

CLIMAGRI - CAMBIAMENTI CLIMATICI E AGRICOLTURA

SOTTOPROGETTO 2: Agricoltura italiana e cambiamenti climatici

Linea di ricerca 2.1: "Classificazione attitudinale a fini agricoli del territorio nazionale su base climatica e pedologica"

Dott. Luigi Perini ⁽¹⁾
responsabile della linea di ricerca 2.1

RELAZIONE TECNICA CONCLUSIVA

3° ANNO DI ATTIVITÀ

Contenuto

	Pag.
1. Presentazione e obiettivi generali della ricerca	2
2. Dati di base	3
3. Elaborazioni	5
4. Scenari climatici	13
5. Profilo climatico degli scenari	21
6. Bibliografia	25

⁽¹⁾ Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura – Ufficio centrale di Ecologia Agraria (CRA-UCEA)

1. Presentazione e obiettivi generali della ricerca

La linea di ricerca 2.1 del P.F. CLIMAGRI, dal titolo “*Classificazione attitudinale a fini agricoli del territorio nazionale su base climatica e pedologica*”, si poneva come finalità l’analisi interdisciplinare delle variabili ambientali, principalmente clima e suolo, al fine di definire le connessioni di causa effetto che regolano la diffusione e l’adattamento delle colture nei vari ambienti pedo-climatici italiani, anche nella prospettiva di un possibile cambiamento climatico. Gli obiettivi specifici della ricerca si possono sintetizzare nei seguenti passaggi che hanno rappresentato, nel corso dei tre anni del progetto CLIMAGRI, le tappe fondamentali del lungo e complesso lavoro di raccolta, analisi, elaborazione e pubblicazione dei risultati:

1. Data base nazionale relativo a suoli, clima, fenologia, indici agroclimatici.
2. Atlante agroclimatico nazionale.
3. Scenari di cambiamento climatico.
4. Strumenti interattivi di consultazione e interrogazione.

Le attività di ricerca si sono avvalse del contributo scientifico e tecnico di ricercatori di:

- Ufficio Centrale di Ecologia Agraria del Consiglio per la Ricerca e Sperimentazione in Agricoltura (CRA-UCEA) - Roma:
 - a) Dott. Luigi Perini – Responsabile della linea di ricerca 2.1
 - b) Dott.ssa Maria Carmen Beltrano
 - c) Dott. Giovanni Dal Monte
 - d) Dott. Stanislao Esposito
 - e) Dott. Luca Salvati
 - f) Dott. Tomaso Ceccarelli (Consulente esterno)
- Dipartimento di Colture Arboree dell’Università Palermo:
 - a) Prof. Tiziano Caruso
 - b) Prof. Antonio Motisi
 - c) Prof. Francesco Paolo Marra

Alla fine del 2° anno di attività è stato pubblicato il volume: “*ATLANTE AGROCLIMATICO: agroclimatologia, pedologia, fenologia del territorio italiano*” con annesso un CD-rom in cui sono state memorizzate le mappe in formato GIS e l’applicazione software (browser-GIS) necessaria alla loro consultazione dinamica ed interattiva.

Al momento è in preparazione un secondo CD necessario per integrare e completare la prima versione dell’Atlante ed è altresì in allestimento la pubblicazione di un secondo volume che, con le stesse impostazioni e soluzioni tecniche del precedente, fornirà la cartografia relativa agli scenari climatici prevedibili sull’Italia nel medio-breve periodo.

Nella presente relazione si riporta una descrizione complessiva del lavoro svolto: raccolta ed analisi dei dati, elaborazioni, risultati e prodotti ottenuti.

2. Dati di base

L'analisi climatica necessita di serie meteorologiche sufficientemente lunghe, affidabili, omogenee, complete e ben distribuite sul territorio. Per perseguire i suoi scopi la ricerca 2.1 si è avvalsa di un database ottenuto dalla spazializzazione (realizzata mediante *Analisi Oggettiva*¹) delle osservazioni meteorologiche originarie presenti nella Banca Dati Agrometeorologica Nazionale (BDAN)². I dati ottenuti costituiscono una serie completa dei valori giornalieri di temperatura dell'aria (minima e massima), precipitazione piovosa, eliofania, umidità relativa e velocità del vento (a 10 m) stimati su 544 punti (*nodi di griglia*) del territorio italiano (fig.1) distribuiti omogeneamente sulla base di uno schema regolare. Ciascun nodo di griglia rappresenta pertanto il centroide di una *cella meteo* di circa 30 Km di lato. Il periodo complessivo preso in considerazione è quello compreso fra il 1951 ed il 2003. Le elaborazioni climatiche, però, sono state effettuate sulla base del trentennio 1961-1990 secondo le raccomandazioni dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale (OMM/WMO).

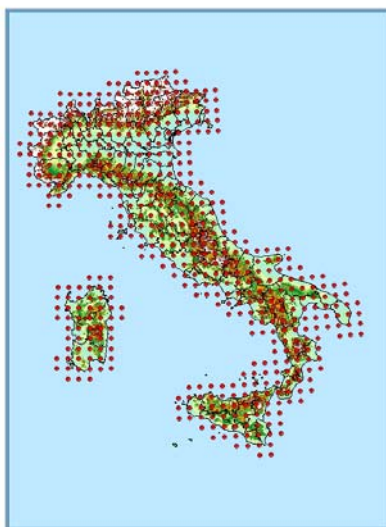


Fig. 1 – Griglia meteo (30 x 30 Km) di 544 punti.

Il database pedologico del territorio italiano deriva da elaborazioni realizzate nell'ambito del programma AGRIT del Ministero delle Politiche Agricole e Forestali.

¹ Le elaborazioni di *Analisi Oggettiva* sono state effettuate nell'ambito del Sistema Informativo Agricolo Nazionale (SIAN) del Ministero delle Politiche Agricole e Forestali. La ricostruzione spazio-temporale delle grandezze meteorologiche coinvolte nello studio meteo-climatico del territorio italiano è stata eseguita utilizzando la metodologia di "Kriging con deriva esterna". Il Kriging è un metodo di stima corretto: l'errore medio di stima è nullo. Lo scarto tra la media dei dati stimati e la media dei dati reali tende a zero quanto maggiore è l'estensione del dominio di analisi. In altre parole, le proprietà statistiche macroscopiche degli eventi meteorologici sono ben riprodotte nel modello numerico anche se si può manifestare un "effetto smoothing" che porta alla perdita di un certo dettaglio.

² La *Banca Dati Agrometeorologica Nazionale (BDAN)* è stata realizzata in ambito SIAN. In essa sono archiviati i dati meteorologici delle reti di rilevamento UCEA e di altri Servizi Meteorologici italiani.

L'informazione elementare di riferimento è una cella quadrata con superficie di 64 km². Il numero di celle su tutto il territorio italiano è pari a 5226 di cui solo 4479 presentano informazioni pedologiche associate. Il valore delle variabili pedologiche attribuito a ciascuna cella è stato stimato come media ponderata dei valori nelle unità di suolo-paesaggio che intersecano la cella utilizzando, come fattore di ponderazione, la superficie delle unità presenti nella cella. Le informazioni di base disponibili per ciascuna *cella pedo* sono:

- Codice ISTAT di regione (viene indicata la regione prevalente nella cella)
- Superficie interna alla cella occupata da unità suolo-paesaggio agricole (ha)
- Valore medio di profondità del suolo (mm)
- Valore medio di AWC (mm di acqua)
- Valore medio della percentuale di carbonio organico a circa 20 cm di profondità
- Valore medio della percentuale di sabbia
- Valore medio della percentuale di limo
- Valore medio della percentuale di argilla
- Valore medio della percentuale di scheletro

3. Elaborazioni

Nel presente lavoro le procedure di elaborazione sono state prodotte integralmente all'interno del gruppo di ricerca. In quasi tutti i casi esse sono state implementate inizialmente su foglio elettronico per collaudarne il corretto funzionamento e, successivamente, scritte in linguaggio di programmazione (Visual Basic) per il trattamento di massa. La base dati meteorologica è stata propedeuticamente sottoposta a vari controlli per accertarne la qualità, la presenza di errori e le eventuali fallanze: la metodologia utilizzata si è basata sulla verifica incrociata della congruità sequenziale di dati e statistiche (medie, totali, varianza) ed anche sulla congruità fra nodi di griglia limitrofi. Successivamente si è proceduto alle vere e proprie elaborazioni per ottenere le varie statistiche descrittive delle variabili e per calcolare gli indici agroclimatici. In estrema sintesi, oggetto delle elaborazioni effettuate sono state le seguenti grandezze:

- Temperatura
- Sommatorie termiche
- Precipitazione piovosa
- Stagione di Crescita (inizio, fine e durata)
- Frequenza delle gelate
- Fabbisogno in freddo (Unità di freddo/Chilling Units)
- Evapotraspirazione di riferimento (ET_0)
- Bilancio idrico dei suoli
- Tessitura dei suoli
- Date di fioritura e maturazione (Pesco)

Per maggiori dettagli riguardanti le elaborazioni meteo-climatiche si rimanda alla relazione tecnica finale del 2° anno.

I risultati delle elaborazioni sono stati a loro volta ulteriormente elaborati con procedure e strumenti GIS (Geographical Information System) per analizzarne la dimensione geografica e consentire la realizzazione della cartografia per l'Atlante. Le finalità, in questo caso, erano quelle di generare nuove informazioni integrando quelle già disponibili, sia di carattere meteorologico che pedologico e di rappresentarle in forma di mappe, realizzando anche un'applicazione multimediale che consentisse la consultazione delle mappe dell'Atlante secondo modalità semplici ed efficaci. Un'operazione fondamentale è stata quella di uniformare l'unità territoriale di riferimento alla *cella pedo* allo scopo di consentire l'elaborazione di dati specifici che, come nel caso del bilancio idrico, hanno richiesto l'intersezione dei dati associati alle *celle meteo* con quelli riferibili alle *celle pedo* e di uniformare la rappresentazione finale delle mappe generate. Per associare ad ogni *cella pedo* la corrispondente *cella meteo* è stato adottato il criterio della semplice distanza fisica. In altre parole, per ogni *cella pedo* è stata calcolata in modo automatico la distanza da tutti i *nodi di griglia* meteorologici, intesi come centroidi della *celle meteo* ed è stato quindi selezionato il nodo più vicino per attribuire alla *cella pedo* i valori ad esso associati. Considerando che le *celle meteo* e le *celle pedo* sono state create con il fine di ottenere una griglia a spaziatura regolare, si è ritenuto che il metodo della minima distanza rappresentasse un

criterio sufficientemente valido di attribuzione e che non vi fosse quindi la necessità di adottare procedure più complesse di intersezione.

Un altro aspetto del quale bisogna tener conto ai fini della organizzazione del database e della rappresentazione geografica dei dati è quello della loro risoluzione temporale. Mentre le caratteristiche pedologiche possono essere considerate sostanzialmente statiche nel tempo, almeno per quanto riguarda l'arco temporale esaminato, gli attributi meteorologici e le informazioni da esse derivate, possono avere una diversa articolazione. I dati elaborati, infatti, si riferiscono:

- alle *singole decadi*, come nel caso di temperature, frequenza gelate, ore di freddo, somme termiche, ET_0 e deficit idrico.
- a *sintesi su base mensile* (es. precipitazione totale mediana).
- a *sintesi relative all'intero periodo considerato*, ossia 1961-90 (es. inizio, durata, fine stagione crescita, frequenza gelate primaverili ed autunnali, fenologia).

Una volta effettuata l'operazione di associazione tra *celle pedo* e *celle meteo* i dati disponibili possono essere rappresentati come *stati informativi* o *layer*, secondo la terminologia GIS. Ai *layer* pedologici e meteorologici sono stati aggiunti alcuni *layer* legati all'orografia. Questo con un duplice obiettivo:

- delineare le aree che, in ragione sia di quote troppo elevate che di eccessive pendenze, mostrassero un valore marginale ai fini della coltivazione di colture agrarie. Scegliendo delle soglie altimetriche e di pendenza sono state realizzate delle "*maschere di non coltura*" in grado di suddividere il territorio nazionale in zone *adatte* o *non adatte*. Quest'ultime, quindi, possono essere sovrapposte ai *layer* contenenti le altre informazioni, per escludere (visivamente) le aree in cui le colture hanno appunto solo un significato marginale o dove esse non possono essere praticate in assoluto.
- utilizzare le informazioni di natura orografica come "*sfondo*" per facilitare la lettura delle mappe e migliorare, in generale, "la percezione" del territorio sottostante. L'informazione di partenza è un modello digitale del terreno (DTM) con celle a risoluzione 250 metri. Dal DTM sono stati derivati con procedure standard GIS la mappa delle pendenze (espresse in valore percentuale), la mappa delle esposizioni ed, infine, la mappa dell'ombreggiatura (*hillshade*). Tutti i suddetti *layer* mantengono la risoluzione spaziale del DTM. La mappa dell'ombreggiatura è stata ritenuta la più adatta a fornire lo "sfondo" a cui si faceva riferimento in precedenza.

Sempre per la finalità di migliorare la leggibilità delle mappe e, quindi, facilitare "l'esplorazione" del territorio nazionale, sono stati aggiunti una serie di altri *layer* costituiti dai limiti amministrativi e da altri elementi fisici quali:

- i confini nazionali, regionali, provinciali
- i principali fiumi
- i principali corpi idrici
- i principali centri urbani

I dati e le informazioni descritti in precedenza sono stati organizzati opportunamente per essere inseriti in unico database geografico. Questo comprende sia

i dati già disponibili in formati GIS (shapefile, grid) che dati tabellari da predisporre attraverso una serie di pre-processamenti. I software (SW) utilizzati sono:

- il database management system Access 2002 di Microsoft utilizzato nelle fasi di pre-processamento e formattazione dei dati tabellari. I files Access (formato .mdb) possono, infatti, essere letti direttamente dal SW GIS (vedi dopo).
- il SW GIS ArcView 8.2 di ESRI, incluse le estensioni *Spatial Analyst* e *Geostatistical Analyst*, utilizzato sia per la creazione del database geografico che per le elaborazioni.

Con le operazioni di pre-processamento si è provveduto all'organizzazione del database geografico in maniera tale che ogni dato, relativo ad esempio ad una singola decade, costituisca un campo a sé stante. L'operazione è stata effettuata con una serie di *query* sviluppate in Access. Nella creazione del database geografico, inoltre, è stato fatto nuovamente riferimento alle due tipologie di dati precedentemente evidenziate e riferite, rispettivamente, alle *celle meteo* ed alle *celle pedo*.

Le elaborazioni relative alle *celle meteo* possono essere facilmente rappresentate geograficamente attraverso le coordinate dei singoli nodi di griglia. È stato quindi costruito quello che viene chiamato un *event theme*, ossia un *layer* puntiforme immediatamente rappresentabile tramite le coppie di coordinate (originariamente espresse in latitudine e longitudine) relative ad ogni punto.

I dati relativi alle *celle pedo* (la profondità media dei suoli ed il valore medio dell'AWC), invece, risultavano già in origine disponibili in formato GIS (*Shapefile*).

I risultati delle elaborazioni effettuate sulla base delle stesse *celle pedo*, quali le classi tessiturali ed il bilancio idrico, sono stati assegnati alle *celle pedo* tramite semplice *Join* tabellare. Poiché è stato deciso di utilizzare la *cella pedo* come unità spaziale di riferimento per l'analisi e la rappresentazione cartografica dei dati, il sistema di riferimento originario delle *celle pedo* (European Datum 1950, UTM Zona 32N) è stato adottato anche per tutti i dati inclusi nel database geografico. È stato necessario, pertanto, riproiettare i *layer* creati sulla base dei nodi di griglia meteorologici.

L'operazione di assegnazione dei nodi griglia alle *celle pedo* è stata ottenuta in automatico attraverso una *Spatial Join* effettuata tra i nodi (entità puntiforme) e le celle (entità poligonale) indicando l'opzione di assegnare ad ogni cella (*polygon*) tutti gli attributi del nodo (*point*) più vicini al suo perimetro (*boundary*).

Per quanto riguarda la stima dei dati orografici derivati dal DTM, sono state utilizzate le funzioni standard per le elaborazioni *raster* di ArcView consentite dalla *extension* denominata *Spatial Analyst*. In particolare, per l'elaborazione del *layer* delle pendenze è stata usata la funzione *Surface Analysis, Slope*. Per l'elaborazione del *layer* delle esposizioni è stata usata la funzione *Surface Analysis, Aspect*. Infine, per quanto riguarda il *layer* dell'ombreggiamento è stata usata la funzione *Surface Analysis, Hillshade*. Le *maschere* di limite delle colture sono state ottenute sempre con *Spatial Analyst* e con il *Raster Calculator*, indicando nella sintassi le seguenti condizioni:

- DTM > 1500, per quanto riguarda la maschera altitudinale.
- Pendenze > = 30, per quanto riguarda la maschera di pendenza.

Sono stati ricavati dei *layer* binari in formato *raster*, in cui le celle del *layer* di input (DTM o pendenze) sono state riclassificate secondo la codifica 0 (cella al di sotto della soglia) o 1 (cella al di sopra della soglia indicata). Questi *layer raster* sono stati quindi convertiti in *layer* vettoriali, più indicati per la sovrapposizione con gli altri strati tematici.

La rappresentazione GIS di una mappa è data dalla combinazione dello strato tematico o *layer* e dalle modalità di *simbolizzazione* (palette di colori, campitura o altro) prescelti. Per alcuni dei *layer* descritti in precedenza, la *simbolizzazione* ha implicato di per sé una classificazione del dato. Infatti, se per i dati che già risultavano essere misurati a livello qualitativo (es. le classi tessiturali) è stata assegnata ad ogni classe una simbologia-colorazione specifica, diverso è stato il discorso per i dati quantitativi (es. profondità dei suoli, temperatura media, deficit idrico). In questo caso, i dati, per essere facilmente rappresentati tramite mappe, sono stati riclassificati proprio in fase di assegnazione della *palette* di colori. Il criterio generalmente adottato è stato quello di suddividere i valori in un numero non eccessivo di classi.

Le soglie delle singole classi sono state definite in modo da poter essere facilmente interpretabili dall'utente.³

Per l'individuazione delle soglie si è comunque proceduto, per ognuna delle variabili considerate, ad una valutazione della distribuzione dei valori osservati tramite classificazione in quantili.

Un discorso a parte meritano le elaborazioni fenologiche, realizzate su una coltura campione (il Pesco), per le implicazioni clima-coltura che comportano. Le piante arboree da frutto decidue hanno la capacità di sincronizzare il proprio sviluppo fenologico con l'andamento climatico stagionale. Ciò consente alle piante di svolgere i processi vegetativi e riproduttivi nel periodo dell'anno in cui il clima è favorevole evitando conseguenze negative per condizioni ambientali (meteorologiche) non tollerate. La durata del giorno e la temperatura sono i fattori climatici che maggiormente condizionano l'evoluzione fenologica e la velocità con la quale si verifica il passaggio da uno stadio a quello successivo. Ciascuna fase di sviluppo mostra risposte differenziate ai fattori ambientali in relazione allo specifico stadio di sviluppo della pianta: il mancato soddisfacimento delle esigenze della pianta può compromettere la produttività o la sua stessa sopravvivenza. Sebbene i meccanismi biologici coinvolti in tali fenomeni siano, al momento, ancora poco conosciuti, è possibile formulare relazioni di tipo empirico tra l'andamento della temperatura e la risposta fisiologica della pianta (modelli fenoclimatici).

Un ruolo particolarmente importante nel controllo della ripresa vegetativa è svolto dalla temperatura: lo stato di dormienza invernale (endo-dormienza), infatti, può essere superato soltanto se le piante risultano esposte a temperature moderatamente basse (circa 6 °C) per un periodo di tempo specifico in rapporto alla specie e alla cultivar. Ciò definisce il cosiddetto fabbisogno in freddo che è ritenuto una costante genetica poco o affatto influenzabile da fattori esterni (ambientali o colturali) e che costituisce l'assunto fondamentale delle attuali formulazioni dei modelli fenoclimatici.

³ Nel caso particolare dei dati pedologici, alcune *cellepedo* sono prive di informazioni, in quanto non intersecano unità suolo-paesaggio agricola; nelle mappe queste celle risultano quindi prive di colorazione.

Una volta soddisfatto il fabbisogno in freddo, le piante rimangono quiescenti fino a quando la temperatura raggiunge livelli favorevoli alla ripresa vegetativa. Questo periodo viene anche definito eco-dormienza ad indicare che le limitazioni allo sviluppo sono determinate da condizioni ambientali non favorevoli più che da inibizioni endogene (Lang, 1987). Anche la durata di quest'ultimo periodo dipende dalla temperatura ma, in questo caso, è l'effetto di temperature moderatamente elevate a favorire la ripresa vegetativa e, successivamente, anche la crescita e lo sviluppo del frutto. L'effetto della temperatura, dal punto di vista quantitativo, è descritto da una sommatoria termica (fabbisogno in caldo) anch'essa assunta come una caratteristica genetica.

Le relazioni temperatura-pianta descrivono fenomeni di tipo continuo e non lineare comportando perciò la necessità di integrare il tasso di sviluppo delle piante utilizzando il tasso medio all'interno di un intervallo temporale quanto più piccolo possibile fra due rilievi termometrici consecutivi. A partire dalle temperature massima e minima giornaliere è stato utilizzato il modello di interpolazione oraria di Linvill (fig. 2) per stimare le temperature orarie da utilizzare nei modelli fenoclimatici. Ai fini del superamento della dormienza invernale è stato utilizzato il modello Utah (Richardson et al., 1974). In tale modello si assume che la temperatura esercita la massima efficacia, per il superamento della dormienza, intorno ai 6 °C, mentre temperature superiori ai 14,5 °C svolgono effetti negativi (fig.3). Per il calcolo delle sommatorie termiche (Growth Degree Hours), l'esperienza operativa ha indirizzato la scelta verso un modello di tipo non-lineare proposto da Anderson et al. (1986) e denominato ASYMCUR. Tale modello approssima la reale risposta della pianta prevedendo una temperatura di base (T_b), una ottimale (T_o), ed una critica (T_c). La caratteristica fondamentale del modello ASYMCUR è la sua asimmetria, intorno all'optimum, nella risposta alla temperatura. I parametri derivano da precise ipotesi fisiologiche mentre non sembra si possa affermare lo stesso riguardo alla formulazione, costituita da due segmenti sinusoidali, uno ascendente da T_b a T_o ed uno discendente da T_o a T_c . In considerazione del fatto che ciascuna fase fenologica può essere caratterizzata da una specifica risposta alla temperatura ambiente, sono state adottate due diverse parametrizzazioni del modello ASYMCUR. In particolare, per la fase fine-dormienza-fioritura sono stati adottati i parametri generalmente accettati ed utilizzati per tale fase fenologica e proposti da Anderson et al. (1986); per la fase fioritura-maturazione, invece, è stata utilizzata una combinazione di parametri specificamente ottimizzata su dati fenologici rilevati presso ambienti frutticoli italiani (Motisi et al., 1994) (fig. 4).

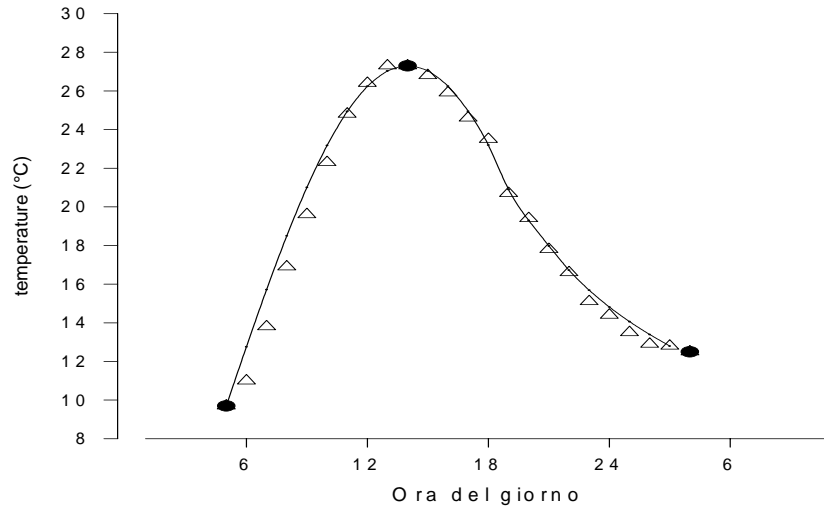


Fig.2 - Andamento orario della temperatura (Δ), registrato a Castrovillari il 5 luglio 1995. Si riportano i valori calcolati mediante un modello seno-logaritmico (linea continua; Linvill, 1990) utilizzando soltanto la temperatura massima e le due minime consecutive verificatesi, rispettivamente, il 5 ed il 6 luglio (punti indicati con \bullet).

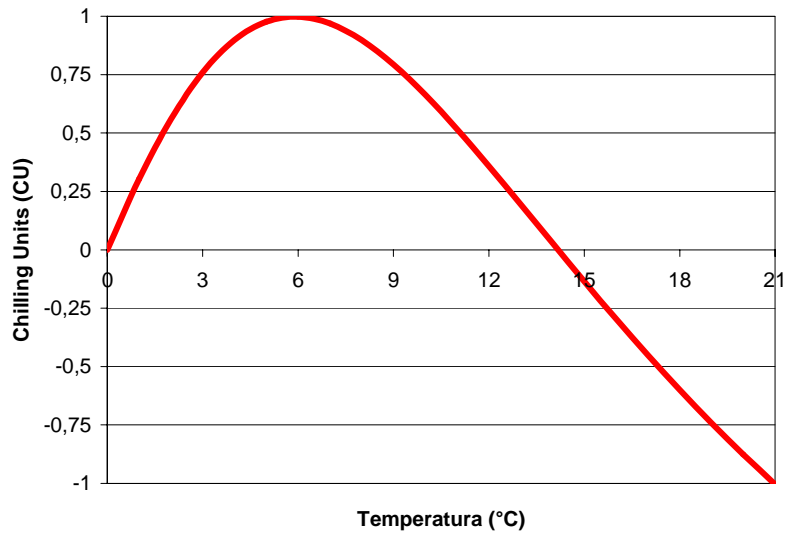


Fig. 3 - Effetto della temperatura sul tasso di accumulo di Unità Fredda (Chilling Units, CU; Richardson et al., 1974).

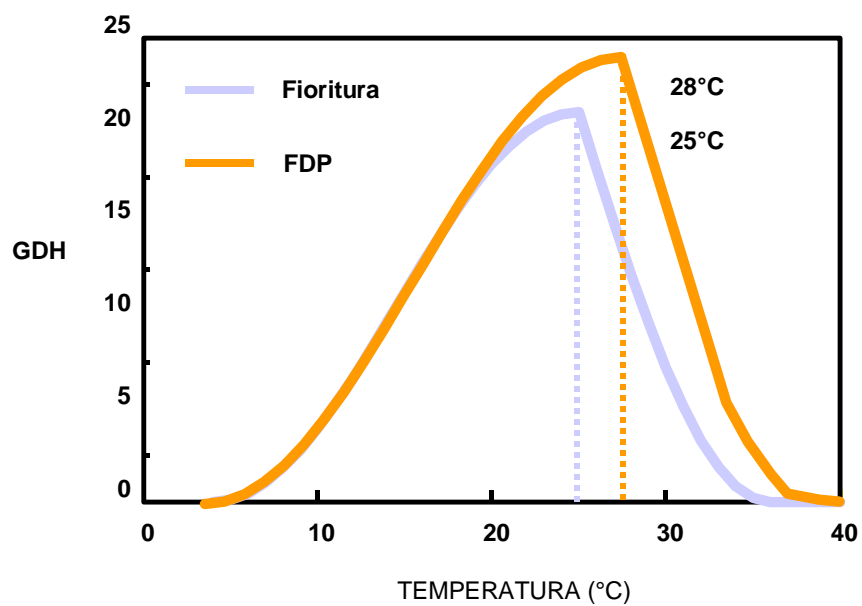


Fig. 4 - Relazione tra tasso di sviluppo e temperatura secondo il modello ASYMCUR. Nella parametrizzazione originale (Anderson et al., 1986; $T_b=4,5^\circ\text{C}$, $T_o=25^\circ\text{C}$ e $T_c=36^\circ\text{C}$) utilizzata nel periodo fine dormienza - fioritura, e parametrizzato per l'intervallo fioritura-maturazione ($T_b=4,3^\circ\text{C}$, $T_o=27,8^\circ\text{C}$ e $T_c=37,4^\circ\text{C}$).

Le elaborazioni, effettuate anno per anno e per ciascuno dei 544 nodi della griglia meteo, hanno prodotto come risultato la stima delle date di fioritura e maturazione basata su criteri di accumulo combinato di Chilling Unit e di Growing Degree Hours. Sono state pertanto incrociate quattro soglie di accumulo di freddo (200, 500, 800 e 1200 C.U.) con quattro soglie di accumulo termico (20000, 40000, 60000 e 80000 GDH) per tener conto della gamma di esigenze espresse dalle diverse cultivar di Pesco.

I risultati ottenuti dai modelli fenoclimatici sono stati ulteriormente elaborati con procedure e strumenti GIS (Geographical Information System) per analizzarne la dimensione geografica. L'intero territorio italiano è stato suddiviso in elementi territoriali minimi (celle) di 8 x 8 Km cui sono state riferite le statistiche "climatiche" di fioritura e maturazione del Pesco espresse da: il valore medio, la deviazione standard, il 20° e l'80° percentile ed, infine, il numero di anni per i quali il modello ha potuto calcolare la data di fioritura e/o di maturazione. Sono state escluse dal computo tutte le celle in cui la fioritura e/o la maturazione non sono giunte a completamento almeno nell'80% dei casi (24 anni).

Le mappe di fioritura e maturazione, inserite nell'Atlante agroclimatico, sono consultabili mediante una interfaccia utente appositamente sviluppata che consente la valutazione delle variazioni territoriali della fenologia del pesco, evidenziando le numerose specificità ambientali del territorio nazionale. Così, ad esempio, emergono le attitudini delle più importanti aree peschicole italiane in merito alla possibilità di soddisfare il fabbisogno in freddo o alla maggiore o minore precocità di fioritura e maturazione. Tali elementi sono ulteriormente arricchiti dalla possibilità di integrare le informazioni fenologiche con gli strati informativi che riguardano la pedologia e la climatologia più in generale.

Da una analisi complessiva della variazione territoriale della fenologia del pesco del territorio italiano emerge una certa uniformità tra le aree peschicole settentrionali. Maggiore variabilità, in relazione anche alla diversa altimetria degli areali colturali del pesco, si riscontra, invece al Meridione dove, insieme alle maggiori espressioni di precocità di fioritura e maturazione, si possono registrare anche ritardi nella fenologia rispetto al Settentrione, soprattutto negli ambienti dove la disponibilità di freddo invernale è limitata. Sempre al Meridione, inoltre, risulta maggiore la variabilità tra gli anni nella fenologia del pesco con una conseguente maggiore aleatorietà del risultato produttivo. Ancora nei distretti peschicoli meridionali si rilevano ampie variazioni, sia nel territorio che da un anno all'altro, nella fenologia della maturazione, fenomeno che interessa soprattutto le produzioni extrastagionali (sia in anticipo che in ritardo), che può condizionare le possibilità di programmazione dei calendari di offerta.

4. Scenari climatici

L'attività di ricerca nel terzo ed ultimo anno di CLIMAGRI si è concentrata sulla definizione degli scenari climatici futuri in relazione ai segnali di cambiamento denunciati dalla comunità scientifica mondiale ed anche emersi dalle analisi condotte dal gruppo di lavoro sul periodo 1951-2003. Le maggiori problematiche che insorgono nel valutare le conseguenze degli eventuali cambiamenti climatici sulla società e sulle attività umane, soprattutto su quelle più esposte all'influenza dei fenomeni atmosferici come l'agricoltura, riguardano proprio la predizione dello Scenario climatico che dovrebbe delinarsi e consolidarsi in un futuro più o meno prossimo. Un modo per preconizzare gli scenari futuri più probabili è quello di dedurre, mediante simulazioni realizzate con opportuni modelli deterministici, i mutamenti dello stato fisico e dei moti di circolazione dell'atmosfera inseriti in un contesto di altrettanto possibili evoluzioni a scala globale dello sviluppo economico, della crescita demografica, delle emissioni di gas, etc.

Le variabili forzanti utilizzabili nelle suddette simulazioni derivano, anche in questo caso, da ipotesi elaborate dall'IPCC ed afferiscono sostanzialmente a diverse concentrazioni in atmosfera di particolari elementi chimici, quali il biossido di carbonio ed il metano, in grado di influenzare significativamente i fenomeni meteorologici ed il clima.

I modelli utilizzati per ottenere le simulazioni appartengono per lo più alla famiglia dei Global Circulation Models (GCM). Essi derivano concettualmente dai modelli di previsione atmosferica ma, rispetto a quest'ultimi, operano ad un grado di risoluzione spaziale più basso (~300 Km) coprendo però un più ampio intervallo di tempo (diverse decine di anni) come richiesto dalle simulazioni di stampo climatico. Attraverso opportune tecniche di downscaling i dati elaborati dai GCM possono essere interpolati a scale di maggior dettaglio (~50 Km) per una migliore applicabilità a fini operativi e di ricerca. L'informazione così ottenuta comporta però alcune limitazioni nella pratica che, in considerazione delle finalità della presente linea di ricerca, hanno condizionato negativamente una loro possibile adozione nel presente lavoro. Allo stato attuale delle conoscenze, infatti, nessuna simulazione climatica di tipo deterministico può essere considerata una previsione sufficientemente attendibile della realtà futura e, in ogni caso, la serie dei dati ottenuti con le suddette procedure potrebbe essere correttamente utilizzata solo a livelli di aggregazione mensile o superiore, comportando anche un certo decadimento della qualità dell'informazione, soprattutto riguardo la variabilità delle grandezze, nonché una qualche difficoltà a rappresentare correttamente la casistica degli eventi estremi come, in particolare, è stato dimostrato per la temperatura massima e le precipitazioni piovose (Vaccari et al., 2006).

È stato pertanto scelto di delineare i possibili quadri climatici del futuro attraverso opportune proiezioni dei dati del passato, a prescindere cioè dalle possibili evoluzioni in campo politico, economico, demografico, etc. Per semplicità di espressione, quindi, si attribuirà alla definizione di Scenario climatico, il significato riferito al solo insieme delle condizioni meteoroclimatiche prefigurate.

La base dati meteorologica utilizzata, come già nella realizzazione del primo *Atlante agrometeorologico*, è costituita dalle serie di dati giornalieri di 544 nodi di griglia afferenti l'intero territorio nazionale. Il periodo preso in esame, considerati gli obiettivi attuali, è stato esteso dal 1961 al 2003 in maniera da poter collezionare una più

ampia casistica meteorologica. Anche in questo lavoro le procedure di elaborazione sono state prodotte integralmente all'interno del gruppo di ricerca. In quasi tutti i casi esse sono state implementate inizialmente su foglio elettronico per collaudarne il corretto funzionamento e, successivamente, scritte in linguaggio di programmazione (Visual Basic) per il trattamento di massa. Per le analisi statistiche ci si è avvalsi del software statistico SPSS.

Preliminarmente, è stata esplorata la possibilità di utilizzare i cosiddetti generatori stocastici di dati meteorologici (Stochastic Weather Generator, SWG). Questi modelli si basano su validi principi teorici ma non sempre risultano di facile applicazione. Partendo da osservazioni meteorologiche sufficientemente lunghe, i modelli SWG consentono di creare sequenze di dati caratterizzati da alta definizione temporale (dati giornalieri), congrui con la naturale interdipendenza esistente tra variabili meteorologiche (come quella, ad esempio, tra precipitazione piovosa, temperatura e radiazione) e modulati secondo l'andamento stagionale dell'anno.

Le proprietà statistiche delle serie generate rispecchiano nel complesso le proprietà statistiche delle serie originali ma, sulla base di specifiche esigenze, tali proprietà possono essere opportunamente reimpostate per ottenere le simulazioni desiderate. Il limite operativo, anche in questo caso, è costituito dalla difficoltà di formulare ipotesi oggettive sulla natura e sulla entità del cambiamento climatico, dovendo magari ipotizzare il coinvolgimento di più variabili alla volta, in un contesto climatico-ambientale molto complesso come quello italiano. Ciò ha fatto decadere l'ipotesi di utilizzare strumenti del genere in questo lavoro.

È stato deciso, quindi, di definire gli scenari climatici attraverso una esplorazione mirata dei dati del passato. L'assunzione di fondo è stata che, almeno per quanto riguarda il futuro più prossimo, la natura del più probabile "cambiamento" climatico risulta descritta nella variabilità degli eventi trascorsi, cioè negli scostamenti dalla normalità climatica che si sono osservati nel corso degli anni.

I segnali probatori di cambiamento climatico, come in precedenza è stato ampiamente menzionato, convergono principalmente intorno alle alterazioni dei regimi termo-pluviometrici ed è per tale ragione che, in questo studio, è stato scelto di classificare gli andamenti meteorologici dei singoli anni sulla base della temperatura media annua e della precipitazione totale annua opportunamente riferite alla scala nazionale.

La tecnica utilizzata fa riferimento alla metodologia statistica di analisi multivariata, in grado di riconoscere e classificare oggettivamente gli elementi costitutivi di un universo o di un campione statistico significativo. La catalogazione di oggetti, o di eventi, misurabili in categorie rappresentano un esempio di identificazione di un sistema di classificazione di entità a partire dall'osservazione multidimensionale della realtà senza operare una definizione delle classi a-priori. Questo è un obiettivo rilevante delle tecniche statistiche che vanno sotto il nome di analisi di raggruppamento (cluster analysis). Dentro i gruppi formati a posteriori, le entità sono mutualmente surrogabili, anche se in ciascuna classe potranno essere individuati profili comuni che individueranno pertanto entità "simili" o comunque "somiglianti" (Rizzi, 1985).

La cluster analysis ha un'importante rilevanza nel rappresentare le entità conosciute attraverso determinazioni sperimentali multivariate in forma grafica e sintetica, semplice e parsimoniosa (in termini di dimensioni concettuali rilevanti per il lettore). Assume, inoltre, un ruolo ancora più concreto sia nell'ottica di generare ipotesi di ricerca e di scenari in condizioni di scarsa (o nulla) ripetibilità sperimentale, sia

nell'identificazione di tipi e profili sintetici appartenenti a gruppi individuati a posteriori sulla base di una collezione di descrittori quali-quantitativi (e.g. Fabbris, 1997).

Queste caratteristiche, a partire dalle informazioni climatiche disponibili, hanno incoraggiato un approccio basato su analisi dei cluster al fine di generare scenari climatici a breve termine basati sul criterio del “what... if”, ovvero sulla partizione delle annate climatiche pregresse, connotate da forte eterogeneità complessiva, in sottogruppi con caratteristiche più omogenee, utili per poter trarre delle proiezioni basate, dunque, non su strumenti probabilistici ma su riconoscimento e classificazione automatica degli andamenti climatici affini. Tale approccio appare di rilevante interesse se applicato ad un contesto agro-ambientale molto eterogeneo, quale quello italiano, che nei 43 anni presi in considerazione (periodo 1961-2003) ha avuto svariate occasioni di sperimentare annate climatiche caratterizzate da deviazioni più o meno consistenti dall'andamento “normale”.

Sotto il profilo procedurale, la cluster analysis si può convenzionalmente suddividere in due grandi filoni: l'analisi gerarchica, in cui ogni partizione dell'insieme viene organizzata in classi progressivamente più grandi fino a comprendere la classe finale che contiene l'intero insieme di entità analizzate, e l'analisi non gerarchica che genera, appunto, gruppi non gerarchizzabili, dovendo l'operatore decidere a-priori il numero di raggruppamenti. Tali gruppi possono rappresentare partizioni, ovvero classi mutualmente esclusive, oppure classi sovrapposte, per le quali si ammette la possibilità che un'entità possa appartenere contemporaneamente a più di una classe (Mardia et al., 1979).

Al fine di conseguire gli obiettivi esplorativi di questo studio, è stato ritenuto opportuno restituire in modo efficace le relazioni fra le diverse dimensioni climatiche (temperatura minima e massima, evapotraspirazione potenziale, precipitazione, etc.) misurate su tutto il territorio nazionale durante il periodo di studio attraverso una aggregazione temporale decadale. Essendo l'obiettivo rappresentato dalla generazione di proiezioni climatiche di breve periodo ad elevata risoluzione spaziale (30 km) e di interesse agro-ambientale, la procedura operativa ha suddiviso le strutture climatiche locali (annate climatiche) in un numero limitato di partizioni attraverso una cluster analysis non gerarchica effettuata mediante l'algoritmo k-means. Ciò ha permesso di classificare le 43 annate in insiemi funzionalmente omogenei. L'ottimizzazione della procedura ha consentito di individuare una partizione idonea formata da 5 gruppi o cluster. Tale partizione è stata tipizzata a posteriori mediante un “profilo climatico” dei gruppi ottenuti tramite analisi statistica descrittiva.

In termini tecnici, la procedura k-means clustering individua k differenti clusters costruendoli in base ad un criterio di massima distinzione. Computazionalmente, questo algoritmo di clusterizzazione può essere considerato un'analisi della varianza (ANOVA) “al rovescio”. Infatti, dopo aver scelto il numero di gruppi su cui articolare la classificazione, ogni unità statistica -nel nostro caso ogni annata climatica- è stata attribuita ad uno dei 5 clusters precostituiti secondo un processo ottimizzato a minimizzare la varianza all'interno di ciascun cluster ed a massimizzare quella fra clusters.

I risultati della clusterizzazione ottenuti tramite k-means riportano, a corredo di ciascuna dimensione climatica analizzata -nel nostro caso specifico le medie annue di temperatura ed i totali annui di precipitazione- alcune informazioni supplementari riguardanti gli indici di posizione e di dispersione (media e deviazione standard) che

consentono di verificare l'effettiva distanza di ciascun cluster dagli altri. Infine, è stato possibile computare, per ogni unità statistica sottoposta all'analisi, la distanza dal centro del corrispondente cluster di appartenenza. Tale misura appare di rilevante importanza in quanto la classificazione può avvalersi di uno strumento di fine valutazione interpretabile come un indice di bontà "media" della stessa classificazione (Fabbris, 1997).

L'analisi condotta secondo l'algoritmo non gerarchico k-means sulla base della temperatura media annua, ha quindi generato 5 partizioni popolate numericamente in maniera differente ma piuttosto omogenee dal punto di vista termometrico e riconducibili a un gradiente termico (Tabella.1) rispetto alla temperatura media del periodo di riferimento 1961-1990 (13.2 °C).

Cluster	numero anni	Tmedia (°C)	Δ T (°C)
1	6	13.4	0.2
2	6	13.4	0.2
3	14	13.0	-0.1
4	5	12.6	-0.6
5	12	14.0	0.8

Tabella 1 – Partizione delle annate climatiche (periodo 1961-2003) secondo *Cluster analysis* basata sulla temperatura media annua. Il ΔT è calcolato rispetto alla temperatura media annua nazionale del periodo di riferimento 1961-1990 (13,1°C).

I gruppi (cluster) 1, 2 e 5 individuano anni mediamente più caldi rispetto al riferimento climatico. In dettaglio, i gruppi 1 e 2 presentano un ΔT di 0.2°C ed includono anni appartenenti a tutti i decenni del periodo considerato, mentre il gruppo 5 include gli anni con le manifestazioni termiche più estremizzate posizionandosi in media di 0.8°C al di sopra del riferimento climatico 1961-1990. L'anno 2003, in particolare, rappresenta l'esempio più significativo evidenziando un'anomalia così marcata da presentare in assoluto anche la più elevata distanza di legame dal centro del rispettivo cluster (il n.5). Si noti, inoltre, che gli anni che partecipano al 5° cluster, a parte il 1961, sono tutti compresi fra il 1988 ed il 2003 indicando un evidente progressivo riscaldamento come descritto a livello nazionale e pure su scala più ampia. Il gruppo 3 raggruppa gli anni con una configurazione tendenzialmente più vicina alla norma climatica, mentre il gruppo 4 ha raccolto un gruppo ristretto di annate, comprese fra il 1965 ed il 1984, decisamente più fredde rispetto al riferimento climatico. (tabella 2).

Ponendosi l'obiettivo di generare proiezioni climatiche applicabili a possibili futuri scenari di riscaldamento globale, è stata focalizzata maggiormente l'attenzione sui gruppi 1, 2 e 5. Tuttavia, è stato deciso di considerare anche il gruppo 3 che, in questa nostra analisi, è chiamato a supportare l'ipotesi di un cambiamento climatico nullo o del tutto trascurabile (T=).

Temperatura media annuale						
Anni	distanza dal centro	Valore Minimo	Valore Massimo	Valore Medio	Dev. std.	CLUSTER
1964	0.24	0.4	18.7	13.2	4.2	1
1966	0.21	0.1	18.6	13.3	4.3	1
1967	0.18	0.5	18.9	13.4	4.3	1
1983	0.14	0.1	18.9	13.3	4.2	1
1989	0.35	0.8	19.3	13.6	4.1	1
1995	0.20	0.0	19.1	13.3	4.4	1
1977	0.25	-0.7	19.0	13.2	4.5	2
1982	0.27	0.1	19.5	13.6	4.4	2
1985	0.21	-0.3	19.3	13.3	4.5	2
1986	0.12	-0.5	19.4	13.4	4.5	2
1987	0.16	-0.2	19.5	13.4	4.5	2
1993	0.27	0.1	19.2	13.5	4.3	2
1962	0.30	-0.7	18.9	13.0	4.5	3
1963	0.39	-0.9	18.5	12.9	4.5	3
1968	0.28	-0.1	19.0	13.2	4.4	3
1969	0.18	-0.4	18.4	12.9	4.3	3
1970	0.25	-0.3	18.8	13.2	4.4	3
1971	0.29	0.4	18.4	13.1	4.1	3
1972	0.19	-0.6	18.6	12.9	4.4	3
1973	0.27	0.1	18.9	13.1	4.2	3
1974	0.26	-0.4	18.3	13.0	4.2	3
1975	0.26	-0.3	18.8	13.2	4.2	3
1979	0.16	-0.6	18.9	13.0	4.4	3
1981	0.19	-0.3	18.7	12.9	4.3	3
1991	0.19	0.0	18.8	13.1	4.3	3
1996	0.21	-0.6	18.7	13.1	4.3	3
1965	0.27	-0.8	18.4	12.7	4.5	4
1976	0.30	-0.5	18.1	12.7	4.2	4
1978	0.12	-1.0	18.3	12.6	4.4	4
1980	0.25	-0.9	18.2	12.4	4.3	4
1984	0.19	-1.0	18.6	12.6	4.5	4
1961	0.28	0.5	19.0	13.8	4.2	5
1988	0.26	0.4	19.7	13.8	4.3	5
1990	0.21	0.7	19.8	14.0	4.3	5
1992	0.28	0.5	19.3	13.8	4.3	5
1994	0.43	0.8	20.1	14.3	4.3	5
1997	0.26	0.9	19.1	13.9	4.2	5
1998	0.34	0.6	19.2	13.7	4.2	5
1999	0.27	0.2	19.7	13.8	4.5	5
2000	0.21	0.8	19.6	14.1	4.3	5
2001	0.26	1.0	19.9	14.0	4.4	5
2002	0.25	0.6	19.2	13.8	4.2	5
2003	0.72	1.5	20.0	14.5	4.1	5

Tabella 2.2 - Statistiche descrittive e classificazione in cluster omogenei delle annate climatiche 1961-2003 sulla base della temperatura media annua.

I clusters 1 e 2, inoltre, hanno manifestato una sostanziale omogeneità per quanto riguarda la distribuzione dei valori di temperatura media annua, come comprovato anche dai risultati del test t ($p > 0,05$). Pertanto, essi sono stati considerati come un unico gruppo cui è stato attribuito, in questo studio, la rappresentatività di uno scenario “intermedio” collegabile all’ipotesi di un debole riscaldamento (T+).

Il gruppo 5 prefigura, invece, una condizione di più marcato riscaldamento: le sue caratteristiche in termini di temperatura media rappresentano quindi in questo studio lo scenario “estremo” (T++). Si ricorda, infine, che il gruppo 4, espressione di annate decisamente “fredde” (T-), non è stato affatto considerato per la successiva definizione degli scenari climatici in quanto numericamente poco consistente.

A fini esplorativi e nell’intento di trovare conferme aggiuntive al criterio “termometrico” utilizzato per classificare le annate climatiche, è stato ritenuto opportuno reiterare la stessa tecnica di clusterizzazione non gerarchica adottando una variabile diversa. È stato scelto, pertanto, di utilizzare quale descrittore la precipitazione piovosa anche in ragione del fatto che il suo trend climatico è generalmente contrapposto a quello della temperatura.

Anche in questo caso i risultati dell’analisi multivariata hanno consentito di pervenire ad una tipizzazione delle annate climatiche sulla base di profili sufficientemente omogenei di totali di precipitazione piovosa annua. Inoltre, è stata verificata una certa coerenza fra le partizioni delle annate ottenute con le due differenti grandezze, precipitazione e temperatura, ottenendo una prova empirica dell’assunto che ad anni mediamente poco piovosi corrispondono anomalie termometriche, generalmente positive, anche consistenti.

La tabella 3 descrive la partizione delle 43 annate pluviometriche in 5 clusters omogenei, ordinati in base alla precipitazione totale annua media secondo un gradiente pluviometrico decrescente.

Cluster	numero anni	Prec anno (mm)	Δ Prec (mm)
a	11	861.4	40.8
b	11	860.9	40.4
c	2	780.7	-39.9
d	13	735.4	-85.2
e	6	645.0	-175.6

Tabella 3 - Partizioni delle annate climatiche (periodo 1961-2003) secondo *Cluster analysis* basata sulle precipitazioni medie annue. Il Δ Prec è calcolato rispetto alla precipitazione totale media annua nazionale del periodo di riferimento 1961-1990 (820.6 mm).

Il gruppo di anni più umidi è incluso nel cluster “a”, che presenta una precipitazione media di 861.4 mm. In questo gruppo, a parte il 1996 ed il 2002, vengono rappresentate soprattutto le annate dei decenni ’70 e ’80. Nel gruppo “b”

vengono classificati gli anni umidi appartenenti al primo decennio del periodo di studio, dal 1961 al 1971, che presentano una precipitazione media di 860.9 mm, praticamente confrontabile con quella del gruppo “a”. Il cluster “c” è rappresentato da due sole annate, il 1977 ed il 2000, con una precipitazione media che si attesta intorno ai 780 mm. Il gruppo “d” include anni mediamente secchi, generalmente appartenenti ai decenni '80 e '90, ed è caratterizzato da una precipitazione media di circa 735 mm. Il cluster “e”, infine, include gli ultimi anni della serie storica, caratterizzati da una generalizzata riduzione degli apporti meteorici, tanto che la media di questo gruppo si attesta su 645 mm, oltre 175 mm in meno rispetto alla climatologia di riferimento.

Analogamente a quanto già fatto nel caso della temperatura, la classificazione ottenuta dall'analisi multivariata condotta sui dati di precipitazione piovosa è stata ulteriormente esaminata e riorganizzata alla luce delle seguenti considerazioni:

- la sostanziale somiglianza, in termini di valore medio, dei gruppi “a” e “b” ha suggerito la fusione dei due clusters in un unico gruppo di annate classificabili come annate umide (P++);

- la limitata numerosità del cluster “c” ha suggerito la sua fusione con quello più simile in termini di precipitazione media (il cluster “d”) venendo così a rappresentare il gruppo che descrive le annate mediamente secche (P-);

- il cluster “e”, infine, è stato designato per descrivere le annate estremamente secche (P--).

In definitiva, gli anni del periodo 1961-2003 sono stati tipizzati sia in base alla piovosità (utilizzando tre classi di precipitazione annua: P++, P-, P--), sia in base alla temperatura annua (utilizzando quattro classi: T-, T=, T+, T++).

Incrociando gli attributi di ciascun anno in una tabella di contingenza (Tab. 4), si può evincere come gli anni più secchi (P--) siano anche i più caldi in 5 casi su 6, o come gli anni mediamente secchi (P-) siano anche quelli moderatamente caldi (T+) o, addirittura, molto caldi (T++) in complessivi 11 casi su 15. Una forte eterogeneità viene riscontrata per gli anni maggiormente umidi (P++), che sono classificabili come anni freddi solo in 5 casi su 22.

<i>Prec/Temp</i>	T-	T=	T+	T++	Totale
P++	5	10	5	2	22
P-	-	4	6	5	13
P--	-	-	1	5	6
Totale	5	14	13	13	43

Tabella 4 – Confronto fra annate classificate congiuntamente in base alla temperatura e alla precipitazione piovosa.

A tal riguardo, una ulteriore evidenza empirica circa la corrispondenza fra annate calde e secche viene dall'esame grafico della relazione fra precipitazioni piovose e temperatura medie annue. Nonostante alcuni evidenti outliers (e.g., l'annata 2003), si evince infatti (Fig. 5) una relazione negativa e significativa ($p < 0,001$) fra le due variabili.

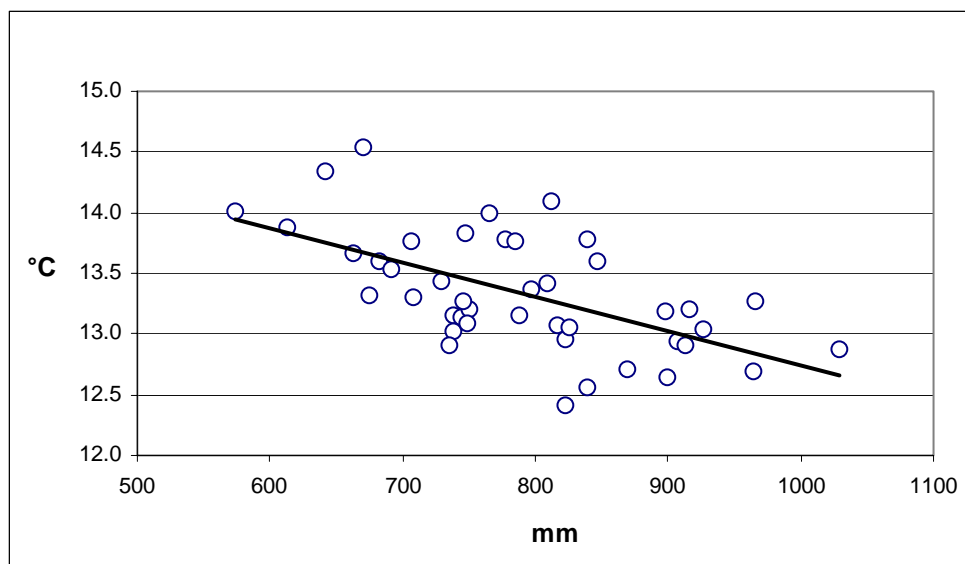


Figura 5 – Relazione fra precipitazione totale annua e temperatura media annua in Italia (valori medi stimati su 544 nodi della griglia Italia) –
Modello lineare di stima: $T_{med} = -0,003 * Prec + 15,572$; $R^2 = 0,35$, ($p < 0,001$, d.f. = 41).

5. Profilo climatico degli scenari

In relazione alle analisi effettuate ed ai risultati ottenuti, è stato possibile individuare tre scenari climatici, indicati convenzionalmente in questo lavoro con le sigle S0, S1 e S2. Tali scenari, come già ampiamente descritto nel capitolo precedente, risultano intrinsecamente tipizzati dalle caratteristiche climatiche di specifici anni opportunamente associati sulla base di un'adeguata classificazione (Tabella 5).

Scenario	numero anni	T _{media} annuale (°C)	ΔT (°C)
S0	14	13.0	-0.1
S1	12	13.4	0.2
S2	12	14.0	0.8

Tabella 5 – Scenari climatici individuati sulla base delle temperature medie annue. Il ΔT è calcolato rispetto ai valori climatici del periodo di riferimento 1961-1990.

Il primo scenario, denominato S₀, risulta basato da un insieme di 14 anni e rappresenta l'ipotesi connessa ad una sostanziale invarianza della temperatura media annua rispetto alle condizioni climatiche di riferimento. Lo scenario è definito dalle annate climatiche appartenenti al cluster n.3 (confronta con capitolo precedente) e presenta una temperatura media annua di 13.0 °C, leggermente al di sotto del valore climatico (13.1 °C).

Lo scenario S₁ può essere invece associato all'ipotesi di un moderato innalzamento termico. La temperatura media annua raggiungerebbe in questo caso un valore di 13.4 °C marcando un incremento di oltre +0.2 °C rispetto alla climatologia. Lo scenario è descritto sulle base delle caratteristiche meteo-climatiche ricavate dai 12 anni classificati nel cluster n.1 (6 anni) e nel cluster n.2. (6 anni).

Lo scenario S₂, infine, contempla l'ipotesi di una temperatura media annua attestata intorno ai 14.0 °C e, quindi, fa riferimento ad un incremento termico di quasi un grado centigrado rispetto ai riferimenti climatici. Le caratteristiche di scenario sono derivate in questo caso dai 12 anni appartenenti al cluster n.5 che, a parte le eccezioni costituite dal 1961 e dal 1988, congloba gli anni più recenti della serie storica utilizzata.

Le differenze di temperatura fra uno scenario e l'altro, così come lo scarto termico positivo degli stessi scenari rispetto alla climatologia di riferimento, delineano abbastanza bene la tendenza verso un generalizzato riscaldamento atmosferico. Ad una più attenta analisi degli scenari, tuttavia, è possibile evidenziare una nutrita serie di aspetti particolari che, associati o conseguenti all'aumento delle temperature, attestano la molteplicità dei fenomeni in discussione e la complessità delle interazioni fra le diverse grandezze meteo-climatiche, il territorio e la stagionalità.

Nel caso della temperatura minima, gli incrementi calcolati a partire dai valori climatici appaiono mediamente molto più consistenti che non nel caso della temperatura massima. In particolare, poi, è la stagione invernale a mostrare le variazioni più macroscopiche, soprattutto al Nord ed al Centro dove si evidenziano impennate fino a +1.5 °C rispetto ai valori climatici medi stagionali. Ciò significa un balzo in avanti delle temperature minime che, in termini relativi, va mediamente oltre il 50%. In ogni caso, anche nei restanti ambiti territoriali i valori delle minime delineate dagli scenari presumono una crescita considerevole in inverno. In Sicilia, ad esempio, lo scostamento rispetto al riferimento climatico è in assoluto fra i più elevati della stagione (+1.4 °C per S₀, +1.5 °C per S₁, + 1.7 °C per S₂) ma rappresenta un incremento “soltanto” del 20% circa. Per quanto riguarda le variazioni a carico delle temperature minime nel corso delle altre stagioni dell’anno, principalmente in quelle di transizione, primavera ed autunno, si può evidenziare una sostanziale invarianza o, addirittura, una lieve flessione in corrispondenza dello scenario S₀ e, parzialmente, anche in corrispondenza dello scenario S₁ (solo per la primavera). Nella stagione estiva l’incremento delle temperature minime appare in genere abbastanza contenuto: nel caso dello scenario S₂, infatti, la variazione dei valori minimi è compresa tra un minimo del 5% (Sud, Sicilia e Sardegna) ed un massimo del 7–8% (Nord e Centro).

Per quanto riguarda le temperature massime le variazioni positive emergono esplicitamente solo negli scenari S₁ ed S₂, mentre lo scenario S₀ mostra temperature poco o per nulla diverse dal quadro climatico di riferimento e, in alcuni casi, anche leggermente più basse. La stagione invernale si conferma, anche in questo caso, il periodo dell’anno in cui si concentrano maggiormente i segnali del surriscaldamento atmosferico: gli incrementi medi nazionali delle temperature massime risultano uguali a +1.1 °C, +1.2 °C e +1.6 °C rispettivamente per gli scenari S₀, S₁ ed S₂. Al Sud ed in Sicilia, in particolare, lo scostamento dai valori climatici raggiunge in inverno il valore record di +1.8 °C (scenario S₂) anche se la variazione più importante in termini percentuali (+26%), corrisponde all’incremento di +1.2 °C stimato per le temperature massime invernali al Nord (scenario S₂). La primavera è il secondo periodo dell’anno che, subito dopo l’inverno, prevede variazioni di una certa importanza a carico dei valori di temperatura massima: lo scenario S₁ è caratterizzato infatti da incrementi medi di circa il +2% un po’ ovunque, mentre nello scenario S₂ gli incrementi variano dal +6-7% di Centro, Sud, Sicilia e Sardegna, al +12% del Nord. Variazioni di un certo rilievo emergono anche in estate dove però gli incrementi previsti per lo scenario più estremo (S₂) non vanno oltre il +5%. L’aumento dei valori massimi, come già precedentemente accennato, risulta comunque più contenuto rispetto a quello stimato per la temperatura minima.

Per quanto riguarda le precipitazioni piovose, i vari scenari mettono in luce una generalizzata diminuzione dei totali di pioggia che appare, pertanto, come una conseguenza concorde, progressiva ed ineluttabile al cambiamento climatico connesso al riscaldamento globale. In termini medi generali, rispetto ai totali climatici di riferimento, la quantità di pioggia persa ogni anno a livello nazionale ammonterebbe a circa 73 mm per lo scenario S₀, 114 mm per lo scenario S₁, 130 mm per lo scenario S₂.

La gran parte delle perdite di pioggia, fino a circa il 60% del totale annuo, si concentra soprattutto nella stagione invernale ed in quella primaverile, mentre in autunno, stagione egualmente penalizzata sotto tale aspetto, l’entità della contrazione delle precipitazioni sembra assumere una tendenza opposta all’aumento delle

temperature: più elevate, infatti, risultano le diminuzioni di pioggia previste in autunno dallo scenario S_0 (circa il 30%), più contenute, invece, quelle previste dallo scenario S_2 (circa il 15%). Ciò, probabilmente, può essere spiegato dalla maggiore incidenza di fenomeni meteorici estremi conseguenti ad un più intenso e prolungato surriscaldamento estivo. Anche dal punto di vista della distribuzione geografica, la diminuzione delle precipitazioni contemplata dagli scenari appare piuttosto articolata. Nello scenario S_0 , ad esempio, Sicilia e Sardegna accuserebbero una diminuzione complessiva delle precipitazioni compresa tra il 17 ed il 21%, mentre sul resto del territorio nazionale le perdite sarebbero più contenute variando da un minimo del 5% ad un massimo del 9%. Ad un ulteriore innalzamento delle temperature, come ipotizzato dagli scenari S_1 ed S_2 , la riduzione degli apporti pluviometrici sfiorerebbe il 20% al Nord, il 17% al Centro, salirebbe al 25-26% al Sud ed in Sardegna, si attesterebbe intorno al 12% in Sicilia. Proprio le minori perdite accusate in Sicilia costituiscono, a sorpresa, una controtendenza alla generale e progressiva riduzione delle precipitazioni dovuto, nel caso particolare, ad un incremento degli apporti piovosi nelle stagioni autunnale ed invernale.

L'innalzamento delle temperature preconizzato dagli scenari comporta variazioni nel quadro climatico generale anche a carico di altre variabili. Nel caso dell'evapotraspirazione, dal confronto con gli andamenti climatici riferiti al 1961-1990, emergono cambiamenti significativi durante tutto l'arco dell'anno anche se, di volta in volta, di segno diverso. Nelle stagioni invernale ed autunnale, infatti, si evidenzia per i vari scenari un trend negativo che comporterebbe nei casi più estremi una riduzione dei flussi di ET_0 del 40% e oltre; in primavera si avrebbe invece un sostanziale allineamento al comportamento climatico, mentre in estate, a fronte di valori di temperatura complessivamente più elevati, consegue un incremento di evapotraspirazione compreso mediamente fra il 5 ed il 15% a seconda dello scenario considerato.

Nel caso delle gelate, definite come occorrenza di temperature inferiori a 0°C , i vari scenari delineano una generale e sostanziale attenuazione di tali evenienze. È necessario però sottolineare, ancora una volta, che il rischio reale per le colture agricole è rappresentato dal carattere di accidentalità dell'evento, soprattutto quando si palesa durante le fasi fenologiche più vulnerabili come, ad esempio, la schiusura delle gemme, il germogliamento, la fioritura, etc. In questo specifico caso, i piccoli numeri associati alle frequenze di gelata a Stagione di Crescita in corso, non hanno consentito, purtroppo, di analizzare e confrontare convenientemente il diverso impatto e le conseguenze dei pur possibili ritorni di gelo nelle varie situazioni di scenario.

Per quanto riguarda proprio la Stagione di Crescita, è emerso invece con chiarezza l'effetto esplicito giocato dall'andamento termico. L'inizio e la durata della Stagione di Crescita risultano infatti linearmente collegati alle temperature via via più elevate che si riscontrano passando da uno scenario all'altro. Relativamente ad una soglia termica di 10°C , ad esempio, l'inizio della Stagione di Crescita nello scenario S_2 risulta mediamente anticipato di circa 4 giorni al Nord, 9 giorni al Centro, 7 giorni al Sud, 8 giorni in Sardegna e di ben 12 giorni in Sicilia.

Ancora più netta appare la conseguenza del riscaldamento atmosferico sul soddisfacimento del cosiddetto fabbisogno in freddo manifestato da diverse specie arboree da frutto. Tali specie, infatti, utilizzano un particolare meccanismo biologico che consente loro di sincronizzare lo sviluppo fenologico con l'andamento climatico e posizionare il ciclo produttivo nel periodo dell'anno più favorevole. La temperatura

ambiente svolge in questi casi un ruolo fondamentale nel consentire l'ingresso e poi l'uscita dallo stato di dormienza invernale (endo-dormienza). La ripresa vegetativa e, soprattutto, la fioritura possono avvenire regolarmente soltanto se le piante hanno precedentemente subito l'effetto di temperature moderatamente basse per un certo periodo di tempo. Secondo quanto riportato in letteratura, ogni specie e cultivar deve poter accumulare nel corso dell'inverno un ben determinato numero di Unità di freddo (o Chillig unit) ciascuna delle quali si realizza attraverso l'esposizione per una ora alla temperatura di circa 6°C (Caruso T. et al., 1992, Linvill D.E., 1990; Richardson E.A., 1974). Nelle diverse situazioni di scenario, considerando il generale innalzamento delle temperature invernali rispetto al quadro climatico di riferimento, è stimato un accumulo di unità di freddo notevolmente più basso, compreso fra un minimo di circa il 50% in meno (media nazionale dello scenario S₀) ed un massimo di circa il 62% in meno (media nazionale dello scenario S₂). Le conseguenze sulla produzione potrebbero essere devastanti, come facilmente si può immaginare, perché in molte aree produttive tradizionalmente vocate alla frutticoltura potrebbe non essere più garantito il soddisfacimento del fabbisogno in freddo.

6. BIBLIOGRAFIA

- Allen R.G. et al., 1998. *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and drainage paper n. 56, 301 pp.
- Andersen T.B. 1992. *A simulation study in dynamic "Utah"-models*. Acta Horticulturae, 313:315-324.
- Anderson J.L., Richardson E.A., Kesner C.D., 1986. *Validation of chill unit and flower bud phenology models for Montmorency sour cherry*. Acta Horticulturae, 184:71-78.
- Anstey T.H., 1966. *Prediction of full bloom date for apple, pear, cherry, peach and apricot from air temperature data*. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci., 88:57-65.
- Barone E., Caruso T., Marra F.P., Motisi A., 1991. *Utilizzazione di modelli fenoclimatici per la valutazione della quantità di freddo utile ai fini del superamento della dormienza in diversi ambienti della Sicilia*. Atti Convegno "Agrometeorologia e Telerilevamento", Palermo 19-20 aprile 1991, 29-54.
- Barone E., Caruso T., Marra F.P., Motisi A., Crescimanno F.G., 1992. *Ulteriori ricerche sulla applicazione di modelli fenoclimatici per la caratterizzazione ambientale in frutticoltura*. Supplemento Atti dei Georgofili: "Monitorare l'ambiente agrario e forestale", Porto Conte 4-6 giugno 1992, 327-343.
- Batjer L.P., Martin G.C., 1965. *The influence of night temperature on growth and development of early Redhaven peaches*. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci., 87:139-144.
- Brunetti A., Dal Monte G., Perini L., 1993. *Indici Agroclimatici: Probabilità di gelate*. Ufficio Centrale di Ecologia Agraria, Roma, 140 pp.
- Caruso T., Motisi A., Marra F.P., Barone E., 1992. *The use of phenoclimatic models to characterize environments for chilling and heat requirements of deciduous fruit trees: methodological approaches and initial results*. Adv. Hort. Sci., 6:65-73.
- Caruso T., Motisi A., Perini L., 1996. *Applicazione di modelli fenoclimatici su scala geografica per la caratterizzazione delle aree frutticole meridionali per la coltura del pesco*. Atti "III Giornate Scientifiche SOI", Erice, 10-14 marzo 1996, 125-126.
- DeJong T.M., Goudriaan J., 1989. *Modelling peach fruit growth and carbohydrate requirements reevaluation of the double-sigmoid growth pattern*. Journal of the American Society for Horticultural Science., 114(5):800-804.
- Dumar D., Pilbeam C.J., Craigon J., 1990. *Use of the Weibull function to calculate cardinal temperatures in faba bean*. Journal of Experimental Botany, 41(232):1423-1430.
- Eisensmith S.P., Jones A.L., Flore J.A., 1980. *Predicting leaf emergence of 'Montmorency' sour cherry from degree-day accumulations*. Journal of the American Society for Horticultural Science. 105: 1, 75-78.
- Edwards G.R., Notodimedjo S., 1987. *Defoliation, bending and tip pruning of apple under tropical conditions*. Acta Horticulturae, 199:125-127.

- Fabbris L. 1997. *Statistica multivariata – Analisi esplorativa dei dati*. McGraw-Hill, Milano.
- Fisher D.V., 1962. *Heat units and the number of days required to mature some pome and stone fruits in various areas of North America*. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci., 80:114-124.
- Folland, C.K., T.R. Karl, J.R. Christy, R.A. Clarke, G.V. Gruza, J. Jouzel, M.E. Mann, J. Oerlemans, M.J. Salinger and S.-W. Wang, 2001: Observed Climate Variability and Change. In: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
- Gerakis A., Baer B., 1999. *A program for soil textural classification*. Soil Science Society of America Journal 63:807-808.
- Grossman Y.L., Dejong T. M., 1994. *PEACH: A simulation model of reproductive and vegetative growth in peach trees*. Tree Physiology 14:329-345.
- Hanninen H., 1990. *Modelling bud dormancy release in trees from cool and temperate regions*. Acta Forestalia Fennica n. 213.
- IPCC, 2001: *Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Watson, R.T. and the Core Writing Team (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, 3.98 pp.
- Lang G.A., 1987. *Dormancy: a universal terminology*. Hort. Science, 22:817-820.
- Liberta A., Girolamo A., 1991. *Geostatistical analysis of the average temperature fields in North Italy in the period 1961 to 1985*. Séminaire CFSG sur la Géostatistique, Giugno 1989. *Science de la Terre Sér. Inf.* Nancy 1991, 1–36.
- Linvill, D.E., 1990. *Calculating chilling hours and chill units from daily maximum and minimum temperature observations*. Hort. Science, 25(1):14-16.
- Lloyd J., Firth D., 1990. *Effect of defoliation time on depth of dormancy and bloom time for low-chill peaches*. Hort. Science, 25(12):1575-1578.
- Luton M.T., Hamer P.J.C., 1983. *Predicting the optimum harvest dates for apples using temperature and full-bloom records*. Journ. Hortic. Sci. 58(1):37-44.
- M.A.F., 1990. *Analisi climatologica e progettazione della rete agrometeorologica nazionale. Nord Italia, Puglia e Sicilia*. Ministero dell'Agricoltura e delle Foreste (M.A.F.), Roma, 97 pp.
- Mardia K.V., Kent J.T. & Bibby J.M. 1979. *Multivariate analysis*. Academic Press, London.
- Marra F.P., DeJong T., Johnson R.S., Inglese P., 2002. *Thermal time requirement and harvest time forecast for peach cultivars with a different fruit development period*. Acta Hort. 592:523-530.
- Matheron G., 1970. *Krigeage Universal pour une dérive aléatoire* - Nota scientifica del Centre de Géostatistique de l'Ecole des Mines de Paris.

- Matheron G., 1971. *La théorie des variables régionalisées et ses applications*. Nota scientifica del Centre de Géostatistique de l'École des Mines de Paris.
- Motisi A., Caruso T., Barone E., 1992. *Effetti della defogliazione estiva ed autunnale sulla fioritura delle cultivar di pesco "Armking" e "Maravilha"*. Atti "Giornate Scientifiche SOI", Ravello, 8-10 aprile 1992, 476-477.
- Motisi A., Marra F.P., Perini L., Caruso T., 1998. *I modelli fenoclimatici come strumento di supporto alla scelta varietale del pesco*. L'Informatore Agrario, LIV(32):59-63.
- Munoz C., Sepulveda G., Garcia-Huidobro J., Sherman W.B., 1986. *Determining thermal time and base temperature required for fruit development in low-chilling peaches*. HortScience, 21(3):520-522.
- Parton W.J., Logan J.A., 1981. *A model for diurnal variation in soil and air temperature*. Agricultural and Forest Meteorology, 23:205-216.
- Perini L., Brunetti A., Dal Monte G., 1990. *Indici Agroclimatici: Stagione di crescita, Somme termiche, Ore di freddo*. Ufficio Centrale di Ecologia Agraria, Roma, 140 pp.
- Perini L., 1993.. *Andamento meteorologica e resa del frumento tenero – AER-Meteorologia, Climatologia, Agrometeorologia Ambiente n. 7 – Lug/1993., 4-10.*
- Perini L., 2000. *Piove meno in Italia*. L'Informatore Agrario - Verona, LVI (45), 65-68.
- Perini L., Ranuzzi M., 2002. *Analisi delle temperature e delle precipitazioni piovose in Italia negli ultimi decenni*. Atti del Convegno "Clima, Precipitazioni, agricoltura" nell'ambito della giornata mondiale dell'alimentazione, Roma 22 novembre 2002, 15-25.
- Perini L., Caruso T., Motisi A., Marra F.P. (2004), *La fenologia del pesco nel territorio italiano rappresentata nell'atlante agroclimatico del progetto CLIMAGRI*. Atti del 25° Convegno Peschicolo. Faenza (RA), 23.-24 settembre 2004.
- Richardson E.A., Seeley S.D., Walker D.R., 1974. *A model for estimating the completion of rest for 'Redhaven' and 'Elberta' peach trees*. Hort. Science, 9(4):331-332.
- Rizzi A. 1985. *Analisi dei dati: applicazioni dell'informatica alla statistica*. La Nuova Italia Scientifica, Roma.
- Samish, R.M., 1954. *Dormancy in woody plants*. Annual Rev. Plant. Physiol., 5:183-204.
- Saxton K.E. et al., 1986. *Estimating generalized soil-water characteristics from texture*. Soil Sci. Soc. Amer. J. 50(4):1031-1036.
- Scafetta N., B. J. West (2005), *Estimated solar contribution to the global surface warming using the ACRIM TSI satellite composite*, Geophys. Res. Lett., 3.2, L18713., doi:10.1029/2005GL023.849.
- Sogni S., 2001. *Sotto la superficie del substrato: le caratteristiche fisiche (seconda parte)*. EPE edizioni.

- STÖCKLE C. O, R. NELSON, M. DONATELLI and F. CASTELLVI, 2001. Climgen: a flexible weather generation program, 2nd International Symposium Modelling Cropping Systems, Florence, Italy, 16-18 July, 2001, 229-23.0
- Tukey, H.B., 1933. *Growth of the peach embryo in relation to growth of fruit and season of ripening*. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci., 30:209-218.
- Ungaro F., Van Soetendael M., Calzolari C., Zinoni F., Marletto V., Busoni E., Guermandi M., 1999. *Calibrazione e verifica di modelli matematici per la simulazione del bilancio idrico nei suoli dell'Emilia-Romagna* (poster). Atti del convegno nazionale “L'agrometeorologia per il monitoraggio dei consumi idrici”, Sassari, 3-4 novembre 1999. IMAes, ERSAT, CeSIA.: 339-348.
- Vaccari F.P., Baldi M., Crisci A., Maracchi G. (2006), *Analisi climatica della Regione Mediterranea: la Tenuta di Castelporziano come caso di studio*. Contributo alla pubblicazione per il settennato Presidente della Repubblica. –In stampa-
- Van Keulen H., Wolf J., 1986. *Modelling of agricultural production: weather, soils and crops*. Pudoc, Wageningen, 480 pp.
- Weinberger, J.H., 1948. *Influence of temperature following bloom on fruit development period of Elberta peach*. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci., 51:175-178.
- Weinberger, J.H., 1950. *Chilling requirements of peach varieties*. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci., 56:122-128.
- Winkler, A.J., Williams W.O., 1939. *The heat required to bring 'Tokay' grapes to maturity*. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci., 37:650-652.
- WMO, 1996. *Climatological normals (CLINO) for the period 1961-1990*. WMO n. 847, 768 pp.
- Yin-XinYou, Kropff M.J., McLaren G., Visperas R.M., 1995. *A nonlinear model for crop development as a function of temperature*. Agricultural and Forest Meteorology, 77(1-2):1-16.
- Zinoni F., Ducco G., Marletto V., Van Soetendael M., 2001. *Uso del modello CRITERIA per la valutazione del rischio di inquinamento azotato dei corpi idrici. Modellistica e qualità ambientale..* Atti di GEOFLUID 2000, Piacenza, 5 ottobre 2000. ANPA RTI CTN_SSC 1:67-77.
- Zinoni F., Duce P., 2003. “Agricoltura italiana e cambiamenti climatici” Atti del Convegno “CLIMAGRI- Cambiamenti Climatici e Agricoltura” - Cagliari, 16-17 gennaio 2003.