del carbonio da parte degli ecosistemi agricoli e forestali della regione, approfondendo altresì aspetti di natura economica e gestionale degli interventi di incremento della superficie forestale.

La **linea esternalità** ha analizzato il complesso quadro delle vulnerabilità del territorio lombardo all'impatto dei cambiamenti climatici in riferimento alla salute dell'uomo, alle infrastrutture, ai sistemi naturali, all'agricoltura, alla biodiversità e al turismo. Questo quadro è di fondamentale importanza per la messa a punto di specifiche politiche di settore per l'adattamento ai cambiamenti in corso (onde di calore, periodi estesi di siccità, eventi alluvionali).

La **linea scenari e politiche** ha affrontato la valutazione economica e ambientale degli strumenti e delle politiche di mitigazione attuabili nella Regione Lombardia tracciando le linee di un "piano regionale di mitigazione" per il controllo delle emissioni dei gas serra e la promozione di un sistema energetico sostenibile. Un innovativo modello matematico di ottimizzazione delle politiche ha permesso l'individuazione del mix tecnologico ottimale che, all'orizzonte temporale del 2020 (indicato dagli impegni comunitari) minimizza il costo degli investimenti in funzione di determinati vincoli ambientali, normativi e tecnologici.

Il Progetto Kyoto Lombardia, fortemente voluto da Regione Lombardia che ne ha seguito costantemente gli sviluppi nel corso degli anni, con il coinvolgimento di oltre 20 unità di ricerca di sei università, del CNR, del Centro Comune di Ricerca della Commissione Europea, di ARPA, ERSAF e altri enti tecnici regionali, ha dimostrato la capacità di un coinvolgimento integrato di una vasta e robusta comunità scientifica su obiettivi strettamente finalizzati alle esigenze del territorio. Al contempo, attraverso un processo continuo di confronto e di monitoraggio dei risultati del progetto con gli amministratori locali, ha realizzato un buon esempio di organizzazione della conoscenza scientifica per il supporto a un governo dell'ambiente fondata su solide basi scientifiche e dotata di intrinseca coerenza. I rapporti finali sono infatti corredati da un sistema di domande frequenti che possono sorgere tra i lettori/utenti di questo volume e di risposte insieme semplici e rigorose in modo che si allarghi l'area della conoscenza di informazioni e di strumenti di valutazione necessari per meglio definire e implementare le migliori strategie capaci di risolvere i complessi problemi portati alla luce dalla ricerca.

La testimonianza di uno scienziato

La scienza ha fatto chiarezza, ora dobbiamo agire

di Giulio De Leo*

Nel 1992, quando con la Conferenza di Rio il problema del contenimento delle emissioni di gas serra cominciò a entrare nell'agenda della diplomazia internazionale, la situazione sembrava ancora molto confusa. La scienza dei cambiamenti climatici non era ancora uscita dalla prima fase embrionale, l'incertezza associata alle previsioni era molto alta e mancavano precise analisi degli andamenti delle principali variabili meteorologiche. Ammesso che i cambiamenti climatici fossero stati una minaccia reale si credeva che i loro effetti si sarebbero manifestati solo molti anni dopo, forse dopo secoli. Sembrava meglio allora rimandare azioni potenzialmente molto costose in attesa che la ricerca scientifica portasse chiarezza.

Oggi, possiamo affermare che **la comunità scientifica internazionale è sostanzialmente unanime sulla valutazione dell'origine e della gravità del problema delle emissioni di gas serra.**

L'evidenza scientifica del cambiamento del clima è ormai molto forte. Gli studi che provano l'esistenza e la dimensione di questi cambiamenti – studi pubblicati su autorevoli riviste scientifiche e, come tali, sottoposti al giudizio severo della comunità scientifica internazionale – sono migliaia e vengono a formare i tasselli di un complesso mosaico di evidenze: **i cambiamenti climatici sono reali, sono già in atto, sono in una fase di accelerazione, sono caratterizzati da una forte componente antropica (sono cioè generati in modo preponderante dalle emissioni di gas serra prodotte dal consumo di combustibili fossili) e le previsioni sui possibili effetti appaiono preoccupanti e non possono lasciarci indifferenti.**

Il tema dei cambiamenti climatici sta lentamente entrando nel linguaggio comune e diventando di dominio pubblico. Ma le immagini satellitari che documentano lo scioglimento delle calotte polari, le grandi inondazioni che hanno colpito i Paesi tropicali, la preoccupazione delle isole della Polinesia di scomparire sotto l'oceano a causa dell'innalzamento del mare hanno finito per radicare in larga parte del mondo occidentale la convinzione che il problema dei cambiamenti climatici, in fondo, non ci riguarderà direttamente; che avverrà "altrove"; che le nostre vite continueranno come prima; che un po' di tecnologia sarà sufficiente per contrastare eventuali effetti dei cambiamenti climatici, se mai si manifesteranno.

Perfino il riferimento all'indicatore più usato per misurare l'entità dei cambiamenti climatici, la temperatura media annuale della Terra, ha finito per creare confusione nella pubblica opinione: infatti, per quanto la crescita della temperatura sia ormai un fenomeno pro-

*Responsabile della linea di ricerca Esternalità, professore ordinario di Ecologia presso il Dipartimento di Scienze Ambientali dell'Università degli Studi di Parma

vato su basi scientifiche molto robuste, quell'aumento di 0,7°C a livello planetario misurato nel corso di un secolo non ci aiuta a capire la gravità del fenomeno perché appare ai nostri occhi quasi insignificante. In realtà, quell'aumento **medio** della temperatura del Pianeta può tradursi in ben maggiori variazioni a livello locale e rappresenta comunque un incremento enorme, in valore assoluto, della quantità di energia che l'atmosfera può trasformare in eventi meteorologici anche disastrosi.

Un altro errore ancora troppo frequente è quello di assimilare lo studio dei **cambiamenti statistici del clima** fra 20 o 50 anni alle **previsioni del tempo** fra 10 o 20 giorni. Molti si chiedono come sia possibile capire come sarà il clima fra qualche decina d'anni se non siamo capaci di fare previsioni del tempo affidabili su orizzonti temporali superiori ai 15-20 giorni. Tuttavia, lo studio delle proprietà statistiche del clima, se pur sempre affetto da grandi incertezze, presenta delle solide basi scientifiche predittive che ci permettono, per esempio, di affermare che anche in Lombardia c'è stata una significativa tendenza all'aumento delle temperature medie annuali e un incremento della frequenza e intensità degli eventi di precipitazione più estremi e che questi fenomeni diventeranno sempre più importanti.

Ora che l'esistenza dei cambiamenti climatici è molto meno controversa e che le sue cause sono molto più chiare, sembra però mancare ancora quel senso di urgenza in grado di mettere in moto i grandi cambiamenti che il genere umano e la società moderna sono capaci di sortire nei momenti di crisi. E per far questo è necessario comprendere a fondo gli effetti che questi cambiamenti climatici globali avranno localmente, anche in Lombardia.

Risulta infatti evidente che la nostra regione – per la sua notevole estensione geografica, la ricchezza di ambienti naturali, la fitta rete idrica, la densità di popolazione, l'intenso uso del territorio e il sistema economico e infrastrutturale che da solo contribuisce al 20% del PIL nazionale – sarà direttamente o indirettamente interessata dagli impatti generati dai cambiamenti climatici.

Siglando l'Accordo Quadro del 2002 con il Ministero dell'Ambiente, la Lombardia è fra le prime regioni d'Europa ad aver preso seriamente a cuore la problematica ambientale posta dal Protocollo di Kyoto e aver deciso di investire risorse nella ricerca e nelle politiche di mitigazione dei gas serra. Il Progetto Kyoto Lombardia nasce da questa sensibilità ad affrontare l'urgenza della climalterazione a partire da consolidate basi scientifiche che hanno permesso di rispondere a interrogativi fondamentali su questi temi, di far maturare una cultura ambientale nei cittadini e di riuscire così ad attuare politiche efficaci.

Sulla base delle conoscenze oggi disponibili, quali saranno gli effetti locali dei cambiamenti climatici in Lombardia? Come ne sarà influenzata la nostra vita? Quali settori del comparto socio-economico e dei sistemi naturali saranno più vulnerabili? Quali sono gli strumenti di intervento e i loro costi per mitigarne le conseguenze? Troverete la risposta a queste e ad altre domande nelle pagine di questo volume.

Dall'ONU alla Lombardia

Il Protocollo di Kyoto, gli accordi internazionali e la strategia dell'Unione Europea

di Mita Lapi*

Poiché le cause (e gli effetti) del problema del cambiamento climatico sono individuabili su una scala globale, la risposta di cui necessita deve contare sull'impegno di tutti i Paesi del mondo. Sin dalla sua entrata in vigore nel 1994, la **Convenzione Quadro sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC)** è stata fondamentale nell'indirizzare la lotta ai cambiamenti climatici e, in particolare, la riduzione e il controllo delle emissioni di gas serra. L'obiettivo della UNFCCC, che è stata sottoscritta da 189 Paesi, è infatti quello di stabilizzare la concentrazione di gas serra in modo da prevenire pericolose interferenze antropiche con il sistema clima.

Il **Protocollo di Kyoto**, trattato figlio della Convenzione, in vigore dal 16 febbraio 2005 e ratificato da 182 Paesi, è l'unica ancorché complessa intesa politica edificata dalle Nazioni Unite su come e quanto ridurre le emissioni di gas climalteranti e su come migliorare le politiche per raggiungere questo obiettivo. Il principio alla base dell'accordo è il vincolo per i Paesi più industrializzati del mondo a ridurre complessivamente del 5,2% le emissioni di gas serra (o gas climalteranti), rispetto ai livelli del 1990 (anno di riferimento), entro il periodo 2008-2012.

Il più rilevante contributo dato dalla Convenzione e dal Protocollo, all'inizio del suo primo periodo d'impegni, è stato quello di aver stimolato la comparsa di una grande varietà di politiche nazionali di riduzione delle emissioni di gas serra (uso più razionale dei combustibili fossili e misure efficaci di risparmio energetico, deciso utilizzo delle energie rinnovabili e netto miglioramento dell'efficienza energetica), l'avvio di nuovi meccanismi istituzionali per il raggiungimento solidale degli obiettivi di riduzione delle emissioni e la creazione di un mercato virtuoso del carbonio.

Gli studi riportati in letteratura scientifica identificano molte opzioni per raggiungere utili risultati in termini di riduzione delle emissioni, entro e al di fuori del Protocollo di Kyoto. Dall'analisi di queste emerge, con ampio grado di condivisione, la convinzione che futuri accordi internazionali (per il "post 2012") avranno maggiore consenso se saranno efficaci dal punto di vista ambientale, dotati di benefici adeguati ai loro costi, e tali da includere aspetti di equità e solidarietà sociale e internazionale. Rendendo lo sviluppo economico del Pianeta socialmente più equo e ambientalmente più sostenibile, si potrà offrire un sostanziale contributo per mitigare il cambiamento climatico (cioè per diminuire la pressione dei fattori antropici sul clima).

I negoziati della Conferenza ONU sui cambiamenti climatici, **COP13**, tenutasi a Bali nel dicembre 2007 (chi scrive era presente come "inviato" della Fondazione), hanno stabilito il processo da seguire (e da concludere entro il 2009) per la definizione di un

*Ricercatrice e Contact Point presso le Nazioni Unite della Fondazione Lombardia per l'Ambiente

nuovo trattato globale che, andando nella direzione prima indicata, impegni tutti i Paesi alla riduzione delle emissioni di gas serra, quando nel 2012 la prima fase del Protocollo di Kyoto sarà terminata.

L'assemblea ha approvato un'agenda di lavoro (**Roadmap di Bali**) che riguarda tre temi chiave: a) i target di riduzione delle emissioni di gas serra dei Paesi principali emettitori; b) gli strumenti per l'adattamento agli impatti dei cambiamenti climatici; c) la diffusione di tecnologie "climate-friendly" e il finanziamento di misure di adattamento e di mitigazione.

L'annesso **Piano di Azione di Bali** ha avviato parallelamente un'azione di cooperazione internazionale per la riduzione delle emissioni globali sul lungo periodo, che si basa sul principio delle "responsabilità comuni, ma differenziate", ma non contiene, come avrebbe voluto l'Unione Europea, una indicazione quantitativa delle riduzioni delle emissioni richieste per i Paesi industrializzati (che viene pertanto lasciata a una decisione futura), ma solo un riferimento alla loro urgenza e il richiamo al documento del Gruppo di Lavoro III (Mitigazione) del Quarto Rapporto dell'IPCC: "come gruppo, i Paesi industrializzati dovrebbero ridurre le proprie emissioni in modo significativo entro il 2020 (10-40% al di sotto dei livelli del 1990) e a livelli ancora più bassi entro il 2050 (40-95% al di sotto dei livelli del 1990) al fine di raggiungere livelli di stabilizzazione bassi o medi (450-550 ppm CO_{2eq})."

In sede internazionale, quindi, il dibattito sulla **seconda fase di Kyoto** è ormai entrato nel vivo: gli obiettivi di cui si parla per la stabilizzazione della concentrazione di gas serra in atmosfera sono di gran lunga più ambiziosi, per l'abbattimento delle emissioni, di quelli posti nella prima fase. Per raggiungere questi obiettivi è richiesto uno sforzo enorme per la mitigazione e l'adattamento: sarà necessario agire con urgenza attraverso l'attuazione di efficaci politiche nazionali e locali. A tal proposito le ultime misure proposte in sede comunitaria sono chiare.

Il 23 gennaio 2008, dimostrandosi ancora leader dell'azione internazionale contro il cambiamento climatico, la Commissione Europea ha infatti tradotto le indicazioni provenienti dalla comunità scientifica in un importante pacchetto di proposte in materia di lotta ai cambiamenti climatici e promozione delle energie rinnovabili, denominato **Climate Action**. Le proposte daranno attuazione agli impegni assunti in sede comunitaria nel corso del 2007, fornendo dettagli su aspetti tecnologici ed economici. Attraverso queste misure si prevede in particolare di accrescere significativamente il ricorso alle fonti energetiche rinnovabili in tutti i Paesi dell'Unione e di imporre ai Governi obiettivi giuridicamente vincolanti.

Questo pacchetto legislativo intende consentire all'Unione Europea di ridurre di almeno il 20% le emissioni di gas serra e porta al 20% la quota di efficienza energetica e al 20% la quota di rinnovabili nel consumo energetico entro il 2020, oltre a norme integrative.

Per soddisfare gli obiettivi del Climate Action dell'Unione Europea è evidente che non si può più operare in modo saltuario o solo con i pur necessari interventi settoriali, ma che è necessario proprio ripensare il modello di sviluppo in tutte le sue componenti.

È un invito che vale ovviamente anche per la prima regione industrializzata d'Italia. Questo volume potrà aiutare a dare una svolta nella direzione giusta.



Questa ricerca

Gli enti promotori, i finanziatori e i protagonisti principali del Progetto Kyoto Lombardia

Soggetti promotori

Fondazione Lombardia per l'Ambiente
Regione Lombardia
ARPA Lombardia

Enti finanziatori

Regione Lombardia
Fondazione Lombardia per l'Ambiente
APAT (oggi ISPRA)
ERSAF Lombardia

Dalla A alla Z le Istituzioni e gli Enti coinvolti

ARPA Lombardia
Associazione Rete di Punti Energia (oggi CESTEC)
Centro Comune di Ricerca (CE)
Comitato Glaciologico Italiano
Consiglio Nazionale delle Ricerche
Consorzio Poliedra
ERSAF Lombardia
Fondazione ENI E. Mattei
Fondazione Lombardia per l'Ambiente
Politecnico di Milano
Regione Lombardia
Università Cattolica del Sacro Cuore
Università degli Studi di Milano
Università degli Studi di Milano Bicocca
Università degli Studi di Parma
Università degli Studi della Tuscia

Comitato Direttivo di Progetto

Rota Ennio
Ballarin Denti Antonio
Giudici Angelo

Regione Lombardia – Coordinatore Comitato
Fondazione Lombardia per l'Ambiente
ARPA Lombardia

Project Leader

Ballarin Denti Antonio

Fondazione Lombardia per l'Ambiente

Project Coordinator

Lapi Mita

Fondazione Lombardia per l'Ambiente

Comitato Scientifico di Progetto

Ballarin Denti Antonio	Fondazione Lombardia per l'Ambiente – Coordinatore Scientifico
Carabelli Marco	Regione Lombardia – Presidenza
Carella Fabio	ARPA Lombardia – Direttore Settore Coordinamento Tecnico per lo Sviluppo Sostenibile (incarico: ottobre 2004)
Carraro Carlo	IPCC – Università Ca' Foscari, Venezia
Clini Corrado	Ministero dell'Ambiente – Direttore generale Direzione Protezione Internazionale dell'Ambiente
Compiani Renzo	ARPA Lombardia – Vice Direttore (dimessosi: settembre 2004)
Gaudioso Domenico	APAT (oggi ISPRA)– Dipartimento Stato dell'Ambiente e Metrologia Ambientale, Servizio Monitoraggio e Prevenzione degli Impatti sull'atmosfera
Prodi Franco	CNR – Direttore, Istituto Scienze dell'Atmosfera e del Clima
Raes Frank	Centro Comune di Ricerca (CE) – Capo Unità Cambiamento Climatico
Valentini Riccardo	CarboEurope Project (UE) – Direttore

Segreteria Tecnica di Progetto

Angelino Elisabetta	ARPA Lombardia
Buganza Elisabetta	Regione Lombardia (incarico: luglio 2005)
Gurrieri Gian Luca	Regione Lombardia (dimessosi: giugno 2005)
Lapi Mita	Fondazione Lombardia per l'Ambiente

Responsabili di linea del Progetto

Caserini Stefano	Politecnico di Milano – Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale, Infrastrutture Viarie, Rilevamento
Linea Emissioni	
De Leo Giulio	Università degli Studi di Parma – Dipartimento di Scienze Ambientali
Linea Esternalità	
Galeotti Marzio	Università degli Studi di Milano – Dipartimento di Discipline Economiche, Aziendali e Statistiche
Linea Scenari e politiche	
Maugeri Maurizio	Università degli Studi di Milano – Istituto di Fisica Generale Applicata
Linea Climatologia	
Seufert Günther	Centro Comune di Ricerca (CE) – Istituto per l'Ambiente e la Sostenibilità
Linea Stima e mappatura dei carbon sinks e stocks	

Capitolo 1

CLIMATOLOGIA Come sta cambiando il clima in Lombardia

I RISULTATI IN BREVE

Da vari decenni le temperature medie annuali in Lombardia tendono ad aumentare a un ritmo di crescita doppio rispetto a quello medio della Terra: circa 1,5-2 gradi centigradi negli ultimi 150-200 anni

Precipitazioni annue: pur non variando come media annua, aumentano in frequenza e intensità gli eventi di precipitazione più "estremi" e risulta alterata la distribuzione stagionale e territoriale.

È inoltre evidente un vistoso arretramento di tutti i ghiacciai lombardi (con diminuzione di massa e di superficie) e delle aree innevate: se non si modificherà questa tendenza, il rischio concreto è che, a metà di questo secolo, i ghiacciai lombardi saranno praticamente scomparsi.

1.1 – I nomi chiave di questa linea di ricerca



Maurizio Maugeri è il responsabile della linea di ricerca Climatologia del Progetto Kyoto Lombardia. È professore associato presso l'Università degli Studi di Milano, ove insegna Fisica dell'Atmosfera nell'ambito del Corso di Laurea in Fisica. Ha quasi 20 anni di esperienza nel campo della fisica dell'atmosfera, settore nel quale ha pubblicato circa 150 lavori, oltre 50 dei quali su riviste scientifiche internazionali. Le sue ricerche sono prevalentemente indirizzate verso la ricostruzione dell'evoluzione del clima italiano, della regione alpina e dell'area mediterranea.

La linea di ricerca da lui coordinata ha visto il contributo di sei unità operative che indichiamo qui di seguito con i nomi dei responsabili del team e il tema principale da loro affrontato:

- | | |
|-------------------|--|
| Unità Operativa 1 | Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Fisica (<u>Maurizio Maugeri</u>): il clima nei dati di temperatura e di precipitazione. |
| Unità Operativa 2 | Università Cattolica del Sacro Cuore, Dipartimento di Matematica e Fisica (<u>Massimo Sancrotti</u> †) : il recupero e l'omogeneizzazione dei dati termopluviometrici. |
| Unità Operativa 3 | Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Scienze della Terra (<u>Claudio Smiraglia</u>): l'evoluzione della risorsa ghiacciai in Lombardia. |
| Unità Operativa 4 | Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale, Infrastrutture Viarie e Rilevamento (<u>Renzo Rosso</u>): cambiamenti climatici e ciclo idrologico nella regione Lombardia. |
| Unità Operativa 5 | Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali (<u>Adalberto Notarpietro</u>): cambiamenti climatici e dissesto geologico in Lombardia. |
| Unità Operativa 6 | ERSAF Lombardia (<u>Antonio Tagliaferri</u>): il ruolo del cambiamento climatico sui sistemi agroforestali lombardi. |

Nota: nomi e cognomi degli altri collaboratori sono riportati a pagina 259 del capitolo Tutti i protagonisti della ricerca.

1.2 – Obiettivi e metodi del gruppo di ricerca

La linea di ricerca Climatologia si è innanzitutto posta l'obiettivo di recuperare, per la regione Lombardia, un'ampia base di serie storiche di dati meteorologici, idrologici e glaciologici e di effettuare una serie di analisi sui dati raccolti. Essa si è inoltre proposta di indagare, per un'area campione (bacino del torrente Staffora nell'Oltrepò Pavese), le relazioni tra gli eventi meteorologici e i dissesti geologici e di verificare se i segnali evidenziati dall'analisi delle serie storiche di dati meteorologici della Lombardia possano avere causato significativi effetti sul settore agricolo e forestale.

Infine essa si è proposta di mettere a punto una metodologia per proiettare sia le informazioni sull'evoluzione delle temperature e delle precipitazioni nel passato, sia quelle relative agli scenari futuri su un grigliato ad alta risoluzione, in modo da far sì che per ogni punto del territorio regionale si potessero avere informazioni sul clima del passato, del presente e su quello atteso per il futuro.

1.3 – Sintesi dei risultati ottenuti

1.3.1 – Recupero, valutazione critica e omogeneizzazione di nuove serie di dati

Tutte le unità operative della linea di ricerca hanno condotto attività volte sia al recupero di nuove serie di dati che al miglioramento di quelle esistenti.

In particolare le unità operative 1, 2, 3 e 6 si sono concentrate sulle serie di dati meteorologici (unità 1, 2 e 6) e glaciologici (unità 3) dell'intero territorio regionale, mentre le unità operative 4 e 5 hanno considerato solo specifici bacini idrologici. Tra i risultati più interessanti ottenuti nel contesto del recupero di nuove serie di dati, segnaliamo il notevole incremento nella disponibilità di serie storiche secolari di dati termometrici e pluviometrici lombardi. Questo

Finalmente abbiamo serie secolari di dati riguardanti temperatura e precipitazioni in tutta la Lombardia

incremento ha permesso di colmare una grave lacuna che faceva sì che la Lombardia fosse una delle regioni dell'Italia settentrionale con la più bassa densità di serie di questo tipo. Questa lacuna riguardava in modo particolare l'area pedemontana e quella montana (figura 1.1 a pag. 33).

Oltre a recuperare i dati, si è dedicata grande attenzione anche a validarli e a omogeneizzarli. Quest'ultimo processo è molto delicato e va effettuato con grande attenzione per non introdurre nuovi errori, ma è comunque un passaggio da cui non si può assolutamente prescindere poiché l'alternativa è possedere dati non confrontabili e non in grado di fornire indicazioni climatiche realistiche, soprattutto per le analisi a lungo termine.

L'esigenza di completare il recupero e la digitalizzazione dei dati con le procedure di validazione e di omogeneizzazione fa sì che l'ampliamento delle basi di serie storiche di

dati meteorologici sia un'attività molto onerosa, soprattutto in termini di risorse umane. Questa attività peraltro non è sempre facile da includere nei progetti di ricerca, in quanto gli stessi si propongono solitamente risultati più legati all'analisi dei dati che al loro recupero. Accade quindi di frequente che un passo assolutamente necessario per la comunità scientifica (senza buoni dati non si può fare buona scienza) costituisca un aspetto non facile da trattare nell'ambito di progetti di ricerca finanziati da enti esterni.

Accanto ai risultati relativi alle serie di dati meteorologici, segnaliamo anche quelli relativi alle serie di dati glaciologici. Per queste serie si è provveduto a incrementare, completare e aggiornare al 2004 le informazioni esistenti, aggiungendo alla base di dati già disponibile nuovi dati di variazione frontale e di bilancio di massa. I dati sono stati omogeneizzati e le lacune temporali sono state colmate attraverso l'utilizzo di dati medi pluriennali.

1.3.2 – La geografia delle temperature e delle precipitazioni in Lombardia

Disporre di un adeguato numero di lunghe serie storiche di dati meteorologici non è una condizione sufficiente per poter valutare l'impatto della variabilità e dei cambiamenti climatici. Queste valutazioni richiedono infatti solitamente che i dati forniti si riferiscano a ben determinate località.

È quindi opportuno corredare i dati con metodologie che permettano di portare le informazioni contenute nelle serie a un livello il più possibile vicino alla scala locale, ovvero che consentano di spazializzare

in modo opportuno i dati. In pratica, se si intende fornire un valido strumento in grado di soddisfare la precedente esigenza per ogni punto del territorio, è necessario ricavare dalle serie realmente disponibili nuove serie riferite ai nodi di un grigliato con elevata risoluzione spaziale.

Queste serie non possono essere ottenute con un approccio statistico elementare, in quanto la risoluzione richiesta è dell'ordine del chilometro quadrato, mentre le serie storiche attualmente disponibili non hanno una così elevata risoluzione spaziale. È quindi necessario procedere con un approccio basato su un'integrazione tra i dati che possono essere forniti dalle serie osservative e i risultati di appositi modelli volti a proiettare le informazioni su un numero di punti superiore di due o tre ordini di grandezza al numero delle serie disponibili.

In questo contesto si è messa a punto una metodologia per la proiezione delle serie storiche su un grigliato ad alta risoluzione (1 km²). Essa si basa sui seguenti passi fondamentali. Innanzitutto le lunghe serie storiche disponibili vengono trasformate in serie mensili di anomalie rispetto ai valori medi del periodo di riferimento 1961-1990. Queste serie di anomalie hanno una elevata coerenza spaziale e possono essere proiettate su griglia (ovvero spazializzate) mediante algoritmi statistici standard. Una volta proiettate su griglia le serie storiche espresse come anomalie, si procede alla costruzione di una pro-

Le lunghe serie storiche sono state trasformate in serie mensili di anomalie rispetto ai valori medi del periodo di riferimento 1961-1990

cedura che consente di stimare i valori medi mensili termometrici e pluviometrici del periodo di riferimento scelto (1961-1990) per ognuno dei punti del grigliato su cui si sono proiettate le serie in anomalie; queste medie prendono il nome di valori normali (o normali climatiche o ancora, in inglese, CLINOs, ovvero CLImatic NORmals), mentre la loro distribuzione spaziale prende il nome di climatologia.

Le climatologie vanno ovviamente prodotte per ogni mese dell'anno e quindi avremo 12 diverse climatologie per ognuna delle variabili considerate. Una volta disponibili le anomalie e le climatologie sul medesimo grigliato, si procede semplicemente a sovrapporre i due campi per ottenere le serie storiche stimate per ognuno dei punti del grigliato.

Ora però, mentre la procedura di spazializzazione delle anomalie è stata realizzata con procedure statistiche standard, la costruzione delle climatologie ha richiesto un notevole sforzo, sia in termini di acquisizione di nuovi dati, sia in termini di definizione di nuove metodologie.

Le climatologie termometriche sono state ottenute costruendo un apposito modello geografico che tiene conto di molti fattori. Il più importante è ovviamente la quota, ma oltre a essa, viene considerato anche l'effetto dovuto all'accumulo di masse d'aria fredda nel bacino padano durante i mesi invernali, l'effetto dei laghi, l'effetto dell'isola di calore dovuta ai grandi centri urbani, l'effetto dovuto all'esposizione geografica della

porzione di territorio considerata, l'effetto dovuto alla concavità o alla convessità del suolo (effetti valle/cima), e così via. Il modello è stato costruito sulla base dell'analisi della dipendenza delle temperature di diverse centinaia di stazioni dai precedenti fattori geografici. Esso è poi stato codificato in un apposito programma che permette, per ogni mese dell'anno, di associare ai dati di un DEM (Digital

Abbiamo tenuto conto della presenza di alte montagne e di altre zone con microclimi difficili da interpretare

Elevation Model) un valore normale di temperatura per ogni punto di griglia.

Le climatologie pluviometriche sono invece state ottenute con un modello di tipo PRISM (Parameter/Precipitation-elevation Regression on Independent Slope Models). I modelli PRISM sono strumenti analitici di interpolazione che consentono di tenere conto delle situazioni più complesse, come la presenza di alte montagne, di regioni lacustri o costiere e di altre zone con microclimi di difficile interpretazione e modellizzazione. L'aspetto più importante di questi modelli in relazione alla costruzione delle climatologie pluviometriche è che essi riescono a "catturare" la complessità del legame tra le precipitazioni e le quote, esprimendo per ogni area geografica la relazione più adatta a descrivere il fenomeno.

Sia la costruzione del modello geografico che l'applicazione del modello di tipo PRISM hanno richiesto la raccolta di una grande base di dati osservativi. Fortunatamente con questi dati non ci si proponeva di cogliere l'aspetto relativo all'evoluzione temporale (le climatologie si riferiscono a un ben determinato periodo di riferimento); non è

quindi stato necessario raccogliere serie secolari, ma è stato sufficiente avere serie atte a poter definire normali climatiche, ovvero serie di lunghezza dell'ordine dei 30 anni (figure 1.2 e 1.3 a pag. 34).

1.3.3 – Variabilità e cambiamenti climatici in Lombardia nel corso degli ultimi due secoli

Osservando l'andamento della serie lombarda relativa alle medie annuali delle anomalie delle temperature medie (figura 1.4 a pag. 35), è possibile notare che i valori si mantengono piuttosto bassi fino a prima del 1860, con il 1816 identificabile come l'anno più freddo dell'intero periodo 1800-2007. Successivamente si nota una tendenza graduale verso valori via via più alti il cui contributo maggiore proviene dagli anni Sessanta e Novanta del XIX secolo e dagli anni Venti e Quaranta del XX secolo. Quindi, dopo un massimo relativo raggiunto intorno al 1950 (il più rilevante dell'intera serie, se si eccettuano gli ultimi due decenni) si ha una leggera diminuzione fino agli anni Settanta, seguita da un nuovo periodo di forte crescita che culmina nel periodo più recente in cui troviamo gli anni più caldi dell'intera serie, il 2003 e il 2007; in realtà il record assoluto spetta al 2007 (1,67°C in più rispetto alla media del periodo 1961-1990), ma il valore del 2003 (+1,63°C) è pressoché uguale. L'analisi delle serie termometriche stagionali mostra differenze significative tra le diverse stagioni. In particolare, il forte riscaldamento che ha caratterizzato gli ultimi due decenni è particolarmente evidente in primavera ed estate ed è meno accentuato in autunno e inverno. Anche il massimo relativo riscontrato nella serie annuale intorno al 1950 è principalmente dovuto alla stagione estiva e a quella primaverile, nelle quali in questo periodo si sono avute temperature confrontabili con quelle degli anni Novanta.

*In Lombardia
gli anni più caldi si sono
registrati negli ultimi
decenni, con il record
assoluto del 2007*

È anche interessante notare come due importanti estremi della serie, ossia i valori del 1816 (l'anno più freddo) e del 2003 (uno dei due anni più caldi), siano principalmente legati alla stagione estiva; essi corrispondono a due eventi ben noti e ampiamente studiati, ossia l'estate fredda dell'anno 1816, noto anche come "anno senza estate" e la prolungata ondata di calore del 2003.

L'evento del 1816 fu successivo a un periodo di quattro anni segnato da forti eruzioni vulcaniche, la più violenta delle quali fu quella del vulcano indonesiano Tambora nell'aprile 1815. È curioso ricordare che, nel giugno dell'anno senza estate, Mary Shelley cominciava a scrivere, in Svizzera, la storia di Frankenstein, o il Prometeo moderno, legata a una scommessa ispirata proprio dalle avverse condizioni meteorologiche.

L'altro anno più caldo (il 2007) è invece legato alla stagione invernale e a quella primaverile per le quali si sono registrati i valori più alti dell'intera serie, con anomalie, rispettivamente, di 3,1°C e di 2,9°C oltre le medie del periodo 1961-1990. Se a ciò si aggiunge

l'elevata anomalia dell'autunno precedente (+2,1°C, che rappresentano il massimo assoluto per l'autunno), si nota la fortissima anomalia del recente episodio caldo che ha avuto luogo dal settembre 2006 al maggio 2007.

È peraltro evidente come la forte concentrazione dei massimi assoluti negli ultimi anni delle serie sia una ovvia conseguenza del forte incremento di temperatura che ha caratterizzato gli ultimi decenni.

Passando dalle temperature alle precipitazioni (figura 1.5 a pag. 36), osserviamo per i totali annui una sequenza di massimi e minimi relativi, sovrapposta a una leggera diminuzione. I valori più alti si sono raggiunti tra gli anni Quaranta e gli anni Cinquanta del XIX secolo, mentre i valori più bassi si riferiscono agli anni Quaranta del XX secolo. Si osservino anche i valori piuttosto bassi che si sono susseguiti nel corso degli ultimi 5

anni. A livello stagionale il dato forse più interessante è l'elevata frequenza di valori piuttosto bassi nella stagione invernale nel corso degli ultimi 20 anni. Questo dato, unitamente al forte incremento delle temperature, ha sicuramente avuto significative ripercussioni sulle precipitazioni nevose nelle aree montuose, con un notevole impatto negativo sul turismo invernale.

*In Lombardia
l'aumento di temperatura
è stato di 1,8°C
nel periodo 1800-2007*

Per quanto riguarda i trend di lungo periodo, il segnale delle serie termometriche è piuttosto omogeneo per tutte le stagioni. A livello di medie annuali l'aumento, stimato mediante la regressione lineare, risulta di 1,1°C per secolo. Questo valore si riferisce al periodo 1865-2007, ovvero al periodo per il quale si ha la massima affidabilità, sia in termini di omogeneità dei dati che di copertura spaziale delle serie disponibili. Se si considerano anche i dati precedenti al 1865, si ottiene una stima leggermente differente (0,9°C per secolo). Moltiplicando questi ratei di incremento per la lunghezza dei corrispondenti periodi si ottiene un aumento di 1,5°C per il periodo 1865-2007 e di 1,8°C per il periodo 1800-2007.

In realtà la valutazione dei trend mediante una regressione lineare fornisce un'informazione molto povera su quella che è stata la variabilità della temperatura nel periodo 1865-2007. Per un'analisi più rigorosa occorre considerare diversi periodi e diverse scale temporali. A questo proposito, un'informazione più minuziosa ci è fornita dalla running-trend analysis. Essa consiste nel valutare i trend su finestre temporali di larghezza variabile (da un minimo di 20 anni a un massimo pari all'intero periodo coperto dai dati), che vengono fatte "muovere" lungo tutta la lunghezza della serie. A titolo esemplificativo si sottolinea (figura 1.6 a pag. 37) che, nonostante sull'intero periodo 1865-2007 il trend è positivo, nei primi 30-35 anni della serie si ha un trend negativo. Altro aspetto interessante è costituito dagli ultimi decenni, per i quali il trend è chiaramente più pronunciato.

Per quanto riguarda le precipitazioni, la regressione lineare evidenzia un leggero calo dei valori totali annuali. Esso risulta dell'ordine del 5% per secolo ed è principalmen-

te legato alla stagione primaverile, per la quale la diminuzione è vicina al 10% per secolo. Anche in questo caso, comunque, i trend sull'intero periodo 1865-2007, forniscono solo un'informazione molto limitata sulla complessa evoluzione delle precipitazioni lombarde nel corso degli ultimi 150 anni circa.

Anche per le precipitazioni è quindi necessario considerare, accanto ai trend relativi all'intero periodo 1865-2007, i risultati della running-trend analysis (figura 1.7 a pag. 37). Essi evidenziano come le finestre senza trend significativi siano relativamente frequenti, mostrando come il trend negativo delle precipitazioni non emerga poi in modo così chiaro dai dati.

Per quanto riguarda le precipitazioni si è anche proceduto a verificare se la tendenza verso un'accentuazione dell'intensità delle precipitazioni evidenziata recentemente per varie aree del nostro Pianeta sia riferibile anche all'Italia. Questo aspetto è particolarmente interessante in quanto il nostro Paese, in virtù di svariati elementi caratteristici quali la presenza della catena alpina e appenninica, la vicinanza del Mediterraneo e l'elevata densità della popolazione, ha una naturale propensione al rischio alluvioni, il che lo rende criticamente esposto a un eventuale incremento degli eventi precipitativi di forte intensità.

I risultati evidenziano come, accanto a variazioni non significative delle precipitazioni totali, si sia registrata negli ultimi 100-120 anni una sensibile e altamente significativa diminuzione del numero totale di eventi precipitativi (mediamente del 10% dal 1880 a oggi). Tale andamento, tuttavia, non è uniforme su tutta la distribuzione statistica delle piogge giornaliere, bensì presenta comportamenti opposti se si considerano gli eventi di bassa intensità e quelli più intensi, essendo in calo i primi e in aumento gli ultimi.

Questo risultato era già disponibile prima dell'avvio del Progetto Kyoto Lombardia; nell'ambito di questo progetto esso è stato ulteriormente verificato, mediante l'analisi di un database più ampio e, soprattutto, con una migliore copertura delle aree pedemontane e montane (figura 1.8 a pag. 38).

In Italia negli ultimi 120 anni le precipitazioni totali sono diminuite. Inoltre, da una parte gli eventi di bassa intensità sono in calo, dall'altra quelli più intensi sono in aumento

1.3.4 – Scenari di cambiamento climatico

Nell'ambito del Progetto Kyoto Lombardia ci si è anche proposti di ottenere proiezioni quanto più solide possibili circa l'andamento futuro delle temperature e delle precipitazioni nell'area lombarda. Queste proiezioni hanno costituito il dato di base per una serie di valutazioni sull'impatto dei cambiamenti climatici attesi in Lombardia per il prossimo futuro, condotte dalla linea di ricerca Esternalità.

L'aspetto più problematico connesso alla costruzione di proiezioni relative all'evoluzione del clima è che i dati forniti da organi internazionali quali l'IPCC non possono essere utilizzati in modo immediato perchè essi sono prodotti con modelli che "lavorano" a

una risoluzione geografica del tutto insufficiente per un territorio orograficamente complesso come quello lombardo. Una simile lacuna in termini di risoluzione spaziale, unitamente a vari altri problemi aperti, induce a considerare con estrema cautela gli output “immediati” o “grezzi” dei modelli climatici.

Nell’ambito del Progetto Kyoto Lombardia ci si è quindi concentrati sul problema di adattare le simulazioni di scenario alla complessità geografica del territorio lombardo. Oggi, a conclusione delle attività del Progetto Kyoto Lombardia, possiamo dire che siamo in grado di produrre serie di scenario adattate a ogni punto del territorio regionale lombardo.

1.3.5 – Addio ghiacciai lombardi

Un importante risultato della linea di ricerca Climatologia è stato quello di concorrere a una migliore conoscenza della dinamica recente dei ghiacciai lombardi. Questo risultato è stato raggiunto grazie alle attività dell’unità operativa 3 che, in collaborazione con il Comitato Glaciologico Italiano, ha innanzitutto proceduto ad avviare una sistematica raccolta e un’accurata organizzazione dei dati disponibili.

Finalmente abbiamo una banca dati aggiornata delle variazioni frontali e dei bilanci della massa dei ghiacciai lombardi

Le osservazioni considerate sono state fondamentalmente di due tipi: 1) le variazioni frontali; 2) i bilanci di massa. Si tratta di parametri che sono raccordabili alle

dinamiche climatiche con due modalità diverse, ma complementari. Le variazioni frontali, ovvero le misure annuali delle variazioni di lunghezza di un ghiacciaio, costituiscono infatti l’ultimo anello di una successione di eventi che, partendo da una perturbazione climatica globale, si concretizza in una perturbazione climatica locale, seguita da uno squilibrio del bilancio di massa del ghiacciaio, da una trasmissione di massa per raggiungere un nuovo equilibrio e, infine, dalla risposta della fronte.

Il bilancio di massa esprime invece le variazioni di massa durante un anno idrologico; esso rappresenta la differenza fra le entrate (accumulo) e le uscite (ablazione) e fornisce quindi una risposta immediatamente correlabile con i parametri meteorologici dell’anno di riferimento. Le osservazioni di variazione frontale e di bilancio di massa richiedono tecniche di raccolta dati molto diverse, in termini di competenza degli operatori, disponibilità strumentale, impegno logistico e così via. Questo fatto, unito ovviamente al progresso della ricerca, ha fatto sì che, mentre le misure di variazione frontale siano iniziate sulle Alpi italiane e in particolare lombarde nel 1895, i bilanci di massa siano stati avviati solo molto più tardi.

La raccolta dei dati ha comportato sia attività di recupero e di digitalizzazione di nuove serie già disponibili su supporto cartaceo (soprattutto le pubblicazioni del Comitato Glaciologico Italiano e alcuni bollettini del Club Alpino Italiano di fine Ottocento), sia attività di campo. Tra le attività di campo si segnalano i rilievi di bilancio di massa

condotti su due ghiacciai campione delle Alpi lombarde. Questi rilievi sono stati effettuati sia con metodi tradizionali (utilizzo della rete di paline ablatometriche, cioè di speciali sonde infisse nei ghiacci), sia con tecniche innovative di tipo topografico che permettono di ricavare le differenze di spessore e quindi il bilancio di massa.

Una volta completata la fase di acquisizione, i dati sono stati sottoposti a una accurata fase di validazione. I dati validati sono quindi stati organizzati in un'apposita banca dati, costituita da tabelle contenenti i nominativi di ciascun ghiacciaio e le variazioni frontali occorse nell'intervallo temporale analizzato, oltre a un insieme di informazioni geografiche come la tipologia del ghiacciaio (distinguendo se si tratta di un ghiacciaio, di un glacionevato o di un apparato estinto), le coordinate geografiche, il bacino idrografico il gruppo montuoso di appartenenza.

La banca dati glaciologica organizzata nell'ambito del Progetto Kyoto Lombardia è stata elaborata sia con l'obiettivo di analizzare le curve tempo-distanza esplicative della dinamica frontale dei ghiacciai lombardi sia con l'intento di studiare la coerenza spaziale e la presenza di eventuali sfasamenti temporali del segnale climatico registrato da parte dei diversi ghiacciai analizzati. Si sono anche considerate le relazioni tra variazioni frontali e fattori morfologici e dimensionali, per verificare l'influenza di questi ultimi nel modulare la risposta dei ghiacciai alle perturbazioni climatiche.

Il dato più chiaro che emerge dall'analisi delle serie glaciologiche è che i ghiacciai lombardi stanno subendo una riduzione di forte entità per lunghezza, per superficie e per volume, da circa un secolo e mezzo, che negli ultimi due decenni potrebbe essere definita un vero e proprio "collasso". Per quanto riguarda le variazioni di lunghezza, ovvero per il parametro per il quale si dispone di serie di misure più lunghe, i 70 ghiacciai considerati appaiono in netto regresso.

Da un secolo e mezzo i ghiacciai della Lombardia stanno subendo una riduzione di forte entità per lunghezza, superficie e volume

In sintesi si può quindi affermare che si conferma una netta e intensa fase di regresso glaciale per tutti i più importanti ghiacciai della Lombardia con valori totali che per i ghiacciai che dispongono di un ottantennio di misure oscillano fra i 1.729 metri dei Forni, i 960 metri del Ventina, gli 876 metri del Caspoggio fino ai 271 metri dello Sforzellina (figure 1.9-1.13 e tabella 1.1 da pag. 39 a pag. 42).

Emerge anche che i ghiacciai più estesi o più lunghi presentano variazioni medie annue più elevate, mentre ghiacciai di minore estensione areale e/o più corti hanno subito variazioni frontali medie annue più limitate. Sono quindi i ghiacciai vallivi che hanno le fronti alle quote più basse, e normalmente presentano maggiore lunghezza e più ampie superfici, a risentire in misura maggiore dell'incremento termico in atto. Il loro regresso è quindi la risposta a una variazione nel delicato equilibrio fra ablazione e accumulo; la reazione si concretizza nel ricollocare le proprie fronti a una quota superiore in condi-

zioni climatiche che permettano di recuperare quell'equilibrio. L'accelerazione del regresso all'inizio del XXI secolo sembra però indicare che un nuovo equilibrio non sia

ancora stato recuperato. È del resto molto improbabile che un equilibrio di questo tipo possa venire raggiunto nel prossimo futuro, visto che gli scenari previsti indicano un'ulteriore accentuazione della crescita delle temperature.

Un'ulteriore conferma della situazione di netta degradazione delle masse glaciali lombarde deriva dai dati dei bilanci di massa che indicano una costante riduzione di spessori e di volume dei ghiacciai campione

(Sforzellina, riduzione totale di spessore di 18 m dal 1987 al 2004; Dosedè di 9 m dal 1996 al 2004) di circa 1 metro all'anno. Se si tiene conto che gli spessori medi dei ghiacciai lombardi raramente superano qualche decina di metri, è ipotizzabile che il loro tempo di sopravvivenza sia di circa mezzo secolo.

Il collasso dei ghiacciai lombardi è vicino: potrebbero scomparire entro mezzo secolo

1.3.6 – Cambiamenti climatici e ciclo idrologico lombardo

La linea di ricerca Climatologia è riuscita altresì a concorrere a una migliore definizione dei passi necessari per poter studiare in modo quantitativo la sensibilità del ciclo idrologico lombardo alla variabilità e ai cambiamenti climatici. Questo risultato è stato raggiunto grazie alle attività condotte dall'unità operativa 4 che ha provveduto a mettere a punto e a utilizzare, per due bacini lombardi campione (Adda e Oglio), un modello afflussi-deflussi in grado di affrontare complessivamente il problema, soprattutto in termini di sensibilità sui deflussi.

Una volta messo a punto il modello sulla base del confronto delle simulazioni ottenute con i dati osservati reali, esso è anche stato utilizzato per operare una prima valutazione della sensibilità dei bacini studiati agli scenari di cambiamento climatico previsti per i prossimi decenni.

Le attività svolte hanno consentito di ottenere buoni risultati, evidenziando un ragionevole accordo tra simulazioni modellistiche e dati osservativi, ma hanno anche messo in evidenza la grande difficoltà ad affrontare in modo quantitativo il problema dell'impatto della variabilità e dei cambiamenti climatici sul ciclo idrologico lombardo.

Un primo aspetto problematico riguarda i dati osservativi, soprattutto in relazione alle variabili idrologiche. La situazione generale della Lombardia ha infatti evidenziato carenze nelle serie storiche, così come nella loro organizzazione e disponibilità. È quindi stato necessario dedicare una significativa frazione delle risorse disponibili al lavoro di reperimento e raccolta dei dati.

Nonostante questi sforzi, i dati raccolti non sono risultati del tutto sufficienti: questo problema evidenzia ancora una volta la forte esigenza della comunità scientifica di poter disporre di una buona base di dati di alta qualità e evidenzia in modo molto chiaro il valore strategico che assumono le risorse destinate al recupero e all'organizzazione dei dati.

Un ulteriore aspetto problematico è costituito dall'intrinseca incertezza degli scenari. Ciò è dovuto sia al fatto che i complessi rapporti e meccanismi che governano il ciclo idrologico sono solo parzialmente conosciuti sia alla circostanza che le incertezze negli afflussi si propagano necessariamente anche sulle stime dei deflussi, sia a livello della componente superficiale che di quella sotterranea.

Comunque, al di là delle incertezze e dei molti problemi aperti, ciò che realmente sembra emergere dalle simulazioni di scenario relative a un periodo collocato intorno alla metà del XXI secolo è un aumento delle portate, che sfiora in alcuni casi il raddoppio, in corrispondenza dei picchi di portata: il dato è particolarmente significativo considerando anche la diminuzione dei giorni di pioggia. Conseguentemente si potrebbero porre seri problemi di esondazioni e piene nei bacini studiati. Oltre all'aumento quantitativo dei volumi di piena si potrebbe assistere a un aumento della ricorrenza con cui le acque dei fiumi lambiranno pericolosamente gli argini, provocando di conseguenza anche un aumento del rischio idrogeologico. Probabilmente si renderà necessaria una nuova mappatura delle aree a rischio, rendendo vulnerabili zone che fino a oggi erano considerate a basso rischio.

I modelli utilizzati evidenziano per i prossimi decenni un aumento del rischio idrogeologico e una nuova geografia delle aree a rischio

Si sottolinea, inoltre, che il modello idrologico prescelto si è dimostrato adattabile e flessibile, dando ottime risposte anche in presenza di evidenti carenze nelle variabili di ingresso. Grazie a queste prestazioni, pertanto, si può indicare il modello come punto di riferimento rispetto ad altre e successive applicazioni.

1.3.7 – Gestire i dissesti geologici lombardi

Nell'ambito della linea di ricerca Climatologia è stata altresì migliorata la definizione dei passi necessari per poter gestire efficacemente, nel contesto di un clima che cambia, i problemi connessi con la vulnerabilità del territorio regionale a fenomeni di dissesto geologico.

Il problema del dissesto geologico riguarda un'elevata frazione delle comunità insediate in aree montane e collinari, non solo in Lombardia, ma nell'intero territorio nazionale. Di conseguenza, si è resa assolutamente necessaria, nel corso degli anni, la messa a punto e la conseguente adozione di una strategia di analisi orientata alla valutazione, previsione, prevenzione e mitigazione dei rischi, andando a investigare non solo gli eventi specifici, ma soprattutto le interazioni tra gli eventi e i fattori umani e ambientali allocati sul territorio. Ciò è vero non solamente in un contesto di analisi del rischio ma, più in generale, nell'ambito di una strategia finalizzata a una corretta ed efficiente pianificazione territoriale. Nell'ambito di questo contesto generale, l'unità operativa 5 ha messo a punto una metodologia di lavoro in grado di confrontarsi con diversi elementi critici.

Nell'ambito delle attività condotte all'interno del Progetto Kyoto Lombardia sono stati considerati e analizzati criticamente molti dei precedenti aspetti, al fine di sviluppare una strategia, continuamente modificabile e aggiornabile, finalizzata alla previsione di eventi calamitosi e, quindi, alla riduzione dell'entità delle possibili perdite.

In particolare sono stati analizzati i meccanismi sottesi ai movimenti franosi cartografati nell'ambito di un'opportuna area pilota (il bacino del torrente Staffora), cercando, tra l'altro, di correlare gli accadimenti (mappati nel corso degli anni) alla situazione di cambiamento climatico in atto (soglie di precipitazione/innesco fenomeni franosi) e al contesto di modifica nelle destinazioni d'uso del suolo sopravvenute nel corso degli anni.

Adesso possiamo disporre della mappa aggiornata dei versanti dei nostri rilievi a rischio di frane

Entrambi i fattori trovano correlazione con la frequenza e con l'intensità dei processi franosi.

Inoltre, attraverso modelli previsionali a scala di bacino, è stata valutata e opportunamente mappata la predisposizione dei versanti a generare eventi

franos. Queste valutazioni sono state effettuate per ambienti caratterizzati da un'elevata densità di fenomeni franosi, relativi sia ad aree alpine che appenniniche (valle dell'Adda e dello Staffora, Pavia). Sulla base dei risultati ottenuti, è stata poi identificata una serie di scenari di rischio, considerando le aree potenzialmente pericolose e gli elementi a rischio allocati in corrispondenza delle stesse.

Nell'ambito del Progetto sono anche state considerate e analizzate le mutue interazioni tra eventi dannosi e fattori umani. È stato così possibile quantificare le perdite subite a seguito dell'accadimento di un evento franoso e, in funzione della disponibilità e della completezza dei dati, eseguire una valutazione della componente sia diretta, sia indiretta delle perdite.

Si sono anche ipotizzate e gestite una serie di situazioni di emergenza, mediante l'allestimento di linee guida per la definizione di Piani di Protezione civile. Tali azioni risultano finalizzate alla definizione di linee di intervento per la salvaguardia delle persone, sulla base delle risorse effettivamente utilizzabili, sfruttando la miglior tecnologia disponibile e formando figure professionali, al fine di superare potenziali situazioni di crisi.

Nel contesto appena delineato, la tecnologia GIS fornisce strumenti molto efficaci in fase di archiviazione, gestione, analisi e rappresentazione dei dati disponibili, spazialmente georeferenziati. Sfruttando tali strumenti, si è giunti alla definizione degli scenari di pericolosità e rischio, nonché alla caratterizzazione degli stessi mediante semplici, ma rapide interrogazioni del database appositamente costruito. A tal proposito, è stato utilizzato un particolare software GIS (PETer, Protezione e Emergenza Territoriale), finalizzato a costruire e a mantenere i Piani di Protezione Civile, in accordo alla legislazione vigente, nazionale e locale.

1.3.8 – Cambiamenti climatici e sistemi agro-forestali lombardi

La linea di ricerca Climatologia ha indagato altresì la vulnerabilità dei sistemi agricoli lombardi ai cambiamenti climatici. A questo proposito si può innanzitutto osservare che, sebbene non vi siano evidenze inconfutabili sugli effetti del cambiamento climatico sull'agricoltura lombarda, è necessario evidenziare che tra le principali colture vi siano diversi livelli di suscettibilità. In particolare tra le colture erbacee occorre distinguere tra colture C3 (vite, ortaggi, frumento, orzo) e C4 (mais, girasole), in funzione dei prodotti della fotosintesi. In particolare tra le colture C3 autunno-vernine (orzo e frumento) si può considerare che le produzioni lombarde siano già inferiori a quelle d'Oltralpe (Francia e Germania) a causa delle temperature che caratterizzano la fine del ciclo di maturazione che, nella maggioranza dei casi, tendono a velocizzare il riempimento della granella e quindi a ridurre la quantità di carboidrati totali traslocati nella spiga. Questo si traduce in produzioni inferiori a quelle potenziali. Su queste colture, temperature primaverili più elevate e precipitazioni inferiori potrebbero ulteriormente diminuire la produzione finale. Anche sulle piante C4 (in Lombardia sostanzialmente il mais) le maggiori temperature e gli stress idrici estivi potrebbero abbreviare il ciclo di maturazione con diminuzione delle produzioni finali.

All'interno di questo contesto generale l'unità operativa 6 ha svolto nel Progetto Kyoto Lombardia sia attività connesse al recupero di serie storiche di dati meteorologici, sia attività volte a meglio comprendere e a modellizzare in modo quantitativo il complesso legame tra meteorologia e produttività dei sistemi colturali.

Le attività di recupero e di organizzazione dei dati sono state condotte sia a livello di intero territorio lombardo, sia considerando in modo più mirato specifiche aree territoriali. In questo contesto si segnala, in particolare, un lavoro di recupero e informatizzazione di serie storiche meteorologiche decennali relative all'area dell'Oltrepò Pavese. Queste serie vengono ora costantemente aggiornate ed elaborate per la produzione di bollettini di assistenza tecnica in viticoltura e per analisi agrometeorologiche. Si tratta della prima serie disponibile per tale area così vasta di informazioni a cadenza giornaliera dei principali parametri meteorologici quali temperatura, umidità relativa e precipitazioni.

Per quanto riguarda le attività modellistiche, si segnala la messa a punto e l'applicazione del modello CROPSYST, già utilizzato in ambito ERSAF Lombardia per la previsione delle rese produttive del mais. Il modello CROPSYST simula, con passo giornaliero, la crescita di una generica coltura erbacea, valutando diversi parametri fisiologici, colturali, pedologici e climatici.

Nell'ambito del Progetto Kyoto Lombardia, il modello è stato applicato a cinque siti (Bergamo, Brescia, Milano, Mantova e Pavia) per gli anni 1951-2003, simulando le rese di un ibrido di mais ottimizzato agli anni 2000.

Nelle simulazioni sono stati ottimizzati concimazione e irrigazione e non sono stati

*Su alcune colture,
primavere più calde
e minori piogge
potrebbero ulteriormente
diminuire
la produzione finale*

considerati i fattori biotici e abiotici, per assenza di dati sulle aree di riferimento. I risultati delle simulazioni indicano che le produzioni nel corso degli ultimi cinquant'anni

Al di là delle innovative tecniche agronomiche, negli ultimi cinquant'anni le produzioni agricole in Lombardia sono diminuite. Per il futuro vanno previste strategie di adattamento specifiche

tendono a diminuire, a causa della riduzione del ciclo produttivo (giorni di accumulo). Esse mostrano inoltre una diminuzione di durata del ciclo, che risulta però sensibile solo dopo il 1985-1988. Nella realtà agricola lombarda, in effetti, la produzione di mais è notevolmente aumentata rispetto agli anni Cinquanta, in quanto negli ultimi cinquant'anni, oltre al miglioramento genetico, si sono fortemente innovate le tecniche agronomiche

in tutte le fasi del ciclo produttivo; i risultati delle simulazioni andrebbero quindi letti nel senso che l'aumento delle produzioni avrebbe potuto essere stato maggiore se esso non avesse subito una depressione determinata dal cambiamento climatico (aumento della temperatura e numero di giorni di precipitazione).

Nel loro complesso gli studi svolti dall'unità operativa 6 hanno consentito di comprendere che l'agricoltura lombarda dovrà far ricorso a strategie di adattamento sia di tipo economico, sia di tipo agronomico. Esse avranno un ruolo rilevante per ridurre le perdite dovute al cambiamento climatico e dovranno provare a ottenere, su alcune specifiche colture, dei vantaggi da esso. Le strategie da mettere in campo dovranno prevedere aggiustamenti a breve termine come l'utilizzo di cultivar con caratteristiche diverse, il cambio di varietà coltivate, l'adozione di modifiche nelle pratiche agronomiche, il cambio di tipo e di modalità di fertilizzanti e antiparassitari utilizzati, l'introduzione di tecniche atte a conservare l'umidità del suolo e il miglioramento della gestione dell'irrigazione. Saranno inoltre necessari aggiustamenti a lungo termine come il cambio dell'uso del suolo, lo sviluppo di nuove varietà, la sostituzione delle specie coltivate e l'adozione di metodologie atte a modificare il microclima delle colture.

1.3.9 – Conclusioni in breve

I risultati più completi sono quelli relativi allo studio della variabilità e dei cambiamenti climatici e quelli relativi alla formulazione di scenari locali, ma anche gli altri risultati presentano molti spunti interessanti. I risultati conseguiti, peraltro, non risultano utili solo nel contesto degli obiettivi del Progetto, ma presentano ricadute molto più ampie.

- Le banche dati prodotte (dati meteorologici, glaciologici e idrologici),
- le metodologie sviluppate (spazializzazione dei dati, costruzione di scenari di cambiamento climatico, gestione del rischio da dissesto geologico),
- e i modelli implementati (modello idrologico, modello per la simulazione delle rese del mais)

potranno portare significativi benefici alle future attività di ricerca relative allo studio dei cambiamenti climatici e dei relativi effetti in Lombardia.

1.4 – Gli intelligrafici

Qui di seguito, come in ognuno degli analoghi paragrafi dei successivi capitoli, sintetizziamo i grafici principali prodotti dalla ricerca in maniera tale da meglio favorire la comprensione dei risultati ottenuti dalle singole unità operative.

A corredo delle mappe, delle tabelle e dei grafici forniamo inoltre esaurienti didascalie, legende e informazioni.



Figura 1.1 – SERIE STORICHE TERMOMETRICHE E PLUVIOMETRICHE LOMBARDE

La sistematica raccolta di dati relativi alle antiche osservazioni strumentali, unitamente a tutte le informazioni sulle loro metodologie di acquisizione, costituisce un aspetto essenziale delle ricerche sul clima. Nell'ambito del Progetto Kyoto Lombardia si è quindi deciso di dare ampio spazio a questo tipo di attività, rispetto ad altri progetti in cui erano state privilegiate più le analisi dei dati che il loro sistematico recupero.

La figura mostra la localizzazione dei siti ove sono state raccolte lunghe serie storiche termometriche e pluviometriche lombarde. La figura mostra anche le serie già disponibili prima del Progetto Kyoto Lombardia, evidenziandone la fonte (AM: Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare; CLIMAGRI: Università degli Studi di Milano e ISAC-CNR nell'ambito del progetto MiPaf CLIMAGRI e altri; Progetto Kyoto: serie storiche secolari lombarde recuperate nell'ambito di questo Progetto).

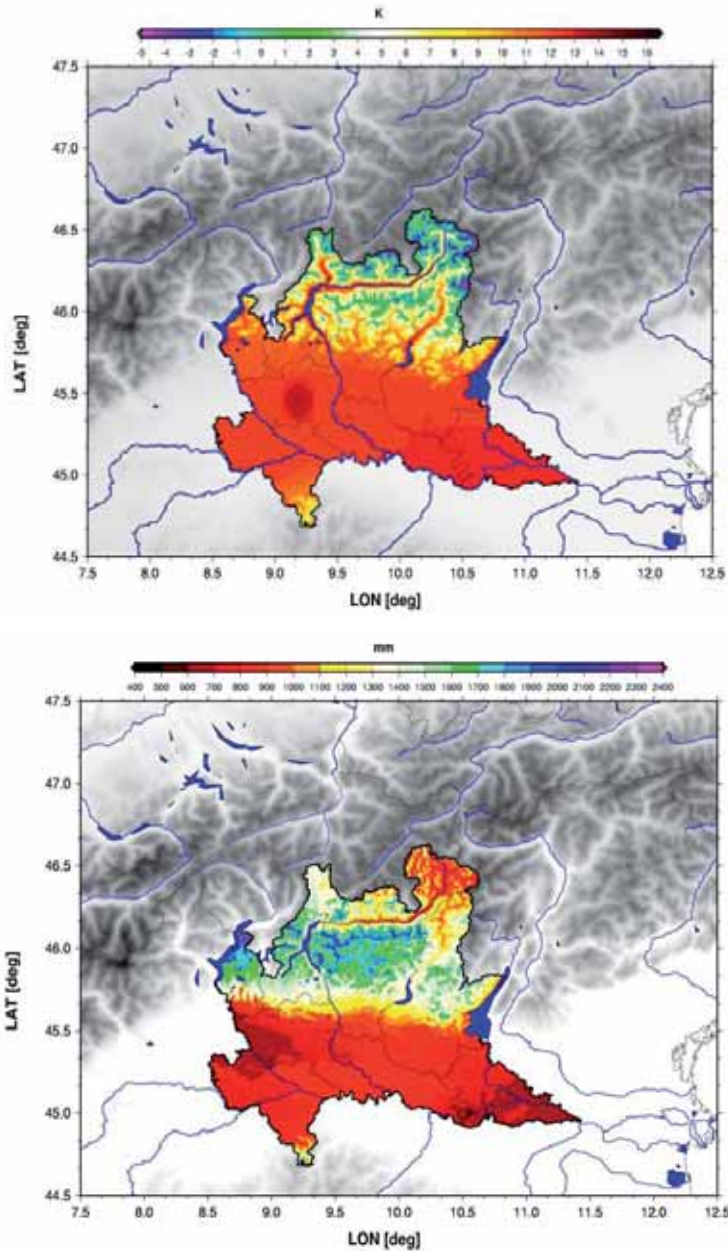


Figure 1.2 -1.3 – CLIMATOLOGIA DELLE TEMPERATURE E PRECIPITAZIONI MEDIE ANNUALI IN LOMBARDIA NEL PERIODO 1961-1990

Oltre alla disponibilità delle serie storiche di dati meteorologici, è necessario definire metodologie che permettano di rappresentare questi dati localmente sul territorio considerato, in un opportuno periodo temporale di riferimento. Queste distribuzioni spaziali prendono il nome di climatologie.

La figure mostrano rispettivamente le climatologie delle temperature medie annuali (fig. 1.2 in alto) e delle precipitazioni totali annue (fig. 1.3 in basso) sull'intera regione Lombardia per il periodo di riferimento 1961-1990. Queste rappresentazioni non consentono solo di esprimere l'evoluzione delle temperature di ogni punto del territorio lombardo, ma costituiscono anche uno strumento importante per la valutazione del rischio meteorologico a scala locale.

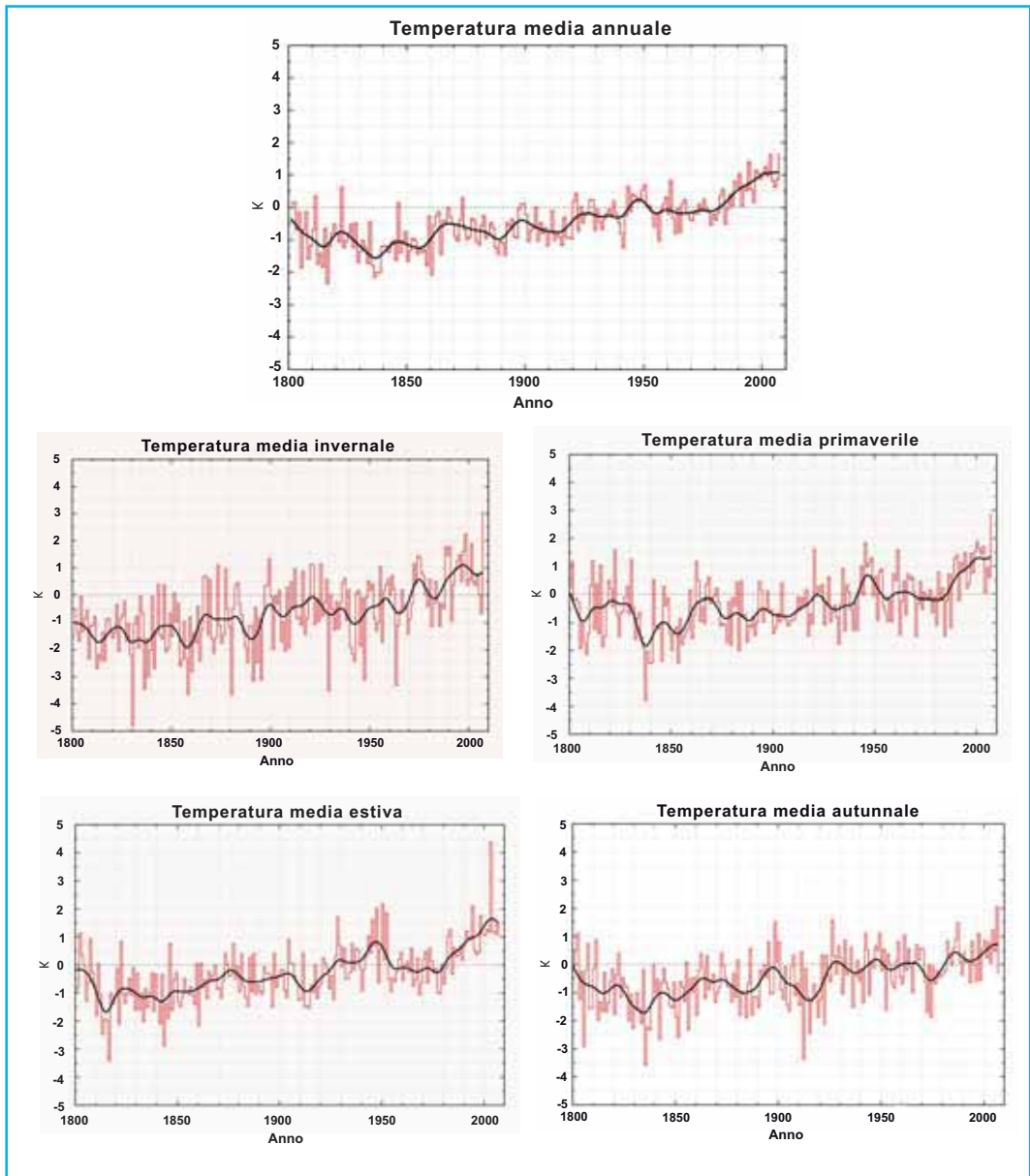


FIGURA 1.4 – VARIAZIONI DELLE TEMPERATURE MEDIE ANNUALI E STAGIONALI NEL PERIODO 1800-2007 RISPETTO AL PERIODO DI RIFERIMENTO 1961-1990

Il modo più efficace per evidenziare l'evoluzione temporale di una variabile meteorologica consiste nel rappresentarne le cosiddette anomalie, cioè gli scostamenti delle serie medie regionali da quelle di un dato periodo storico usato come riferimento (1961-1990). Queste serie regionali sintetizzano le informazioni delle serie delle singole stazioni, fornendo un segnale climatico più stabile e meno soggetto agli errori casuali che le singole serie inevitabilmente contengono anche se soggette a sofisticate tecniche di omogeneizzazione. I grafici della figura mostrano l'andamento temporale delle medie annuali (in alto) e stagionali (più sotto) delle temperature del periodo 1800–2007. I dati sono espressi in gradi centigradi come variazioni rispetto al periodo 1961-1990. Le barre verticali indicano i valori di ogni singolo anno, la curva nera continua rappresenta l'andamento mediato su periodi più lunghi.

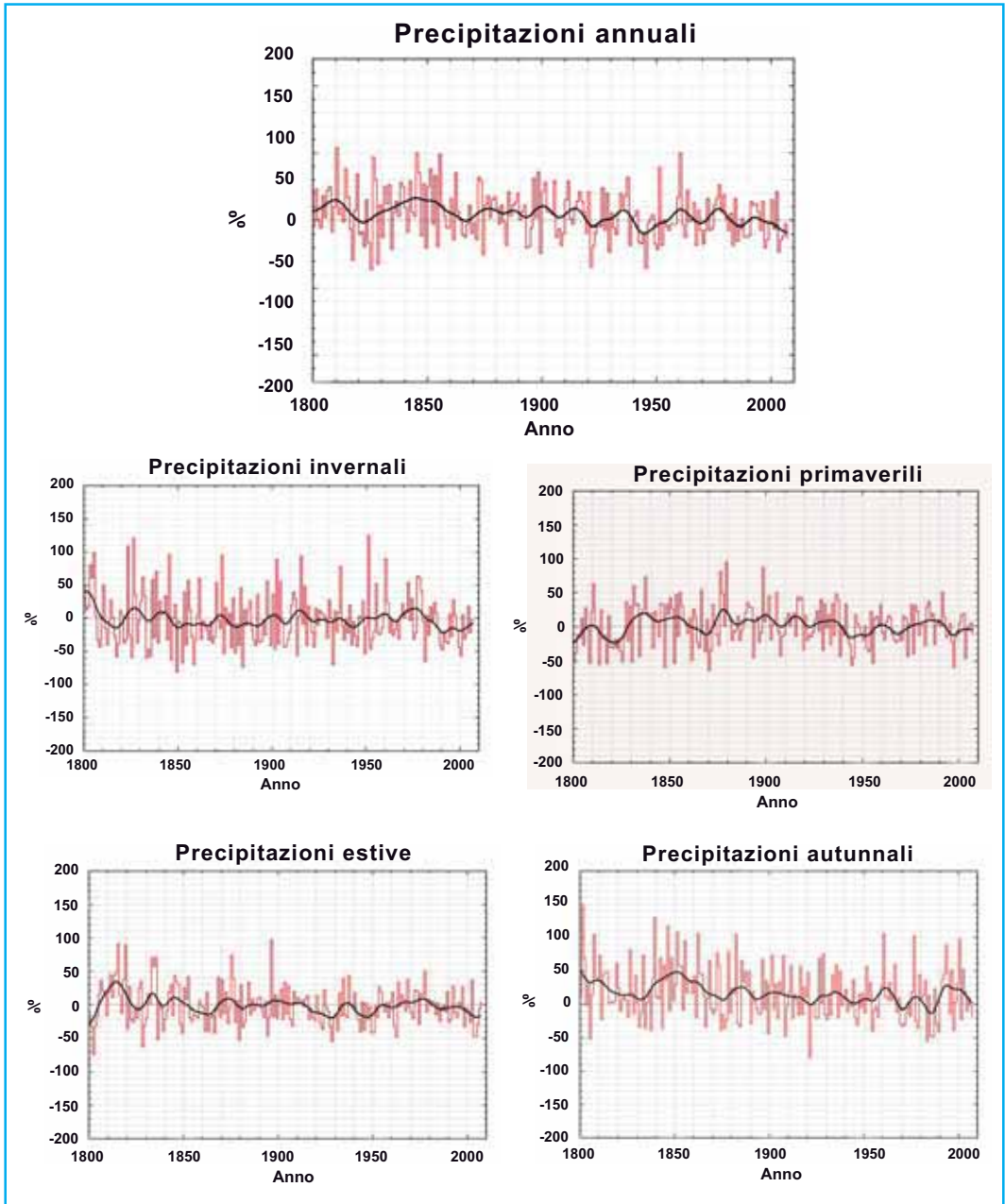


Figura 1.5 – VARIAZIONE DELLE PRECIPITAZIONI ANNUALI STAGIONALI NEL PERIODO 1800-2007 RISPETTO AL PERIODO DI RIFERIMENTO 1961-1990

I grafici della figura forniscono le stesse informazioni della figura precedente (ovvero gli scostamenti o anomalie in relazione al periodo di riferimento 1961-1990), riferite alle precipitazioni totali medie nella regione nello stesso periodo (1800-2007). I dati sono espressi come percentuali di variazione rispetto al periodo di riferimento. Le barre verticali indicano i valori di ogni singolo anno, la curva nera continua rappresenta l'andamento mediato su periodi più lunghi.

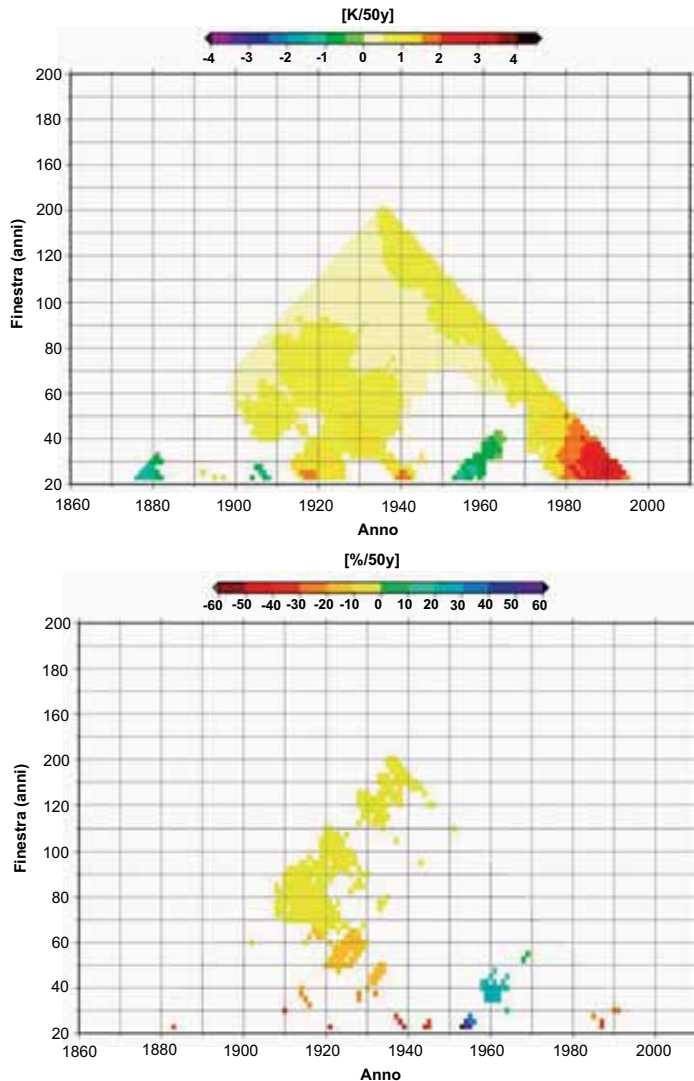


FIGURE 1.6-1.7 – ANALISI DELLA TENDENZA TEMPORALE DELLE TEMPERATURE E DELLE PRECIPITAZIONI MEDIE ANNUALI DELLA LOMBARDIA

La valutazione delle tendenze di una variabile meteorologica (come temperatura e precipitazioni) ottenute mediante semplici interpolazioni lineari non riesce a considerare adeguatamente l'effettiva variabilità in un lungo periodo temporale. Per un'analisi più rigorosa si ricorre alla "running-trend analysis", che valuta i trend su finestre temporali di larghezza variabile (da un minimo di 20 anni a un massimo pari all'intero periodo), che vengono fatte "muovere" lungo tutta la lunghezza del periodo in cui sono disponibili i dati.

Nella figura è mostrato il risultato di questa analisi per la serie lombarda delle temperature (in alto) e delle precipitazioni (in basso) medie annuali. Sulla scala orizzontale è indicata la larghezza della "finestra temporale" su cui è stimato il trend e sulla scala verticale l'anno centrale di tale finestra. Le intensità dei trend (espresse in gradi ogni 50 anni per le temperature e in percentuale per le precipitazioni) vengono espresse mediante una scala colorata posta alla sommità del grafico (sono riportati solo i punti corrispondenti a trend statisticamente significativi).

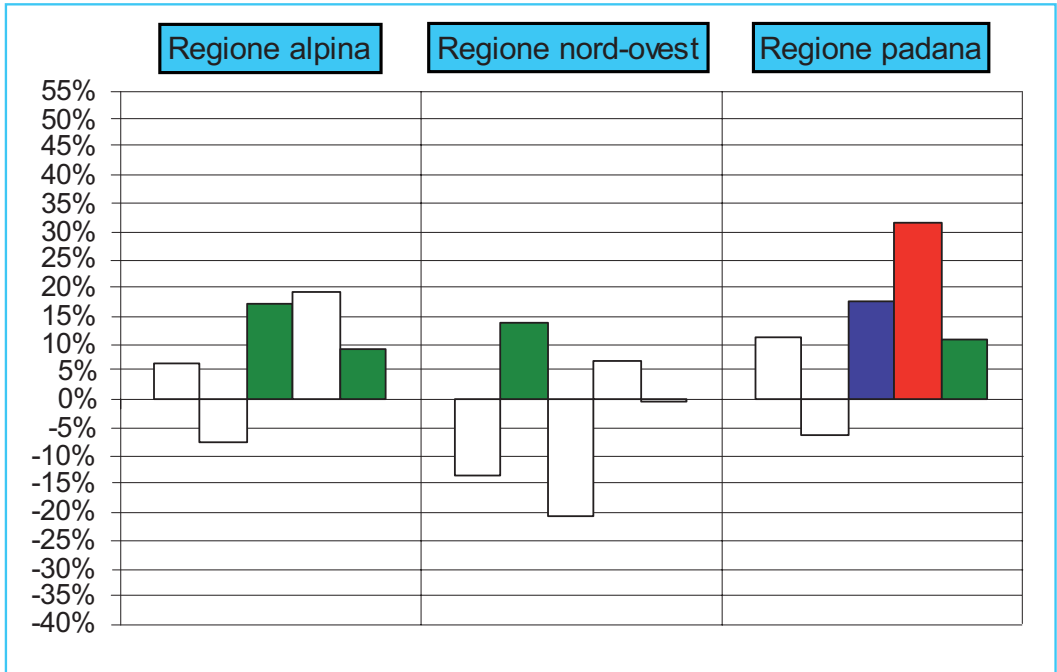


FIGURA 1.8 – TENDENZA DEL NUMERO DI EVENTI DI PRECIPITAZIONE INTENSA

La Lombardia, a causa di vari fattori naturali e antropici, è particolarmente esposta al rischio alluvionale, che è correlato ad eventi precipitativi di forte intensità. E' quindi estremamente importante verificare se esiste anche in Lombardia una tendenza a un'accentuazione dell'intensità delle precipitazioni come si sta evidenziando in varie altre aree del nostro Pianeta. Rimane tuttavia ancora difficile analizzare queste tendenze in aree geografiche più limitate dell'intero bacino padano, in quanto lo studio delle precipitazioni intense risulta difficoltoso per il basso numero di eventi che vengono considerati.

La figura mostra i trend (periodo 1880-2004) del numero di eventi con precipitazioni giornaliere intense in tre macroregioni. La soglia di intensità di precipitazione è il valore al di sopra del quale si colloca solo il 5% dei dati. Per ogni regione le prime quattro colonnine rappresentano i trend per le quattro serie stagionali (nell'ordine: inverno, primavera, estate e autunno), mentre la quinta mostra il trend della serie annuale. I valori sono espressi come variazioni percentuali per secolo della frequenza di eventi precipitativi intensi, rispetto alla media nel trentennio normale 1961-1990; valori non significativi sono indicati da colonnine bianche, mentre valori con significatività superiore al 90% sono mostrati da colonnine colorate: verdi per i trend con significatività superiore al 90%, blu per i trend sopra al 95% e rosse per i trend superiori al 99%.

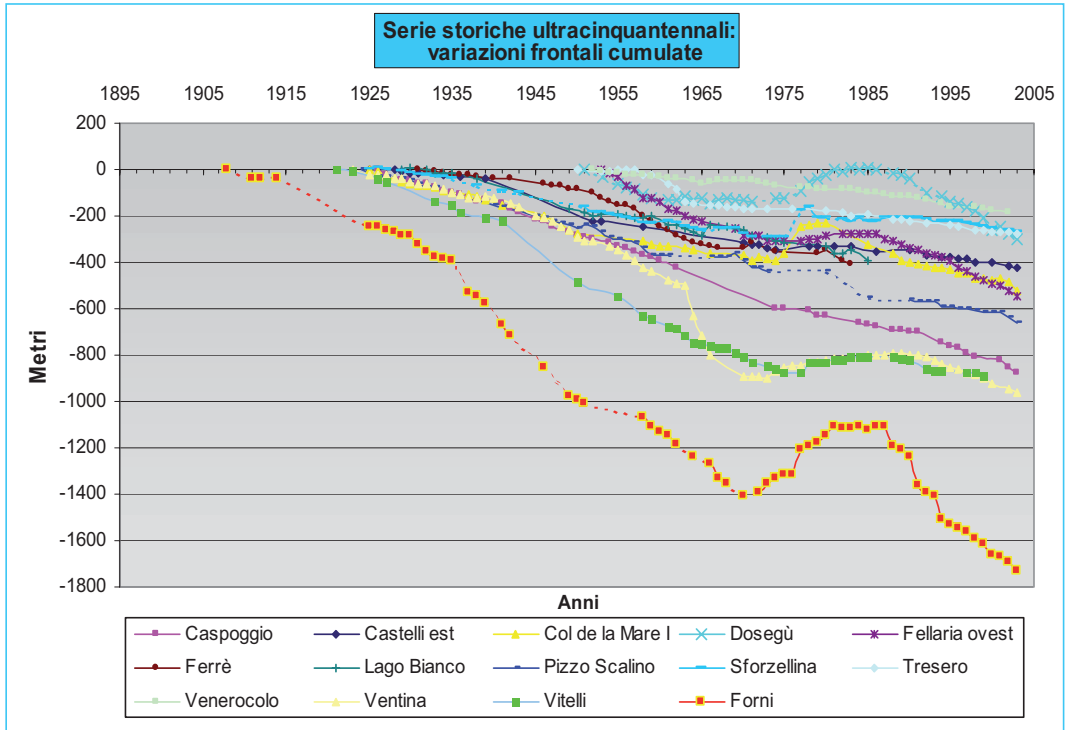


FIGURA 1.9 – DINAMICA RECENTE DEI GHIACCIAI LOMBARDI: LE VARIAZIONI FRONTALI CUMULATE NELLE SERIE STORICHE ULTRACINQUANTENNALI

Un importante risultato del Progetto Kyoto Lombardia è stato quello di migliorare la conoscenza dello stato dei ghiacciai lombardi studiandone sia le variazioni frontali che i bilanci di massa. La figura mostra un quadro di sintesi relativo all'evoluzione dei ghiacciai lombardi che emerge da oltre un secolo di osservazioni di variazioni frontali.

Le variazioni frontali, ovvero le misure annuali delle variazioni di lunghezza di un ghiacciaio, costituiscono l'ultimo anello di una successione di eventi che, partendo da una perturbazione climatica prima globale e poi locale, produce uno squilibrio del bilancio di massa del ghiacciaio e infine la risposta della fronte. Si tratta quindi dell'effetto finale di una catena di eventi prolungatisi nel tempo e non sempre immediatamente correlabile con gli eventi meteorologici registrati nel periodo della misurazione. Le serie di variazioni frontali hanno il grande vantaggio di essere molto lunghe, essendo iniziate queste misure già negli ultimi anni del XIX secolo.

La figura mostra il quadro di sintesi relativo all'evoluzione dei ghiacciai lombardi per i quali si hanno almeno cinquant'anni di osservazioni di variazioni frontali.

NOME GHIACCIAIO	Variazione cumulata (m)	PERIODO	N. anni di misure sul terreno	NOME GHIACCIAIO	Variazione cumulata (m)	PERIODO	N. anni di misure sul terreno
Serie storiche ultracinquantennali				CAMPO NORD	-45,5	1986-2002	15
PIZZO FERRE'	-408	1931-1983	40	SURETTA SUD	-106	1989-2003	11
VENTINA	-961	1923-2003	75	ORSAREIGLS	-73	1947-1959	11
CASPOGGIO	-876	1926-2003	53	CALVO	-67,5	1927-1941	7
FELLARIA OVEST	-546,5	1953-2003	48	BADILETTO	-80	1926-1941	13
PIZZO SCALINO	-664,5	1924-2003	57	BADILE	-76	1927-1941	10
VITELLI	-888,5	1921-1999	49	CENGALO SUD-EST	-102	1927-1941	12
CASTELLI EST	-423,5	1925-2003	33	CENGALO SUD OVEST	-70	1928-1941	11
COL DE LA MARE I	-521,5	1925-2003	53	RASICA EST	-355	1989-1999	9
FORNI	-1729	1908-2003	69	PREDÀ ROSSA	-303,5	1992-2002	9
TRESERO (meridionale)	-280,5	1950-2003	41	CASSANDRA OVEST	-109	1927-1938	11
DOSEGU'	-300,5	1951-2003	45	CASSANDRA EST	-148,5	1988-2003	12
SFORZELLINA	-271,5	1925-2003	59	SISSONE	-188,5	1988-2003	14
LAGO BIANCO	-388,5	1929-1985	35	VAZZEDA	-103,5	1987-1998	11
VENEROCOLO	-185	1952-2002	44	SCERSCEN SUPERIORE	-217	1984-2003	12
Serie storiche ultraquarantennali							
DOSDE' EST	-318,5	1953-2001	45	DOSDE' OVEST	-82,5	1983-1994	9
CEDEC	-208,5	1958-2003	41	VAL VIOLA EST	-35	1993-2003	10
PISGANA OVEST	-373	1951-1992	34	VAL VIOLA OVEST	-42,5	1993-2003	10
Serie storiche ultratrentennali				PLATIGLIOLE	-44,5	1974-1993	14
CIMA PIAZZI CENTRALE	-343	1946-1983	31	FORA'	-75	1925-1939	8
CARDONNE' OCC.	-64,5	1951-1990	28	PASQUALE NORD	-8	1927-1939	9
ZEBRU'	-49	1970-2003	22	ROSOLE	-193	1992-2003	9
CASTELLI OVEST	-161,5	1970-2003	24	SAN GIACOMO EST	-32	1925-1938	11
GRAN ZEBRU'	-236,5	1970-2003	27	SAN GIACOMO OVEST	-28,5	1925-1938	10
Serie storiche ultraventennali				CERENA	-178,5	1925-1941	11
DISGRAZIA	-364,5	1981-2003	13	PASSO DI DOSEGU' I	-91,5	1925-1941	9
SCERSCEN INFERIORE	-437,5	1977-2003	19	PUNTA DELLA SFORZELLINA N. E.	-57,5	1925-1943	10
FELLARIA EST	-191,5	1980-2003	13	PUNTA DELLA SFORZELLINA OVEST	-15	1925-1943	10
PALON DE LA MARE	-161,5	1981-2003	16	GAVIA	-36,5	1950-1963	10
PIZZO TRESERO NORD	-57	1954-1978	18	CAGAMEI III	-73	1929-1942	11
MAROVIN	-68,5	1983-2003	21	CAGAMEI II	-27	1929-1942	9
SCAIS	-100,5	1953-1974	22	LUPO	-220,5	1988-1998	7
Serie storiche ultradecennali				POROLA	-116	1992-2003	12
SALARNO	-5	1975-1985	8	GLENO	-107	1949-1963	15
MINE	-135,5	1946-1961	10	TROBIO OVEST (tre confini)	-129	1947-1960	14
VAL NERA OVEST	-47	1957-1969	12	AVIO CENTRALE	34	1954-1971	9
CAMPO NORD	-45,5	1986-2002	15	SALARNO	-5	1975-1985	8

TABELLA 1.1 – VARIAZIONI IN LUNGHEZZA DEI GHIACCIAI LOMBARDI CUMULATE NEI PERIODI DI TEMPO INDICATI

La tabella mostra un quadro di sintesi relativo all'evoluzione dei ghiacciai lombardi che emerge da oltre un secolo di osservazioni di variazioni frontali.



Figura 1.10 – IL GHIACCIAIO DEI FORNI

Il ghiacciaio dei Forni del gruppo Ortles-Cevedale (sopra), tra Lombardia e Trentino, è il più grande delle Alpi italiane (13 km. quadrati). Dalla seconda metà del XIX secolo, questo ghiacciaio si è ritirato di oltre 2,6 km. La morena laterale che sbarra il laghetto indica il livello allora raggiunto dal ghiacciaio. (Foto: M. Santilli 1999)

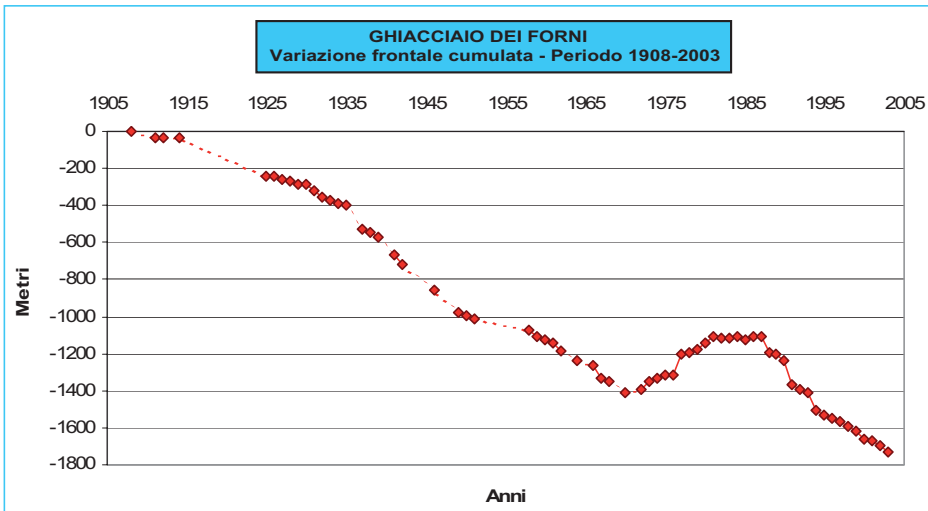


FIGURA 1.11 – ANNO PER ANNO LA CRISI DI UN GHIACCIAIO

I ghiacciai lombardi stanno subendo una riduzione di forte entità a livello di lunghezza, di superficie e di volume, da circa un secolo e mezzo, che negli ultimi due decenni potrebbe essere definita un vero e proprio “collasso”. In questo contesto è essenziale procedere a un sistematico e accurato monitoraggio degli apparati glaciali, analizzando nel modo più esteso possibile sia le variazioni frontali che i bilanci di massa.

La figura mostra la dinamica frontale del ghiacciaio dei Forni nel corso degli ultimi 140 anni. Essa evidenzia come il ghiacciaio sia arretrato di 2,6 km dal 1864 al 2004, con un regresso medio annuale di circa 18 metri.



FIGURA 1.12 – IL PIÙ STUDIATO: ECCO IL GHIACCIAIO DELLA SFORZELLINA NELLE ALPI RETICHE
 Questo ghiacciaio è stato oggetto della più estensiva attività di monitoraggio, nel Progetto Kyoto, da parte del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Milano. (Foto: M. Santilli 2001)

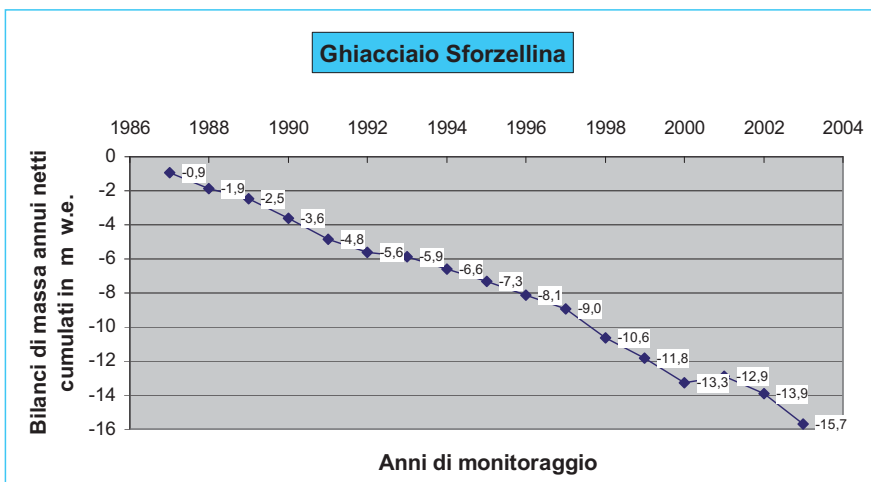


FIGURA 1.13 – GHIACCIAIO DELLA SFORZELLINA DAL 1987 AL 2003: SERIE STORICA DEL BILANCIO DI MASSA DEL GHIACCIAIO SFORZELLINA (M W.E.= METRI D'ACQUA EQUIVALENTI)

Il bilancio di massa esprime le variazioni di massa durante un anno idrologico; esso rappresenta la differenza fra le entrate (accumulo) e le uscite (ablazione) e fornisce quindi una risposta immediatamente correlabile con i parametri meteorologici dell'anno di riferimento. A fronte di questo grande vantaggio, le serie di bilancio di massa hanno il limite di essere molto più brevi delle serie di variazioni frontali. La figura mostra i bilanci di massa del ghiacciaio della Sforzellina per il periodo 1987-2004 espressi in metri di acqua equivalente. Misure come questa indicano una costante riduzione degli spessori dei ghiacciai lombardi che, per i ghiacciai campione, è stata di circa 1 metro all'anno. Se si tiene conto che gli spessori medi dei ghiacciai lombardi raramente superano qualche decina di metri, è ipotizzabile che il loro tempo di sopravvivenza sia di circa mezzo secolo.

1.5 – Che cosa si sta facendo e che cosa si può fare

Nel corso degli ultimi decenni la comunità scientifica ha indirizzato ampi sforzi verso lo studio dei processi che regolano il clima del nostro Pianeta. Nel loro complesso le ricerche condotte hanno evidenziato come il miglioramento della nostra capacità di comprendere l'evoluzione del clima della Terra richieda lo sviluppo di nuovi modelli di simulazione e previsione climatica e l'utilizzo di risorse di calcolo e di metodi numerici sempre più avanzati.

Indissolubilmente legato alla parte modellistica e d'importanza forse ancora maggiore, risulta lo sviluppo delle osservazioni, in quanto solo la minuziosa osservazione di ciò che accade nel presente e di ciò che è accaduto nel passato nei diversi comparti del Sistema Terra può consentirci di capire quali siano i processi e le interazioni fondamentali da considerare ai fini di una corretta comprensione dell'evoluzione delle condizioni dell'atmosfera.

Una fonte molto importante di dati osservativi è costituita dalle serie storiche di osservazioni meteorologiche. Esse sono state raccolte grazie alla passione e all'impegno di generazioni di osservatori, la cui opera ha reso disponibili dati per migliaia di stazioni, con serie spesso lunghe più di 100 anni.

In questo settore il nostro Paese si trova in una posizione molto privilegiata, in quanto ha avuto un ruolo di primissimo piano nello sviluppo delle osservazioni meteorologiche e può disporre oggi di un patrimonio di dati osservativi d'enorme valore.

In questo contesto si ritiene che sia oggi assolutamente prioritario compiere ogni possibile sforzo sia per potenziare in modo sempre maggiore le attività di monitoraggio sia per recuperare e rendere disponibile alla ricerca tutto quell'enorme bagaglio di informazioni che generazioni di osservatori hanno provveduto a raccogliere ed archiviare e che spesso giace ancora scarsamente utilizzato nei nostri archivi.

Nella nostra regione il Progetto Kyoto Lombardia e altri importanti progetti svolti nel corso degli ultimi anni (o ancora in corso) hanno costituito un primo e importante passo in questo senso, ma è chiaro che la complessità del problema e la vastità dei dati necessari alla ricerca richiederanno nel prossimo futuro un ulteriore approfondimento delle attività finora intraprese.

Per saperne di più su siti web, pubblicazioni e bibliografia fondamentale consultare il capitolo Avviso ai navig@nti a pagina 269.

Le osservazioni meteorologiche sono state raccolte grazie alla passione e all'impegno di molte generazioni di meticolosi ricercatori

1.6 – A domanda risponde. Le domande più comuni che affiorano in base alla ricerca, seguite dalle risposte dei ricercatori

Informare localmente

Gli scienziati dibatteranno e faranno ricerche ancora per decenni sulle cause esatte dei cambiamenti climatici. Ma i decisori sono chiamati a prendere fin da subito delle misure preventive. (Kathy Riklin, OcCC – Organe consultatif sur les changements climatiques, Suisse)

Programmare e agire

Le strategie e le decisioni intraprese per ridurre l'inquinamento, il cambiamento climatico, la deforestazione e la desertificazione potranno costituire un'opportunità e una sfida sia per il settore privato sia per quello pubblico. Una serie di reazioni nazionali e internazionali accuratamente individuate e mirate alla mitigazione, all'adattamento e al miglioramento delle conoscenze può ridurre i rischi posti dai cambiamenti ambientali alle risorse idriche e ai rischi naturali (Martin Beniston, Université de Genève, Suisse)

1. A LIVELLO REGIONALE LOMBARDO, O PER LO MENO A LIVELLO DELL'AREA PADANA, SONO EVIDENTI CAMBIAMENTI CLIMATICI IN CORSO? IN PARTICOLARE QUAL È L'ANDAMENTO NEL TEMPO DELLE TEMPERATURE E DELLE PRECIPITAZIONI?

Dall'analisi dei dati attualmente disponibili si è osservata una netta tendenza verso temperature più alte e una tendenza molto più sfumata verso una riduzione delle precipitazioni. In particolare, l'andamento delle temperature medie annue relative all'intero territorio lombardo mostra una crescita dell'ordine di 1,8°C nell'arco del periodo 1800-2007, con il contributo più forte al riscaldamento dato dagli ultimi 25/30 anni. Questa tendenza a lungo termine è piuttosto omogenea per tutte le stagioni, anche se le serie termometriche delle diverse stagioni mostrano interessanti specificità, come, per esempio, il fatto che il fortissimo riscaldamento che ha caratterizzato gli ultimi tre decenni sia particolarmente evidente in primavera ed estate.

È anche interessante notare come due importanti estremi della serie delle temperature medie annuali, ossia i valori del 1816 (l'anno più freddo) e del 2003 (uno dei due anni più caldi), siano principalmente legati alla stagione estiva; essi corrispondono a due eventi ben noti e ampiamente studiati, ossia l'estate fredda dell'anno 1816, noto anche come "anno senza estate", e la prolungata ondata di calore del 2003.

L'altro anno più caldo (il 2007) è invece legato alla stagione invernale e a quella primaverile per le quali si sono registrati i valori più alti dell'intera serie, con anomalie, rispettivamente, di 3,1°C e di 2,9°C oltre le medie del periodo 1961-1990. Se a ciò si aggiunge l'elevata anomalia dell'autunno precedente (+2,1°C, che rappresentano il massimo assoluto per l'autunno), si evidenzia ancora meglio la fortissima anomalia del recente

episodio caldo che ha avuto luogo dal settembre 2006 al maggio 2007. È peraltro evidente come l'elevata concentrazione di massimi assoluti che si hanno negli ultimi anni delle serie sia stagionali che annuali risulti un'ovvia conseguenza del forte incremento di temperatura che ha caratterizzato gli ultimi decenni.

È anche interessante osservare come, dal punto di vista del trend termometrico di lungo periodo, il dato lombardo risulti in ottimo accordo con quello medio nazionale, in quanto il riscaldamento degli ultimi due secoli ha mostrato una grande coerenza spaziale su tutto il territorio italiano. Questo comportamento risulta peraltro confermato da quello di altri Paesi europei che confinano con l'Italia.

L'analisi dell'andamento delle temperature minime e massime giornaliere ha messo in luce un aumento più forte nelle prime rispetto alle seconde; se però si considerano solo gli ultimi 50 anni la situazione è capovolta, con le temperature massime che crescono più delle minime: ciò significa che nell'ultimo mezzo secolo vi è stato un aumento dell'escursione termica giornaliera.

Per quanto riguarda le precipitazioni la situazione è più delicata. A livello italiano si è registrato un leggero calo nella quantità totale annua, dell'ordine del 5% ogni cento anni. Tale diminuzione è maggiormente evidente nell'Italia peninsulare, mentre nel territorio lombardo e, più in generale nell'intero bacino padano, l'andamento a lungo termine delle precipitazioni è meno significativo. Il quadro di sintesi presentato emerge dall'analisi di un database di oltre cento serie storiche di lunghezza secolare, frutto di un lungo e paziente lavoro di recupero e "omogeneizzazione" dei dati meteorologici raccolti nei più antichi osservatori del nostro Paese nell'arco degli ultimi due secoli, oltre che dallo sviluppo di innovative metodologie volte a proiettare le informazioni fornite da tali serie su una griglia ad alta risoluzione spaziale che copre l'intero territorio italiano.

2. A LIVELLO REGIONALE LOMBARDO, O PER LO MENO A LIVELLO DELL'AREA PADANA, SI OSSERVA UNA VARIAZIONE DI FREQUENZA E INTENSITÀ DEGLI EVENTI ESTREMI QUALI EPISODI DI SICCITÀ PROLUNGATA ED EPISODI DI INTENSE PRECIPITAZIONI?

Il database messo a punto è stato utilizzato anche per verificare se la tendenza verso un'accentuazione dell'intensità delle precipitazioni, evidenziata recentemente per varie aree del nostro Pianeta, sia riferibile anche all'Italia. Questo aspetto è particolarmente interessante in quanto il nostro Paese, in virtù di svariati elementi caratteristici quali la presenza della catena alpina e appenninica, la vicinanza del Mediterraneo e l'elevata densità della popolazione, ha una naturale propensione al rischio alluvioni, il che lo rende criticamente esposto a un eventuale incremento degli eventi precipitativi di forte intensità.

I risultati evidenziano come, accanto a una leggera diminuzione al sud e a variazioni non significative al nord delle precipitazioni totali, si sia registrata negli ultimi 100-120

anni una sensibile e altamente significativa diminuzione del numero totale di eventi precipitativi in tutta Italia (mediamente del 10% dal 1880 a oggi). Tale andamento, tuttavia, non è uniforme su tutta la distribuzione delle piogge giornaliere, bensì presenta comportamenti opposti se si considerano gli eventi di bassa intensità e quelli più intensi, essendo in calo i primi e in aumento gli ultimi. Le evidenze più forti di questo comportamento si hanno nell'area settentrionale della penisola.

3. COM'È E COME STA EVOLVENDO LA SITUAZIONE DEI GHIACCIAI ALPINI LOMBARDI?

La prima osservazione generale che si può proporre è che i ghiacciai lombardi stanno subendo una riduzione di forte entità a livello di lunghezza, di superficie e di volume, da circa un secolo e mezzo, che negli ultimi due decenni potrebbe essere definita un vero e proprio "collasso". Per quanto riguarda le variazioni di lunghezza, cioè il parametro per il quale si dispone di serie di misure più lunghe, il campione dei 70 ghiacciai considerati appare in netto regresso.

L'osservazione delle serie storiche più lunghe di variazioni di lunghezza fornisce le informazioni più interessanti. Di queste la serie dei Forni (Ortles – Cevedale), il più vasto ghiacciaio vallivo delle Alpi lombarde, monitorato per quasi un secolo, fa registrare un regresso totale di circa 1,7 chilometri; se si tiene conto anche dei rari dati della seconda metà dell'Ottocento si arriva a un regresso di circa 2,6 km.

In sintesi si può affermare che dalle serie storiche superiori a mezzo secolo si conferma una netta e intensa fase di regresso glaciale per tutti i più importanti ghiacciai della Lombardia con valori totali che per i ghiacciai che dispongono di un ottantennio di misure oscillano fra i 1.729 metri dei Forni, i 960 metri del Ventina, gli 876 metri del Caspoggio fino ai 271 metri dello Sforzellina.

Emerge anche che i ghiacciai più estesi o più lunghi presentano variazioni medie annue più elevate, mentre ghiacciai di minore estensione areale e/o più corti hanno subito variazioni frontali medie annue più limitate. Sono quindi i ghiacciai vallivi che hanno le fronti alle quote più basse, e normalmente presentano maggiore lunghezza e più ampie superfici, a risentire in misura maggiore dell'incremento termico in atto.

Il loro regresso è quindi la risposta a una variazione nel delicato equilibrio fra ablazione e accumulo; la reazione si concretizza nel ricollocare le proprie fronti a una quota superiore in condizioni climatiche che permettano di recuperare quell'equilibrio. L'accelerazione del regresso all'inizio del XXI secolo sembra indicare che questo processo non sia stato positivo.

Un'ulteriore conferma della situazione di netta degradazione delle masse glaciali lombarde deriva dai dati dei bilanci di massa (misure di variazione di spessore) che

indicano una costante riduzione di spessori e di volume dei ghiacciai campione (Sforzellina, riduzione totale di spessore di 18 metri dal 1987 al 2004; Dossè di 9 metri dal 1996 al 2004) di circa 1 metro all'anno. Se si tiene conto che gli spessori medi dei ghiacciai lombardi raramente superano qualche decina di metri, è ipotizzabile che il loro tempo di sopravvivenza sia di circa mezzo secolo.

Naturalmente la loro estinzione avverrà solo se le tendenze attuali del clima non si modificheranno (basterebbe una riduzione delle temperature estive di pochi decimi di grado e un incremento delle precipitazioni solide del 10-20 per cento per invertire la tendenza). L'estinzione avverrà con modalità complesse: i grandi ghiacciai si frammenteranno in diverse unità minori perdendo le loro lingue poste a quota più bassa, mentre i ghiacciai più piccoli si ricopriranno di detrito e si "fossilizzeranno", creando un paesaggio simile a quello degli attuali Pirenei. Successivamente anche i ghiacciai più elevati si estingueranno e il paesaggio diventerà simile a quello degli attuali Appennini.

4. VI SONO SEGNALI EVIDENTI CHE NEGLI ULTIMI DECENNI LE PRODUZIONI DELLE PRINCIPALI COLTURE LOMBARDE HANNO SUBITO VARIAZIONI RICONDUCEBILI AL CAMBIAMENTO CLIMATICO IN CORSO?

Sebbene non vi siano evidenze inconfutabili sugli effetti del cambiamento climatico sull'agricoltura lombarda è necessario evidenziare che tra le principali colture lombarde vi siano colture più suscettibili e altre meno suscettibili al cambiamento climatico. Una prima distinzione andrebbe fatta tra i possibili effetti sulle colture arboree (meno sensibili) e quelli sulle erbacee.

Tra le colture erbacee occorre distinguere a seconda della diversa fisiologia. Queste specie infatti, si dividono in C3 (vite, ortaggi, frumento, orzo) e C4 (mais, girasole) in funzione dei prodotti della fotosintesi. In particolare tra le colture C3 autunno-vernine (orzo e frumento) si può considerare che le produzioni lombarde siano già inferiori a quelle d'Oltralpe (Francia e Germania) a causa delle temperature che caratterizzano la fine del ciclo di maturazione che, nella maggioranza dei casi, tendono a velocizzare il riempimento della granella e quindi ridurre la quantità di carboidrati totali traslocati nella spiga.

Questo si traduce in produzioni inferiori a quelle potenziali. Su queste colture, temperature primaverili più elevate e precipitazioni inferiori – come previsto dai diversi scenari di cambiamento climatico – potrebbero ulteriormente diminuire la produzione finale.

Anche sulle piante C4 (in Lombardia sostanzialmente il mais) le maggiori temperature e gli stress idrici estivi potrebbero abbreviare il ciclo di maturazione con diminuzione delle produzioni finali.

5. IN QUALE MISURA LO STATO DELL'ARTE DELLE ATTUALI CONOSCENZE CI PERMETTONO DI ESPRIMERE VALUTAZIONI RELATIVE ALLA "SENSIBILITÀ" AL RISCHIO IDROLOGICO E GEOLOGICO DEL TERRITORIO DELLA NOSTRA REGIONE NEL CONTESTO DI UN CLIMA CHE CAMBIA?

I complessi rapporti e meccanismi che governano il ciclo idrologico sono solo parzialmente conosciuti. In una valutazione della sensibilità al rischio idrologico inevitabilmente si ripercuote il livello di incertezza, a maggiore ragione in un contesto di cambiamento climatico. In particolare l'incertezza della variazione degli afflussi si propaga necessariamente anche sulle stime dei deflussi, che si riflettono nel determinare e descrivere le trasformazioni dell'afflusso meteorico in deflusso superficiale e sotterraneo. Sono molte le variazioni importanti legate al rischio idrologico. Tra queste possiamo citare: l'aumento delle precipitazioni brevi e intense, la presenza di lunghi periodi di siccitosi, la possibile variazione nel rapporto fra le precipitazioni acquose e nevose in clima montano. A queste condizioni saranno sensibili non solo fiumi, laghi e acquiferi, ma anche gli altri processi di interfaccia tra suolo, vegetazione e atmosfera. Ridotte precipitazioni estive potranno essere parzialmente compensate da un aumento delle precipitazioni invernali. Particolarmente significativo può essere l'impatto sugli invasi alpini poiché le modificazioni di regime, da nivale a pluvio-nivale o, addirittura, pluviale, possono determinare una redistribuzione stagionale dei deflussi a causa dello scioglimento delle nevi, anticipato per via di temperature più elevate al termine dell'inverno, o per via della minore copertura nivale, dovuta alla riduzione della quota di precipitazioni nevose sul totale delle precipitazioni. Inoltre, i torrenti montani, influenzati dai cambiamenti del clima montano, potrebbero vedere un anticipo e, forse, un consistente aumento delle morbide primaverili a causa dello scioglimento più intenso delle nevi e dei ghiacciai.

Un altro effetto sui deflussi da parte di eventi di pioggia breve e intensa, presumibilmente più gravosi e frequenti, è costituito dall'aumento delle portate al colmo di piena: per esempio, un evento giudicato oggi cinquantennale potrebbe divenire ventennale o trentennale, e l'analogo ventennale si potrebbe verificare assai più frequentemente (una volta ogni 3-5 anni). In tal caso, non solo le reti idrografiche naturali verrebbero sollecitate in modo più gravoso, ma anche le reti di drenaggio urbano. I cambiamenti più rilevanti potranno comunque manifestarsi nei piccoli bacini alpini, data la loro maggiore sensibilità all'effetto di tropicalizzazione. Altri effetti importanti prodotti da mutazioni del regime delle precipitazioni si possono sintetizzare nella maggiore aggressività climatica, che comporta una crescente potenzialità erosiva delle piogge, un aumento del tasso di erosione (un aumento dell'erosione ha come conseguenza non solo una perdita di fertilità dei suoli, ma anche una loro maggior suscettibilità all'innescio delle frane superficiali e delle colate detritiche) e mutazioni delle modalità di trasporto dei nutrienti da parte delle acque (con prevedibile impatto sugli ecosistemi lacustri

e fluviali). Un altro aspetto importante deriva dalla maggiore durata dei cicli siccitosi estivi. Questo provoca la competizione nell'uso della risorsa idrica fra gli utilizzi con la conseguente e necessaria ridefinizione della politica delle priorità.

6. IN QUALE MISURA I DATI PRODOTTI DAI MODELLI CHE VENGONO UTILIZZATI PER IL CLIMA DEI PROSSIMI DECENNI POSSONO ESSERE UTILIZZATI NELL'AMBITO DI STUDI VOLTI A VALUTARE IL POTENZIALE IMPATTO DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI?

L'aspetto più problematico connesso alla costruzione di proiezioni relative all'evoluzione del clima è che i dati forniti da organi quali l'IPCC allo scopo di studiare il riscaldamento globale non possono essere utilizzati in modo immediato. Infatti essi si basano su modelli che producono dati con una risoluzione geografica del tutto insufficiente per un territorio orograficamente complesso come quello lombardo. Una simile lacuna, unitamente a vari altri problemi aperti, induce a considerare con estrema cautela gli output "immediati" o "grezzi" dei modelli climatici. Tale cautela deve riguardare in particolare le precipitazioni, in quanto, la modellizzazione delle precipitazioni è particolarmente complessa a causa della considerevole incoerenza spaziale di questa variabile e del suo complesso legame con le caratteristiche orografiche e geografiche del territorio. Questo problema può venire risolto, almeno parzialmente, adottando opportune metodologie di downscaling basate su legami di tipo fisico esistenti tra la circolazione atmosferica a grande scala e la meteorologia locale. Questi legami vengono definiti sulla base di serie storiche osservative "locali" di opportuna lunghezza e qualità e sulla base di dati globali come quelli relativi alle re-analisi operate da enti quali ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) o NCAR/NCEP (National Center for Atmospheric Research/National Centers for Environmental Prediction).

È quindi evidente come la disponibilità di una buona base di dati osservativi non consenta solo di avere un quadro più chiaro della variabilità e dei cambiamenti climatici relativi al passato, ma risulti anche un aspetto essenziale per la costruzione di solide proiezioni per il futuro.

7. È IPOTIZZABILE, NEI PROSSIMI 50 ANNI, UNA VARIAZIONE DELLE RESE NELLE PRODUZIONI AGRICOLE PIÙ TIPICHE DELLA LOMBARDIA? COME DOVRÀ ADATTARSI L'AGRICOLTURA REGIONALE ALLE EVENTUALI VARIAZIONI?

In base ai risultati finora ottenuti dalle analisi effettuate mediante l'aiuto del modello dei sistemi culturali CROPSYST, e prendendo come riferimento (evidentemente parziale) solo la coltura di mais, si evidenzia un minor incremento produttivo sulle colture di mais rispetto a quello attendibile dal miglioramento genetico abbinato al miglioramento tecnologico e agronomico degli ambienti di coltura. Questa diminuzione

(nella produzione potenziale) sembra essere più evidente a partire dalla seconda metà degli anni Ottanta del secolo scorso.

In base agli scenari di cambiamento climatico si può ipotizzare che la perdita di produzione potenziale (cioè la produzione senza limitazione per nutrienti, insetti, patologie, stress di natura abiotica) continuerà a seguire il trend mostrato dalla fine degli anni Ottanta, mentre è in leggero incremento la produzione reale (cioè la produzione al netto delle limitazioni date da nutrienti, insetti, patologie, stress di natura abiotica e biotica).

8. QUALI TECNICHE INNOVATIVE DOVRANNO NECESSARIAMENTE ESSERE ADOTTATE DAGLI AGRICOLTORI LOMBARDI PER MANTENERSI COMPETITIVI A FRONTE DELLE VARIAZIONI NELLA DISTRIBUZIONE DELLE PIOGGE, DELL'AUMENTO DELLE TEMPERATURE, O DELL'AUMENTO DEGLI EVENTI ESTREMI?

L'agricoltura lombarda dovrà far ricorso a strategie di adattamento di tipo economico e di tipo agronomico. Queste tecniche avranno un ruolo rilevante per ridurre le perdite dovute al cambiamento climatico e dovranno provare a ottenere, su alcune specifiche colture, dei vantaggi dal cambiamento climatico.

Le principali strategie economiche dovranno prevedere di rendere i costi agricoli inferiori in funzione delle variazioni che si verificheranno a carico delle produzioni, mentre quelle agronomiche dovranno prevedere soluzioni atte a ridurre al minimo le perdite nelle produzioni agricole. Queste strategie dovranno prevedere aggiustamenti a breve termine: utilizzo di cultivar con caratteristiche diverse, cambio di varietà coltivate, variazioni nelle pratiche agronomiche e cambio del tipo e della modalità di fertilizzante e antiparassitario utilizzato, introduzione di tecniche atte a conservare l'umidità del suolo, migliore gestione dell'irrigazione e aggiustamenti a lungo termine (cambio dell'uso del suolo, sviluppo di nuove varietà, sostituzione delle specie coltivate e modifiche del microclima della coltura).

9. A QUALI INDICATORI BIOLOGICI È POSSILE RICORRERE PER OSSERVARE EVENTUALI CAMBIAMENTI NEGLI ECOSISTEMI FORESTALI INDOTTI DAL CAMBIAMENTO CLIMATICO?

Il comportamento di patogeni e parassiti è un buon indicatore in quanto il comportamento di questi organismi è fortemente influenzato dai parametri climatici, in particolare dalle temperature. In Lombardia si registra ormai da diversi anni una pericolosa espansione della processionaria del pino che viene generalmente considerata come uno dei principali fattori limitanti per lo sviluppo e la sopravvivenza delle pinete in Europa meridionale e nel Mediterraneo. L'insetto può causare estese defogliazioni che causano il deperimento delle pinete fino a mille metri di quota, cosa impensabile fino

a 15-20 anni fa. Gli inverni caldi e siccitosi che si sono registrati nell'ultimo decennio hanno ridotto notevolmente la mortalità stagionale di questo pericoloso defogliatore.

Diverse segnalazioni indicano anche come nell'ultimo decennio vi è stata una sostanziale espansione dell'areale di presenza di *Traumatocampa pityocampa* sia in latitudine che in altitudine, con elevati attacchi in zone prima non interessate (oltre i mille metri di quota).

All'inizio degli anni Novanta, la prolungata siccità invernale accompagnata da temperature superiori alle medie stagionali cui hanno fatto seguito abbondanti nevicate tardive in primavera a quote basse, ha favorito le pullulazioni di *Ips typographus* L. (bostrico dell'abete rosso), che ha causato danni estesi soprattutto nei popolamenti artificiali di questa specie in provincia di Bergamo e Brescia.

10. QUALE CONTRIBUTO CONCRETO POSSONO DARE LE FORESTE DELLA LOMBARDIA PER LIMITARE L'IMPATTO POTENZIALE DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO?

Le capacità degli ecosistemi forestali di compensare la crescita dei gas serra e di contribuire alla difesa del suolo e al mantenimento della biodiversità costituiscono, in un periodo come l'attuale dominato da enormi incertezze sul futuro dell'ambiente, un forte motivo per la loro tutela oltre che un incentivo per la loro espansione. L'aumento delle superfici forestate in aree fortemente urbanizzate, infatti, oltre ad aumentare le quantità di carbonio immagazzinate, contribuisce attraverso la multifunzionalità dell'ecosistema bosco alla depurazione dell'atmosfera e al mantenimento di condizioni ambientali equilibrate.

È pertanto prioritario mantenere una continua vigilanza sullo stato di salute delle nostre foreste. Ciò anche alla luce del fatto che, se è noto che un ecosistema in "buono stato" possiede discrete capacità di resistenza alle perturbazioni ambientali, è anche vero che tali capacità, una volta che si è superata la soglia di non ritorno, vengano meno in tempi molto rapidi.

