

I GEORGOFILI

Quaderni
2015-IV



STATO, PROSPETTIVE E FABBISOGNI
DELLA RICERCA ITALIANA IN ZOOTECNIA
NEL CONTESTO DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI

Firenze, 22 aprile 2015



EDIZIONI POLISTAMPA

Con il contributo di



ENTE CASSA DI RISPARMIO DI FIRENZE

Copyright © 2016
Accademia dei Georgofili
Firenze
<http://www.georgofili.it>

Proprietà letteraria riservata

Supplemento a «I Georgofili. Atti della Accademia dei Georgofili»
Anno 2015 - Serie VIII - Vol. 12 (191° dall'inizio)

Direttore responsabile: Paolo Nanni

Edizioni Polistampa
Via Livorno, 8/32 - 50142 Firenze
Tel. 055 737871 (15 linee)
info@polistampa.com - www.polistampa.com
Sede legale: Via Santa Maria, 27/r - 50125 Firenze

ISBN 978-88-596-1631-3

Servizi redazionali, grafica e impaginazione
SOCIETÀ EDITRICE FIORENTINA

INDICE

MASSIMILIANO PASQUI, EDMONDO DI GIUSEPPE <i>Evidenze dei cambiamenti climatici nella variabilità della temperatura in Italia</i>	7
ELEONORA DI CRISTOFARO <i>Il fabbisogno di conoscenze per l'inventario nazionale delle emissioni in agricoltura</i>	27
PIER PAOLO ROGGERO, GIOVANNI ARGENTI, MARCO BINDI, CAMILLA DIBARI, LAURA MULA, ANTONIO PULINA, GIOVANNA SEDDAIU <i>Stato e prospettive della ricerca italiana per la produzione di alimenti zootecnici in un contesto di cambiamenti climatici</i>	45
GABRIELE DONO, RAFFAELE CORTIGNANI, DAVIDE DELL'UNTO E GRAZIANO MAZZAPICCHIO <i>Una valutazione degli impatti produttivi ed economici del cambiamento della variabilità climatica in aree dell'agricoltura mediterranea</i>	97
NICOLA LACETERA, UMBERTO BERNABUCCI, ANDREA VITALI, BRUNO RONCHI, ALESSANDRO NARDONE <i>Le aree fondamentali della ricerca per la sostenibilità della zootecnia italiana in un contesto di cambiamenti climatici</i>	II7

Evidenze dei cambiamenti climatici nella variabilità della temperatura in Italia

INTRODUZIONE

La fase di intenso riscaldamento globale che stiamo vivendo negli ultimi decenni è iniziata in maniera inequivocabile a partire dagli anni '50 e ha subito un'accelerazione dalla fine degli anni '80 come è stata evidenziata da molti studi scientifici. Tale aumento ha interessato sia i valori climatici medi di temperatura mensile e stagionale, sia gli eventi estremi (IPCC, 2014). Il cambiamento climatico è significativamente attribuibile anche agli effetti delle emissioni delle attività antropiche e mostra numerose eterogeneità a livello planetario; l'area del Mediterraneo si distingue per essere una delle zone più critiche per quanto riguarda le ondate di calore (Baldi et al., 2006; Efthymedis et al., 2011).

Il riscaldamento globale provoca, poi, effetti che sono misurabili anche attraverso degli indicatori fisici quali, ad esempio, l'innalzamento del livello del mare, l'incremento del contenuto di calore degli oceani, la diminuzione delle superfici ricoperte da neve e da ghiaccio (marine e terrestri), l'aumento della frequenza di giorni molto caldi e degli episodi di piogge molto intense (IPCC, 2014). A tal riguardo una collezione di 27 indicatori meteo-climatici è stata costituita al fine di individuare l'occorrenza degli eventi estremi (Expert Team on Climate Change Detection and Indices-ETCCDI) in maniera il più possibile omogenea sia per scopi di monitoraggio che di proiezione climatica futura (Sillmann et al., 2013 a-b).

Le proiezioni per il XXI secolo dei 27 indicatori ETCCDI, effettuate sulla base di diversi modelli climatici e di diversi scenari di emissione di

* *Istituto di Biometeorologia – Dipartimento di Scienze Bio-Agroalimentari; Consiglio Nazionale delle Ricerche*

anidride carbonica indicano, tra gli altri, un incremento della frequenza di giorni estremamente caldi, sempre più presenti in sequenze molto lunghe (Sillmann et al., 2013-b). Questo aspetto è intrinsecamente collegato ai fattori di “sofferenza da caldo”, cui sono sottoposti gli esseri viventi in genere (McMichael et al., 2006).

L'obiettivo del presente studio è di costruire un quadro sintetico del cambiamento climatico in atto in Italia per quanto riguarda le ondate di calore, basato su dati osservati spazializzati, oltre che evidenziare il ruolo importante svolto da un meccanismo atmosferico specifico, il West African Heat Low, nel processo di genesi e mantenimento delle ondate di calore stesse.

Negli ultimi anni un crescente interesse scientifico è stato focalizzato sulla valutazione degli impatti dei cambiamenti climatici relativamente alle produzioni zootecniche e in particolare degli effetti dovuti alle ondate di calore. Recenti studi, infatti, hanno dimostrato che la sofferenza delle vacche da latte indotta dalle ondate di caldo comporta un incremento dei tassi di mortalità (Vitali et al., 2009) e un decadimento della qualità e quantità del latte prodotto (Bertocchi et al., 2014). Inevitabilmente, quindi, modifiche della variabilità climatica determinano un impatto economico significativo sui redditi degli imprenditori agricoli (Dono et al., 2014).

Per mettere meglio in evidenza le relazioni tra fenomeni atmosferici a grande scala e le ondate di calore sul nostro territorio sono stati presi in considerazione tre aspetti complementari per l'identificazione e l'analisi delle ondate di calore e dei possibili mutamenti nel quadro dei cambiamenti climatici in atto: 1) la scomposizione della variabilità climatica della temperatura; 2) l'analisi storica degli eventi e 3) lo studio di possibili meccanismi atmosferici generatori, le cosiddette forzanti climatiche di larga scala. L'analisi di seguito riportata è incentrata sul territorio italiano per i mesi di maggior rischio d'impatto delle ondate di calore: da Maggio a Settembre.

MATERIALI E METODI

Il primo punto dell'analisi proposta è la scomposizione della variabilità climatica durante l'ultimo secolo in tre componenti caratterizzate da differenti scale temporali: il trend di lungo periodo, la variabilità decennale e la variabilità inter-annuale. La base di dati utilizzata è composta dalla serie mensile dei valori di temperatura media mensile dal 1901 al 2009, sull'areale che interessa il territorio italiano a partire dal dataset UEA CRU TS3p1 (Harris et al., 2014). La metodologia applicata per la decomposizione delle serie temporali di tem-

peratura media mensile è invece descritta nel dettaglio in Green et al., 2011.

L'analisi delle scale temporali della temperatura media del periodo Maggio-Settembre permette di evidenziare i principali modi di variabilità sulla regione del Mediterraneo Centrale. Il trend di lungo periodo è stato calcolato (Green et al., 2011) tramite una regressione del segnale locale della temperatura rispetto alla serie temporale della temperatura media globale ottenuta dalla media dei modelli di circolazione globale provenienti dall'esperimento di "Twentieth Century Climate in Coupled Models" (20C3M) utilizzati nel AR4 dell'IPCC. Il trend temporale che ne risulta è quindi riconducibile al cambiamento climatico e rappresenta la parte del segnale locale di cambiamento della temperatura che è linearmente dipendente dalla temperatura media globale.

Le altre analisi proposte in questo studio sono riferite invece ai dati giornalieri di temperatura massima e minima e ai dati riguardanti l'indice WAHL. I primi sono stati estratti dal *data set* EOBS (Version 11.0) relativamente all'area individuata dalle coordinate geografiche dei quattro punti (6°, 19° Lon Est e (36°, 48°) Lat Nord che circoscrive il territorio italiano. Tali dati sono costituiti dai valori stimati nelle 2496 celle del grigliato regolare con risoluzione di cella pari a (0.25° X 0.25°) sulla base delle osservazioni registrate dalle stazioni a terra (Haylock et al., 2008).

I secondi, invece, rappresentano i valori dell'indice WAHL in termini assoluti sempre per il periodo Maggio-Settembre 1951-2013, che sono stati ottenuti seguendo la definizione proposta in Chauvin et al., 2010 a partire dai dati giornalieri delle Reanalisi NCAR/NCEP (Kalnay et al., 1996). Tale definizione esprime l'intensità del WAHL sulla base della differenza, espressa in metri, tra l'altezza geopotenziale relativa alle quote 850hPa e 925hPa sul dominio dell'Africa Nord Occidentale, e isolando poi il valore del 90^{mo} percentile tra tutti i valori del dominio di ogni particolare giorno. La variabilità del WAHL è sostanzialmente determinata sia dalla variabilità dei processi monsonici dell'Africa occidentale, sia dalla variabilità Atlantica. Il WAHL rappresenta quindi un meccanismo di risposta a processi di larga scala, sia tropicali che delle medie latitudini, la cui azione ha un netto impatto nell'avvezione di masse d'aria calda sul nostro territorio nazionale.

Tale meccanismo atmosferico produce, infatti, un flusso divergente in quota generato e mantenuto dal riscaldamento dei bassi strati della troposfera sul deserto del Sahara e, più in particolare, nell'area dell'Africa Nord Occidentale. Infatti, l'espansione termica conseguente al riscaldamento della superficie sahariana determina un innalzamento dell'aria con conseguente formazione di un flusso convergente nei bassi strati della troposfera e un corrispondente flusso divergente negli alti strati. Tale divergenza,

presente a una quota di circa 1400m – 1600m sul livello del mare è tra i responsabili del trasporto, per avvezione, di masse d'aria di origine sub tropicale calde e spesso ricche di aerosol verso il Mediterraneo (Gaetani et al., 2012). L'indice proposto da Chauvin et al., 2010 sintetizza in modo preciso questa dinamica ed è in grado di rappresentare le fasi di vigore del WAHL responsabili di un più efficiente trasporto di aria calda di origine nord africana nel Mediterraneo Centrale e sull'Italia in particolare e, quindi, di propensione alla genesi e al mantenimento di una ondata di calore sul nostro territorio.

Per quanto riguarda l'analisi storica delle ondate di caldo, si considerano le variabili: “numero di ondate di caldo”, “durata media delle ondate di caldo” e “numero di giorni inclusi in un'ondata di caldo” cumulato nei mesi da Maggio a Settembre, relativamente al periodo 1951-2013.

Sulla base delle indicazioni fornite dal gruppo di lavoro ETCCDI, definiamo “ondata di caldo”, il fenomeno per il quale si registra una sequenza di almeno 6 giorni con temperatura giornaliera massima (TX) o temperatura giornaliera minima (TN) superiore al valore di soglia giornaliero corrispondente al 90.^{mo} percentile (Karl et al., 1999). Più specificatamente, si calcola una serie di valori giornalieri per il periodo di analisi, in modo tale da avere uno specifico valore soglia per ciascun giorno di osservazione e, successivamente, si verifica giorno per giorno l'eventuale superamento della soglia. Il valore di soglia giornaliero si calcola prendendo i valori osservati per quel giorno giuliano e per i due giorni precedenti e successivi, relativi al trentennio 1961-1990, in modo tale da avere una serie di 150 termini, che costituisce la base su cui individuare il valore corrispondente al 90.^{mo} percentile. In questo studio adottiamo lo schema descritto in precedenza con l'eccezione del periodo trentennale di riferimento, dal momento che consideriamo il periodo 1971-2000. Tale scelta è stata fatta sulla base delle indicazioni generali del NOAA, che propone l'aggiornamento ogni 10 anni della base di riferimento al fine di renderla più “simile” al clima attuale e di altri studi che indicano, per l'Italia, una chiara differenza nei livelli medi dei due periodi (Beltrano et al., 2007). Il gruppo ETCCDI definisce, inoltre, l'indicatore *Warm spell duration index-WSDI* come il conteggio dei giorni che rientrano in un'ondata di caldo, così come definita in precedenza nei mesi maggiormente a rischio per la salute sia umana che animale: da Maggio a Settembre. Dunque, utilizziamo i dati di temperatura massima giornaliera (TX) e minima giornaliera (TN) aggregati per il periodo Maggio-Settembre 1971-2000 per il computo della soglia giornaliera TX90 e TN90 e i dati relativi al periodo Maggio-Settembre

1951-2013 per l'analisi del numero delle ondate di caldo, della loro durata media e dell'indice WSDI.

Infine, l'ultimo aspetto di questo studio riguarda un'analisi della correlazione tra l'indice WAHL e le ondate di caldo registrate nei mesi da Maggio a Settembre nel corso del periodo 1951-2013 e mira a dimostrare che esiste una relazione funzionale tra il meccanismo del WAHL e un'ondata di caldo nel bacino del Mediterraneo Centro-Occidentale. A tal fine, consideriamo la distribuzione di probabilità dei valori giornalieri dell'indice WAHL condizionata rispetto ai giorni inclusi in un'ondata di caldo e la confrontiamo con la corrispettiva distribuzione non condizionata. In altre parole vogliamo verificare se la presenza dell'ondata di caldo provoca un cambiamento nella forma distributiva dei dati dell'indice WAHL. Questa verifica è effettuata utilizzando il *test* non parametrico di Wilcoxon-Mann-Whitney (Wilcoxon, 1945; Mann e Whitney, 1945) e il *test* parametrico T Student (Gosset, 1908), al fine di valutare se i valori dell'indice WAHL condizionati hanno una media sistematicamente superiore rispetto agli stessi non condizionati.

Una condizione necessaria per l'applicazione di questi *tests* è che i dati campionari utilizzati siano estratti in maniera indipendente l'uno dall'altro e, nel caso di confronto tra due campioni, che i due campioni siano tra loro indipendenti. Nel nostro caso è necessario tener conto del fatto che giorni caldi consecutivi sono dovuti alla presenza di condizioni atmosferiche specifiche (un sistema a grande scala che permane per più giorni). Dunque, i due campioni (valori del WAHL e valori del WAHL condizionati rispetto alle ondate di calore) non possono considerarsi statisticamente indipendenti. Tuttavia, se si considerano le due popolazioni: i) valore dell'indice WAHL nei giorni fuori dalle ondate di caldo e ii) valori dell'indice WAHL nei giorni inclusi nelle ondate di caldo, allora i due campioni possono considerarsi indipendenti e si possono applicare i *tests* per campioni indipendenti, vale a dire il *test* U di Wilcoxon-Mann-Whitney per campioni indipendenti e il *test* t Student per campioni indipendenti, quest'ultimo previo rispetto della condizione che i dati seguano una distribuzione gaussiana. Per maggior chiarezza, definiamo e denominiamo i confronti effettuati nel modo che segue:

1. T1, *test* che confronta i valori del WAHL durante i giorni caldi con $TX > TX_{90}$ o $TN > TN_{90}$ anche non appartenenti a ondate rispetto ai valori del WAHL per i restanti giorni;
2. T2, *test* che confronta i valori del WAHL durante i soli giorni caldi inclusi in un'ondata rispetto ai valori del WAHL per i restanti gior-

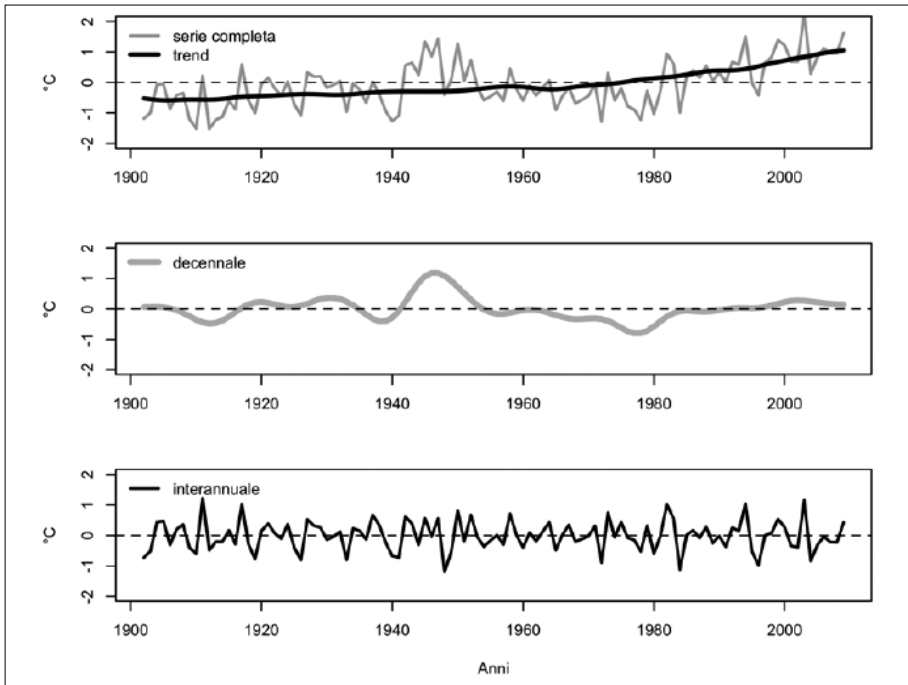


Fig. 1 *Scomposizione della variabilità temporale del valore medio di temperatura da maggio a settembre sul Mediterraneo Centrale (5°E-20°E; 35°N-48°N)*

ni, vale a dire i giorni con $TX(TN) < TX(TN)_{90}$ in aggiunta a quelli con $TX(TN) > TX(TN)_{90}$ non inclusi in un'ondata;

3. T3, *test* che confronta i valori del WAHL per ogni singolo giorno tra i 15 precedenti l'inizio di un'ondata di caldo rispetto ai valori del WAHL per i restanti giorni.

Il *test* T3 è utile per valutare la dinamica completa della relazione oggetto di studio anche nell'ottica di definizione di un modello strutturale di previsione.

RISULTATI

Analisi della variabilità della temperatura media stagionale

Nella figura 1 sono riportati i dati di temperatura media del periodo Maggio-Settembre insieme all'analisi della variabilità temporale calcolata sul dominio geografico del Mediterraneo Centrale per il periodo 1901-2009. Il *trend* di lun-

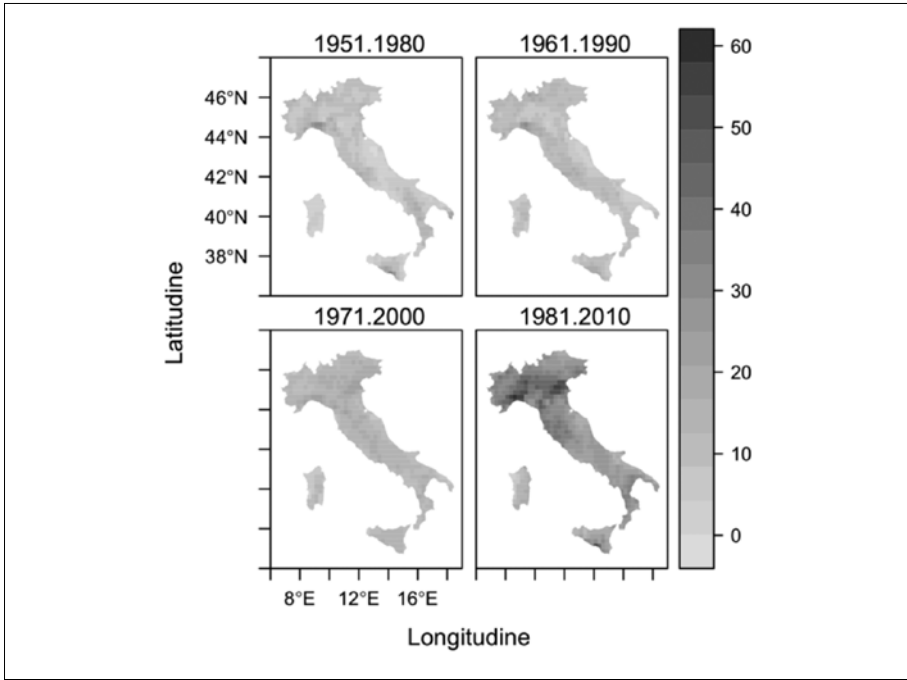


Fig. 2 *Mappa del Numero delle Ondate di Caldo della Temperatura Massima giornaliera in Italia durante il periodo Maggio-Settembre: confronto tra i trentenni 1951-1980, 1961-1990, 1971-2000 e 1981-2010*

go periodo, che descrive il 33% circa della variabilità totale del segnale analizzato, risulta complessivamente positivo e caratterizzato da un'accelerazione a partire dagli anni '80. La variabilità decennale, che descrive da sola il 25% circa della variabilità totale mostra invece la successione di periodi più caldi e periodi più freddi, con decenni caratterizzati da anomalie anche significativamente intense come, ad esempio, il periodo caldo successivo al 1940. La variabilità rimanente, che descrive il 41% circa del segnale analizzato rappresenta, infine, la cosiddetta variabilità inter-annuale dovuta essenzialmente alle interazioni tra meccanismi climatici sia di larga che di piccola scala.

Analisi delle ondate di caldo tramite l'indice WSDI

Per quanto riguarda la Temperatura Massima, il quadro climatico del periodo Maggio-Settembre che emerge dall'analisi si contraddistingue per un significativo aumento del numero di ondate di caldo nel trentennio 1981-2010 ri-

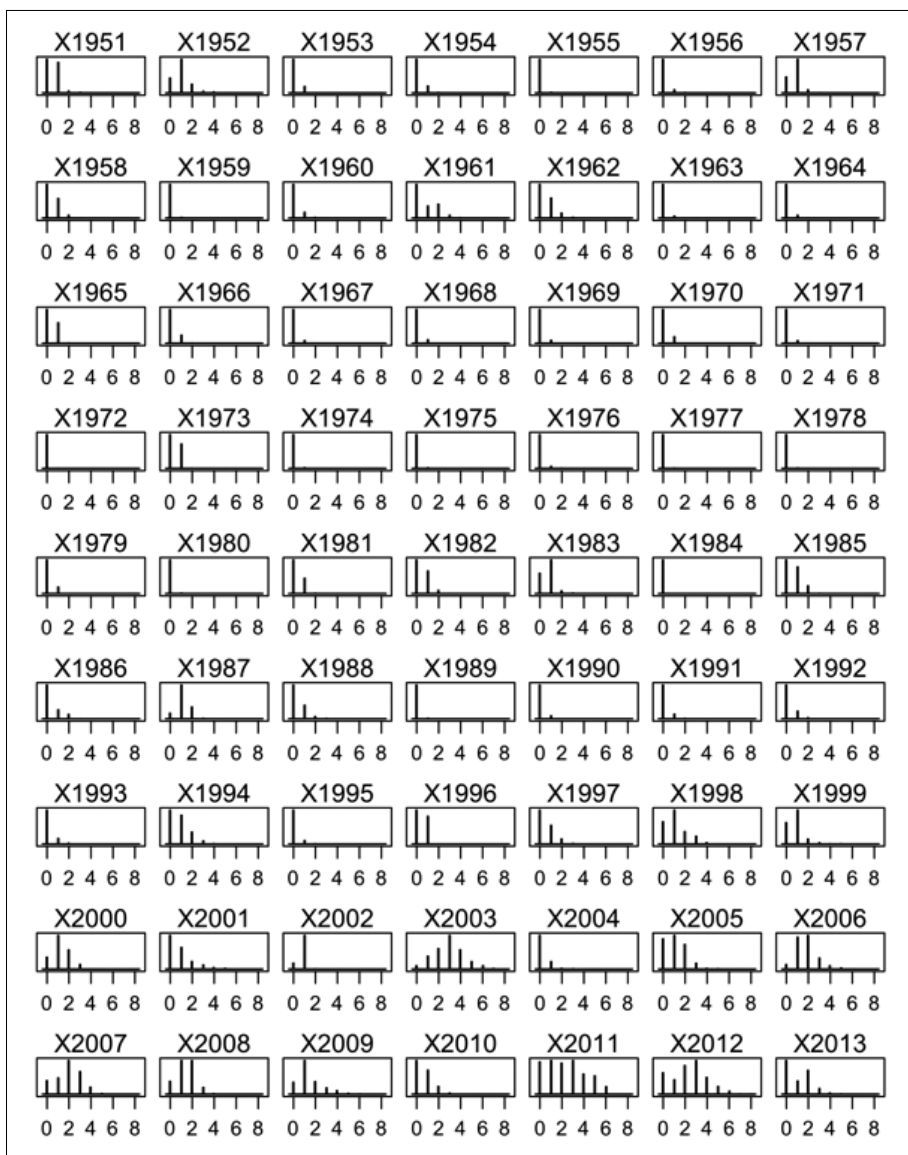


Fig. 3 *Ondate di Caldo della Temperatura Massima giornaliera in Italia durante il periodo Maggio-Settembre 1951-2013: distribuzione di frequenza del numero di ondate registrate sulle 2496 celle del dominio spaziale anno per anno*

petto agli altri trentenni, con particolare interessamento delle zone del Nord-Ovest (Basso Piemonte, Liguria e Pianura Padana) e Centro (Toscana), dove si sono registrate fino a 60 ondate di calore (fig. 2).

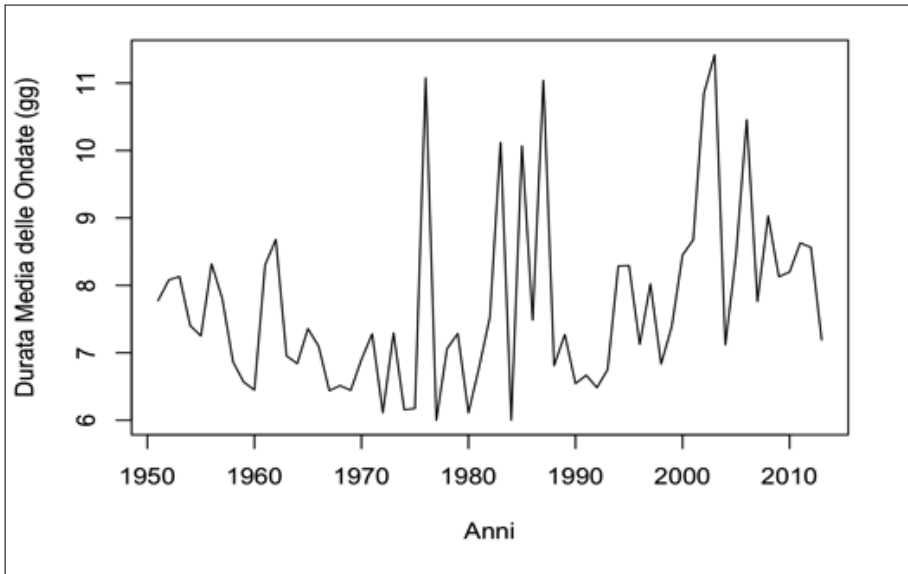


Fig. 4 Serie storica della Durata Media delle Ondate di Caldo della Temperatura Massima giornaliera in Italia durante il periodo Maggio-Settembre 1951-2013: media areale sull'intero dominio considerato

Inoltre, come si vede nella figura 3, la distribuzione di frequenza del numero di ondate aggregate anno per anno sulle 2496 celle del dominio spaziale di analisi evidenzia un netto cambiamento del regime a partire dal 2003, quando si ha uno spostamento a destra del valore centrale della distribuzione (incremento del numero di ondate di calore) e una maggiore variabilità del fenomeno. Si noti, inoltre, come segnali di cambiamento nel senso appena descritto si erano manifestati, seppur con delle discontinuità, già a partire dal 1994. L'analisi della serie storica della durata media delle ondate di caldo supporta questa ipotesi di un cambio di regime nei primi anni '90, quando si evidenzia un *trend* crescente interrotto proprio nell'ultimo anno di analisi (fig. 4). Precedentemente si registrano due ulteriori fasi contraddistinte, la prima da un trend decrescente che va dal 1951 a metà degli anni '70 e la seconda da una fase stazionaria che giunge fino ai primi anni '90 con picchi di durata molto elevati e simili a quelli raggiunti nel 2003 (10-11 giorni). Questa fase, come si può verificare dalla figura 3, registra, tuttavia, pochi casi di ondate di caldo e anche il numero di giorni caldi complessivamente registrati è sensibilmente inferiore a quello registrato durante la terza fase. Infatti, visualizzando il boxplot della figura 5, si nota ancor più chiaramente il cambio di regime emerso a partire da metà degli anni '90.

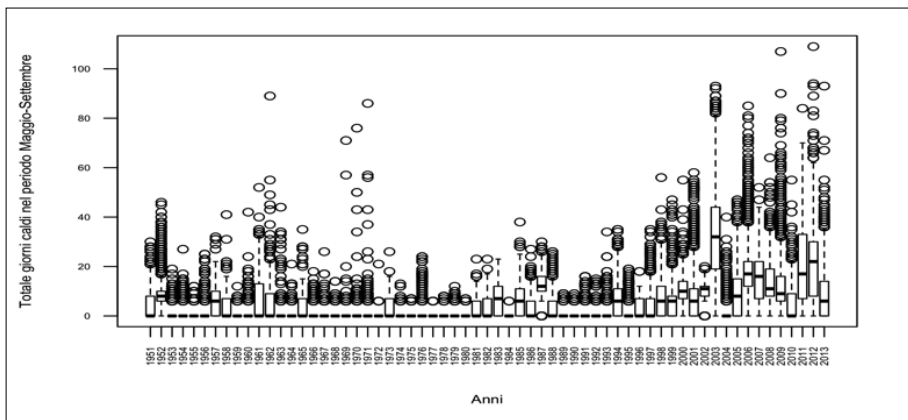


Fig. 5 Boxplot della distribuzione spaziale (tutte le celle dell'area) del Numero di Giorni Caldi contati complessivamente durante le Ondate di Caldo della Temperatura Massima giornaliera per il periodo Maggio-Settembre 1951-2013 in Italia

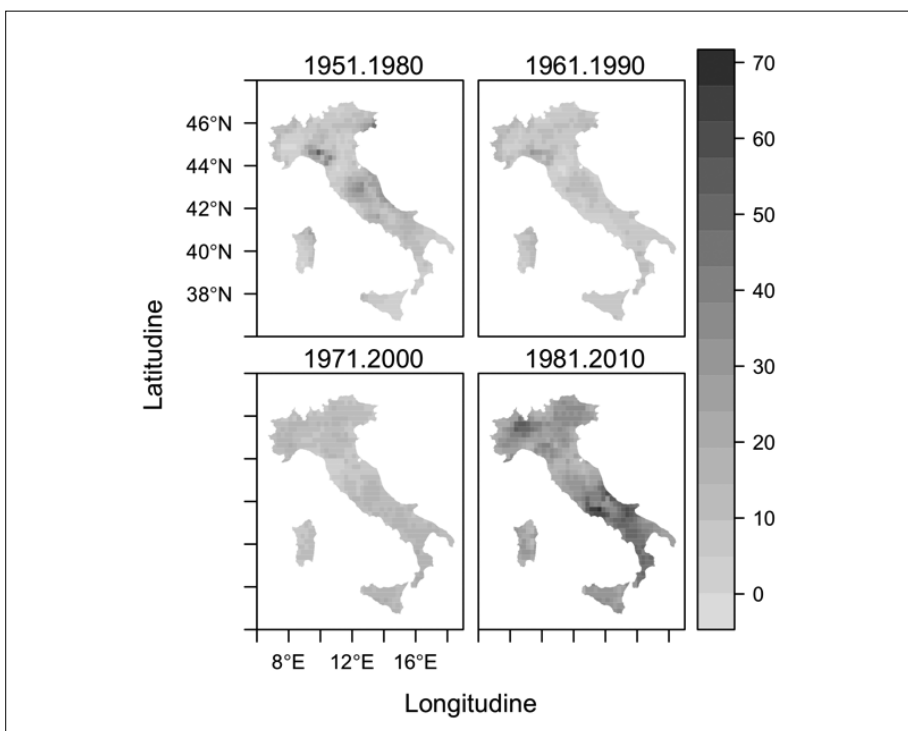


Fig. 6 Numero Cumulato delle Ondate di Caldo della Temperatura Minima giornaliera in Italia durante il periodo Maggio-Settembre: confronto tra i trentenni 1951-1980, 1961-1990, 1971-2000 e 1981-2010

Per quanto riguarda la Temperatura Minima, si possono fare delle considerazioni molto simili a quelle fatte per la Temperatura Massima, in special modo quelle relative all'individuazione di tre fasi distinte nell'arco del periodo analizzato e al sensibile incremento delle ondate di caldo nella terza fase, tuttavia è utile descrivere alcune differenze. Innanzi tutto, le zone che hanno registrato un incremento nel numero di ondate nel trentennio 1981-2010 sono non solo quelle del Nord come succede per la Temperatura Massima, ma anche e soprattutto quelle del Sud, a esclusione della Sicilia (fig. 6). Ancora osservando la figura 6, si nota come il numero massimo di ondate registrate è ben superiore di 10 unità a quelle relative alla Temperatura Massima: questo a conferma del fatto che l'incremento delle ondate di caldo nell'ultimo trentennio è ascrivibile con maggior importanza alla Temperatura Minima.

D'altro canto, come si vede dalla figura 8, la durata media delle ondate di caldo è comparabile tra le due variabili, a eccezione dell'anno 2003 il cui valore è superiore di circa 1,5 giorni a quello della Temperatura Massima.

Il totale di giorni caldi inclusi nelle ondate raggiunge, per alcune zone meridionali, fino a 120 giorni negli anni relativi alla terza fase, vale a dire quella che abbiamo individuato a partire dalla metà degli anni '90, particolarmente negli anni 2007, 2008 e 2011 (fig. 9). Questo livello è superiore a quelli registrati per la Temperatura Massima di circa 20 unità. Inoltre, il numero di giorni caldi che si osservano nella prima fase, che va dal 1951 a metà degli anni '70 è particolarmente elevato a dispetto di una durata media non corrispondentemente elevata (fig. 8), quando si sono verificate molte ondate di durata uguale, o appena superiore, alla soglia minima dei 6 giorni.

Correlazione con i meccanismi di larga scala: distribuzione condizionata dell'indice WAHL rispetto ai giorni di caldo

In termini generali e sintetici, la risposta dei *tests* statistici alla domanda riguardo l'esistenza di una relazione funzionale tra il meccanismo del WAHL e l'occorrenza di un' ondata di caldo nel bacino del Mediterraneo Centrale e, più specificatamente, nella penisola italiana è affermativa. In altre parole, possiamo rifiutare un'ipotesi che suppone l'indipendenza dei due fenomeni e sostenere invece un'ipotesi alternativa secondo la quale la distribuzione dei valori del WAHL, quando è in atto un' ondata di caldo, ha un valore centrale mediamente superiore alla stessa distribuzione quando siamo in condizioni normali (fuori da un' ondata). Tale affermazione risulta statisticamente significativa al 5%. Una sintesi dei valori

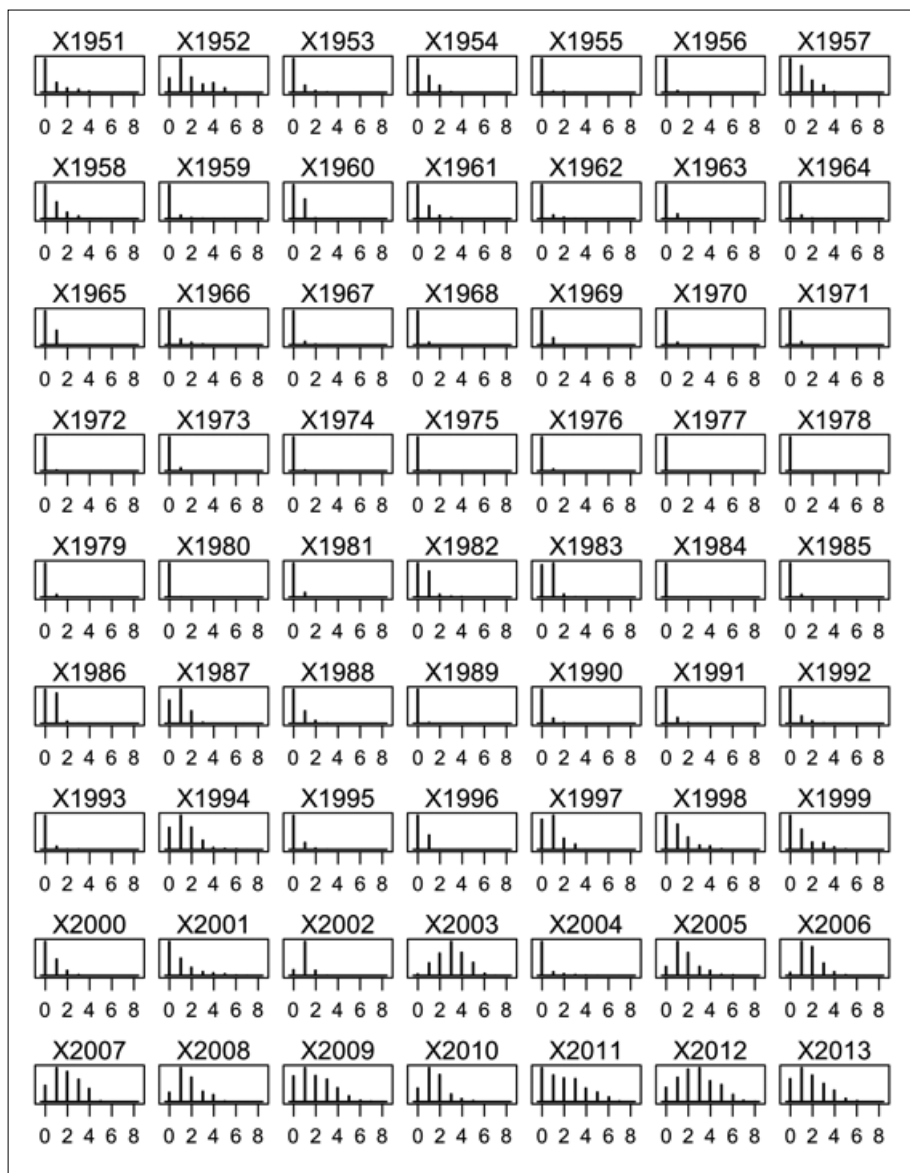


Fig. 7 *Ondate di Caldo della Temperatura Minima giornaliera in Italia durante il periodo Maggio-Settembre 1951-2013: distribuzione di frequenza del numero di ondate registrate sulle 2496 celle del dominio spaziale anno per anno*

dell'indice WAHL riscontrati in tutte le celle dell'area di studio, nel campionamento relativo al caso T1 (Giorni caldi anche fuori da un'ondata *vs*

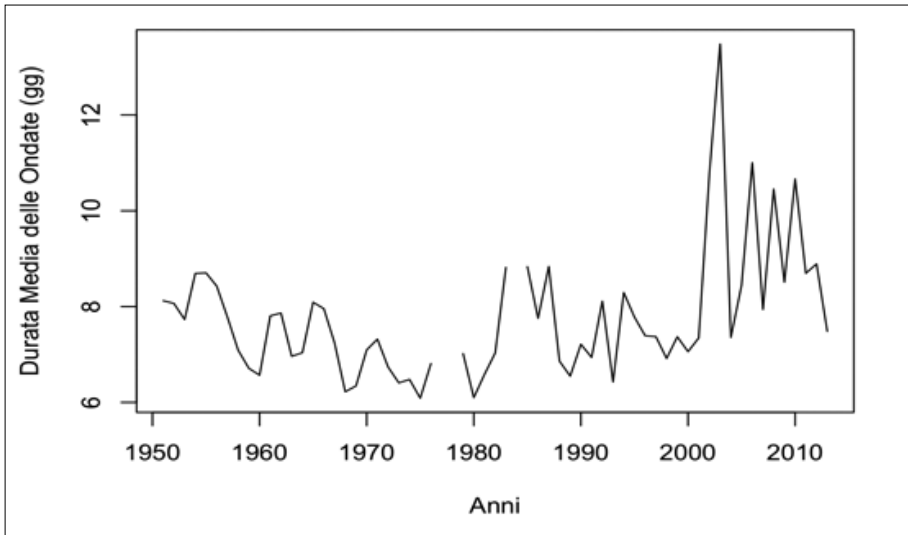


Fig. 8 *Serie storica della Durata Media delle Ondate di Caldo della Temperatura Minima giornaliera in Italia durante il periodo Maggio-Settembre 1951-2013: media areale*

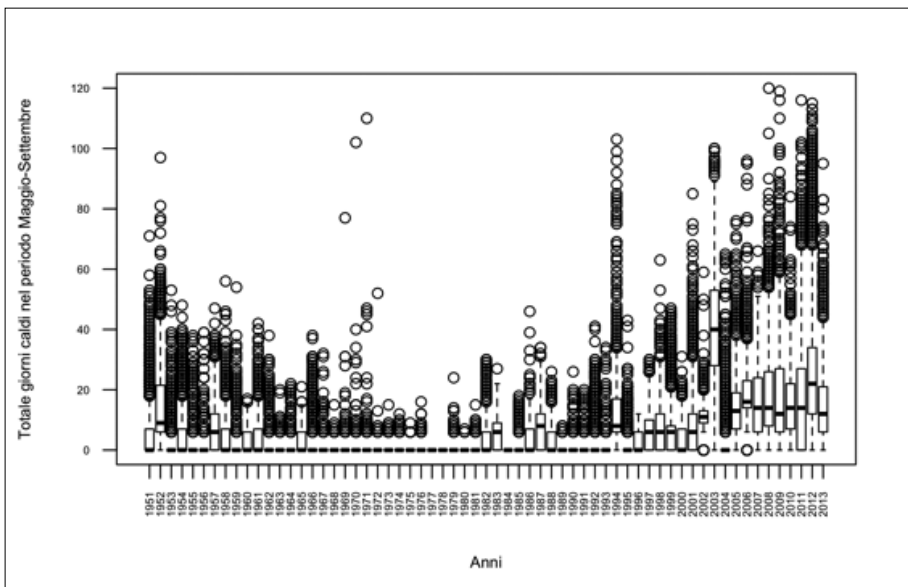


Fig. 9 *Boxplot della distribuzione spaziale (tutte le celle dell'area) del Numero di Giorni Caldi contati complessivamente durante le Ondate di Caldo della Temperatura Minima giornaliera per il periodo Maggio-Settembre 1951-2013 in Italia*

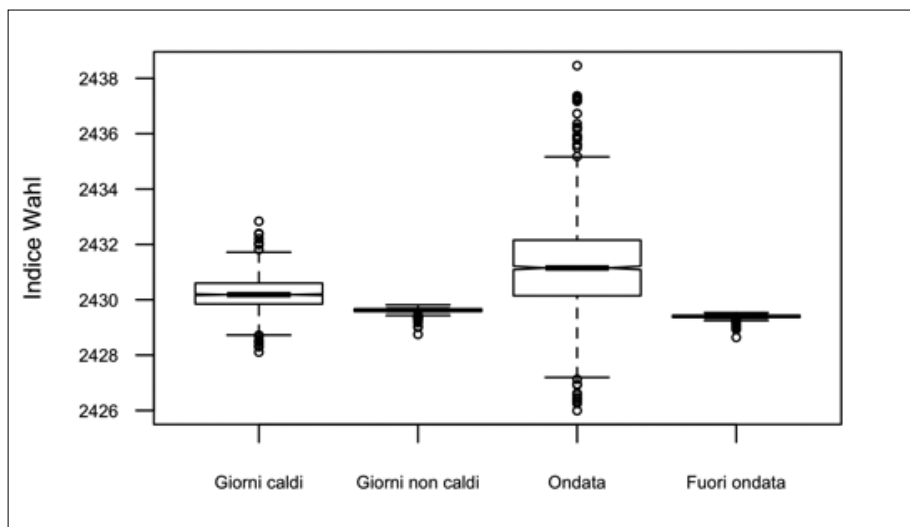


Fig. 10 *Distribuzione dei valori dell'indice WAHL riscontrati in tutte le celle dell'area di studio nel campionamento relativo al caso T1 e T2: Temperatura Massima*

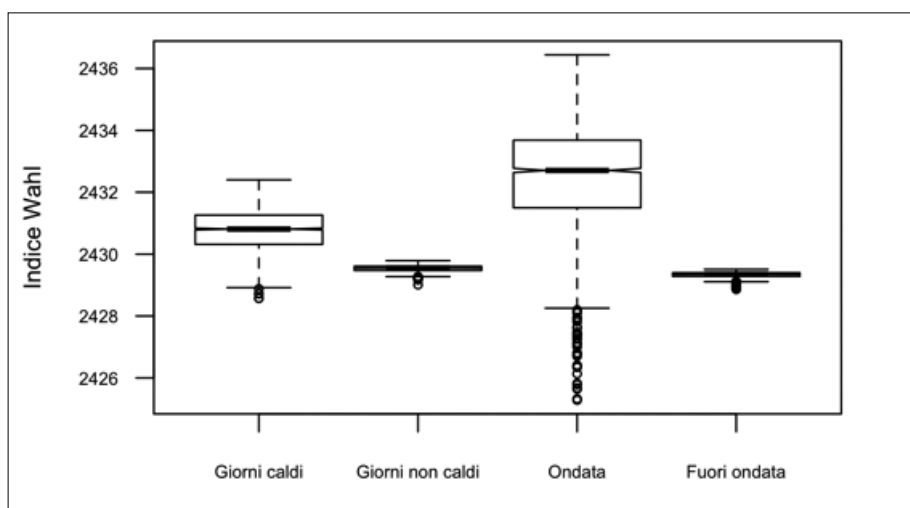


Fig. 11 *Distribuzione dei valori dell'indice WAHL riscontrati in tutte le celle dell'area di studio nel campionamento relativo al caso T1 e T2: Temperatura Minima*

Giorni non caldi) e T2 (Giorni caldi inclusi in un'ondata *vs* Giorni fuori da un'ondata) è riportata nei *boxplots* delle figure 10 e 11, rispettivamente per la TX e per la TN.

Come si vede dalle mappe delle figure 12 e 13, ove sono riportati i valori

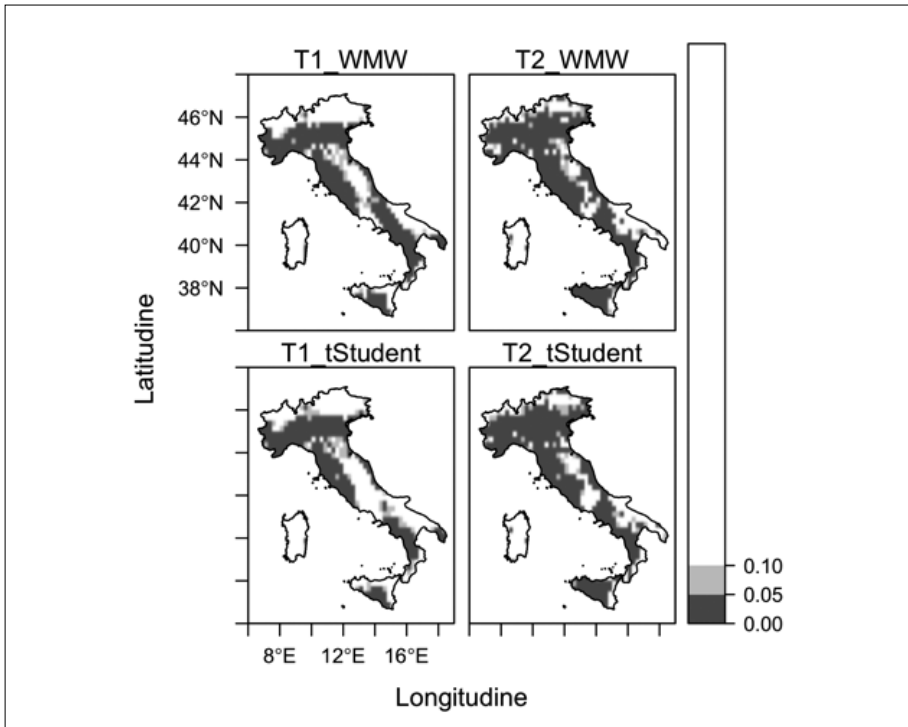


Fig. 12 Valori del *P-value* ottenuti dall'applicazione del test di Wilcoxon-Mann-Whitney (WMW) e di *t Student* sia nel caso T1 che T2 per la Temperatura Massima (valori significativi inferiori alle due soglie di accettazione di errore pari a 0.05 0.10)

del *P-value* ottenuti dall'applicazione del test WMW e *t Student*, l'esistenza di questa relazione è valida tanto per la TX quanto per la TN. Tuttavia mentre per la TN si riscontrano valori significativi pressoché in tutte le aree del territorio nazionale, per la TX sono escluse le zone Alpine e Appenniniche e la Sardegna.

È bene sottolineare che i risultati dei *tests* segnalano l'esistenza di una relazione diretta tra ondate di caldo e valori dell'indice WAHL, ma non possono dare indicazioni sulla causalità dei due fenomeni. Tuttavia, alcune considerazioni sulla dinamica della suddetta relazione possono dare delle indicazioni utili per lo sviluppo di un modello nel quale ricostruire la relazione stessa. Per esempio, se esaminiamo il risultato del test T1 e lo confrontiamo con il medesimo risultato del test T2 notiamo un'estensione delle aree ove il test risulta significativo e ciò è più evidente nel caso della TX. Questo risultato suggerisce che il legame tra WAHL e ondate di caldo è più forte che non tra WAHL e giorni caldi in genere, tanto più per la TX. Inoltre, l'analisi della relazione nei 15 giorni precedenti l'inizio dell'ondata

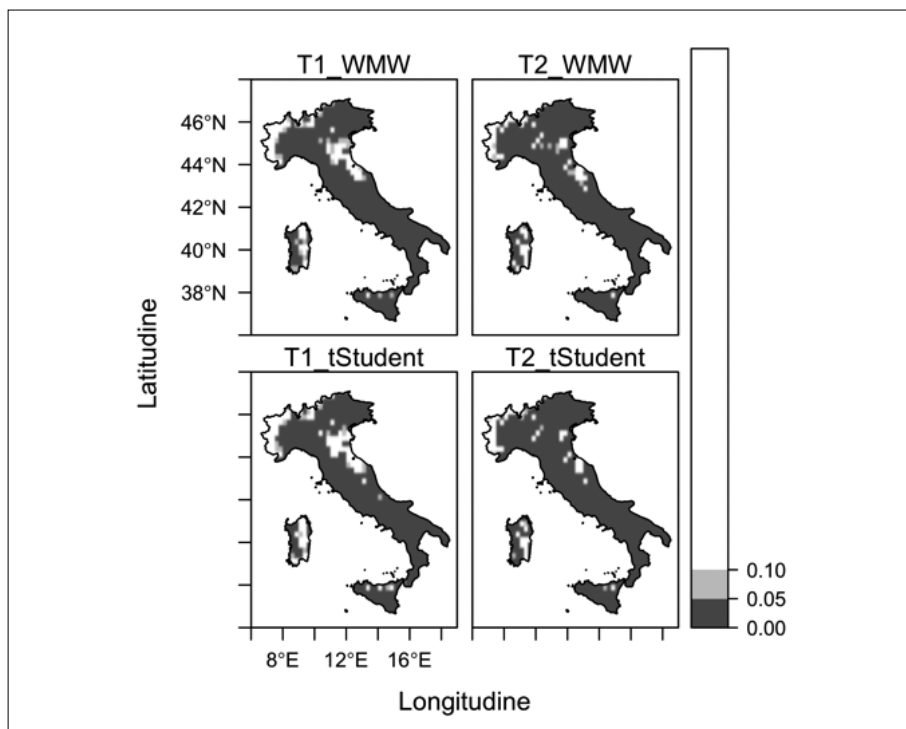


Fig. 13 Valori del P-value ottenuti dall'applicazione del test di Wilcoxon-Mann-Whitney (WMW) e di t Student sia nel caso T1 che T2 per la Temperatura Minima (valori significativi inferiori alle due soglie di accettazione di errore pari a 0.05 0.10)

di caldo permette di determinare una dinamica spazio-temporale delle variazioni che intercorrono tra i due fenomeni. Come si vede dalle figure 14 e 15, il quadro dinamico della relazione è ben distinto tra TX e TN. Infatti, la TX mostra una relazione attiva tra WAHL e tutti e 15 i giorni precedenti un' ondata di caldo, sebbene con specificità areali ben differenti lungo il corso di questi 15 giorni, mentre per la TN si evidenzia un decadimento tra il 6° e il 10° giorno, per poi rinforzarsi fino al 15° giorno. Ancora una volta, il segnale relativo alla TN è più diffuso in termini spaziali rispetto a quello della TX.

CONCLUSIONI

La variabilità climatica mostra un elevato grado di complessità, ma può essere scomposta in componenti più semplici per essere studiata approfonditamente.

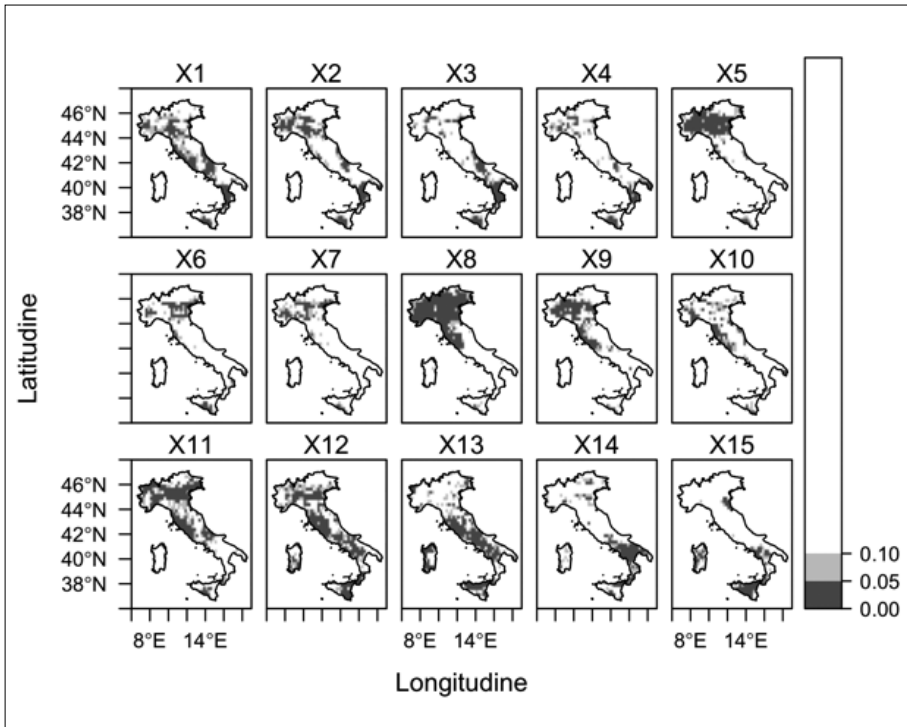


Fig. 14 Valori del *P*-value ottenuti dall'applicazione del test di Wilcoxon-Mann-Whitney (WMW) nel caso T3 relativamente ai 15 giorni precedenti l'inizio di un'ondata di caldo per la Temperatura Massima (valori significativi inferiori alle due soglie di accettazione di errore pari a 0.05 0.10)

La scomposizione in scale temporali permette di esaminare differenti tipi di variabilità e di attribuire un peso specifico a ciascuna di esse nel comporre il segnale osservato. Dall'analisi proposta risulta evidente come quasi la metà della variabilità dei valori di anomalie di temperatura media mensile del periodo Maggio-Settembre sia ascrivibile alle variazioni inter-annuali frutto delle interazioni tra i meccanismi climatici di larga scala. Tuttavia, risultano significativi i contributi dovuti a meccanismi di variabilità più lenta e caratterizzata da fasi decennali, che da sola determina il 25% della variabilità. Oltre un terzo della variabilità delle anomalie termiche medie, però, è determinata dal trend di lungo periodo in fase con il riscaldamento globale identificato. Tale impronta del cambiamento climatico in atto determina una considerevole pressione sugli ecosistemi e sulla salute umana e animale.

Inoltre gli eventi estremi termici determinati dalle ondate di caldo in Italia sono divenuti più frequenti a partire da metà degli anni '90 (Baldi et al.,

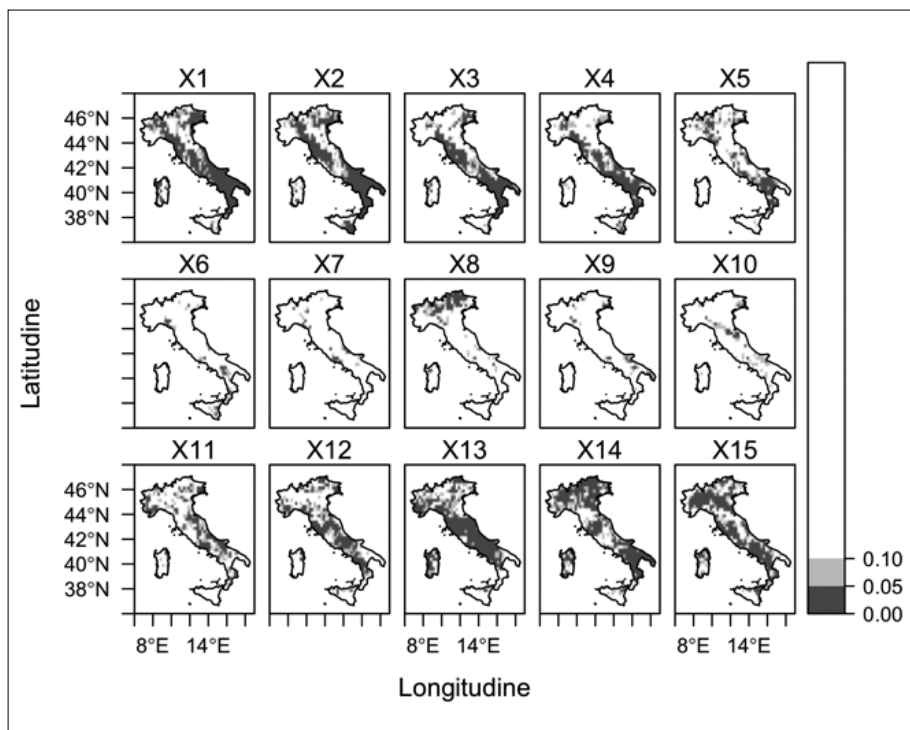


Fig. 15 Valori del *P*-value ottenuti dall'applicazione del test di Wilcoxon-Mann-Whitney (WMW) nel caso *T*3 relativamente ai 15 giorni precedenti l'inizio di un'ondata di caldo per la Temperatura Minima (valori significativi inferiori alle due soglie di accettazione di errore pari a 0.05 0.10)

2006; Lionello and Coauthors, 2009). Tale fenomeno, seppur meno regolare, sembra mostrare un trend crescente. Dalle analisi effettuate risulta che l'incremento delle ondate di caldo in questo periodo sia ascrivibile con maggior importanza alla Temperatura Minima.

In questo studio abbiamo poi mostrato un legame tra la variabilità del WAHL e un'ondata di caldo nella penisola italiana e questo legame è statisticamente significativo: la distribuzione dei valori giornalieri del WAHL, quando è in atto un'ondata di caldo, ha un valore centrale mediamente superiore alla stessa distribuzione quando non è in atto un'ondata. Analizzando poi la dinamica temporale delle variazioni che intercorrono tra i due fenomeni, i risultati ottenuti costituiscono una base importante per ulteriori approfondimenti sul nesso di causalità che esiste e un probabile supporto alla definizione di un modello specifico di previsione delle ondate di caldo a scala stagionale basato su meccanismi di larga scala.

RIASSUNTO

L'aumento della temperatura dell'aria nel bacino del Mediterraneo rappresenta una delle impronte più nitide del cambiamento climatico in atto legato principalmente alle attività antropiche. In questo studio viene proposta un'analisi della variabilità della temperatura media stagionale, delle ondate di calore e di un meccanismo atmosferico di grande scala coinvolto nello sviluppo e nel mantenimento delle ondate di calore stesse. I risultati mostrano come l'accelerazione del riscaldamento osservata negli ultimi anni sia legata all'aumento della frequenza delle ondate di calore, all'aumento dei giorni con valori di temperatura minima estrema. Infine viene mostrata una relazione funzionale statisticamente significativa tra ondate di calore in Italia e circolazione atmosferica di carattere nord africano.

ABSTRACT

The air temperature warming in the Mediterranean basin represents one of the observed climate change clearest footprints mainly related to the anthropic activities.

The long-term temperature variability has been analysed along with the heat waves occurrence in the last decades with one of the main related atmospheric forcing mechanism. Results highlights how heat waves frequency increased over last decades and that exists a robust functional dependence between heat waves in Italy and large-scale circulation over Northern Africa.

BIBLIOGRAFIA

- BALDI M., DALU G., MARACCHI G., PASQUI M., CESARONE F. (2006): *Heat waves in the Mediterranean: a local feature or a larger-scale effect?*, «Int. J. Climatol.», 26, pp. 1477–1487.
- BELTRANO M.C., DI GIUSEPPE E., ESPOSITO S., VENTO D. (2007): *Anomalie di temperatura e precipitazioni mensili calcolate sulle basi climatiche 1961-1990 e 1971-2000 in Italia*, «Osservatorio Agrometeorologico 2/2007», Supplemento al settimanale «Agricoltura Informazione», 46, pp. 9-13.
- BERTOCCHI L., VITALI A., LACETERA N., NARDONE A., VARISCO G., BERNABUCCI U. (2014): *Seasonal variations in the composition of Holstein cow's milk and temperature-humidity index relationship*, «Animal. », 8 (4), pp. 667-74.
- CHAUVIN F., ROEHRIG R., LAFORE J. P. (2010): *Intraseasonal variability of the Saharan heat low and its link with midlatitudes*, «J. Clim. », 23 (10), pp. 2544-2561.
- DONO G., CORTIGNANI R., DORO L., LACETERA N., LEDDA L., PASQUI M., MAZZAPICCHIO G. (2014): *An Integrated Assessment of the Productive and Economic Impacts Generated by Change in Climatic Variability in an Irrigated Mediterranean Area*, «QA-Rivista dell'Associazione Rossi-Doria», 4.
- EFTHYMIADIS D., GOODESS C.M., JONES P.D. (2011): *Trends in Mediterranean gridded temperature extremes and large-scale circulation influences*, «Nat. Hazards Earth Syst. Sci.», 11, pp. 2199-2214.

- GREENE A.M, GODDARD L., COUSIN R. (2011): *Web tool deconstructs variability in twentieth-century climate*, «Eos Trans. AGU», 92 (45), p. 397.
- HAYLOCK M.R., HOFSTRA N., KLEIN TANK A.M.G., KLOK E.J., JONES P.D., NEW M., (2008): *A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation*, «J. Geophys. Res. (Atmospheres)», 113, D20119.
- HARRIS I., JONES P.D., OSBORN T.J., LISTER D.H. (2014): *Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset*, «Int. J. Climatol.», 34, pp. 623-642.
- KALNAY E., KANAMITSU M., KISTLER R., COLLINS W., DEAVEN D., GANDIN L., IREDELL M., SAHA S., WHITE G., WOOLLEN J., ZHU Y., CHELLIAH M., EBISUZAKI W., HIGGINS W., JANOWIAK J., MO K.C., ROPELEWSKI C., WANG J., LEETMAA A., REYNOLDS R., JENNE R. AND JOSEPH D. (1996): *The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project*, «Bull. Amer. Meteor. Soc.», 77, pp. 437-471.
- KARL T.R., NICHOLLS N., GHAZI A. (1999): *CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes: Workshop summary*, «Climatic Change», 42, pp. 3-7.
- LIONELLO AND COAUTHORS (2009): *Eventi climatici estremi: tendenze attuali e clima futuro sull'Italia*, in Castellari S., Artale V. (a cura di), *I cambiamenti climatici in Italia: evidenze, vulnerabilità e impatti*, Bonomia University Press, Bologna.
- MANN H.B., WHITNEY D.R. (1947): *On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other*, «Annals of Mathematical Statistics», 18 (1), pp. 50-60.
- MCMICHAEL A.J., WOODRUFF R.E., HALES S. (2006): *Climate change and human health: present and future risks*, «The Lancet», 859-869.
- PETERSON T.C., COAUTHORS (2002): *Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapports 1998-2001*, WMO, Rep. WCDMP-47, WMO-TD 1071, Geneva, Switzerland, pp. 1-143.
- SILLMANN J., KHARIN V.V., ZHANG X., ZWIERS F.W., BRONAUGH D. (2013a): *Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate*, «J. Geophys. Res. Atmos.», 118, pp. 1716-1733.
- SILLMANN J., KHARIN V.V., ZHANG X., ZWIERS F.W., BRONAUGH D. (2013b): *Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections*, «J. Geophys. Res. Atmos.», 118, pp. 2473-2493.
- STUDENT (WILLIAM SEALY GOSSET) (1908): *The probable error of a mean*, «Biometrika», 6 (1), pp. 1-25.
- VITALI A., SEGNALE M., BERTOCCHI L., BERNABUCCI U., NARDONE A., LACETERA N. (2009): *Seasonal pattern of mortality and relationships between mortality and temperature-humidity index in dairy cows*, «J. Dairy Sci.», 92 (8), pp. 3781-90.
- WILCOXON F. (1945): *Individual comparisons by ranking methods*, «Biometrics Bulletin», 1 (6), pp. 80-83.

Il fabbisogno di conoscenze per l'inventario nazionale delle emissioni in agricoltura

INVENTARIO NAZIONALE DELLE EMISSIONI: IL QUADRO ISTITUZIONALE
E LE CONVENZIONI INTERNAZIONALI, IL REPORTING INTERNAZIONALE
E I PROCESSI DI REVIEW

L'Istituto per la protezione e la ricerca ambientale (ISPRA) è responsabile della realizzazione, della gestione e dell'archiviazione dei dati dell'inventario nazionale delle emissioni e degli assorbimenti dei gas a effetto serra e degli inquinanti atmosferici, della raccolta dei dati di base e della realizzazione di un programma di controllo e di garanzia della qualità dei dati. L'implementazione di tali procedure di controllo è fondamentale per garantire la trasparenza, la consistenza, la comparabilità, la completezza e l'accuratezza dell'inventario nazionale, secondo quanto previsto dall'*Intergovernmental panel on climate change* (IPCC). L'ISPRA predispone, aggiorna e trasmette al Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare (MATM) un progetto per l'organizzazione del Sistema nazionale per la realizzazione dell'inventario nazionale dei gas serra (D.Lgs. 51/2008 e D.Lgs. 30/2013)¹.

Il contesto internazionale al quale fa riferimento l'inventario nazionale delle emissioni è rappresentato dalla Convenzione quadro sui cambiamenti climatici delle Nazioni Unite (UNFCCC), dal Protocollo di Kyoto, dalla Convenzione di Ginevra sull'inquinamento atmosferico transfrontaliero a lunga distanza (CLRTAP) dell'UNECE e relativi protocolli di riduzione delle

* ISPRA

¹ In base all'articolo 5.1 del protocollo di Kyoto, i Paesi inclusi nell'allegato I della Convenzione UNFCCC devono disporre di un adeguato sistema nazionale per la stima delle emissioni di gas serra di origine antropica, per la trasmissione dei dati al Segretariato della Convenzione e per l'archiviazione dei risultati.

emissioni, dal Meccanismo di monitoraggio dei gas serra dell'Unione Europea, dal Pacchetto Clima-Energia e dalle direttive europee sulla limitazione delle emissioni (IPPC², NEC³, ecc.).

Nell'ambito della Convenzione UNFCCC, i Paesi firmatari devono inviare ogni anno al Segretariato della Convenzione le stime annuali delle emissioni e assorbimenti di gas serra con effetto diretto (anidride carbonica CO₂, metano CH₄, protossido di azoto N₂O, idrofluorocarburi HFCs, perfluorocarburi PFCs, esafluoruro di zolfo SF₆) e indiretto (biossido di zolfo SO₂, ossidi di azoto NO_x, composti organici volatili non metanici NMVOC, monossido di carbonio CO) e delle proiezioni, secondo la metodologia di riferimento dell'IPCC (IPCC, 2014; IPCC, 2006; IPCC, 2003; IPCC, 2000; IPCC, 1997)⁴. I dati devono essere comunicati tramite il *Common Reporting Format* (CRF) e accompagnati dal *National Inventory Report* (NIR)⁵, nel quale sono riportate le metodologie di stima e i dati utilizzati, le stime prodotte e una spiegazione degli andamenti osservati.

Per quanto concerne la Convenzione CLRTAP, la trasmissione annuale deve contenere le emissioni e le proiezioni di SO_x, NO_x, NH₃ (ammoniaca), NMVOC, CO, HMs (metalli pesanti), PM (particolato), POPs (inquinanti organici persistenti) e, ogni cinque anni, la disaggregazione territoriale delle emissioni (ISPRA, 2009; ISPRA, 2015a) sul grigliato EMEP⁶, in base alla metodologia di riferimento dell'EMEP/EEA (EMEP/EEA, 2013)⁷. I dati devono essere comunicati tramite il *Nomenclature Reporting Format* (NFR) e

² La Direttiva 96/61/CE, nota come direttiva IPPC (*Integrated pollution prevention and control* – in italiano, prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento) è lo strumento di cui l'Unione Europea si è dotata per combattere l'inquinamento e per raggiungere un livello elevato di tutela dell'ambiente.

³ La Direttiva 2001/81/CE, conosciuta come NEC (*National Emission Ceilings*), stabilisce dei limiti superiori delle emissioni totali per l'anno 2010 dei quattro inquinanti responsabili dell'acidificazione, dell'eutrofizzazione e dell'inquinamento da ozono troposferico (biossido di zolfo, ossidi di azoto, composti organici volatili non metanici e ammoniaca). Attualmente è in fase di revisione per estendere i limiti nazionali di emissione fino al 2020 e per stabilire nuovi impegni di riduzione delle emissioni nazionali applicabili a partire dal 2020 e dal 2030 (anche per metano e particelle sottili).

⁴ I dati dell'inventario nazionale delle emissioni sono disponibili ai seguenti link: <http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/serie-storiche-emissioni> (sito dell'ISPRA); http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/8108.php (sito dell'UNFCCC).

⁵ ISPRA, 2014

⁶ L'acronimo indica il programma di sorveglianza continua e di valutazione del trasporto a lunga distanza degli inquinanti atmosferici in Europa. Si fa riferimento a un grigliato geografico di 50 chilometri per lato.

⁷ È la metodologia di stima delle emissioni degli inquinanti atmosferici dell'Agenzia europea per l'ambiente (*European Environmental Agency*).

accompagnati dall'*Informative Inventory Report* (IIR)⁸.

L'inventario delle emissioni serve a quantificare i livelli di emissione, identificare le fonti principali e valutare l'impatto sulla salute e sui materiali attraverso appropriati modelli, verificare il rispetto dei limiti di emissione nazionali e degli impegni di riduzione intrapresi nei diversi contesti internazionali, sviluppare strategie di abbattimento e individuare priorità attraverso analisi costi-effetti e modelli integrati, verificare le conseguenze a diversi livelli (settoriale, regionale, nazionale e internazionale) delle politiche e misure intraprese per ridurre le emissioni, verificare l'interazione tra le politiche settoriali, i conti economici e gli impatti ambientali, fornire informazione confrontabile e accessibile al pubblico attraverso opportuni indicatori.

L'inventario delle emissioni è sottoposto ogni anno a un processo di controllo, verifica e revisione (*review*) da parte di un organismo nominato dal Segretariato della Convenzione UNFCCC che analizza tutto il materiale presentato dal Paese e ne verifica in dettaglio la rispondenza alle proprietà di trasparenza nelle metodologie e nei dati utilizzati, consistenza della serie storica, comparabilità con altri inventari, completezza in relazione ai processi di stima e agli inquinanti e accuratezza nella realizzazione⁹. Senza tali requisiti, l'Italia sarebbe esclusa dalla partecipazione ai meccanismi flessibili previsti dal Protocollo di Kyoto, come il mercato delle quote di emissioni, l'implementazione di progetti con i Paesi in via di sviluppo (CDM) e l'implementazione di progetti congiunti con i Paesi a economia in transizione (JI).

INVENTARIO NAZIONALE DELLE EMISSIONI: LE SORGENTI EMISSIVE, LE LINEE GUIDA E I DATI DI SINTESI

Le attività antropogeniche e biogeniche responsabili della formazione di emissioni sono classificate nei seguenti settori: energia, processi industriali, uso dei solventi, agricoltura, LULUCF (*Land use, land-use change and forestry*, Uso del suolo, cambiamento di uso del suolo e selvicoltura) e rifiuti. Ognuno di questi settori è suddiviso a sua volta in diverse categorie di emissioni e assorbimenti. Le emissioni e gli assorbimenti devono essere riportati al massimo livello di disaggregazione per categoria.

⁸ ISPRA, 2015b.

⁹ Le relazioni sui processi di *review* possono essere visualizzate al link http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/inventory_review_reports/items/8452.php (per i gas serra) e al link http://www.ceip.at/ms/ceip_home1/ceip_home/review_results/review_results_2015/ (per gli inquinanti atmosferici).

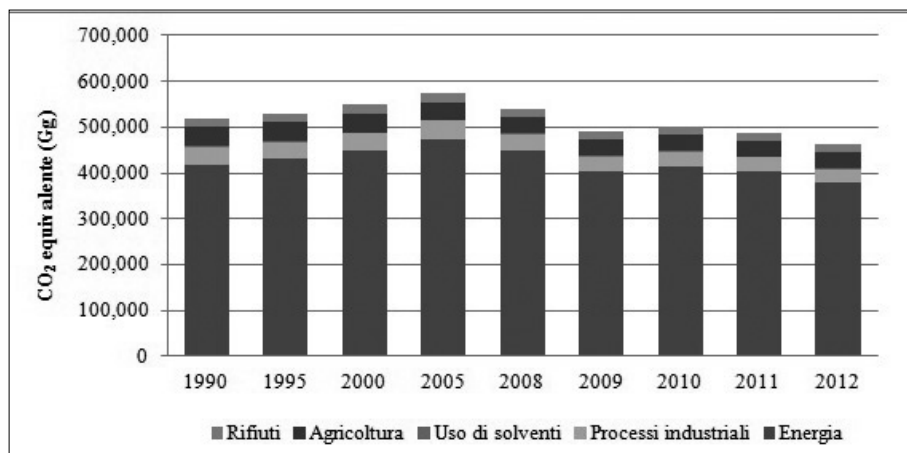


Fig. 1 Emissioni nazionali di gas serra per settore e per anno (Gg CO₂eq)

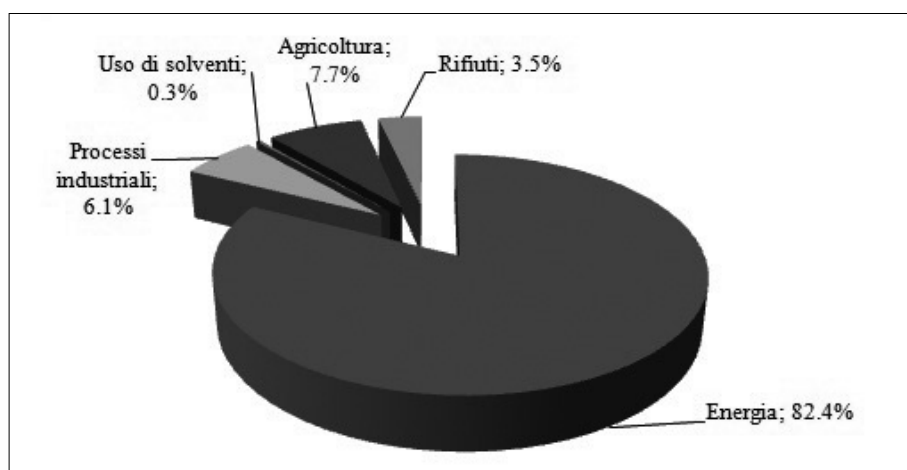


Fig. 2 Emissioni nazionali di gas serra per settore (2012)

Osservando i dati di emissione dei gas serra (fig. 1), comunicati nel 2012 al segretariato della Convenzione UNFCCC, le emissioni totali, espresse in CO₂ equivalente, escluse le emissioni e gli assorbimenti dovuti al settore LULUCF, sono diminuite del 11,1% tra il 1990 e il 2012, passando da 519 a 461 milioni di tonnellate di CO₂ equivalente. Entro la fine del 2015 verrà pubblicato un documento sulla verifica della conformità rispetto all'obiettivo nazionale di Kyoto, in base al quale l'Italia avrebbe dovuto ridurre le proprie emissioni totali di gas serra nel periodo 2008-2012 del 6,5% rispetto ai livelli del 1990.

La maggior parte delle emissioni di gas serra è attribuita al settore energia, con una percentuale del 82,4%, seguito da agricoltura e processi industriali, pari al 7,7% e del 6,1% rispettivamente. Il settore rifiuti contribuisce per il 3,5% e l'uso di solventi con lo 0,3% (fig. 2).

EMISSIONI NAZIONALI DEL SETTORE AGRICOLTURA:

UNA PANORAMICA SU DATI DI SINTESI, LE METODOLOGIE UTILIZZATE E I PARAMETRI CONSIDERATI

Il settore agricoltura è costituito da cinque fonti emissive, che sono la fermentazione enterica (di cui si stimano le emissioni di CH_4), la gestione delle deiezioni (che causa le emissioni di CH_4 , N_2O , NH_3 , NMVOC, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$), le risaie (di cui si stima l'emissione di CH_4), i suoli agricoli (fonte di N_2O e NH_3), la combustione dei residui agricoli (da cui derivano le emissioni di CH_4 , N_2O , NO_x , CO , NMVOC, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$) e i pesticidi (il cui utilizzo genera l'emissione di esaclorobenzene - HCB)¹⁰.

I suoli agricoli includono le emissioni dirette, dovute all'impiego dei fertilizzanti azotati, allo spandimento dei reflui zootecnici e dei fanghi da depurazione, ai residui colturali, alle colture azoto-fissatrici, ai suoli organici e al pascolo, e le emissioni indirette, dovute alle deposizioni atmosferiche e al ruscellamento e percolazione delle forme azotate.

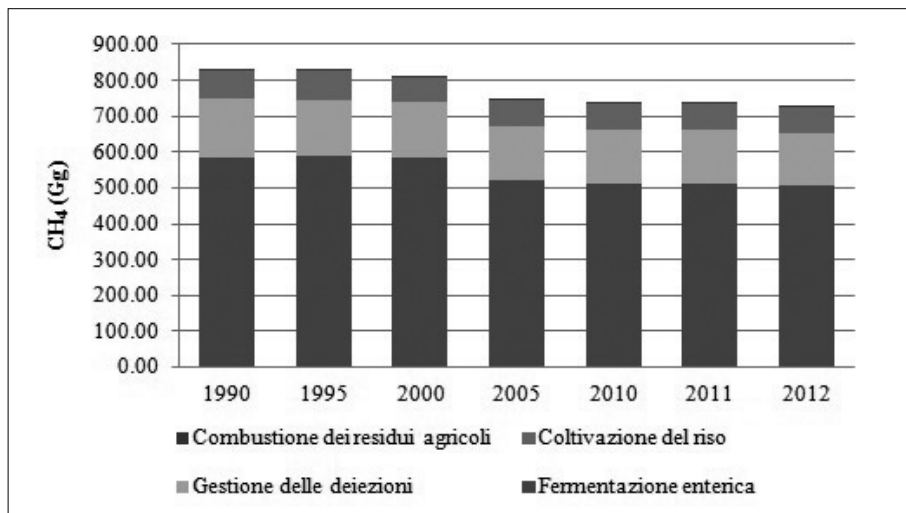
Per quanto riguarda i gas serra, nel 2012 le emissioni di metano e protossido di azoto sono pari al 43,1% e al 56,9%, rispettivamente. La riduzione complessiva delle emissioni rispetto al 1990 (pari a -13,3%) è principalmente dovuta al calo delle emissioni di metano della fermentazione enterica (-13,1%) e delle emissioni di protossido di azoto da suoli agricoli (-15,0%), che rappresentano rispettivamente il 30,1% e il 47,0% del totale delle emissioni di settore (tab. 1).

Le emissioni di metano nel 2012 sono pari a 726,4 Gg (fig. 3) e sono dovute alla fermentazione enterica (69,9%), alla gestione delle deiezioni (19,9%), alla coltivazione del riso (10,1%) e alla combustione dei residui agricoli (0,1%). Rispetto al 1990, le emissioni presentano un decremento di 99,1 Gg (-12,0%). Tale andamento è dovuto principalmente alla riduzione del numero di bovini e al recupero di biogas per la produzione di energia.

Le emissioni di protossido di azoto, pari nel 2012 a 65,0 Gg (fig. 4), sono determinate dalla coltivazione dei terreni agricoli (82,5%), dalla gestione del-

¹⁰ ISPRA, 2015b; ISPRA, 2014; ISPRA, 2011; ISPRA, 2008.

Categorie emissive	1990	1995	2000	2005	2008	2009	2010	2011	2012	2012	2012/1990
	CO ₂ eq (Gg)								%	%	
Fermentazione enterica	12,278	12,348	12,246	10,914	10,996	11,007	10,732	10,753	10,667	30.1	-13.1
Gestione delle deiezioni	7,401	7,080	7,151	6,865	6,862	6,972	6,757	6,705	6,554	18.5	-11.4
Coltivazione del riso	1,576	1,671	1,391	1,472	1,386	1,565	1,565	1,550	1,533	4.3	-2.7
Suoli agricoli	19,557	19,487	19,411	18,169	16,947	15,569	15,193	15,423	16,624	47.0	-15.0
Combustione dei residui agricoli	17	17	17	18	19	18	18	18	19	0.1	9.1
Totale	40,830	40,601	40,217	37,438	36,209	35,130	34,265	34,449	35,397	100	-13.3

Tab. 1 Emissioni di gas serra del settore agricoltura per categoria e per anno (Gg CO₂eq)Fig. 3 Emissioni di metano per categoria e per anno (Gg CH₄)

le deiezioni (17,4%) e dalla combustione dei residui agricoli (0,02%). La riduzione pari a 10,8 Gg (-14,3%) rispetto ai livelli del 1990 è principalmente dovuta al calo dell'uso di fertilizzanti sintetici azotati, nonché alla variazione della consistenza del bestiame allevato e alla perdita di coltivazioni agricole.

Sulla base dell'analisi del contributo emissivo di tutte le sorgenti di emissione dell'inventario nazionale, rispetto al 2012 e all'anno base (1990), le categorie emissive più importanti del settore agricoltura sono le emissioni di metano da fermentazione enterica e gestione delle deiezioni, le emissioni di protossido di azoto da gestione delle deiezioni e suoli agricoli. In particolare, per la valutazione delle emissioni di queste categorie, in base alle linee guida dell'IPCC, si utilizzano metodologie di stima più dettagliate e fattori di emissione specifici del paese in sostituzione dei fattori di default presenti nelle linee guida.

Per la quantificazione delle emissioni delle diverse sorgenti si utilizzano i dati di attività, relativi a indicatori correlati con le quantità emesse. La fonte principale di queste informazioni è l'ISTAT, le cui statistiche, relative agli

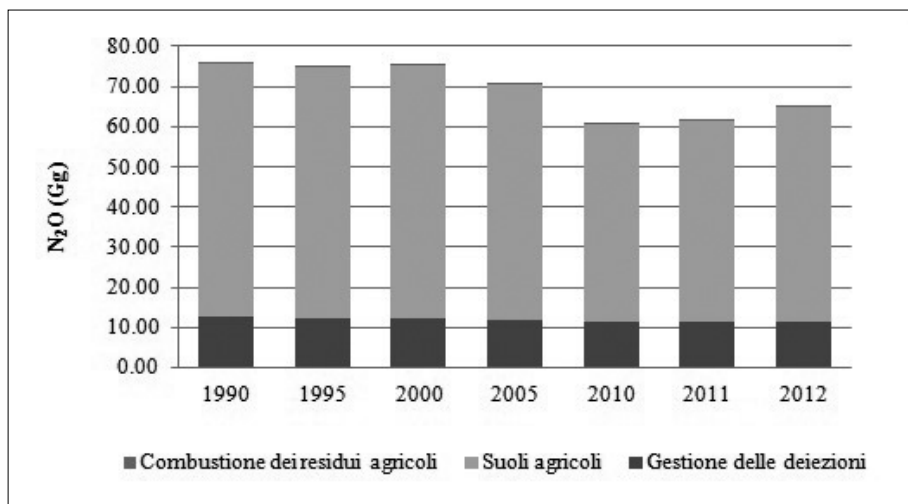


Fig. 4 Emissioni di protossido di azoto per categoria e per anno (Gg N_2O)

allevamenti (consistenza per tipo di produzione – riproduzione o macellazione – e per età dei capi e dati sulle produzioni zootecniche), alle superfici e produzioni agricole, all'uso dei fertilizzanti azotati (sintetici e organici), sono ampiamente utilizzate. La metodologia di stima richiede, inoltre, informazioni dettagliate su vari parametri, quali il peso degli animali, la dieta (in termini di digeribilità dell'alimento), la produzione delle deiezioni e la quantità di azoto escreto per categoria animale. Questi dati sono basati su misure nazionali e su dati di letteratura internazionale, adattata al caso nazionale. La maggior parte degli studi utilizzati sono stati realizzati dal Centro di ricerca per la produzione animale (CRPA). Nell'ambito del processo di miglioramento delle stime, l'ISPRA, insieme al CRPA, ha, inoltre, partecipato alla preparazione dei quesiti sulla gestione degli effluenti del censimento dell'agricoltura e dell'indagine sulla struttura e sulle produzioni agricole (SPA).

EMISSIONI NAZIONALI DEL SETTORE AGRICOLTURA PER CATEGORIA E FOCUS SU POSSIBILI MIGLIORAMENTI

Fermentazione enterica

Le emissioni di metano, considerate in questa categoria, sono prodotte dagli erbivori come sottoprodotto della fermentazione enterica, che è un processo digestivo durante il quale i carboidrati sono demoliti da microrganismi in molecole

Categorie animali	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012	2012	2012/1990
				Gg				%	%
Vacche da latte	249.75	220.53	221.03	211.19	209.29	209.05	215.93	42.5%	-13.5%
Altri bovini	233.00	246.22	234.48	204.65	187.46	188.81	186.43	36.7%	-20.0%
Bufalini	5.95	9.55	12.83	14.82	23.62	23.25	22.93	4.5%	285.6%
Ovini	69.91	85.34	88.71	63.63	63.20	63.54	56.13	11.0%	-19.7%
Caprini	6.29	6.86	6.88	4.73	4.91	4.80	4.46	0.9%	-29.2%
Cavalli	5.18	5.67	5.04	5.01	6.72	6.72	7.13	1.4%	37.5%
Asini e muli	0.84	0.38	0.33	0.30	0.46	0.51	0.60	0.1%	-28.6%
Scrofe	0.98	1.03	1.06	1.08	1.08	1.06	0.93	0.2%	-4.5%
Altri suini	11.63	11.06	11.40	12.72	12.91	12.96	12.06	2.4%	3.7%
Conigli	1.16	1.33	1.39	1.59	1.39	1.36	1.38	0.3%	19.7%
Totale	584.69	587.98	583.14	519.73	511.05	512.07	507.98	100%	-13.1%

Tab. 2 *Emissioni di metano da fermentazione enterica (Gg)*

semplici per l'assorbimento nel flusso sanguigno. La quantità di metano che viene rilasciato dipende dal tipo di apparato digerente, dall'età e dal peso dell'animale, e dalla qualità e quantità di alimenti consumati (IPCC, 2006).

Le categorie animali considerate sono i ruminanti (bovini, bufalini, ovini, caprini), che sono la maggiore fonte di metano, e i non ruminanti (suini, equini, conigli). Per la stima delle emissioni di metano da fermentazione enterica, è stata utilizzata una metodologia più dettagliata (*tier 2*, secondo le linee guida dell'IPCC) per le categorie bovini e bufalini e un approccio semplificato (*tier 1*), basato sull'utilizzo dei fattori di emissione di *default* dell'IPCC, per le altre categorie animali.

Nel 2012, le emissioni di CH₄ da fermentazione enterica sono pari a 508,0 Gg (tab. 2), che equivalgono al 69,9% del totale delle emissioni di CH₄ del settore agricoltura e al 29,6% delle emissioni nazionali di CH₄ escluso il settore LULUCF.

La diminuzione delle emissioni di metano derivanti dalla fermentazione enterica è principalmente dovuta alla riduzione del numero di capi bovini, che rappresenta la categoria animale che fornisce il contributo maggiore in termini di emissioni. Il numero di vacche da latte è passato da 2.642 migliaia di capi nel 1990 a 1.857 migliaia di capi nel 2012, con una riduzione del 29,7%, mentre la quantità di latte prodotto per capo in produzione è aumentata, passando da una media nazionale annua pari a 4.210 kg di latte prodotto per bovina nel 1990 a 6.429 kg nel 2012. Tale andamento è essenzialmente imputabile al sistema delle quote latte del primo pilastro della politica agricola comune (PAC), che ha, in generale, contingentato la produzione totale di latte, determinando la chiusura negli anni di molte piccole e medie aziende agricole e l'aumento della produzione unitaria.

EQUATION 10.21
CH₄ EMISSION FACTORS FOR ENTERIC FERMENTATION FROM A LIVESTOCK CATEGORY

$$EF = \left[\frac{GE \cdot \left(\frac{Y_m}{100} \right) \cdot 365}{55.65} \right]$$

Where:

EF = emission factor, kg CH₄ head⁻¹ yr⁻¹

GE = gross energy intake, MJ head⁻¹ day⁻¹

Y_m = methane conversion factor, per cent of gross energy in feed converted to methane

The factor 55.65 (MJ/kg CH₄) is the energy content of methane

Fig. 5 *Equazione del fattore di emissione del metano da fermentazione enterica*

EQUATION 10.16
GROSS ENERGY FOR CATTLE/BUFFALO AND SHEEP

$$GE = \left[\frac{\left(\frac{NE_m + NE_a + NE_l + NE_{work} + NE_p}{REM} \right) + \left(\frac{NE_g + NE_{wool}}{REG} \right)}{\frac{DE\%}{100}} \right]$$

Where:

GE = gross energy, MJ day⁻¹

NE_m = net energy required by the animal for maintenance (Equation 10.3), MJ day⁻¹

NE_a = net energy for animal activity (Equations 10.4 and 10.5), MJ day⁻¹

NE_l = net energy for lactation (Equations 10.8, 10.9, and 10.10), MJ day⁻¹

NE_{work} = net energy for work (Equation 10.11), MJ day⁻¹

NE_p = net energy required for pregnancy (Equation 10.13), MJ day⁻¹

REM = ratio of net energy available in a diet for maintenance to digestible energy consumed (Equation 10.14)

NE_g = net energy needed for growth (Equations 10.6 and 10.7), MJ day⁻¹

NE_{wool} = net energy required to produce a year of wool (Equation 10.12), MJ day⁻¹

REG = ratio of net energy available for growth in a diet to digestible energy consumed (Equation 10.15)

DE% = digestible energy expressed as a percentage of gross energy

Fig. 6 *Equazione dell'energia giornaliera lorda*

In base all'approccio metodologico *tier 2*, il fattore di emissione (EF) del metano è calcolato a partire dalla quantità di energia (GE, *Gross Energy*) consumata giornalmente dall'animale (fig. 5).

L'energia giornaliera è basata sulle esigenze energetiche dell'animale per il mantenimento e per svolgere le attività, quali la crescita, la lattazione e la gravidanza, e sulla disponibilità di energia del mangime (fig. 6).

Secondo le linee guida dell'IPCC, i dati e le informazioni (la maggior parte delle quali basate su misure sperimentali), relativi alla composizione della dieta dei bovini, alla concentrazione dei prodotti generati dalla fermentazione dei ruminanti, alla variazione stagionale della popolazione animale, alla qualità e disponibilità degli alimenti, alle strategie di mitigazione potrebbero essere utilizzati per sviluppare modelli sofisticati per la stima delle emissioni.

Inoltre, la disponibilità di informazioni sulle diete e su un maggior dettaglio della popolazione animale potrebbe consentire l'utilizzo di valori differenziati di digeribilità, che comporterebbe variazioni rilevanti nella stima dell'energia necessaria per soddisfare le esigenze di mantenimento e delle attività degli animali.

Data l'importanza del fattore di conversione in metano dell'energia assimilata (Y_m nella fig. 5), sforzi aggiuntivi dovrebbero essere profusi in ricerche volte a migliorare le stime del fattore per le diverse combinazioni di bestiame e mangimi.

Gestione delle deiezioni (emissioni di metano)

In questa categoria si considerano le emissioni di metano prodotte durante lo stoccaggio e il trattamento dei reflui zootecnici, in seguito alla decomposizione per opera di microrganismi dei reflui in condizioni anaerobiche.

I principali fattori che influenzano le emissioni di metano sono la quantità di deiezioni prodotte e la porzione delle stesse che si decompone in condizioni anaerobiche. Il primo fattore dipende dal tasso di produzione per animale e il numero di animali, il secondo dalla modalità con la quale il refluo viene gestito. Quando il refluo viene stoccato o trattato come un liquido (ad esempio, in lagune, stagni, serbatoi o pozzi), si decompone in condizioni anaerobiche ed è in grado di produrre una quantità significativa di metano. La temperatura e il tempo di conservazione nell'unità di stoccaggio influenzano notevolmente la quantità di metano prodotto. Quando il refluo viene gestito come un solido (per esempio, in cataste o pile) o quando si deposita al pascolo, tende a decomporsi in condizioni più aerobiche e meno metano viene prodotto (IPCC, 2006).

L'approccio metodologico *tier 2* è stato utilizzato per le categorie dei bovini, bufalini e suini.

Per la stima dei fattori di emissione per tipo di refluo (liquido e solido) e dei fattori di conversione dei solidi volatili¹¹ in metano, una metodologia

¹¹ È la parte della sostanza secca (solidi totali) costituita da sostanza organica.

Categorie animali	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012	2012	2012/1990
	Gg							%	%
Vacche da latte	39.74	31.12	30.96	27.21	25.55	25.34	26.37	18.2%	-33.7%
Altri bovini	38.18	40.37	38.12	33.69	30.81	30.64	28.80	19.9%	-24.6%
Bufalini	1.15	1.77	2.25	2.52	4.49	4.35	4.09	2.8%	256.0%
Ovini	1.90	2.32	2.41	1.73	1.72	1.73	1.53	1.1%	-19.7%
Caprini	0.18	0.20	0.20	0.14	0.14	0.14	0.13	0.1%	-29.2%
Cavalli	0.43	0.47	0.41	0.41	0.55	0.55	0.59	0.4%	37.5%
Asini e muli	0.07	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.0%	-28.6%
Suini	68.19	65.17	66.80	70.46	69.81	68.94	65.80	45.5%	-3.5%
Avicoli	13.82	14.67	14.09	15.05	15.82	16.01	15.82	10.9%	14.5%
Conigli	1.19	1.36	1.42	1.63	1.43	1.40	1.42	1.0%	19.7%
Animali da pelliccia	0.22	0.15	0.16	0.14	0.09	0.11	0.11	0%	-50.8%
Totale	165.08	157.64	156.85	153.01	150.45	149.25	144.71	100%	-12.3%

Tab. 3 *Emissioni di metano da gestione delle deiezioni (Gg)*

dettagliata è stato applicata a livello regionale. Successivamente, per la stima della serie storica dei fattori di emissione è stata seguita una metodologia semplificata. Le emissioni si basano su specifiche pratiche di gestione delle deiezioni e delle condizioni ambientali. In particolare, sono stati considerati i seguenti fattori: le temperature medie mensili regionali; la quantità di liquame e letame prodotta per categoria di animali; le tecniche di gestione per l'applicazione al suolo dei reflui zootecnici.

Per la stima delle emissioni di metano della categoria dei suini, un tasso di emissione di metano specifico è stato sperimentalmente determinato dal CRPA. La stima del fattore di emissione dipende, in particolare, dal tipo di stoccaggio dei liquami (serbatoio e lagune), dal tipo di allevamento e dalla produzione stagionale di biogas.

Un approccio *tier 1* con l'utilizzo dei fattori di emissione di default dell'IPCC è stato impiegato per stimare le emissioni delle altre categorie di animali.

Una riduzione delle emissioni di metano è stata introdotta per le categorie dei bovini e dei suini, al fine di prendere in considerazione la produzione di biogas dai reflui zootecnici per scopi energetici. La stima delle emissioni di metano da sottrarre, dovute al recupero di biogas negli stoccaggi, è stata calcolata utilizzando le informazioni e i dati forniti da TERNA (il principale operatore di reti per la trasmissione dell'energia elettrica in Italia) e il CRPA.

Per il miglioramento di queste stime, sarebbero necessarie dati e informazioni relativi alla quantità di deiezioni animali avviate ai digestori, all'entità di biogas derivante dalle queste quantità e alle perdite di metano degli impianti.

Nel 2012, le emissioni di CH_4 sono pari a 144,7 Gg (tab. 3), che rappresentano il 19,9% del totale delle emissioni di CH_4 del settore agricoltura e l'8,4% delle emissioni nazionali di CH_4 escluso il settore LULUCF.

La riduzione delle emissioni negli anni, osservata in tabella 3, dipende, in particolare, dalla variazione della consistenza dei capi bovini e dalla quantità di biogas recuperato per la produzione di energia.

Gestione delle deiezioni (emissioni di protossido di azoto)

In questa sezione si considerano le emissioni di protossido di azoto prodotte durante lo stoccaggio e il trattamento dei reflui zootecnici, prima dello spandimento al suolo.

Le emissioni di protossido di azoto dipendono dal contenuto di azoto e di carbonio delle deiezioni, dalla durata dello stoccaggio e dal tipo di trattamento. Esse avvengono in seguito ai processi di nitrificazione e denitrificazione dell'azoto contenuto nelle deiezioni. La nitrificazione, che indica l'ossidazione di azoto ammoniacale in azoto nitrico, è un prerequisito necessario per la formazione di protossido di azoto dallo stoccaggio delle deiezioni e si verifica a condizione che vi sia una quantità sufficiente di ossigeno. Essa, infatti, non avviene in condizioni anaerobiche. I nitriti e i nitrati vengono trasformati in protossido di azoto e in diazoto (N_2) durante il processo naturale di denitrificazione, un processo anaerobico. In sintesi, la produzione e l'emissione di protossido di azoto dallo stoccaggio delle deiezioni richiede la presenza di nitriti e nitrati in ambiente anaerobico, preceduto da condizioni aerobiche, necessarie per la formazione di queste forme ossidate di azoto (IPCC, 2006).

In base alle linee guida dell'IPCC, per la stima delle emissioni sono stati considerati i seguenti parametri: la consistenza dei capi e i tassi di escrezione di azoto per tipologia animale, la frazione di escrezione annua per ciascuna categoria zootecnica e per sistema di gestione delle deiezioni, i fattori di emissione per ciascun sistema considerato. I sistemi di gestione più diffusi nel nostro Paese sono il sistema liquido¹², lo stoccaggio del solido¹³, l'essiccazione

¹² Le deiezioni vengono stoccate tal quali o con qualche minima aggiunta di acqua in vasche o in bacini di terra all'esterno del ricovero degli animali, di solito per periodi inferiori a un anno (IPCC, 2006).

¹³ Le deiezioni sono stoccate, tipicamente per un periodo di diversi mesi, in cataste o pile. Le deiezioni possono essere stoccate grazie alla presenza di una quantità sufficiente di lettiera o alla perdita di umidità per evaporazione (IPCC, 2006).

Sistemi di gestione delle deiezioni	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012	2012	2012/1990
	Gg						%		%
Sistema liquido	0.62	0.57	0.54	0.49	0.47	0.46	0.44	3.9%	-29.8%
Stoccaggio solido	12.07	11.49	11.34	10.29	10.12	10.02	10.02	88.4%	-17.0%
Altro (*)	-	0.10	0.56	1.00	1.01	1.04	0.88	7.8%	803.8% (**)
Totale	12.69	12.16	12.44	11.78	11.60	11.52	11.34	100%	-10.7%

Tab. 4 Emissioni di protossido di azoto da gestione delle deiezioni (Gg)

(*) Nella categoria 'Altro' sono incluse le emissioni derivanti dal sistema di essiccazione della pollina e dai digestori anaerobici. (**) Variazione tra l'anno 2012 e il 1995.

della pollina¹⁴ e i digestori anaerobici.

Nel 2012, le emissioni di N₂O sono pari a 11,3 Gg (tab. 4), che rappresentano il 17,4% del totale delle emissioni di N₂O del settore agricoltura e il 12,8% delle emissioni nazionali di N₂O escluso il settore LULUCF.

La riduzione delle emissioni negli anni, osservabile nella tabella 4, dipende principalmente dalla diminuzione dei capi bovini, che hanno tassi di escrezione di azoto più elevati rispetto alle altre categorie animali.

Per il miglioramento delle stime si potrebbero sviluppare una serie di attività, quali la definizione di fattori di emissione di protossido di azoto per ciascun sistema di gestione delle deiezioni, che riflettano l'effettiva durata dello stoccaggio, il tipo di trattamento (e pre-trattamento) dei reflui nei sistemi di stoccaggio e la frazione di azoto stoccato.

Suoli agricoli

In questa sezione consideriamo le emissioni di protossido di azoto dovute agli apporti netti di azoto ai suoli. Tali emissioni si verificano sia per via diretta (cioè, direttamente dai suoli sui quali l'azoto è aggiunto), sia attraverso due vie indirette: la prima, in seguito alla volatilizzazione di ammoniaca e ossidi di azoto dai suoli sui quali è stato apportato azoto e alla conseguente ri-deposizione di questi gas e dei loro prodotti ai suoli e nelle acque; la seconda, dopo il ruscellamento e la percolazione di azoto dai suoli.

Le emissioni dirette (come già detto in precedenza), includono le emissioni dovute all'impiego dei fertilizzanti azotati, allo spandimento dei reflui zootecnici e dei fanghi da depurazione, ai residui colturali, alle colture azotofissatrici, ai suoli organici e al pascolo.

¹⁴ Deiezioni avicole.

Emissioni di N ₂ O per sotto-categorie		1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012	2012	2012/1990
		Gg						%		%
Emissioni dirette di N ₂ O	Fertilizzanti sintetici	13.59	14.27	14.05	13.96	8.84	9.19	12.05	22.5%	-11.3%
	Spandimento reflui zootecnici	9.33	8.92	9.00	8.65	8.56	8.59	8.59	16.0%	-7.9%
	Coltivazioni azoto-fissatrici	5.00	3.75	3.72	3.47	3.34	3.29	2.74	5.1%	-45.2%
	Residui colturali	2.90	2.79	2.84	2.85	2.28	2.34	2.08	3.9%	-28.2%
	Suoli organici	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.6%	0.0%
	Spandimento fanghi da depurazione	0.08	0.13	0.17	0.14	0.16	0.17	0.20	0.4%	153.6%
	Totale emissioni dirette	31.20	30.17	30.10	29.39	23.48	23.89	25.97		-16.8%
Pascolo		5.60	6.44	6.60	4.90	4.98	5.00	4.60	8.6%	-17.9%
Emissioni indirette di N ₂ O	Deposizione atmosferica	5.99	5.69	5.50	5.10	4.71	4.75	5.09	9.5%	-15.0%
	Lisciviazione e ruscellamento dell'azoto	20.29	20.56	20.42	19.23	15.84	16.12	17.96	33.5%	-11.5%
	Totale emissioni indirette	26.28	26.25	25.92	24.33	20.55	20.86	23.06		-12.3%
Totale		63.09	62.86	62.62	58.61	49.01	49.75	53.63	100%	-15.0%

Tab. 5 *Emissioni di protossido di azoto dai suoli agricoli (Gg)*

La metodologia di stima utilizzata non tiene conto della diversa copertura del suolo, del tipo di suolo, delle condizioni climatiche e delle pratiche di gestione dei suoli. Inoltre, non si considera il “ritardo” con il quale si generano le emissioni dirette dovute all’azoto dei residui colturali e l’assegnazione di tali emissioni all’anno in cui effettivamente tali residui ritornano al suolo. Questi aspetti non sono considerati perché non ci sono dati disponibili per fornire opportuni fattori di emissione (IPCC, 2006).

Nel 2012, le emissioni di N₂O sono pari a 53,6 Gg (tab. 5), che rappresentano l’82,5% del totale di N₂O del settore agricoltura e il 60,4% delle emissioni nazionali di N₂O escluso il settore LULUCF.

La riduzione negli anni delle emissioni di protossido di azoto dai suoli agricoli (tab. 5) deriva principalmente dalla variazione dell’uso di fertilizzanti e dalla riduzione del numero di animali. Nel periodo 1990-2012 la quantità distribuita di fertilizzanti azotati e del relativo contenuto di azoto sono diminuiti del 22% e del 10% rispettivamente (anche se l’urea¹⁵ è aumentata del 19% contribuendo a un aumento delle emissioni di ammoniaca da fertilizzanti azotati dell’8%).

CAMBIAMENTI METODOLOGICI

La stima delle emissioni del settore agricoltura effettuata nel 2015, relativa alla serie storica 1990-2013, prevederà un cambiamento nella metodologia di stima che comporterà una riduzione complessiva delle emissioni del settore pari al 19% rispetto alla precedente metodologia.

Sulla base dell’applicazione delle linee guida del 2006 dell’IPCC sono state

¹⁵ È uno dei fertilizzanti sintetici azotati più utilizzato e con il fattore di emissione di ammoniaca più alto rispetto agli altri fertilizzanti.

effettuate le seguenti modifiche: è stato modificato il valore di *default* relativo al calcolo dell'energia netta per il mantenimento e il fattore di conversione in metano dell'energia assimilata delle bovine e delle bufale in lattazione (ciò comporterà un aumento delle emissioni di metano del 7%); sono stati aggiornati i fattori di emissione di metano derivante dalla gestione delle deiezioni (distinti per temperatura media annua) per le categorie di caprini, equini e avicoli (ciò implicherà una riduzione di metano del 5%); in base a nuove fonti riportate nelle linee guida, sono stati adeguati i fattori di emissione del protossido di azoto, prodotto durante lo stoccaggio dei reflui zootecnici (che produrrà una riduzione delle emissioni del 54%); nella categoria "suoli agricoli" sono stati considerati anche gli apporti di azoto di altro materiale organico applicato al suolo (quale, gli scarti vegetali e animali, il compost, il materiale da lettiera), della biomassa ipogea dei residui colturali (incluse le foraggere permanenti), è stato rimosso il contributo di azoto proveniente dalle colture azoto fissatrici e sono stati modificati i fattori di emissione del protossido di azoto delle emissioni dirette e indirette (queste modifiche determineranno una riduzione delle emissioni del 33%); per la categoria combustione dei residui agricoli, è stato aggiornato il fattore di combustione degli scarti della produzione del riso (che porterà una diminuzione del metano del 4% e del protossido di azoto del 5%); infine, sono state incorporate nel settore agricoltura le stime di emissione dell'anidride carbonica prodotte dall'applicazione al suolo di calce per ridurre l'acidità del suolo e migliorare la crescita delle piante¹⁶.

Con l'applicazione delle linee guida 2006 dell'IPCC, le emissioni di metano aumenteranno in media annualmente del 4%, mentre le emissioni di protossido di azoto diminuiranno del 36%. Considerando i dati del 2012, le emissioni di metano saranno pari al 59%, quelle di protossido di azoto al 39%¹⁷. La categoria che fornirà un contributo maggiore in termini di emissioni (esprese in CO₂ equivalente) sarà la fermentazione enterica (43%), seguita dai suoli agricoli (32%).

Complessivamente, le emissioni totali di gas serra del settore agricoltura scenderanno in media all'anno del 19%, ma considerando le emissioni di anidride carbonica, dovute all'applicazione ai suoli di calce e urea, e l'applicazione dei nuovi GWP¹⁸, la riduzione sarà pari all'11%.

¹⁶ In base alla metodologia dell'IPCC, precedente le linee guida del 2006, tali emissioni erano riportate nel settore LULUCF.

¹⁷ Il restante 2% è da attribuire alle emissioni di anidride carbonica, prima non conteggiate nel settore agricoltura.

¹⁸ Il GWP, *global warming potential* (in italiano, il potenziale di riscaldamento globale), confronta il forcing radiativo di una tonnellata di gas serra per un determinato periodo di tempo (ad

CONCLUSIONI

La preparazione dell'inventario delle emissioni è un lavoro complesso, che coinvolge competenze in differenti campi e che necessita della raccolta di dati di attività per una completa serie storica. Le autorità pubbliche e gli istituti di ricerca sono necessariamente coinvolte nel Sistema nazionale per la realizzazione dell'inventario al fine di preparare un inventario nazionale di buona qualità e nei tempi previsti. La preparazione dell'inventario nazionale delle emissioni e degli assorbimenti dei gas serra e la gestione del Sistema nazionale per la realizzazione dell'inventario nazionale dei gas serra permettono all'Italia di avere i requisiti di eleggibilità al Protocollo di Kyoto. L'inventario nazionale delle emissioni è uno strumento necessario per la pianificazione di misure di mitigazione dei cambiamenti climatici da inserire nelle strategie di sviluppo rurale, per l'elaborazione di scenari emissivi a livello nazionale e regionale, per l'analisi degli impatti sulla qualità dell'aria e dei costi delle misure di abbattimento e mitigazione, per il monitoraggio e la valutazione delle misure di mitigazione, incluse nei piani di sviluppo rurale, e per la verifica degli obiettivi relativi ai cambiamenti climatici nell'ambito dello sviluppo rurale.

RIASSUNTO

L'inventario nazionale delle emissioni di gas serra, realizzato ogni anno dall'ISPRA, è uno strumento fondamentale per la verifica del rispetto dei limiti di emissione nazionali e degli impegni di riduzione intrapresi nei diversi contesti internazionali (Convenzione quadro sui cambiamenti climatici e Protocollo di Kyoto, Convenzione di Ginevra sull'inquinamento atmosferico transfrontaliero, Direttive europee sulla limitazione delle emissioni) e per la pianificazione e l'attuazione delle politiche ambientali da parte delle istituzioni centrali e periferiche. Secondo quanto richiesto dall'IPCC, per le categorie emissive più importanti deve essere utilizzata una metodologia di stima più raffinata che richiede informazioni più dettagliate. Per quanto riguarda il settore agricoltura, per migliorare ulteriormente le stime occorrerebbero, in particolare, dati e informazioni sulle diete degli animali (vacche da latte e bufale), sui fattori di emissione relativi ai sistemi di gestione delle deiezioni zootecniche, che riflettano l'effettiva durata dello stoccaggio e il tipo di trattamento dei reflui, sulle quantità di deiezioni avviate ai digestori e sulla quantità di biogas recuperate. Tale fabbisogno informativo potrebbe essere colmato sfruttando le competenze e le conoscenze dei centri di ricerca e delle università, che già in passato hanno fornito importanti contributi.

esempio, 100 anni) per una tonnellata di CO₂. Il GWP del metano è pari a 25 (prima era 21), del protossido di azoto è 298 (prima era 310).

ABSTRACT

The national greenhouse gas emissions inventory, compiled and communicated annually by ISPRA, is a fundamental tool for the verification of compliance with the national emission ceilings and reduction commitments undertaken in different international contexts (United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol, United Nations Economic Commission for Europe Convention on Long Range Transboundary Air Pollution, the European Directives on the limitation of emissions) and the planning and implementation of environmental policies by the central and local institutions. As required by the IPCC, for the most important categories in terms of emissions, a more refined estimation methodology that requires more detailed information should be used. As for the agriculture sector, to further improve the estimates would be needed, in particular, data and information on the diets of the animals (dairy cows and buffaloes), on the emission factors related to manure management systems, which reflect the actual duration of storage and type of waste treatment, on the amount of manure started to digesters and on the amount of biogas recovered. These information need could be filled by exploiting the skills and knowledge of the research centers and universities, who in the past have made important contributions.

BIBLIOGRAFIA

- EMEP/EEA (2013): *Air pollutant emission inventory guidebook 2013*, EEA Technical report n. 12/2013. URL: <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013>
- IPCC (1997): *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Emission Inventories*, Three volumes: Reference Manual, Reporting Manual, Reporting Guidelines and Workbook, IPCC/OECD/IEA IPCC WG1 Technical Support Unit, Hadley Centre, Meteorological Centre, Meteorological Office, Bracknell, UK.
- IPCC (2000): *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*, IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, Technical Support Unit, Hayama, Kanagawa, Japan.
- IPCC (2003): *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*, IPCC Technical Support Unit, Kanagawa, Japan.
- IPCC (2006): *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds), published: IGES, Japan. URL Vol. 4 - Agriculture, Forestry and Other Land Use: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
- IPCC (2014): *2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol*, Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T.G. (eds), published: IPCC, Switzerland. URL: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/kpsg/index.html>
- ISPRA (2008): *Agricoltura: inventario nazionale delle emissioni e disaggregazione provinciale*, Rapporto tecnico 85/2008, ISPRA, Roma. URL: <http://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/agricoltura-inventario-nazionale-delle-emissioni-e>

- ISPRA (2009): *La disaggregazione a livello provinciale dell'inventario nazionale delle emissioni. Anni 1990-1995-2000-2005*, Rapporto tecnico 92/2009, ISPRA, Roma. URL: <http://www.sinanet.isprambiente.it/it/siaispra/inventaria/disaggregazione-dellinventario-nazionale-2005/la-disaggregazione-a-livello-provinciale-dell2019inventario-nazionale-delle-emissioni-anni-1990-1995-2000-2005/view>
- ISPRA (2011): *Agricoltura: emissioni nazionali in atmosfera dal 1990 al 2009*, Rapporto tecnico 140/2011, ISPRA, Roma. URL: <http://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/agricoltura-emissioni-nazionali-in-atmosfera-dal>
- ISPRA (2014): *Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2012. National Inventory Report 2014*, Rapporto tecnico 198/2014, ISPRA, Roma. URL: <http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/serie-storiche-emissioni/national-inventory-report-2012/view>
- ISPRA (2015a): *Database della disaggregazione a livello provinciale dell'Inventario nazionale delle emissioni: 1990-1995-2000-2005-2010*, ISPRA. URL: <http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/inventaria/disaggregazione-dellinventario-nazionale-2010/>
- ISPRA (2015b): *Italian Emission Inventory 1990-2013. Informative Inventory Report 2015*, Rapporto tecnico 223/2015, ISPRA, Roma. URL: <http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/serie-storiche-emissioni/informative-inventory-report-2012/view>

PIER PAOLO ROGGERO*, GIOVANNI ARGENTI**, MARCO BINDI**,
CAMILLA DIBARI**, LAURA MULA*, ANTONIO PULINA*, GIOVANNA SEDDAIU*

Stato e prospettive della ricerca italiana per la produzione di alimenti zootecnici in un contesto di cambiamenti climatici

INTRODUZIONE

La produzione di alimenti zootecnici in Italia contribuisce solo in parte al fabbisogno degli animali di allevamento e riguarda prevalentemente la componente amidacea (granella di mais prodotta quasi esclusivamente in pianura Padana) e fibrosa (insilati di mais o altri cereali e fieni di prati o erbai) delle razioni per allevamenti stabulati e l'erba e il fieno prodotti da pascoli e prati-pascoli per gli allevamenti bradi e semi-bradi. La componente proteica della razione è soprattutto di importazione e riguarda prevalentemente le farine di estrazione di colture erbacee oleaginose come soia, colza o girasole.

Questo lavoro fa riferimento prevalentemente ai sistemi foraggeri destinati ai ruminanti, distinguendo nettamente tra sistemi foraggeri basati in larga misura sul pascolo e sistemi intensivi destinati ad allevamenti stabulati (es. bovini da latte e centri di ingrasso per i bovini da carne), la cui alimentazione è basata su alimenti conservati di varia provenienza.

Entrambe le tipologie di sistema foraggero sono andate incontro a importanti dinamiche negli ultimi decenni, associate ai cambiamenti di natura sociale ed economica che con diversa intensità hanno interessato i diversi contesti nazionali (Roggero et al., 2010). L'analisi proposta si concentra sui possibili impatti del cambiamento climatico su diverse tipologie di sistemi foraggeri in diversi contesti italiani, sullo sfondo delle dinamiche in corso di altra natura, brevemente descritte in questo paragrafo.

* *Dipartimento di Agraria e Nucleo di Ricerca sulla Desertificazione, Università degli Studi di Sassari*

** *Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agroalimentari e dell'Ambiente, Università degli Studi di Firenze*

Rispetto a qualche decennio fa, si è notevolmente ristretta la gamma di colture destinata alla produzione di alimenti zootecnici, oggi basata su poche colture erbacee: principalmente mais da granella o insilato, prati avvicendati di erba medica, erbai di cereali autunno vernini (principalmente orzo, avena o triticale). Le produzioni nazionali di leguminose da granella sono da molti anni insufficienti a far fronte alla domanda di proteine vegetali degli allevamenti. Per quanto riguarda i pascoli, è nota la elevata variabilità delle rese in relazione all'andamento meteorologico e delle tecniche di gestione e miglioramento agronomico.

La sostenibilità di un sistema di alimentazione zootecnica dipende in larga misura dalla disponibilità e varietà di risorse locali (Roggero et al., 1996). La sempre minore diversificazione delle fonti di alimenti, rende vulnerabile e incerto il futuro dell'autoapprovvigionamento di alimenti zootecnici nel nostro paese. Ciò pone nuove domande di ricerca scientifica orientate alla individuazione di risposte adattative efficaci e sostenibili nei diversi contesti in cui si sviluppa la produzione zootecnica dei ruminanti.

SISTEMI FORAGGERI INTENSIVI

La foraggicoltura intensiva irrigua caratterizza gli agroecosistemi dei maggiori distretti zootecnici italiani. Rispetto alla superficie interessata alla produzione di foraggi, la foraggicoltura intensiva irrigua interessa aree relativamente limitate, come emerge dal 6° Censimento Generale dell'Agricoltura (ISTAT, 2010), che evidenzia la vastità e l'eterogeneità per intensità di utilizzazione e scelte colturali delle aree destinate alla produzione di foraggi in Italia. Ai sistemi foraggeri intensivi sono destinate le zone che per caratteristiche pedoclimatiche presentano i più alti potenziali produttivi, all'interno di aree nelle quali l'attività zootecnica principale è spesso l'allevamento intensivo di razze bovine ad alta produttività. Le tipologie di animali allevati nell'ambito della zootecnia intensiva, per poter al meglio esplicitare il proprio potenziale produttivo (principalmente latte e carne), necessitano di una grande quantità di input energetici ed elevata qualità degli alimenti. L'evoluzione della zootecnia verso allevamenti specializzati ad alto grado di intensificazione ha portato allo sviluppo di sistemi foraggeri ad alta produttività per unità di superficie e capaci di fornire prodotti di alta qualità per massimizzare l'efficienza di conversione degli animali in produzione (Peeters, 2009).

Negli ultimi decenni le tipologie di coltivazione dei sistemi foraggeri intensivi si sono evolute da prati-pascoli a erbai avvicendati ed è aumentato

il ricorso a tecnologie di utilizzazione e trasformazione del foraggio basate sempre più sull'insilamento in parziale sostituzione della fienagione (Khan et al., 2015). In questi sistemi foraggeri, la tendenza a diminuire la produzione di fieno, fonte di fibra indispensabile ai ruminanti e il ricorso ad alimenti concentrati, ha creato una crescente dipendenza degli allevamenti da fonti alimentari di importazione ad alto contenuto energetico e proteico, principalmente farine di soia e granella di mais.

In Italia, le superfici destinate a foraggiare avvicendate sono di circa 1.900.000 ha, uniformemente distribuite nel territorio nazionale occupato da seminativi. Nell'ambito della foraggicoltura intensiva il mais è certamente la coltura più importante in termini di produzioni e di rilevanza economica. Secondo FAOSTAT la superficie investita a mais in Italia nel 2014 è stata di circa 860.000 ha. Il rapporto dell'INEA sul comparto maidicolo italiano (Macrì e Zilli, 2014) evidenzia nell'arco temporale dal 2006 al 2014 un andamento alternante delle superfici investite, con una tendenza alla riduzione. Le rese unitarie medie nel 2014 sono state di circa 10 Mg ha⁻¹ di granella, con una media degli otto anni precedenti di circa 8 Mg ha⁻¹ e minimi nel 2007 e nel 2012 di circa 4,0 e 5,5 Mg ha⁻¹ rispettivamente. La produzione totale nel 2014 è stata di circa 8.000.000 Mg. In termini di SAU, circa l'84% della superficie coltivata a mais si trova in Veneto (29%), Lombardia (26%), Piemonte (18%) ed Emilia-Romagna (11%). La distribuzione delle superfici, che comprende mais destinato a granella, insilato o per la produzione di bioenergie, riflette i dati sulla distribuzione geografica dei distretti zootecnici intensivi italiani. Nonostante la produzione annuale degli ultimi anni evidenzi un buon livello complessivo di produttività della coltura, il prodotto non è sufficiente a soddisfare il fabbisogno interno e si evidenzia un trend crescente di importazione di mais dall'estero, che nel 2014 ha raggiunto 4.000.000 Mg, otto volte di più rispetto ai 500.000 Mg nel 2000.

Gli avvicendamenti colturali basati sul mais variano nei diversi contesti colturali italiani. Il doppio ciclo colturale con mais in secondo raccolto dopo *lojessa* (*Lolium multiflorum* Lam.) per la produzione di fieno o insilato d'erba o cereali autunno vernini (es. orzo, tritiale) per la produzione di insilato, è comune in tutti i distretti maidicoli, dal Nord Italia (Grignani et al., 2007; Perego et al., 2012) all'Oristanese (Demurtas et al., 2016). In altre situazioni si riscontra mais in rotazione con frumento, barbabietola e erba medica (Morari et al., 2006). Le rese unitarie particolarmente elevate che si osservano nei tipici avvicendamenti colturali basati sul mais sono da attribuire, oltre agli alti livelli di fertilità dei suoli e dalle condizioni climatiche favorevoli, all'impiego di ibridi e varietà di alta potenzialità produttiva

e di tecniche agronomiche avanzate, che prevedono in genere elevate dosi di fertilizzante azotato in forma organica e minerale. Nei distretti maidicoli più importanti si sono generate piccole economie di scala che hanno contribuito ad aumentare il potere contrattuale degli imprenditori agricoli nell'acquisto di mezzi tecnici e favorito l'avanzamento tecnologico (Giardini e Vecchietini, 2002).

I fattori di incertezza che minano la sostenibilità futura di questi sistemi foraggeri, anche in relazione alla capacità di far fronte alla domanda di foraggi e mangimi delle aziende zootecniche, sono diversi: eccesso di micotossine nei foraggi e nei mangimi prodotti in Italia (Maiorano et al., 2009), inquinamento delle falde da nitrati e da residui di prodotti chimici (Demurtas et al., 2016; Giola et al., 2012; Pinna et al., 2014), emissioni di gas climalteranti (Lehtinen et al., 2014; Subedi et al., 2016). Quelli elencati sono solo alcuni dei problemi su cui si stanno concentrando gli sforzi della ricerca per superarli senza aggravare di costo per le aziende. Queste realtà sono infatti caratterizzate da una limitata capacità di adattamento per gli ingenti investimenti in capitali fissi da remunerare, che incidono pesantemente sui costi di produzione. A ciò si aggiunge la scarsa competitività delle produzioni di alimenti zootecnici nazionali rispetto al mercato mondiale, dove è determinante il peso dei grandi paesi da cui proviene gran parte del mais e della soia biotech (Stati Uniti, Argentina, Brasile, Francia, Romania). Ciò si traduce in un equilibrio assai precario delle aziende zootecniche italiane, che contribuisce ad aumentare la vulnerabilità dell'intero sistema agricolo nazionale (Bartolini et al., 2007).

Negli ultimi anni, il crescente interesse scientifico sulle emissioni di gas serra (GHG, *Greenhouse Gases*) (Smith et al., 2008), ha portato a un notevole incremento della produzione scientifica orientata a quantificare l'impatto delle pratiche agricole sull'emissione di CO_2 , N_2O e CH_4 in atmosfera. L'incertezza legata all'evoluzione climatica aumenta la vulnerabilità dei sistemi agricoli caratterizzati da scarsa diversificazione e dipendenti dal mercato globale delle principali *commodities* (Porter et al., 2014). I sistemi zootecnici sono considerati fra i più impattanti: si stima che circa il 10% delle emissioni di GHG nell'EU27 provenga dal settore dell'allevamento (Lesschen et al., 2011). Il dibattito scientifico è aperto: il V rapporto di valutazione dell'IPCC (2014) mette in evidenza come i fattori che condizionano le emissioni di GHG, fra i quali il numero di animali allevati, l'utilizzo di fertilizzanti e le superfici irrigue, siano in costante aumento come conseguenza dell'aumento della domanda mondiale di prodotti alimentari. Questo comporterà un impatto significativo sulle emissioni di GHG da

questi sistemi (Blanco et al., 2014). In quest'ottica la comunità scientifica è spinta a individuare azioni strategiche per la mitigazione, attraverso l'individuazione di pratiche agricole meno impattanti, e opzioni sostenibili per l'adattamento agli scenari climatici futuri (Bennetzen et al., 2016; Silva et al., 2016). Queste recentissime ricerche dimostrano che l'incremento di produzione e produttività dei sistemi foraggero-zootecnici a scala mondiale sono già da alcuni anni disaccoppiate dalle emissioni di GHG associate alla produzione di mangimi ($1.88 \text{ Pg CO}_2\text{-eq anno}^{-1}$ nel 2007, pari al 16% delle emissioni in agricoltura), con un lieve calo se rapportato all'incremento di produttività. Tuttavia è proprio questa fonte alimentare che contribuisce alla maggiore impronta di carbonio delle produzioni animali in confronto al cibo di origine vegetale. L'aumento della produzione di mangimi, se rapportato al numero di animali allevati a scala globale, si è ridotto del 27% (Bennetzen et al., 2016). A questo trend è associata una riduzione delle emissioni per unità di mangime prodotto e un aumento dell'efficienza nell'alimentazione di suini e avicoli (Herrero et al., 2010) che ha comportato complessivamente una riduzione delle emissioni per unità di prodotto zootecnico nonostante la crescente dipendenza degli allevamenti da alimenti concentrati rispetto a quelli allevati al pascolo.

SISTEMI FORAGGERI ESTENSIVI

Sistemi foraggeri montani

I sistemi foraggeri estensivi si contraddistinguono per la loro capacità di svolgere molteplici funzioni, specialmente in ambito montano. Oltre a quella produttiva, che nel passato ha rappresentato l'aspetto predominante, è nel tempo maturata la consapevolezza del ruolo dei pascoli rispetto alla salvaguardia della biodiversità vegetale e animale, alla protezione dei versanti dall'erosione e dagli incendi, all'esaltazione del valore estetico del paesaggio, alla fruibilità turistica del territorio, alla conservazione di un'identità storico-culturale delle comunità locali e non ultimo alla mitigazione dei cambiamenti del clima (Carlier et al., 2009). L'espletamento di queste molteplici funzioni, o quantomeno il mantenimento dell'efficienza ecologica di molte di queste, è condizionata sia dalle modalità di utilizzazione dei pascoli da parte dell'uomo, ma anche, soprattutto in ambienti montani, dalle condizioni pedo-topo-climatiche in cui si trovano (Argenti et al., 2002; Gusmeroli, 2004; Dibari et al., 2016; 2015).

I sistemi pastorali alpini

La combinazione di variegata condizioni ambientali e topografiche insieme ad azioni di pascolamento continue e ripetute per millenni, ha portato nelle Alpi la differenziazione di un'ampissima serie di vegetazioni prato-pascolive (Cavallero et al., 2005a, 2005b). Alle quote inferiori dominano i pascoli secondari o spontanei (formati sia da specie erbacee, suffrutescenti, fruticose e arbustive) inframezzati da boschi che sono il risultato di un iniziale disboscamento della originaria cenosi arborea, cui ha fatto seguito un continuo intervento di contenimento della avanzata del bosco stesso (Ziliotto et al., 2004). Alle quote maggiori delle Alpi (sopra i 2000 metri di altitudine, in zone dove si trovano i tradizionali alpeggi e oltre il limite della vegetazione arborea), predominano invece i caratteristici pascoli naturali alpini, non sfalcati ma utilizzati direttamente dagli animali due o tre mesi l'anno durante il periodo estivo. Questi sono quasi sempre formati esclusivamente da specie erbacee, ma in qualche caso sono presenti specie legnose, anche in relazione alla pressione del pascolamento.

Caratteristiche comuni della flora dei pascoli alpini sono la dominanza di specie perenni, specie aventi fasi riproduttive molto rapide, caratterizzate da un portamento basso e raccolto con un apparato radicale molto sviluppato. Ciò è dovuto principalmente alla presenza di temperature piuttosto rigide e precipitazioni abbondanti anche durante l'estate (Ziliotto et al., 1992). La gamma delle tipologie pastorali in zone a elevate altitudini si amplia notevolmente in relazione alla crescente influenza che esercitano le condizioni ambientali come esposizione, pendenza o fattori climatici (Cavallero et al., 2002).

Numerosi studi confermano che gli ecosistemi alpini, sebbene costituiti da specie più adattabili e capaci di colonizzare abbastanza rapidamente le aree pre-glaciali (Cannone et al., 2007; 2008), sono soggetti a forti stress ecologici in quanto i fattori abiotici (in particolare, il clima) prevalgono nettamente su quelli biotici (Smiraglia et al., 2009; Dibari et al., 2016). Ciò desta particolare preoccupazione sulle Alpi in quanto nell'ultimo secolo è stato osservato un progressivo aumento delle temperature circa due volte superiore rispetto a quello medio globale (Beniston et al., 2003). Inoltre nelle ultime decadi, è stata registrata una rilevante diminuzione delle precipitazioni nivali con conseguente contrazione della copertura nevosa su tutta l'area alpina (Bocchiola e Diolaiuti, 2009; Bocchiola e Groppelli, 2010). Pertanto i cambiamenti del clima osservati sulle Alpi comportano gravi conseguenze sulla distribuzione e sviluppo delle specie vegetali soprattutto nelle zone di alta quota (Theurillat

e Guisan, 2001; Keller et al., 2005; Gottfried et al., 2012). Ciò è confermato in letteratura: Pauli et al. (2007), ad esempio, sostengono che gli ecosistemi montani, specialmente quelli alpini, stanno subendo un forte impoverimento nella loro struttura, pertanto la composizione specifica degli ecosistemi andrà incontro, nel prossimo futuro, a profondi e radicali cambiamenti dovuti ai cambiamenti del clima. Evidenze sulle variazioni nella distribuzione delle specie alpine sono riportate anche da Walther et al. (2005), che rileva, negli ultimi 100 anni, spostamenti altitudinali della vegetazione a ritmi in forte aumento. Questo è confermato anche da studi condotti da Trivedi et al. (2008a) che, utilizzando modelli a elevata risoluzione, prevedono un sostanziale turnover delle specie nelle comunità alpine anche in ambito di scenari climatici meno pessimisti.

Va infine sottolineato che la ricca biodiversità e l'elevata concentrazione di endemismi nella maggior parte delle cenosi alpine risultano comunque particolarmente vulnerabili ai cambiamenti del clima, in quanto le specie sono fisicamente ostacolate a colonizzare aree poste a maggiori altitudini per la presenza, oltre un certo limite, di masse rocciose (Campbell et al., 2009; Petriccione, 2009; Gottfried et al., 2012).

I sistemi pastorali Appenninici

Numerose aree dell'Appennino, non occupate da boschi e foreste o da colture agricole, sono dominate da sistemi foraggeri estensivi che occupano soprattutto le aree montane su altopiani e radure sopra il limite della vegetazione arborea ma spesso popolano anche aree collinari. In Appennino l'utilizzazione del pascolo è andata via via diminuendo negli ultimi decenni, e tale fenomeno è stato favorito principalmente da una carente rete infrastrutturale che li colleghi con le zone di pianura ma anche dalle negative caratteristiche morfologiche delle zone montane appenniniche (pendenze, dislivelli, inaccessibilità, ecc.).

La diversità floristica dei sistemi foraggeri appenninici è rilevante: sono state infatti registrate più di 2000 specie vegetali tra cui diverse specie rare e 44 tipologie di habitat diversi (Sundseth, 2010) menzionati anche nella direttiva 92/43/CEE relativa alla conservazione degli habitat naturali e seminaturali.

I sistemi foraggeri appenninici, essendo influenzati negativamente da alcuni fattori climatici (alte temperature e scarsa piovosità estiva, forte ventosità, copertura nevosa incostante o assente), sono spesso di qualità

foraggera inferiore rispetto a quelli alpini: prevalgono infatti le specie annuali su quelle perenni mentre la composizione floristica è molto variabile durante l'avvicendamento stagionale e negli anni e anche la produzione foraggera risulta aleatoria nel tempo e concentrata soprattutto in primavera (fig. 1) (Talamucci, 1992; Targetti et al., 2013). Il valore pastorale dei sistemi foraggeri è variabile lungo la catena appenninica: è in genere piuttosto basso nei terreni silicei (prevalenti in appennino settentrionale), rispetto a quelli calcarei o a quelli argillosi (situati in genere nelle zone appenniniche centro-meridionali). Nelle zone settentrionali sono presenti specie foraggere di interesse produttivo, spesso minacciate però, a seguito di fenomeni di abbandono, da specie invasive come ginestre, felci e rovi. Nelle zone meridionali appenniniche sono invece prevalenti specie più xerofile, caratterizzate da organi vegetali coriacei, ricchi di fibre ma poveri in proteine, e talvolta provviste di spine e quindi poco appetibili dal bestiame. Molte specie di interesse pabulare vengono da queste sopraffatte e rimangono allo stato latente permettendo l'uso del pascolo solo in maniera discontinua.

Da un punto di vista climatico la catena appenninica è da considerarsi alquanto varia e del tutto particolare (Metzger et al., 2005) a causa della notevole estensione latitudinale, della presenza del mare a est e ovest e della marcata eterogeneità morfologica e orografica. Le differenze maggiori si riscontrano tra il versante tirrenico e adriatico, oltre che tra Appennino settentrionale e meridionale.

Anche le zone montane dell'Appennino sono soggette ai cambiamenti climatici: secondo Stanisci et al., (2005a, 2005b), il cui studio mira a valutare gli effetti del riscaldamento atmosferico sull'estensione del piano bioclimatico alpino sulla Majella, emerge che l'aumento di un solo grado della temperatura atmosferica ne comporterebbe, tra circa 12 anni, una riduzione dell'estensione di circa il 75%. Ciò comporterebbe quindi gravi ripercussioni sulla flora d'alta quota, e in particolare nei confronti delle specie endemiche tipiche delle vette dell'Appennino centrale. Inoltre lo studio di Petriccione (2005), sulla base di osservazioni effettuate in Appennino centrale tra i 1000 e i 2300 metri d'altitudine, riporta una tendenza all'adattamento degli ecosistemi di alta quota in seguito all'aumento dell'aridità, consistente in notevoli variazioni nella composizione e abbondanza di specie di comunità vegetali tipiche delle zone montane. Tale cambiamento risulta essersi verificato nelle cenosi poste al di sopra del limite naturale della vegetazione arborea, in correlazione a un incremento delle specie xerofitiche e stress tolleranti.

Sistemi foraggeri mediterranei

Le aree costiere della Toscana e del Lazio, le aree più a sud dell'Abruzzo e tutte le Regioni meridionali e insulari appartengono alla regione biogeografica mediterranea (fig. 2), caratterizzata da una concentrazione delle precipitazioni in autunno-inverno e siccità per un periodo da 2 a 6 mesi che condizionano la durata della stasi produttiva dei pascoli tra fine primavera e autunno. I sistemi pastorali estensivi di queste aree occupano oltre 25.000 km² e sono principalmente associati alla produzione di latte ovino e di carne bovina e in secondo ordine di carne ovina (Caballero et al., 2009).

Questi sistemi di allevamento sono basati oltre che sul pascolamento di pascoli permanenti e temporanei, anche sull'impiego, sebbene solitamente secondario, di altre risorse alimentari quali arbusti, alberi, stoppie di cereali, fieni e mangimi che vengono consumati nei periodi di scarsità di risorse pascolive, primariamente in estate e autunno.

Tre principali sistemi foraggeri possono essere individuati, a crescente livello di intensificazione (Porqueddu, 2014; Santilocchi e D'Ottavio, 2005): (i) *sistemi silvo-pastorali* in cui gli animali pascolano tutto l'anno utilizzando specie erbacee, arbustive e arboree, spesso in aree demaniali; (ii) *sistemi agro-pastorali* basati su pascoli naturali e migliorati ma anche su erbai di cereali o miscugli di specie foraggiere a ciclo autunno-vernino; (iii) *sistemi cerealicolo-zootecnici* in cui gli animali consumano foraggi di origine aziendale ed extra-aziendale e pascolano solo sui residui colturali delle colture cerealicole e sui pascoli permanenti e/o temporanei nelle aree più marginali delle aziende.

In passato, i sistemi foraggeri più estensivi basati esclusivamente o quasi sul pascolo erano maggiormente rappresentati ed erano associati alla transumanza, soprattutto di greggi di ovini, anche su lunghe distanze (>200 km). Attualmente, nelle aree mediterranee dell'Italia centrale e meridionale e nelle isole, la profonda trasformazione del contesto socio-economico ha determinato una marcata diminuzione della mobilità delle greggi e delle mandrie. La transumanza verticale su brevi distanze è ad esempio ancora praticata in alcune aree della Puglia (es. Gargano) in cui vengono allevati ovini da latte di razza autoctona e bovini di razza Podolica da cui si ottengono prodotti tipici come il caciocavallo podolico.

I sistemi cerealicolo-zootecnici hanno anch'essi subito una sensibile riduzione nell'Italia mediterranea, soprattutto in aree svantaggiate, come conseguenza della generale contrazione delle superfici destinate a cereali autunno-vernini e *in primis* a frumento duro (Roggero et al., 2010). Un caso emblematico è quello della Sardegna dove in dieci anni la superficie destinata

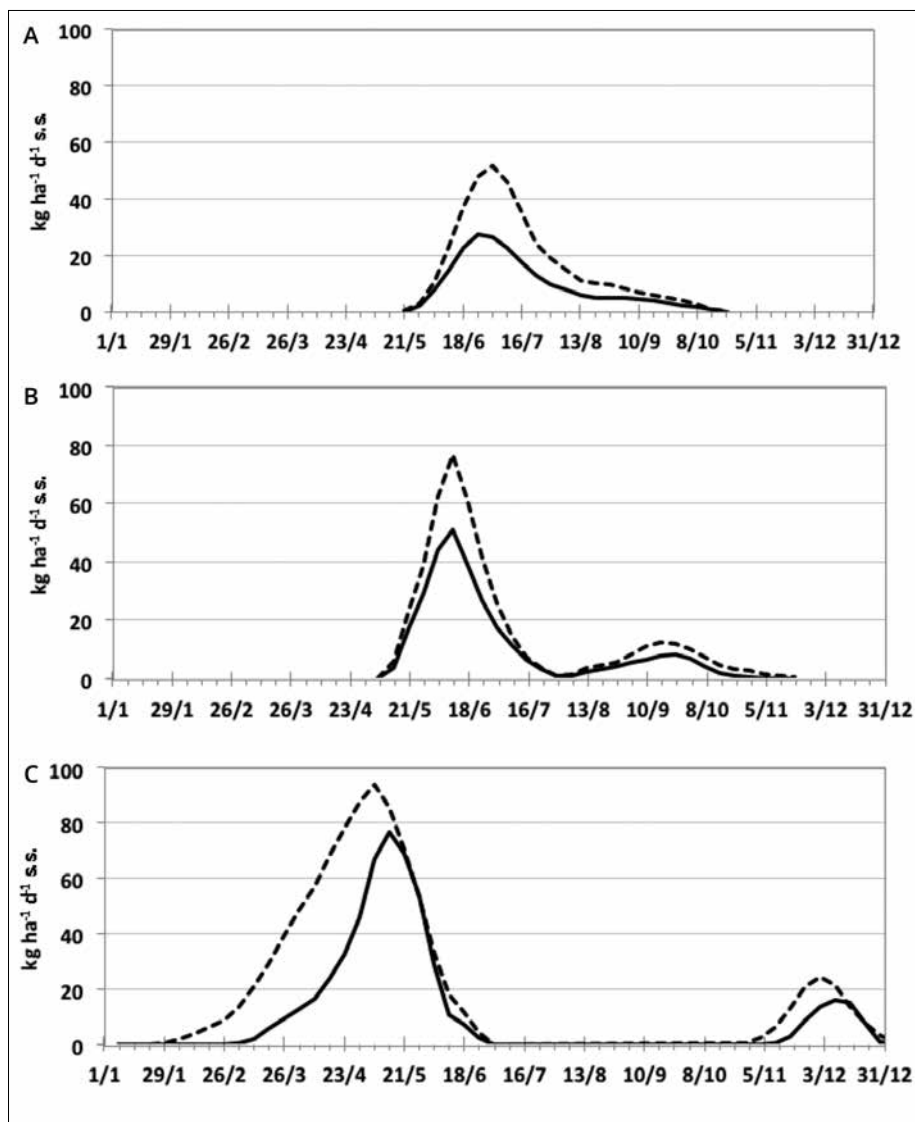


Fig. 1 Tassi di accrescimento giornalieri medi di pascoli italiani (rielaborato da Sarno et al., 1989). Linee intere: controllo non concimato; tratteggiate: N e P non limitanti. I principali fattori limitanti il tasso di crescita nei pascoli alpini (A) sono le basse temperature e la fisiologia delle specie erbacee perenni; in quelli appenninici (B) le basse temperature invernali e la siccità estiva; nei pascoli mediterranei (C), costituiti in prevalenza da specie annuali, la data della prima precipitazione utile dopo la siccità estiva, che condiziona l'epoca di germinazione di nuove plantule da seme e, in funzione della quota, le basse temperature autunno-invernali e le precipitazioni primaverili. In tutti i casi considerati, la disponibilità di nutrienti è sempre fortemente limitante

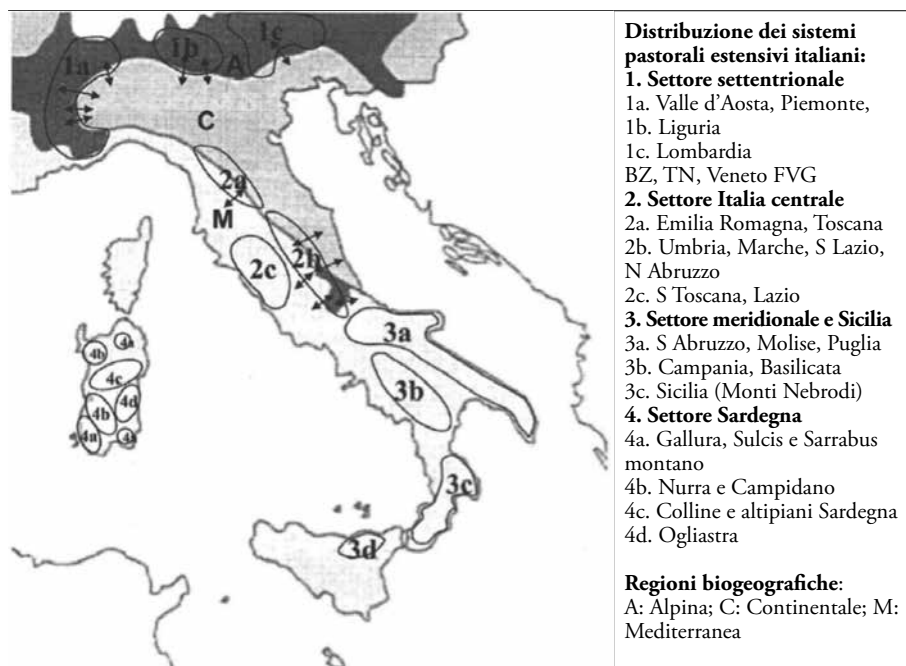


Fig. 2 Distribuzione dei sistemi pastorali estensivi italiani (LSGS) nelle regioni biogeografiche della penisola e delle isole italiane. Fonte: Caballero et al., 2009

a cereali (principalmente frumento duro) si è più che dimezzata (-60% dal 2000 al 2011, Fonte Istat), in parte a vantaggio di usi del suolo ora classificati come pascolo (+15% dal 2000 al 2011), ma che di fatto sono in gran parte seminativi abbandonati.

La diversità floristica dei sistemi pastorali mediterranei è particolarmente elevata con una netta dominanza di specie annuali autoriseminanti (Aronson et al., 1993; Porqueddu et al., 2016; Bagella et al., 2013; Bagella et al., 2016). Queste specie si sono adattate alle condizioni climatiche mediterranee e all'impatto antropico, ovvero alle millenarie pratiche pastorali, attraverso una serie di meccanismi eco-fisiologici e morfologici che includono la dormienza del seme e la presenza di strutture negli organi riproduttivi che favoriscono la dispersione e diffusione attraverso gli animali al pascolo o l'interramento nel suolo (Norman et al., 2005). La dinamica di produzione di questi pascoli è tipicamente caratterizzata da un picco produttivo in primavera in cui si possono superare 100 kg ha⁻¹ d⁻¹ di sostanza secca e da un altro picco secondario in autunno che in genere non supera i 40 kg ha⁻¹ d⁻¹, che può anche azzerarsi in caso di scarsità di precipitazioni nei primi mesi autunnali (fig. 1) (Snaydon, 1981).

Condizioni termiche miti durante l'inverno, in particolare nelle aree a più bassa quota, permettono di ottenere produzioni foraggiere sufficienti ad assicurare il pascolamento tutto l'anno. La scarsità di precipitazioni e gli elevati livelli di radiazione solare in primavera-estate hanno selezionato specie che sfuggono la siccità tardo primaverile ed estiva attraverso la produzione di semi dormienti capaci di germinare solo dopo le piogge che si verificano in periodi concomitanti all'abbassamento delle temperature, in autunno-inverno. Eventi piovosi autunnali seguiti da periodi di assenza di precipitazioni possono determinare il fenomeno delle "false partenze" (Chapman e Asseng, 2001) che causano il disseccamento delle plantule e, quindi, modifiche nella composizione floristica dei pascoli. L'elevata variabilità interannuale delle precipitazioni e della loro distribuzione è responsabile della marcata stagionalità di produzione dei pascoli mediterranei, la cui durata della crescita può variare da 4 a 10 mesi, con produzioni annuali di foraggio che possono oscillare da meno di 1 Mg ha⁻¹ fino a 7-8 Mg ha⁻¹ nelle annate migliori (Porqueddu et al., 2016). Le aziende agro-pastorali estensive organizzano la gestione del pascolo e delle risorse foraggiere in modo da minimizzare la vulnerabilità dovuta alla aleatorietà dei fattori climatici.

La maggior parte degli scenari climatici futuri per il bacino del Mediterraneo prevedono una riduzione delle precipitazioni (fino a -10% in inverno e tra il -10% e il -20% in estate) sebbene con marcate differenze tra i diversi modelli previsionali, e un incremento medio delle temperature invernali tra 1 e 2 °C (Dumont et al., 2015) fino a picchi di +5 °C per le temperature massime annuali in alcune aree (Mannetje, 2007). Sono inoltre previsti un inizio più tardivo delle precipitazioni autunnali da cui dipende l'avvio della stagione di crescita dei pascoli, e un anticipo della stagione siccitosa in primavera (Dumont et al., 2015) che si traduce a cascata in una minore capacità di produrre scorte foraggiere per l'annata agraria successiva. Il livello di incertezza sull'adeguatezza delle scelte gestionali degli imprenditori agricoli potrà subire un ulteriore incremento a causa della maggiore variabilità interannuale e intrannuale delle precipitazioni (Mariotti et al., 2015).

Nonostante le regioni del bacino del Mediterraneo vengano considerate particolarmente vulnerabili al cambiamento climatico, è stata data finora insufficiente attenzione da parte del mondo scientifico alla valutazione degli impatti attesi sulla produttività e sostenibilità economica e ambientale dei sistemi pastorali estensivi in queste aree. Lozano-Parra et al. (2014) hanno stimato che la riduzione della produttività dei pascoli mediterranei sarà associata più alla contrazione della durata della stagione piovosa che alla diminuzione della quantità di foraggio prodotta. In uno studio sull'effetto della

siccità sul sequestro di carbonio in sistemi pastorali estensivi del Portogallo meridionale, Aires et al. (2008) hanno osservato che questi sistemi sono un serbatoio di carbonio nelle annate piovose mentre sono fonte di emissioni in annate con scarse precipitazioni. Dumont et al. (2015) in una meta-analisi sugli effetti dei cambiamenti climatici sulla qualità del foraggio dei pascoli mediterranei hanno evidenziato l'assenza di significativi impatti sulla maggior parte dei parametri qualitativi con la sola eccezione dei carboidrati solubili e non strutturali che aumentano all'aumentare della concentrazione di CO_2 in atmosfera.

Il cambiamento climatico è solo uno dei fattori che minacciano la produttività dei sistemi pastorali estensivi mediterranei. Altri fattori come l'aumento dei costi dei mezzi di produzione, la riduzione del valore commerciale di molti prodotti zootecnici, la perdita di biodiversità nelle aree più intensamente coltivate, la colonizzazione di specie legnose nelle aree abbandonate, anche in conseguenza delle modalità di attuazione delle politiche agricole comunitarie, sono fattori che già oggi esercitano un forte impatto sulle dinamiche dei sistemi pastorali estensivi. Sternberg et al (2015) hanno dimostrato che i pascoli mediterranei composti prevalentemente da graminacee annuali sono particolarmente resistenti al pascolamento continuo o stagionale e alla variabilità del regime pluviometrico interannuale, in particolare in termini di mantenimento della diversità dei principali gruppi funzionali di specie erbacee. Gli stessi autori concludono che questa capacità di resilienza è un punto di forza dei sistemi pastorali mediterranei semiaridi rispetto agli scenari di inaridimento attesi per l'area mediterranea. Questo comportamento è stato attribuito alla millenaria utilizzazione al pascolo di queste superfici, associata alla tipica variabilità del regime pluviometrico mediterraneo nei mesi autunnali e primaverili, per la quale le comunità di specie pascolive sono particolarmente ben adattate. Anche l'abbandono è un processo impattante sulla diversità floristica dei pascoli mediterranei (es., Tardella e Catorci, 2015; Bonanomi et al., 2013) oltre che sul controllo del rischio di incendio (es., Lovreglio et al., 2014).

LE DOMANDE DELLA RICERCA

Questo lavoro riporta i risultati di due esperienze di valutazione effettuate in diversi contesti italiani da due gruppi di ricerca che, pur avendo intrapreso percorsi di ricerca differenti dal punto di vista strettamente metodologico, hanno condiviso le meta-domande, gli elementi di discussione e le

LIVELLO	ATTEGGIAMENTO	RISORSE INVESTITE	CASI
1. Nessuna risposta	Riluttante	Nessuna	Pochi
2. Remissivo (compliant)	Applicazione norme	Minimo di legge	Molti
3. Gestione efficiente	Basso livello, attivo	per ottenere uno stato-obiettivo (es. ISO 14001)	Molti
4. Progetti strategici	Alto livello, strategico	Ricerca di opportunità "win-win" rispetto ad altre priorità	Molti
5. Resilienza strategica	Strategico, totalizzante	Assicurare resilienza al CC a tutti i livelli del sistema	Rari
6. Promozione sostenibilità	Visionario, influente	Per influenzare l'ambiente politico sociale e tecnologico	Molto rari

Tab. 1 *Tipologie di risposta adattativa al cambiamento climatico (Reason et al., 2009)*

prospettive di sviluppo per la ricerca italiana sulla produzione di alimenti zootecnici.

Con specifico riferimento alle pressioni associate al cambiamento climatico, la ricerca intende supportare risposte adattative efficaci, stimolando atteggiamenti proattivi e volontari di agricoltori, decisori politici e ricercatori. A questo riguardo, occorre distinguere in modo netto le tipologie di risposta adattativa a cui fare riferimento (tab. 1). I livelli di risposta 1-3 indicati in tabella sono quelli più comunemente adottati dagli attori dell'agricoltura italiana. Le sfide poste dal cambiamento climatico richiederebbero investimenti efficaci sui livelli 4-6 indicati in tabella 1. Questo nuovo atteggiamento implica l'acquisizione della piena consapevolezza di cosa sta accadendo e cosa potrebbe accadere nel breve, medio e lungo termine per effetto del riscaldamento globale, con specifico riferimento ai diversi contesti nazionali nei quali oggi l'allevamento zootecnico è centrale per lo sviluppo economico e sociale e per la tutela ambientale. Il passaggio più critico è dal livello 3 (gestione efficiente) al livello 4 (progetti strategici di innovazione su prodotto e processo), che implica una interpretazione dell'adattamento che va oltre la scelta tecnica che massimizza l'efficienza in un determinato contesto. L'orientamento, per i livelli di risposta 4-6, mette il cambiamento climatico al centro delle scelte future e esplora in anticipo le opportunità associate ai nuovi scenari, con investimenti strategici capaci di garantire piena resilienza nonostante le condizioni di incertezza.

Le esperienze di ricerca descritte nei paragrafi successivi forniscono una serie di elementi di conoscenza a supporto di scelte strategiche e aiutano a formulare le domande giuste per intraprendere percorsi che si mantengano nell'alveo degli spazi adattativi, evitando così l'esposizione a situazioni di criticità senza possibilità di recupero (Wise et al., 2015).

Nell'affrontare il tema della ricerca scientifica sulla produzione nazionale degli alimenti zootecnici in un contesto di cambiamento climatico, la meta-

domanda che ci siamo posti è “come individuare le domande di ricerca più efficaci per supportare percorsi adattativi strategici per la produzione di alimenti zootecnici, che consentano di cogliere le opportunità e mitigare gli impatti attesi?”. Per discutere questa domanda faremo riferimento a specifici esempi di valutazione dell’impatto del cambiamento climatico in sistemi foraggeri di diversi contesti nazionali, sulla base dei quali estrarre una sintesi rivolta idealmente alla comunità tecnico-scientifica e ai decisori politici nazionali.

ESPERIENZE DI RICERCA SULL’IMPATTO DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SUI SISTEMI FORAGGERI ITALIANI

Sistemi pastorali alpini e appenninici

Obiettivi della ricerca

Lo studio ha avuto come obiettivo la valutazione delle possibili variazioni della distribuzione delle risorse pastorali delle zone montane alpine e appenniniche in relazione ai cambiamenti climatici in funzione degli scenari futuri SRES A2 e B2 dell’IPCC previsti per due finestre temporali di medio (2040-2069) e lungo periodo (2070-2099). Inoltre, sono stati identificati i principali macro tipi pastorali aventi maggiore rilevanza nelle aree montane delle Alpi italiane e valutato le possibili contrazioni/espansioni delle aree idonee alla loro permanenza. Gli impatti dei cambiamenti climatici sono stati analizzati tramite l’utilizzo del modello di classificazione statistica Random Forest (Breiman, 2001), utilizzando come variabili predittive parametri climatici, edafici e topografici determinanti per la discriminazione delle risorse pastorali e dei macro tipi individuati.

Materiali e metodi

Le aree di studio del presente lavoro (circa 43°-47° Lat N e 6°-14° Lon E per le Alpi; 38°-45° Lat N e 8°-17° Lon E per l’Appennino) sono localizzate nel piano montano della catena alpina italiana (quota superiore a 1.000 metri s.l.m.) e appenninica (quota superiore a 600 metri s.l.m.). Le superfici a pascolo sono state identificate tramite l’estrazione dalla Carta Corine Land Cover 2000 dei codici corrispondenti alle risorse foraggere estensive (codici 321, 322, 324), mentre le informazioni sulla loro composizione sono state acquisite da cartografie specifiche, disponibili solamente per l’arco Alpino:

Regione Piemonte (Cavallero et al., 2007), Comelico (Targetti et al., 2010) e Carta degli Habitat di Natura 2000 (ISPRA, 2009). Sulla base di tre approcci metodologici basati su elaborazioni GIS, analisi/armonizzazione delle legende e un approccio euristico, sono state quindi definite sette macro tipologie (macro tipi) su cui concentrare lo studio dei pascoli alpini: Arbusteti, Curvuleti, Firmeti, Nardeti, Pascoli ricchi, Praterie xeriche e Seslerieti, per le quali sono state identificate le principali caratteristiche pedoclimatiche maggiormente condizionanti la loro diffusione (Dibari et al., 2016).

La caratterizzazione ambientale delle risorse pastorali è stata effettuata acquisendo i dati geografici relativi alla topografia, pedologia e climatologia delle aree di studio. I parametri topografici e quelli climatici per lo scenario attuale (medie mensili di temperatura massima e minima e pioggia) sono stati estratti dal database WorldClim (Hijmans et al., 2005), disponibile per tutta la superficie terrestre a una risoluzione di un 1 km x 1 km. I dati climatici relativi agli scenari climatici futuri sono stati ottenuti con una procedura di *downscaling* a partire dal modello generale di circolazione HadCM3. Tali scenari fanno riferimento alle due ipotesi di emissioni SRES A2 e B2 dell'IPCC per due finestre temporali trentennali di medio (2040-2069) e lungo periodo (2070-2099). Le variabili pedologiche sono state invece estratte dal database dei suoli HWSD (*Harmonized World Soil Database*) (Nachtergaele et al., 2008), anch'esso disponibile alla stessa risoluzione spaziale (1 km x 1 km) dei dataset di WorldClim. Dai database pedo-topo-climatici, una volta integrati e omogenizzati in ambiente GIS, sono state quindi estratte e calcolate, sulla base di quanto riportato in letteratura, le variabili predittive da utilizzare sia per caratterizzare le risorse pascolive (per Alpi e Appennino) sia per l'individuazione dei sette macro tipi (solo per le Alpi). Tali variabili sono quota, pendenza, pH, temperatura minima media del mese più freddo (Tmin_Gen), temperatura massima media del mese più caldo (Tmax_lug), e precipitazioni medie stagionali (PP_inv, PP_prim, PP_est, PP_aut).

L'individuazione delle aree potenzialmente idonee alle risorse pastorali, sulla base delle condizioni ambientali (clima, suolo e topografia), si è basata sull'utilizzo del modello di classificazione statistica Random Forest (RF). RF è un modello ampiamente utilizzato per determinare la distribuzione delle specie sulla base di parametri ambientali in campo agricolo-forestale (Moriondo et al., 2008; Evans e Cushman, 2009; Casalegno et al., 2011; Moriondo et al., 2013), ecologico (Cutler et al., 2007; Elith e Graham, 2009; Zucchetta, 2009; Murphy et al., 2010) e per valutare gli impatti dei cambiamenti climatici (Prasad et al., 2006; Rehfeldt et al., 2006). RF consiste in un algoritmo di classificazione ad alberi randomizzati, ovvero da collezioni di regole espresse

in forma di alberi binari, ottenute attraverso un partizionamento ricorsivo. L'algoritmo non necessita della messa in atto di tecniche di valutazione imparziale dell'errore, in quanto ciò è garantito intrinsecamente dal metodo (Evans et al., 2011). Il modello RF fornisce infatti già una stima dell'errore interno di classificazione (Out-of-Bag-error – OOB). Inoltre RF fornisce una valutazione dell'importanza relativa delle variabili predittive nel processo di classificazione, e consente di adottare diverse strategie per trattare i dati mancanti. Il modello RF è stato quindi calibrato per il periodo presente separatamente per le due aree di studio e quindi applicato nelle due finestre temporali dei due scenari climatici A2 e B2. Tramite il calcolo dei tre indici statistici Kappa (Monserud e Leemans, 1992), ROC-AUC (Hanley e McNeil, 1982) e TSS (Allouche et al., 2006) le mappe probabilistiche di output del modello sono state convertite in mappe dicotomiche di presenza/assenza dei pascoli alpini e appenninici e dei macro tipi pastorali individuati sulle Alpi.

Risultati e discussione

Presente

Dall'applicazione del modello RF per il periodo presente, la superficie delle aree coperte dalle risorse pastorali simulata dal modello è risultata superiore (2.080.000 ha sulle Alpi e 2.344.000 ha in Appennino) rispetto a quella attualmente occupata (1.400.000 ha sulle Alpi e 1.101.000 ha in Appennino) così come riportato dalla carta Corine Land Cover in entrambe le aree di studio. Tale sovrastima è risultata maggiore per l'area Appenninica (errore di classificazione = 23%) rispetto a quella alpina (errore di classificazione = 13%). Questo risultato è probabilmente determinato dal fatto che il modello simula le zone potenzialmente idonee alla presenza del pascolo sulla base delle condizioni climatiche, pedologiche e topografiche medie attuali, ma, a causa di altri fattori, come ad esempio l'attività agricola, la risorsa pastorale non è attualmente presente. Va considerato che le formazioni pastorali sono, per definizione, l'espressione e il risultato dell'interazione di due componenti principali: le condizioni ambientali dell'area e le azioni antropiche di utilizzazione, fattore che in questo studio non è stato possibile prendere in considerazione. Inoltre, nel modello di classificazione non sono stati presi in considerazione fattori ambientali locali, come ad esempio alcuni elementi nutritivi del suolo, processi ecologici di competizione fra le specie, condizioni microclimatiche, ecc. fattori determinanti la presenza del pascolo ma che possono essere considerati solo per indagini a scale di maggior dettaglio (Riedo et al., 2011; Komac et al., 2014). Inoltre, in entrambe le aree di studio la mag-

gior parte dei pixel classificati come falsi positivi dal modello si trovano a una distanza inferiore di 1-2 km rispetto all'osservato (veri positivi) della carta Corine, distanza che coincide con la risoluzione dei dataset climatici utilizzati (i.e. 1 km x 1 km) (Dibari et al., 2013; 2016). L'aver considerato anche queste aree ha tuttavia permesso di mantenere una soddisfacente *performance* di classificazione totale del modello con livelli di accuratezza accettabili. La minore accuratezza della classificazione del modello sull'arco appenninico è probabilmente dovuto al fatto che la catena montuosa è caratterizzata da una maggiore variabilità climatica e pedologica rispetto all'area Alpina e quindi dalla presenza di diverse tipologie pastorali con esigenze pedo-climatiche molto diverse fra loro.

Il modello si è dimostrato robusto anche per classificare la distribuzione dei macro tipi pastorali alpini, per i quali l'errore di classificazione è risultato pari al 14%. Inoltre, da una analisi PCA (Principal Component Analysis) e KDE (Kernel Density Estimation) è risultato che le variabili predittive utilizzate come input del modello sono risultate efficaci nel riprodurre le caratteristiche e le esigenze ambientali delle formazioni analizzate (Dibari et al., 2016).

Dall'applicazione del modello sull'intero arco alpino, i Nardeti sono risultate le formazioni più estese (1074 milioni di ha, rappresentando circa il 48% dell'intera superficie classificata a pascolo), mentre i Firmeti (190 mila ettari) e i Pascoli ricchi (226 mila ettari), quelle meno diffuse, rappresentando rispettivamente 1,1% e 1,8% del totale dell'area a pascolo. Tranne le Praterie xeriche, tutte le altre formazioni pascolive sono principalmente distribuite nella fascia altimetrica compresa fra 1800 e 2200 m. Inoltre il modello è risultato robusto anche nel riprodurre le esigenze termiche delle formazioni analizzate. Infatti, alle quote maggiori (> 2000 metri) si trovano le formazioni tipiche dell'alta montagna come i Curvuleti, i Seslerieti e i Firmeti; le aree idonee alle Praterie xeriche si trovano invece a quote inferiori rispetto agli altri sei macro tipi (inferiori a 1600 metri). Infine il modello ha riprodotto correttamente le esigenze edafiche dei macro tipi analizzati in quanto formazioni come i Nardeti, gli Arbusteti e i Curvuleti si trovano concentrate in aree caratterizzate da condizioni pedologiche di maggiore acidità, mentre Firmeti e Seslerieti, formazioni maggiormente legate a suoli basici, confermano valori medi di pH tendenti all'alcalino nella simulazione riferita al periodo presente.

Occorre precisare che gran parte dell'area di studio (94,3%) è caratterizzata dalla compresenza di almeno due macro tipi pastorali all'interno di ciascuna unità di mappa (pixel, avente la risoluzione spaziale di 1 km x 1 km). Va difatti evidenziato che l'unità minima spaziale di riferimento dello

studio è molto ampia: cento ettari in ambito montano, rappresentano una superficie molto vasta, al cui interno si rileva una molteplicità di elementi paesaggistici, colturali ed ecologici molto complessi e diversi fra loro, a cui corrisponde spesso un'elevata eterogeneità anche dal punto di vista pastorale, con coesistenza di formazioni vegetali di diverso tipo per unità di area. Tale risoluzione è stata però subordinata dalla disponibilità delle cartografie di base che coprissero l'intero territorio oggetto di studio. Tuttavia, nonostante la bassa risoluzione spaziale dei dataset di partenza, è stato possibile analizzare le caratteristiche ambientali medie delle superfici a pascolo montane e delle sette formazioni alpine, osservando una corrispondenza molto soddisfacente con quanto riportato in letteratura (Cavallero et al., 2007; Argenti et al., 2012; Dibari et al., 2016; 2015). Infine, in questo contesto, occorre rilevare che le variabili maggiormente determinanti nel processo classificatorio delle aree a pascolo sono risultate la precipitazione primaverile (PP_prim) per i pascoli appenninici e la temperatura massima del mese più caldo (Tmax_lug) per le risorse pastorali alpine. La temperatura massima del mese di luglio e il pH sono state invece le variabili principali per la discriminazione dei sette macro tipi pastorali delle Alpi. La pendenza del terreno è invece risultata la variabile meno importante nel processo classificatorio in tutti i dataset.

Futuro

Relativamente all'impatto che i cambiamenti climatici, così come delineati dal GCM HadCM3, potranno avere sulle risorse pastorali, i risultati evidenziano effetti non particolarmente marcati sulle aree a pascolo delle Alpi, con una riduzione massima delle superfici idonee inferiore al 16% rispetto al periodo presente in entrambe le finestre temporali dei due scenari analizzati. Sebbene le contrazioni siano di lieve entità, lo scenario B2, meno pessimista, presenta alla fine del secolo sulle Alpi le riduzioni di areale maggiori (-16%) rispetto a quelle previste nello scenario A2 (-10%), più pessimista (tab. 2). Questo risultato non sembra essere coerente con le variazioni climatiche previste dai due scenari, in quanto per la fine del secolo lo scenario A2 mostra incrementi medi di temperature maggiori rispetto al B2 insieme a situazioni di maggiore aridità. Da una analisi bivariata effettuata fra le variabili maggiormente determinanti nella classificazione (temperatura massima di luglio e piogge estive), le diverse combinazioni di queste determinano condizioni più o meno favorevoli alla presenza del pascolo. È probabile pertanto che la combinazione di temperatura e pioggia previsti dallo scenario B2 a fine secolo, sebbene mediamente meno pessimista dal punto di vista climatico, crei condizioni più sfavorevoli alla presenza del pascolo rispetto a quelle dello scenario

ZONA		A2 (2040-2069)	A2 (2070-2099)	B2 (2040-2069)	B2 (2070-2099)
ALPI	Variazioni di superficie (%)	-13	-10	+1	-16
	Variazioni di altitudine (m)	+69	-1	-2	+54
APPENNINO	Variazioni di superficie (%)	-46	-35	-41	-33
	Variazioni di altitudine (m)	+140	-76	+80	-22

Tab. 2 *Variazioni di superficie (in percentuale di espansione (+) o riduzione (-) rispetto al presente) e di altitudine (in metri rispetto al presente) per le Alpi e l'Appennino nelle due finestre temporali di medio (2040-2069) e lungo periodo (2070-2099) dei due scenari SRES A2 e B2 (fonte Dibari, 2013; Dibari et al., 2015)*

A2. Tali riduzioni sono accompagnate da un innalzamento di quota delle aree potenzialmente idonee al pascolo soprattutto nella prima finestra temporale (+69 m) dello scenario A2 e alla fine del secolo dello scenario B2 (+64 m).

Impatti più rilevanti si evidenziano invece sulle zone montane dell'Appennino, dove dalle simulazioni del modello, risultano riduzioni della superficie idonea al pascolo fino a -46% nello scenario A2 e -41% nello scenario B2 già a metà del secolo. Tale riduzione è accompagnata da un aumento dell'altitudine media delle aree classificate come idonee al pascolo (aumento dell'altitudine media dell'intera area pari +110 metri).

Analizzando le diverse zone dell'Appennino (tab. 3), si rileva che a fronte di forti riduzioni, in termini di superfici idonee nell'Appennino Nord e soprattutto in quello Centrale in entrambi gli scenari, si rilevano forti espansioni in entrambi gli scenari nell'Appennino meridionale (+96% e +105%, rispettivamente nello scenario A2 e B2 alla fine del secolo). Questo scenario è da considerarsi particolarmente allarmante se si considera che circa il 72% delle risorse pastorali appenniniche si trova attualmente localizzata nella zona centrale della catena montuosa.

Per quanto riguarda lo spostamento altitudinale, le zone appenniniche centrali e meridionali idonee al pascolo mostrano un marcato aumento in altitudine (fino a un massimo di +507 m nello scenario A2 a metà del secolo) mentre quelle dell'Appennino settentrionale mostrano un abbassamento in entrambi gli scenari A2 e B2 alla fine del secolo (rispettivamente -125 m e -188 m).

È importante tuttavia ricordare che i dati riferiti al futuro derivano da una procedura di *downscaling* statistico mediante la quale è stato applicato un fattore correttivo di variazione climatica ai dati riferiti al presente del database di WorldClim (avente una risoluzione spaziale di 1 km x 1 km). Essendo la risoluzione dei GCM relativamente bassa (2,5° di latitudine e 3,75° di

ZONA	A2 (2040-2069)	A2 (2070-2099)	B2 (2040-2069)	B2 (2070-2099)
VARIAZIONE IN SUPERFICIE (%)				
Appennino NORD	-25	-69	-10	-71
Appennino CENTRO	-83	-90	-78	-90
Appennino SUD	+19	+96	+21	+105
VARIAZIONE IN ALTITUDINE (M)				
Appennino NORD	+105	-125	+137	-188
Appennino CENTRO	+507	+90	+422	+203
Appennino SUD	+168	+20	+56	+52

Tab. 3 *Variazioni di superficie (in percentuale rispetto al presente) e di altitudine (in metri rispetto al presente) per tre zone dell'Appennino nelle due finestre temporali di medio (2040-2069) e lungo periodo (2070-2099) dei due scenari SRES A2 e B2. L'Appennino NORD comprende le zone montane appenniniche del Piemonte, Lombardia, Emilia Romagna, Liguria, Toscana; Appennino CENTRO comprende le zone appenniniche delle Marche, Umbria, Lazio, Abruzzo e Molise; e Appennino SUD comprende le zone montane della Puglia, Campania, Calabria e Basilicata (fonte Dibari et al., 2015b)*

longitudine), la zona di studio, specialmente quella dell'Appennino meridionale, risulta coperta da celle molto ampie, fortemente influenzate dal potere mitigatore del mare. L'utilizzo di modelli climatici dotati di una più alta risoluzione spaziale (i.e. Regional Climate Models - RCM), comunemente utilizzati per previsioni climatiche a livello regionale, permetterebbero di superare questo problema (Sousanna et al., 2010).

Le contrazioni in termini di superficie idonea alle risorse foraggiere estensive montane dovute al cambiamento del clima risultanti da questo studio sono coerenti con quanto riportato da studi analoghi che hanno esaminato gli impatti dei cambiamenti climatici su zone pastorali a livello europeo (Engler et al., 2011; Gottfried et al., 2012; Pauli et al., 2012) e regionale (Stanisci, 2005a, 2005b; Cannone et al., 2007; Vittoz et al., 2009; Gavazov et al., 2014). Secondo Benvenuti (2009) e Bütof et al. (2012) le riduzioni delle precipitazioni dovute al cambiamento climatico giocano un ruolo determinante nella distribuzione delle risorse pastorali montane. Questo è particolarmente evidente nell'Appennino Centrale dove alla fine del secolo nello scenario A2 si prevedono forti contrazioni in termini di superficie idonea (-90%) in corrispondenza, per lo stesso scenario e finestra temporale, di una forte riduzione delle piogge primaverili e aumenti della temperatura media del mese più caldo, ovvero delle due variabili maggiormente determinanti nel processo classificatorio del modello RF.

Impatti più preoccupanti del clima futuro sono emersi per ciò che ri-

guarda la distribuzione delle superfici idonee ai singoli macro tipi pastorali analizzati sulle Alpi. Si prefigura infatti una forte riduzione, o in alcuni casi la scomparsa, di aree idonee ad alcune tipologie di pascoli. Le superfici dei macro tipi caratteristici delle zone più elevate (Firmeti, Seslerieti e Curvuleti) o più sporadiche (Pascoli ricchi) sono quelle che presenteranno le riduzioni maggiori (tab. 4). Le condizioni climatiche previste dal modello HadCM3 determineranno infatti addirittura la scomparsa delle aree idonee ai Firmeti e i Pascoli ricchi già a metà del XXI secolo in entrambi gli scenari A2 e B2. Ma anche le aree idonee ai macro tipi caratteristici della fascia alpina, come i Curvuleti (-83% e -77%) e Seslerieti (-81% e -79%) o cenosi più eterogenee come gli Arbusteti (-95% e -87%) presentano considerevoli riduzioni rispetto al presente già nella finestra temporale di medio termine, rispettivamente nello scenario A2 e B2. I Nardeti, ampiamente diffusi sul territorio di studio, presentano riduzioni molto limitate soprattutto nello scenario A2, rispettivamente -5% e -30% nello scenario di medio e lungo termine. Solamente le Praterie xeriche sembrano avvantaggiarsi dalla variazione climatica prevista: sono infatti le uniche formazioni che mostrano espansioni del loro areale nelle due finestre temporali di entrambi gli scenari in quanto le condizioni di alte temperature e aridità aumentano la loro competitività nei confronti degli altri macro tipi analizzati (+200% e +356% nello scenario A2, e +294% e +179% nello scenario B2, rispettivamente nel medio e lungo periodo).

In condizioni climatiche più pessimiste (scenario A2), si prevede che alla fine del secolo la maggior parte delle aree attualmente idonee alle formazioni erbacee di alta quota (Firmeti, Curvuleti e Seslerieti) verranno occupate dai Nardeti, mentre quelle occupate attualmente da Pascoli ricchi e Arbusteti verranno sostituite dalle Praterie xeriche. Analoghi comportamenti sono previsti anche nello scenario meno pessimista (B2), anche se in questo caso le aree idonee alla presenza di Arbusteti verranno occupate prevalentemente dai Nardeti. Aree idonee ai Nardeti e alle Praterie xeriche subiranno inoltre, già a partire dalla metà del secolo di entrambi gli scenari, una notevole espansione. Nello specifico, nella finestra temporale a medio termine dello scenario A2, il 66% delle superfici coperte nel periodo presente da Arbusteti e l'81% dei Curvuleti e Firmeti diventeranno idonee alla presenza dei Nardeti; mentre il 78% dei Pascoli ricchi potrebbero degradare a Praterie xeriche (tab. 4). Percentuali simili si riscontrano anche nel contesto dello scenario B2: il 66% delle superfici idonee nel periodo presente agli Arbusteti e il 79% di Curvuleti e Firmeti diventeranno ottimali per la presenza dei Nardeti mentre Pascoli ricchi (78% del totale al presente) e Seslerieti (37% del totale al presente) diventeranno adatti alle Praterie xeriche (tab. 4).

È nell'ultima finestra temporale (2070-2099) di entrambi gli scenari che si prevedono le variazioni maggiori in tutti i macro tipi pastorali, a eccezione dei Nardeti e delle Praterie xeriche. Il 39% e il 56% delle aree occupate dagli Arbusteti nel periodo presente diventeranno idonee rispettivamente ai Nardeti e Praterie xeriche nello scenario A2; la maggior parte delle aree ad Arbusteti (63%) risulterà idonea solamente ai Nardeti nello scenario B2. Circa l'80% delle superfici coperte dai Curvuleti e dai Firmeti sarà occupato da Nardeti in entrambi gli scenari. Per quanto riguarda le aree attualmente coperte dai Pascoli ricchi si prevede che alla fine del XXI secolo siano occupate prevalentemente dalle Praterie xeriche nello scenario A2 (95%), dai Nardeti (50%) e Praterie xeriche (49%) nel B2. Infine circa l'80% delle superfici idonee ai Seslerieti nel periodo presente sarà coperto sempre da Nardeti e Praterie xeriche in entrambi gli scenari.

Il vantaggio nella competizione ecologica mostrato da parte delle formazioni più termofile in funzione della variazione del clima è riportato anche da altri studi, come in Björk e Molau (2007) e in Klanderud e Totland (2007). Questo processo, evidenziato anche da altri studi (Theurillat, 1995; Guisan e Theurillat, 2000; Theurillat e Guisan, 2001; Dirnböck et al., 2003; Stanisci et al., 2005b; Pauli, 2007), porterà a una lenta frammentazione delle formazioni, una progressiva perdita in termini di ricchezza floristica nonché a una banalizzazione degli ambienti e del paesaggio che caratterizza da secoli il territorio montano italiano.

Parallelamente alla perdita di biodiversità, gli aumenti delle temperature congiuntamente alla diminuzione delle piogge, previsti da entrambi gli scenari SRES considerati, determineranno un generale innalzamento delle quote medie delle superfici coperte dal pascolo, soprattutto per le formazioni aventi caratteristiche più termofile (Praterie xeriche). L'innalzamento progressivo delle formazioni alpine evidenziato da questa ricerca è confermato anche da gran parte degli studi condotti sulla flora alpina (Grabherr et al., 1994; Theurillat e Guisan, 2001; Kullman, 2002; Dirnböck et al., 2003; Walther et al., 2005; Trivedi et al., 2008a) e appenninica (Stanisci et al., 2005b).

Lo spostamento altitudinale delle specie alpine non è stato invece riscontrato da Cannone et al. (2007) e Trivedi et al. (2008b). Questi autori infatti osservano una elevata tolleranza da parte delle specie alpine a sopportare incrementi di temperatura anche di +1 °C o +2 °C, senza che si verifichino variazioni di quota nel loro areale.

Occorre precisare che la maggior parte degli studi riportati in letteratura sono effettuati su singole specie e non su ampie formazioni pastorali come quelle considerate nella presente ricerca. Secondo alcuni autori infatti (Parry

e Carter, 1991; Guisan et al., 1995; Ozenda e Borel, 1995; De Groot, 1997) una comunità non può spostarsi in quanto tale, ma sono le singole specie che, sulla base di risposte individuali al cambiamento del clima, mettono in atto specifici e singoli meccanismi adattativi andando a occupare (o abbandonando) aree diventate a loro idonee (o inidonee). Questo processo può pertanto determinare cambiamenti nelle interazioni fra le singole specie non facilmente prevedibili nel loro insieme, avendo come risultato la modifica della struttura delle comunità vegetali e delle associazioni stesse.

Le specie erbacee caratterizzanti le risorse pastorali delle Alpi sono però rappresentate da specie anche molto diverse tra loro e la loro presenza in determinate associazioni dipende non soltanto da fattori pedo-climatici a loro favorevoli ma anche da elementi antropici. Tali elementi, sebbene non considerati nel presente studio per la loro difficile modellizzazione, sono però determinanti per la persistenza di determinate formazioni. A titolo di esempio, i Nardeti e gli Arbusteti rappresentano le formazioni vegetali che più si avvantaggiano dell'alleggerimento dei carichi animali che con diverse forme e intensità stanno interessando molti orizzonti montani e quindi la loro distribuzione può essere fortemente influenzata da aspetti antropici oltre che da fattori ambientali.

Le analisi dei possibili impatti dei cambiamenti del clima su formazioni pastorali valutate nel loro complesso (es. tipi pastorali) o sulle singole specie che compongono il pascolo, possono fornire indicazioni utili e operative per una migliore gestione di queste risorse. Infatti gli impatti che i cambiamenti climatici potranno avere sulle formazioni analizzate nell'ambito di questo lavoro, congiuntamente a un progressivo abbandono nell'utilizzazione dei pascoli e delle praterie alpine, potranno determinare profonde modifiche nella struttura e nella composizione di queste risorse, con evidenti ripercussioni anche sull'appetibilità del foraggio prodotto (Chamaillé-Jammes e Bond, 2010; Morgan et al., 2007; Bloor et al., 2008) e quindi sulle loro potenzialità di gestione, come i carichi mantenibili, che sono direttamente connessi con il valore pastorale della risorsa (Cavallero et al., 2002).

Conclusioni

Le condizioni ambientali previste, così come delineate dal GCM HadCM3 nei due scenari SRES analizzati in questo studio, determineranno una moderata riduzione delle superfici potenzialmente idonee alla presenza del pascolo sulle Alpi (massimo -16%), ma riduzioni invece più preoccupanti sull'Appennino (massimo -46%) già a metà del XXI secolo. Tuttavia, le contrazioni mag-

			DISTRIBUZIONE RISPETTO AL TOTALE (%)							
			ESP./RID. (%)	SP	CC	CF	NS	FR	XS	SV
A2	2040-2069	SP	-95	1,7	2,9		66,3		26,2	2,9
		CC	-83	0,9	7,2		81,4		4,1	6,4
		CF	-100	2,1	0,1		80,8		16,9	0,1
		NS	-5	0,3	1,1		52,8		45	0,8
		FR	-100				19,8		77,8	2,5
		XS	+200				2,1		97,6	0,3
		SV	-81	1,9	4,1		51,6		33,9	8,6
	2070-2099	SP	-96	2,2	0,5		39,4		56,4	1,5
		CC	-97	1,1	1,2		75		20,6	2
		CF	-100				90,5		9,5	
		NS	-30	0,1	0,2		25,8		73,4	0,5
		FR	-100				5,2		94,8	
		XS	+356	0,2	0		2,6		97,2	
		SV	-90	0,7	1		46,9		43,3	8,2
B2	2040-2069	SP	-87	2,4	3,2		66,2		25	3,1
		CC	-77	1,1	11,6		79,2		2,6	5,5
		CF	-100	7,4	0,4		79,8		12,3	0,1
		NS	-3	0,4	0,7		50,3		47,9	0,7
		FR	-100				20,7		78	1,3
		XS	+294				2,4		97,5	0,1
		SV	-76	6,7	5,2		37		37	14,2
	2070-2099	SP	-97	0,9	0,9		63		31,9	3,2
		CC	-87	0,3	5,7		84		5,4	4,6
		CF	-100	0,1			86,3		13,6	0
		NS	-5	0,4	0,7		55,4		41,9	1,6
		FR	-100		0,5		50,5		48,5	0,5
		XS	+179				10,2		89,6	0,3
		SV	-79	0,9	4,2		48,7		32,2	14

Tab. 4 Percentuale di espansione (+) e riduzione (-) nelle due finestre temporali dei due scenari A2 e B2 delle aree idonee ai macro tipi pastorali alpini rispetto al periodo presente; tabella di contingenza (in termini di percentuale rispetto al totale) dei macro tipi pastorali nelle due finestre temporali dello scenario SRES A2 e B2 (righe) rispetto al presente (colonne). SP = Arbusteti, CC = Curvuleti, CF = Firmeti, NS = Nardeti, FR = Pascoli Ricchi, XS = Praterie xeriche, SV = Seslerieti. (fonte Dibari et al., 2013)

giori in Appennino saranno prevalentemente concentrate nella zona centrale della catena montuosa dove attualmente si trova il 57% delle formazioni pastorali appenniniche. Questi cambiamenti, in concomitanza con la riduzione delle utilizzazioni dei pascoli e delle praterie alpine, comporteranno profonde

modificazioni nella struttura, composizione e distribuzione della flora locale, con inevitabili conseguenze sul valore pastorale di queste risorse e sul loro pregio naturalistico. Le diminuzioni previste nel medio e lungo termine (intorno a -80%) potrebbero portare quindi alla quasi scomparsa del pascolo in Appennino, causando una perdita di biodiversità cenotica rilevante. A questa potrebbe aggiungersi una riduzione complessiva della capacità produttiva delle aree pastorali, considerando che i pascoli previsti in espansione in Appennino meridionale potrebbero essere caratterizzati da specie più termofile e xeriche, spesso di scarso interesse agronomico, come evidenziato sull'analisi dei macro tipi condotta sulle Alpi. Analoghe considerazioni possono essere fatte per l'Appennino settentrionale, dove sono previste diminuzioni meno marcate nel breve periodo (A2: -31%, B2: -12%), ma comunque significative nel lungo termine (intorno a -70%).

Sebbene non siano emerse riduzioni rilevanti dell'areale potenziale futuro del pascolo sulle Alpi, lo stesso non si può affermare per quanto riguarda la sua composizione. I macro tipi pastorali alpini considerati presentano infatti forti variazioni nella distribuzione in funzione del cambiamento climatico previsto da entrambi gli scenari. Si prefigura pertanto una forte riduzione, o in alcuni casi la scomparsa, di alcune formazioni caratteristiche delle Alpi italiane, come i Curvuleti e Seslerieti, o per quelli meno diffusi, come i Firmeti e i Pascoli ricchi. Ma anche cenosi più eterogenee come gli Arbusteti presentano considerevoli riduzioni rispetto al periodo presente. Conseguentemente a queste generali contrazioni, si prospetta lo sviluppo ed espansione di due grandi formazioni pastorali (Praterie xeriche e Nardeti) che, potendo occupare aree precedentemente idonee a formazioni meno termofile, saranno favorite dal generale riscaldamento atteso, andando presumibilmente a dominare il piano montano e alpino delle Alpi italiane nel prossimo futuro.

Sistemi foraggeri mediterranei

Obiettivi della ricerca

La ricerca è stata condotta con un approccio per caso di studio, tenendo conto cioè non solo delle caratteristiche pedo-climatiche del territorio considerato, ma anche dello specifico contesto sociale. Questa scelta è motivata dal fatto che la valutazione dei possibili impatti del cambiamento climatico sui sistemi foraggeri presi in esame era orientata a supportare investimenti per lo sviluppo di opzioni adattative nel breve-medio periodo. In questo caso,

si intendeva focalizzare l'attenzione al processo attraverso il quale sviluppare risposte efficaci, sulla base di analisi di scenario condotte attraverso modelli matematici di sistema colturale.

Materiali e metodi

La ricerca è stata condotta nell'area della Sardegna centro-occidentale corrispondente a quella del Consorzio di Bonifica dell'Oristanese, all'interno della quale sono stati individuati i principali sistemi foraggeri irrigui di pianura e quelli asciutti di collina.

I sistemi foraggeri irrigui più rilevanti nella zona sono destinati alla produzione di alimenti fibrosi (insilati e fieni) per bovini da latte. Questo sistema produttivo è in larga misura confinato nella piana di Arborea, che è caratterizzata dalla presenza di circa 30.000 bovine da latte che insistono su una superficie di circa 5.500 ha in una zona vulnerabile da nitrati (ZVN). L'allevamento bovino ha carattere intensivo e il foraggiamento è basato sull'impiego di insilati e fieni prodotti localmente oltre ad alimenti concentrati esclusivamente di provenienza extra aziendale. La quasi totalità delle aziende zootecniche di Arborea coltiva graminacee foraggere a ciclo autunno-vernino (loglio italico e/o avena o triticale) principalmente destinate alla produzione di fieni o, in minor misura, insilato, in avvicendamento a doppio ciclo annuale con mais in secondo raccolto per la produzione di insilato. A questo sistema colturale si affianca la coltivazione di prati avvicendati di erba medica per la produzione di fieno di qualità.

I sistemi foraggeri asciutti dell'Oristanese sono destinati prevalentemente all'allevamento di ovini da latte o bovini da carne (linea vacca-vitello) delle aree collinari. Le colture foraggere prevalenti in queste zone sono erbai asciutti (in genere miscugli a base di loiessa-avena e talvolta trifogli annuali), utilizzati per il pascolo durante i mesi autunno invernali e per la produzione di un taglio a fieno a metà maggio, o pascoli avvicendati con turni di 3-7 anni con gli erbai, utilizzati esclusivamente con il pascolamento.

La valutazione dell'impatto del cambiamento climatico è stata effettuata attraverso l'impiego del modello colturale EPIC - Environmental Policy Integrated Climate (Williams, 1995). L'attuale versione di EPIC è in grado di simulare l'accrescimento e lo sviluppo delle colture e gli effetti delle pratiche agricole sulla dinamica dell'acqua, degli elementi nutritivi e dei fitofarmaci nel suolo oltre che al loro impatto sull'erosione, sulla qualità dell'acqua e sulla produttività delle colture. EPIC è stato utilizzato con successo per analizzare l'effetto dell'erosione del terreno sulla produttività (Williams e Renard,

1995), per studiare le variazioni produttive e di utilizzo delle risorse idriche in funzione dei mutamenti climatici (Brown e Rosenberg, 1997), per simulare la dinamica del carbonio nel suolo (Izaurre et al., 2006) e per simulare gli effetti dei mutamenti climatici sull'agricoltura a scala nazionale (Brown e Rosenberg, 1999; Priya e Shibasaki, 2001) regionale (Easterling et al., 1993; Dhakhwa et al., 1997; Chavas et al., 2009; Niu et al., 2009) e globale (Tan e Shibasaki, 2003; Liu et al., 2007).

La procedura da seguire per utilizzare correttamente il modello in uno specifico contesto prevede la conduzione di esperimenti in campo per una o più colture a seconda del sistema che si vuole analizzare, da cui ottenere dati sufficienti alla sua calibrazione e validazione. In particolare, sono sempre necessari dati meteorologici (temperatura max e min, precipitazioni, radiazione solare) su base giornaliera e la concentrazione di CO_2 in atmosfera su base annuale; dati sul suolo (tessitura, densità apparente, C e N totali, caratteristiche idrologiche); dati sulla gestione delle colture e almeno due rilevazioni durante il ciclo produttivo della produzione di fitomassa epigea e dell'indice fogliare (LAI), oltre alla resa finale raccolta e residui colturali.

La prima fase del lavoro ha riguardato la calibrazione e validazione del modello impiegando dataset già disponibili o costruiti ad hoc. Le informazioni pedologiche sono state ottenute tramite appositi campionamenti. Il dataset meteo è stato costruito utilizzando la serie storica di dati termopuviometrici giornalieri raccolti dalla stazione meteorologica dell'Azienda sperimentale del Dipartimento di Agraria dell'Università di Sassari ubicata a Santa Lucia (OR). Questi dati sono stati integrati con quelli raccolti dalla stazione meteorologica installata nel 2006 presso la Cooperativa Produttori di Arborea, dalla stazione meteorologica del Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare ubicata a Capo Frasca e con informazioni bibliografiche (Petrarca et al., 2000) al fine di stimare la radiazione solare e la velocità del vento. Le informazioni relative alla gestione dei sistemi colturali sono state integrate mediante interviste agli agricoltori, con lo scopo di raccogliere informazioni specifiche sulle tecniche agronomiche comunemente utilizzate. È stato così possibile costruire un dettagliato dataset di *crop management* associato ai dati disponibili di performance colturale (resa, LAI ecc.).

Gli scenari climatici futuri sono stati ottenuti a partire dai dati meteorologici giornalieri storici raccolti nell'area oggetto di studio. I dati osservati sono stati utilizzati per la calibrazione e il *downscaling* di modelli atmosferici regionali (RAMS) a partire dalle informazioni derivanti dai modelli di circolazione globale. In questo modo è stato possibile creare delle serie sintetiche di dati meteorologici che conservano le peculiarità climatiche

della zona dell'oristanese. Le serie sintetiche facevano riferimento a due periodi temporali distinti definiti “clima presente” (CP) relativo al *down-scaling* del decennio 2000-2010 e “clima futuro” (CF) relativo al decennio 2020- 2030. Le serie di dati meteorologici sintetici create tramite il modello RAMS e aventi una lunghezza di 11 anni, sono state successivamente estese a 150 anni tramite l'utilizzo del generatore climatico WXGEN (Wallis e Griffiths, 1995). Il generatore climatico analizza i dati meteorologici forniti in input e calcola una serie di statistiche mensili (es.: temperatura massima e minima, precipitazioni medie e la loro deviazione standard, probabilità che a un giorno piovoso ne segua uno piovoso e probabilità che a un giorno piovoso faccia seguito un giorno privo di precipitazioni, etc.) che vengono poi utilizzate per generare in modo stocastico nuove serie di dati meteorologici che riproducono le caratteristiche della serie storica originale utilizzata come informazioni in input per il modello.

Il modello EPIC calibrato e validato con dataset indipendenti è stato utilizzato per valutare gli effetti del cambiamento climatico sulle rese dei sistemi foraggeri studiati e per analizzare la variabilità inter-annuale delle produzioni. Sono state effettuate serie di simulazioni colturali di 150 anni generati da WXGEN in condizioni di CP e CF tenendo conto dell'aumento della concentrazione dell'anidride carbonica in atmosfera da 380 ppm (CP a 407 ppm (CF).

La selezione di output del modello ha riguardato:

- la resa (in granella e paglia per i cereali asciutti, in biomassa raccolta per erbai, pascoli e silomais);
- i consumi idrici delle colture irrigue, assumendo che fossero mantenute in condizioni idriche non limitanti;
- durata della stagione di crescita dei pascoli, con particolare riferimento all'avvio della crescita autunnale.

La disponibilità di azoto nel suolo è stata considerata limitante nei pascoli, che solitamente non sono concimati. Per le altre colture sono stati seguiti i criteri di concimazione normalmente utilizzati nella zona. Nel caso dei sistemi foraggeri asciutti, ai fini della interpretazione degli output del modello, sono stati distinti due periodi produttivi: autunno e inverno-primavera. La produzione estiva dei sistemi foraggeri asciutti è normalmente assente in questo contesto a causa del tipico severo deficit idrico.

Risultati

Scenari climatici

La previsione di cambiamento climatico nel breve-medio periodo indica un

sensibile incremento delle temperature medie mensili, in particolare nel periodo estivo (sino a +1,7 °C di aumento delle medie massime mensili in luglio-agosto) e un calo delle precipitazioni primaverili di circa il 30% rispetto alla media attuale dei mesi di aprile-giugno e, ancora più pronunciato, nel mese di dicembre.

Sistemi foraggeri intensivi irrigui

L'analisi degli impatti attesi del cambiamento climatico sui sistemi colturali si è basato sul confronto degli output delle simulazioni ottenute utilizzando come dati meteo in input le serie sintetiche CP e CF.

Il sistema foraggero basato sul doppio ciclo mais da insilato e loglio è risultato vulnerabile al cambiamento climatico atteso per il 2020-2030. Nel caso del mais (fig. 3), la stima dell'impatto del CC indica una maggiore frequenza di basse produzioni con conseguente riduzione della produzione media che passa da 22,2 Mg ha⁻¹ di sostanza secca per il clima presente (CP) a 20,5 e 20,7 Mg ha⁻¹ s.s. rispettivamente per il clima futuro con concentrazione di CO₂ pari a 380 ppm (CF 380) e 407 ppm (CF 407). Questo risultato è stato ottenuto mantenendo invariato il volume irriguo utilizzato nelle simulazioni.

La riduzione delle rese associata all'aumento delle temperature è la conseguenza dell'accorciamento del ciclo di sviluppo della coltura con conseguente minore accumulo di biomassa. Anche Johnston (2015) riporta una riduzione dei consumi irrigui del mais negli scenari futuri di cambiamento climatico, attribuendolo alla riduzione della stagione di crescita.

La stessa analisi condotta per il loglio (fig. 4) ha mostrato un aumento atteso delle rese in fieno da una media di 7,7 Mg ha⁻¹ di sostanza secca con CP a 9,0 e 9,2 Mg ha⁻¹ s.s. con CF e concentrazione di CO₂ rispettivamente di 380 e 407 ppm. Questo risultato è stato attribuito al fatto che l'aumento previsto delle temperature simulato per il clima futuro offre minori limitazioni all'accrescimento nel periodo autunno-vernino e che l'irrigazione di soccorso possa supplire all'incremento di fabbisogno idrico conseguente all'aumento delle temperature. L'aumento delle temperature comporta anche un aumento delle esigenze irrigue stagionali, quantificate dagli output del modello per valori medi di circa 160 mm nel clima presente e circa 210 mm con clima futuro.

Zhao et al., (2015) hanno dimostrato che non considerando gli effetti dell'aumento della CO₂, in ambiente mediterraneo gli impatti negativi per le rese siano attesi molto meno marcati per le colture primaverili-estive che per le colture invernali. L'effetto della CO₂ comporterebbe una riduzione moderata degli effetti negativi dei cambiamenti climatici sulla resa per il mais nelle regioni centrali e settentrionali, a eccezione di alcuni paesi Mediterranei come la Spagna.

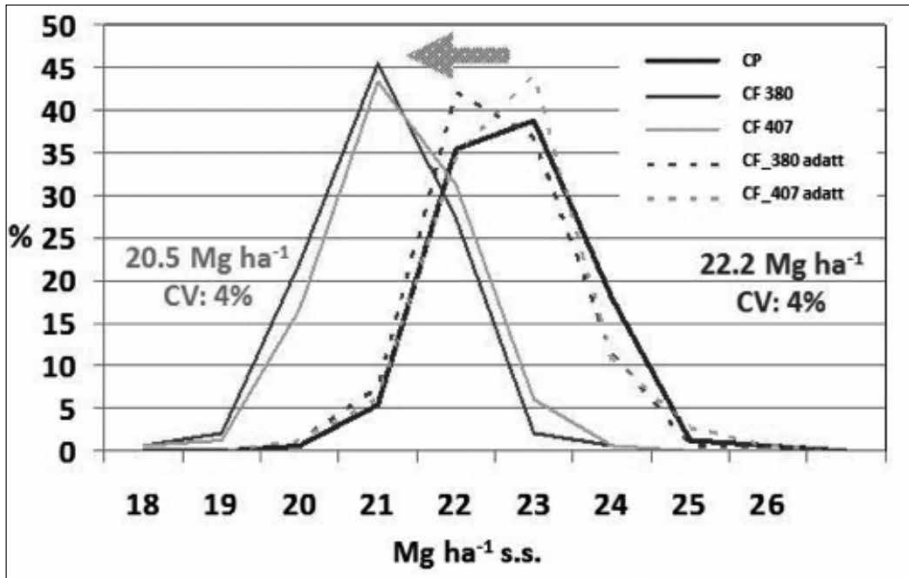


Fig. 3 Distribuzione di frequenza per la resa del mais in funzione dei diversi scenari meteorologici. CP: clima presente 2000-10; CF: clima futuro 2020-30; 380: $\text{CO}_2 = 380 \text{ ppm}$; 407: $\text{CO}_2 = 407 \text{ ppm}$; adatt: scenario di adattamento (vedi testo); CV: coefficiente di variabilità

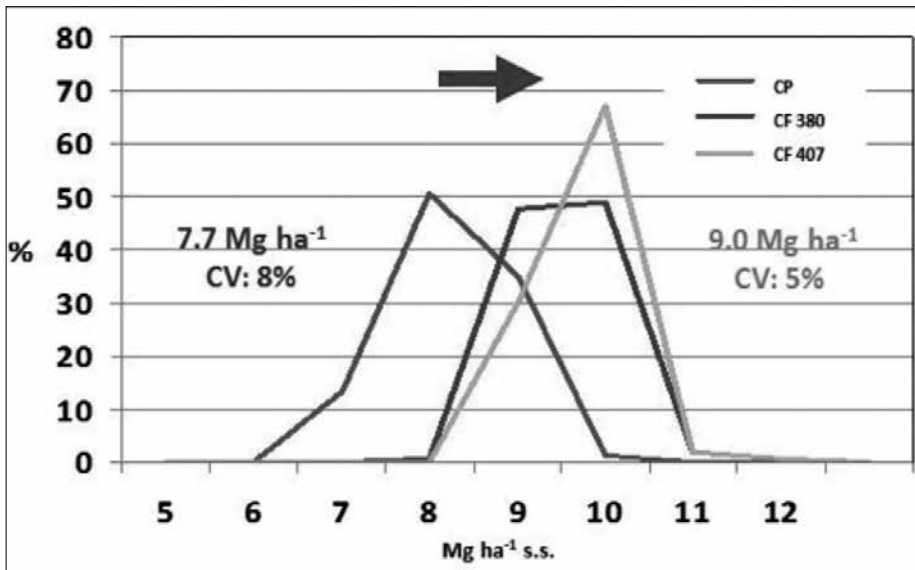


Fig. 4 Distribuzione di frequenza delle rese attese dagli erbai autunno-vernini irrigui di loglio italico nel distretto dell'Oristanese. CP: clima presente 2000-10; CF: clima futuro 2020-30; 380: $\text{CO}_2 = 380 \text{ ppm}$; 407: $\text{CO}_2 = 407 \text{ ppm}$. CV = coefficiente di variabilità

L'aumento di temperatura estivo potrebbe determinare stress da alte temperature superiori anche in condizioni di assenza di deficit idrico anche su mais, dal momento che temperature massime superiori ai 35 °C possono significativamente ridurre il tasso di crescita del mais (Jones et al., 2003). Un aumento della temperatura medio mensile di 1,7 °C cela una maggior frequenza di ondate di calore con massimi termici giornalieri spesso superiori a 35 °C.

I sistemi foraggeri irrigui, pur se suscettibili agli effetti dell'aumento di temperatura in termini di resa e consumi idrici, permettono tuttavia maggiori possibilità di intervento per contrastare gli effetti negativi attraverso variazioni della tecnica colturale. Per esempio, per contrastare l'accorciamento del ciclo colturale, è possibile far ricorso a un ibrido più tardivo, ripristinando così la durata del ciclo colturale e le rese attese (fig. 3). Le produzioni di insilato di mais, che in seguito al CC si riducevano da 22,2 (CP) a 20,5 o 20,7 Mg ha⁻¹ (CF) a seconda della concentrazione di CO₂ considerata, in seguito all'adozione di ibridi con ciclo colturale più lungo raggiungevano livelli produttivi comparabili a quelli conseguiti con CP dall'ibrido più precoce, ma con un lieve incremento dei volumi irrigui stagionali (+6,8% e +5,8% per CF con, rispettivamente, 380 e 407 ppm di CO₂).

Sistemi foraggeri estensivi

Per i pascoli è stato valutato l'impatto del CC sulla produzione totale e sulla produzione autunnale (fine dicembre) e inverno-primaverile (maggio). Con CF, il modello EPIC ha simulato una diminuzione della resa da 2,1 a 1,9 Mg ha⁻¹ s.s. e un incremento della variabilità delle produzioni (CV da 20% a 25%) passando da CP a CF. L'analisi delle produzioni stagionali ha messo in evidenza in particolare una certa sensibilità delle rese medie primaverili, per le quali si stima che il calo di precipitazioni possa far diminuire le rese da 1,1 a 0,9 Mg ha⁻¹ s.s., con un corrispondente aumento della variabilità delle produzioni (CV da 18% a 22%) passando da CP a CF (fig. 5).

Piccoli cambiamenti nelle precipitazioni medie annue possono avere un impatto sulla produttività delle colture. Lobell e Burke (2008) riportano che un piccolo cambiamento delle precipitazioni durante la stagione di crescita può essere associato a una variazione fino al 10% della resa colturale. Li et al. (2009) indicano che un tasso di riduzione di resa del 60-75% è spiegato da una relazione lineare con l'indice di rischio di siccità basato sul Palmer Drought Severity Index (Palmer 1965). Assumendo che la relazione lineare tra l'indice di rischio siccità e YRR si mantenga nel futuro, Liet al. (2009)

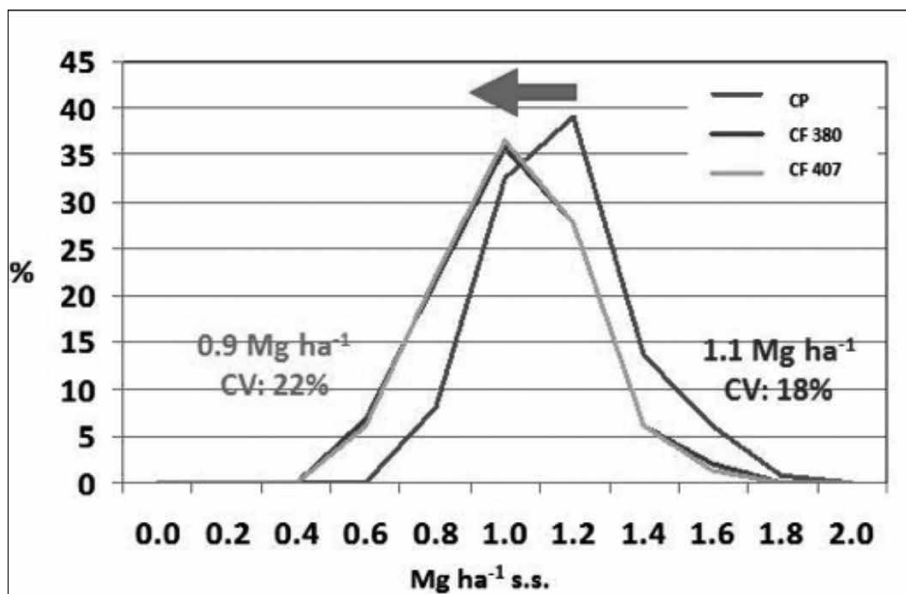


Fig. 5 Distribuzione di frequenza per la resa del pascolo nel periodo primaverile, in funzione dei diversi scenari climatici. CP: clima presente; CF: clima futuro; 380: CO_2 380 ppm; 407: CO_2 407 ppm. CV = coefficiente di variabilità

hanno stimato incrementi delle riduzioni di resa di oltre il 50% entro il 2050 per le principali colture.

Risultato analogo è stato ottenuto nell'analisi dell'impatto del CC sugli erbai asciutti. Anche in questo caso le produzioni attese diminuiscono da circa $3,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ con CP (CV: 9%) a circa $3,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ (CV: 11%) con CF (fig. 6).

Come riportato da diversi autori (Hopkins e Del Prado, 2007; Tubiello et al., 2007), gli impatti attesi dall'incremento della temperatura e dei livelli di CO_2 a causa dei cambiamenti climatici, riguardano il cambiamento degli intervalli di crescita ottimali delle colture, le nuove dinamiche di competizione intraspecifica e inter-specifica per l'utilizzo delle risorse, il cambiamento della composizione floristica e quindi del valore agronomico dei pascoli (Thornton et al., 2009). La composizione floristica dei pascoli e la gestione dei sistemi foraggeri asciutti sono elementi determinanti per le produzioni colturali e animali in sistemi foraggeri estensivi. Nel contesto della Sardegna, nonostante l'elevata specializzazione raggiunta, l'allevamento estensivo di ovini da latte o bovini da carne è ancora basato principalmente sull'alimentazione al pascolo di risorse foraggere spontanee o erbai asciutti. Considerando la stagionalità produttiva e il

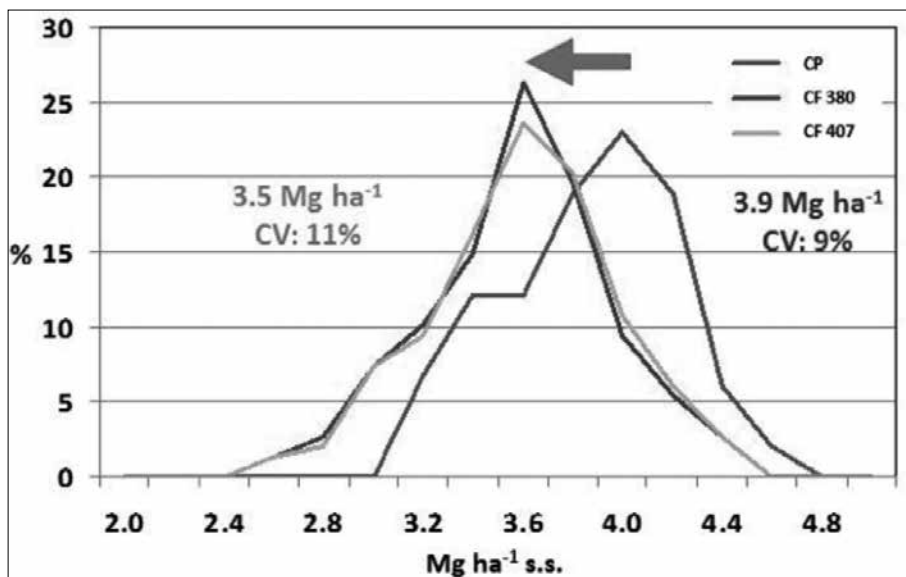


Fig. 6 Distribuzione di frequenza per la resa degli erbai asciutti in funzione dei diversi scenari meteorologici. CP: clima presente; CF: clima futuro; 380: $\text{CO}_2=380$ ppm; 407: $\text{CO}_2=407$ ppm. CV = coefficiente di variabilità

sistema di alimentazione di questi sistemi, la stagione invernale rappresenta un periodo critico per la ridotta disponibilità di risorse foraggiere offerte dal pascolo rispetto alle esigenze nutritive degli animali. In questo periodo infatti gli ovini da latte sono in piena lattazione e i bovini da carne in piena fase di allattamento dei vitelli, le cui nascite si concentrano nel periodo autunno-invernale. Oggi il deficit viene sopperito con l'impiego di integrazioni alimentari a base di concentrati e fieno. Questo sistema di gestione degli ovini ha consentito, assieme al miglioramento genetico, di aumentare il livello produttivo degli animali, ma allo stesso tempo ha comportato anche un incremento dei costi di produzione e in particolare di quelli alimentari, che attualmente rappresentano circa il 45% delle spese variabili aziendali (Idda et al., 2010). In questo contesto, le riduzioni delle rese previste per erbai e pascoli nella stagione primaverile, potranno avere implicazioni rilevanti che si tradurranno in maggiori costi per l'approvvigionamento di risorse alimentari extra-aziendali.

PROSPETTIVE PER LA RICERCA

I risultati conseguiti dalle due esperienze di ricerca illustrate in questo lavoro of-

frono spunti di riflessione su come sviluppare in modo efficace la ricerca scientifica nazionale sul futuro delle risorse alimentari per gli allevamenti zootecnici italiani e, in particolare, sul futuro dei sistemi pastorali e dei sistemi colturali intensivi, in un contesto di cambiamento climatico. Sino al recente passato, l'approccio della ricerca agronomica sul tema si limitava a valutazioni sperimentali in campo finalizzate a mettere a punto metodi agronomici efficaci e economicamente sostenibili in diversi contesti ambientali. Gran parte dei risultati di queste ricerche sono pubblicati in letteratura "grigia" in lingua italiana e sono per lo più sconosciute alla comunità scientifica internazionale. Più recentemente, lo sviluppo dei modelli matematici di simulazione di tipo deterministico ha permesso di ampliare i campi di applicazione delle valutazioni quantitative e l'inferenza delle valutazioni sperimentali puntuali che in passato erano basate nel migliore dei casi su analisi descrittive di tipo statistico.

L'analisi dei casi di studio italiani illustrati in questo lavoro ha messo in evidenza anche le potenzialità e limiti degli approcci seguiti. Pur se differenti nel percorso analitico scelto in termini di scala e strumenti e negli obiettivi specifici, le due analisi proposte offrono numerosi elementi quantitativi sull'impatto atteso dai cambiamenti climatici sulle produzioni di pascoli e colture foraggere in diversi contesti ambientali italiani. Il principale punto di forza di queste valutazioni è che utilizzano strumenti di analisi basati su teorie consolidate e validate scientificamente e su solidi archivi dati raccolti a scala locale o globale, che ne hanno permesso una accurata calibrazione. Potenzialmente, con questi approcci si potrebbero effettuare valutazioni quantitative ex ante su tutto il territorio nazionale della produzione di alimenti zootecnici nei vari distretti rurali italiani. Le precondizioni per questo tipo di valutazione sono la disponibilità di dati di base (clima, suolo, risorse, gestione agronomica) su tutto il territorio nazionale a un livello di dettaglio coerente con la precisione richiesta per la stima e adeguati strumenti per la spazializzazione dei dati (Hoffman et al. 2015; Kollas et al., 2015; Zhao et al., 2015 e 2016).

Per quanto riguarda i sistemi colturali intensivi, la disponibilità di dati è facilitata dal fatto che si basano in genere su monoculture ben caratterizzate per tipologia, fenologia e risposta ai vari fattori di stress, per le quali i modelli sono stati abbondantemente validati (es. mais). Tuttavia, sono ancora troppo poche le esperienze di campo e le valutazioni modellistiche riguardanti le relazioni tra tecnica colturale (es. fertilizzazione) ed emissioni di GHG in sistemi foraggeri intensivi mediterranei (es. Pulina et al., 2016).

Nel caso invece dei sistemi foraggeri estensivi basati sui prati e pascoli naturali, si tratta spesso di formazioni vegetali complesse, che rispondono in modo non lineare e fortemente dipendente dalla composizione floristica

ai diversi fattori di stress. Inoltre, i pascoli fanno riferimento ad aree marginali, caratterizzate da importanti limitazioni alla resa associate alla fertilità e profondità del suolo e alla disponibilità idrica, cosa che rende le performance dei modelli meno affidabili di quelle conseguibili in condizioni idriche e nutrizionali non limitanti.

Da queste considerazioni scaturisce una prima indicazione sulle prospettive di ricerca italiana per la produzione di alimenti zootecnici in un contesto di cambiamenti climatici. Dato che i modelli colturali sono gli unici strumenti a disposizione della scienza per quantificare gli impatti del cambiamento climatico sulle rese, l'investimento sulla ricerca agro-ecologica finalizzata a produrre dataset affidabili per lo sviluppo, la calibrazione e validazione di questi strumenti è indispensabile per poter quantificare gli effetti del cambiamento e valutare gli effetti dell'adattamento, non solo sulle rese ma anche sulle implicazioni relative alla sostenibilità economica (Dono et al., 2013) e ambientale (Deyetieux et al., 2016). I dispositivi sperimentali di lunga durata rappresentano uno strumento fondamentale per poter validare gli effetti di lungo termine di diverse tecniche di gestione non solo sulle rese ma anche sulla qualità del suolo, il sequestro di C e le emissioni di gas climalteranti (Roggero, 2016). Nel caso dei sistemi colturali intensivi, le sperimentazioni di lunga durata possono essere condotte in campi sperimentali realizzati ad hoc, nei quali il controllo dei principali fattori di produzione è elevato. Nel caso di colture foraggere estensive e pascoli, le sperimentazioni di lunga durata consistono in osservatori per il monitoraggio di situazioni agronomicamente stabili da un tempo sufficiente a garantire l'interpretazione delle dinamiche dei processi biofisici che regolano la produttività e i servizi ecologici di quegli ecosistemi. In Italia sono state condotte numerose ricerche, in particolare negli anni '80, sulla caratterizzazione e la produttività dei pascoli (es.: Sarno et al., 1989; Cavallero et al., 1992), ma raramente i dati raccolti sono stati finalizzati alla calibrazione di modelli matematici. Peraltro, sono pochi anche i lodevoli esempi di caratterizzazione delle risorse pastorali (Cavallero et al., 2007), che costituiscono una base di conoscenza indispensabile per qualsiasi applicazione, anche di tipo modellistico. La disponibilità di osservatori di lunga durata e di protocolli di monitoraggio della gestione, dei parametri produttivi ed ecofisiologici delle colture, dei suoli e del clima, in diversi ambienti del territorio nazionale rappresentativi della diversità di tipologie di pascoli, costituirebbe un'ottima base dati per poter utilizzare in modo appropriato gli strumenti modellistici per valutazioni quantitative. Un aspetto particolarmente critico, che meriterebbe adeguata attenzione nell'ottica di valorizzare appieno gli strumenti modellistici, è quello della disponibilità di serie di dati meteorologici affidabili e

su base almeno giornaliera. La rete di stazioni meteo in Italia è estremamente frammentaria, spesso associata ad ambienti non rurali (es. aeroporti o porti) e con una disponibilità dei dati non aggregata, spesso insufficiente per tenere conto della variabilità microclimatica che caratterizza i distretti pastorali della penisola e delle isole. Per quanto riguarda i suoli, ancora oggi in molte regioni d'Italia la scala della cartografia pedologica è insufficiente perché troppo ampia per poter tenere conto della grande variabilità spaziale che caratterizza i suoli nazionali. Infine, il monitoraggio delle pratiche è ancora insufficiente, perché troppo spesso orientato alla valutazione economica e non a quella agronomica. Ad esempio, la rete RICA (Rete Italiana di Contabilità Agraria) non prevede la raccolta di dati aziendali relativi alle produzioni delle colture, alle caratteristiche dei suoli e alla gestione agronomica. Una integrazione di quella rete con dati agronomici e climatici sarebbe già un importante passo in avanti nella direzione di supportare con valutazioni quantitative le scelte di politica di sviluppo rurale.

La disponibilità di basi di dati ben progettate e affidabili, accoppiata con strumenti modellistici, consentirebbe non solo di valutare gli effetti quantitativi del cambiamento climatico sulle rese, ma anche di migliorare le stime sulla variabilità interannuale delle rese stesse, sul ciclo dell'acqua e dei nutrienti, sulle emissioni di gas climalteranti e il sequestro del C. Sarebbe inoltre possibile effettuare analisi di scenario più accurate di quelle proposte nelle due esperienze illustrate, incluse le analisi sull'impatto delle scelte di politica agraria.

Gli strumenti modellistici hanno ancora alcune limitazioni intrinseche che non consentono per il momento una compiuta valutazione degli impatti del clima sui sistemi colturali per l'alimentazione degli animali. Uno è quello della qualità del foraggio, aspetto raramente integrato nelle valutazioni modellistiche ma non per questo poco importante. Altri aspetti raramente considerati dai modelli sono le interazioni biotiche con altre componenti dell'ecosistema, come parassiti, insetti ecc. che direttamente (es. sulla pianta) o indirettamente (es. attraverso la biodiversità funzionale) condizionano il funzionamento dell'agro-ecosistema. Il superamento di questi limiti e di altri prima accennati relativi agli strumenti modellistici applicati ai sistemi colturali in genere e foraggeri in particolare implica un percorso articolato e di livello internazionale. Negli ultimi anni, proprio a seguito della crescente domanda di ricerca sugli impatti attesi dal cambiamento climatico o sulle più efficaci strategie per la mitigazione e l'adattamento, è aumentata progressivamente nella comunità scientifica agronomica la consapevolezza di progettare percorsi di ricerca pluriennali che coinvolgessero il maggior nu-

mero possibile di ricercatori impegnati nello sviluppo di modelli e/o nella produzione di dati sperimentali idonei alla loro calibrazione e validazione. È a questa filosofia che si ispirano il progetto globale AgMIP (*Agricultural Model Intercomparison Protocol*) e quello europeo MACSUR (*Modelling European Agriculture for food Security with climate change*), che coinvolgono centinaia di gruppi di ricerca in tutto il mondo. L'aggregazione di una massa critica di ricercatori così ampia è di fondamentale importanza per condividere percorsi convergenti orientati a sviluppare nel più breve tempo possibile strumenti modellistici e dataset per analisi di scenario affidabili. Le prime fasi di studio di questi progetti hanno messo immediatamente in evidenza quanto l'incertezza delle previsioni associata alla scelta del modello sia spesso maggiore rispetto a quella associata alle previsioni climatiche future offerte dai modelli di circolazione globale (Asseng et al., 2013). Ciò non deve meravigliare, in quanto ogni modello è espressione del contesto culturale nel quale è stato sviluppato e quindi è particolarmente accurato per alcuni processi e meno per altri. Lo sforzo in atto è orientato a condividere potenzialità e limiti dei vari strumenti e a costruire piattaforme che consentano di combinare diversi moduli da diversi modelli con l'obiettivo di migliorare la qualità delle simulazioni in ogni situazione. Gli esercizi di “*model intercomparison*” consentono di valutare il grado di incertezza associato ai modelli utilizzando un unico dataset di input e valutando gli output dei modelli rispetto ai dati effettivamente osservati o alle risposte relative di ciascun modello rispetto agli altri (es. Kollas et al., 2015). L'incertezza delle valutazioni riguarda, come è noto, anche la generazione di scenari climatici futuri, sia perché questi dipenderanno da dinamiche di emissione di GHG a scala globale di difficile previsione, sia per i limiti associati alla elevata variabilità degli output dei diversi modelli che generano gli scenari climatici globali a parità di scenario di emissione e al *downscaling* che permette di adattarli alle condizioni locali (Dubrovsky et al., 2015). L'incertezza aumenta in particolare per stime di lungo periodo, come è lecito attendersi, e per analisi a scala regionale (Ma et al., 2015).

La maggior parte dei modelli oggi disponibili non è progettata per simulare le specifiche dinamiche che caratterizzano le praterie e i pascoli naturali, la loro complessa composizione, soprattutto in ambiente mediterraneo dove prevalgono le specie a ciclo annuale la cui dinamica è associata alla dinamica della banca del seme presente nel terreno. A oggi, questa problematica viene affrontata attraverso assunzioni e semplificazioni che, pur consentendo simulazioni di resa sufficientemente affidabili, non consentono di fare valutazioni quantitative sulle successioni ecologiche tipiche delle dinamiche di intensifi-

cazione o abbandono e quindi sulla biodiversità e sui servizi ecologici a essa associati.

Affrontare questi limiti rappresenta una sfida per la ricerca scientifica a livello nazionale e internazionale. Il progetto MACSUR¹ ha una specifica attività in corso sulla simulazione modellistica di prati e pascoli e al quale collabora anche una partnership italiana (Ma et al, 2014) o altre iniziative simili, come quella Models4Pasture a cui collabora l'Università di Firenze. Un'altra rete globale, orientata alla riduzione delle emissioni di GHG è la Global Research Alliance², su cui le risorse nazionali sono decisamente insufficienti. A queste iniziative la ricerca italiana partecipa in maniera diversa a seconda delle specifiche caratteristiche dei progetti. L'Italia collabora a MACSUR con 11 unità di ricerca di Università ed Enti di Ricerca nazionali (CNR, CREA, ENEA) coordinate dall'Università di Sassari. Models4Pasture è un progetto di ricerca sviluppato sempre nel contesto della JPI FACCE che però non ha permesso, per la scarsa disponibilità di fondi e per come era stato progettato il bando, la costituzione di partnership italiane sufficientemente ampie da costituire una massa critica di ricercatori. È proprio la massa critica di ricercatori organizzati a livello nazionale che invece sarebbe necessario costruire per poter svolgere un ruolo efficace e conseguire un significativo impatto nelle politiche di autoapprovvigionamento di alimenti per gli allevamenti zootecnici. Nel campo dei sistemi colturali erbacei il progetto PRIN IC-FAR³ ha svolto un ruolo importante nel recuperare una massa critica di dati di esperimenti italiani di lunga durata che è stata raccolta in un database strutturato in modo da poter essere automaticamente utilizzato come input di diversi modelli di simulazione. È recentissima la pubblicazione di un numero speciale dell'European Journal of Agronomy dedicato ad alcuni di questi dataset e alle metodologie di gestione anche statistica di dati di prove di lunga durata (Roggero, 2016). Questo sforzo andrebbe realizzato anche nel campo dei sistemi colturali orientati alla produzione di alimenti zootecnici, nell'intento di assicurare una base scientifica solida alle azioni di mitigazione e adattamento al cambiamento climatico e alle scelte politiche per assicurare la produzione sostenibile di alimenti zootecnici.

Le lezioni apprese da queste esperienze hanno permesso di mettere a fuoco le domande di ricerca e offrono spunti per possibili percorsi strategici di ricerca a supporto di risposte adattative efficaci alle mutate condi-

¹ www.macsur.eu

² www.globalresearchalliance.org

³ www.icfar.it

zioni climatiche che siano anche compatibili con azioni di mitigazione. Per poter rispondere in modo efficace alle domande di ricerca emerse dalle esperienze illustrate, occorre investire su una maggiore aggregazione dei gruppi di ricerca nazionali, al fine di aumentare la capacità di coordinare iniziative anche a livello internazionale che catalizzino attenzione e risorse per la ricerca sperimentale su sistemi per la produzione di alimenti zootecnici in contesti mediterranei. L'aggregazione di gruppi di ricerca è oggi ostacolata dai sistemi di finanziamento e valutazione della ricerca nazionali che, favorendo la competizione interna, ostacolano di fatto la costituzione di unità di ricerca miste, composte cioè da ricercatori di diversi atenei o Enti di ricerca. Ciò rende il sistema di ricerca nazionale troppo frammentario e quindi inadeguato ad affrontare temi di ampia portata come quelli affrontati in questo lavoro. L'iniziativa di singoli gruppi di ricerca di singoli atenei o enti di ricerca, la cui produttività scientifica è spesso molto elevata se messa in rapporto ai finanziamenti disponibili, è tuttavia fortemente limitata e non competitiva quando orientata al coordinamento di iniziative internazionali, che vengono invece intraprese da istituzioni di ricerca di altri paesi europei, dove la comunità scientifica in campo agro-zootecnico è istituzionalmente più aggregata e l'organizzazione amministrativa è progettata per garantire il necessario supporto strumentale alla progettualità di livello internazionale.

RIASSUNTO

Con l'obiettivo di fare il punto sullo stato e le prospettive della ricerca italiana per la produzione di alimenti zootecnici, questo lavoro analizza i cambiamenti che hanno interessato i principali sistemi foraggeri italiani in ambiente montano e mediterraneo, sotto l'impulso delle profonde modifiche socio-economiche caratterizzanti l'agricoltura italiana degli ultimi decenni. Si fa riferimento a due esperienze di ricerca maturate in Italia sui possibili impatti dei cambiamenti climatici sull'organizzazione e il funzionamento di sistemi foraggeri in diversi contesti ambientali: sistemi foraggeri mediterranei intensivi e agro-pastorali, sistemi pastorali alpini e appenninici. L'analisi riguarda principalmente l'evoluzione della distribuzione delle diverse risorse pastorali montane e delle rese e stabilità produttiva delle risorse foraggiere in ambiente mediterraneo. Dall'analisi di casi studio sono emersi punti di forza e criticità dei sistemi foraggeri italiani, da cui potrebbero essere sviluppate risposte adattative efficaci per fronteggiare i cambiamenti globali se opportunamente supportate da ricerche sperimentali di lunga durata e moderni strumenti di analisi. Infatti, pur operando su contesti ambientali differenti, per collocazione territoriale e tipologia di sistema d'allevamento, e con finalità diverse, i due gruppi di ricerca che hanno contribuito alla stesura del lavoro hanno individuato priorità per la ricerca, percorsi comuni e metodologie, quali l'uso degli strumenti modellistici e dei

Sistemi Informativi Territoriali, che si propongono come una solida base di riferimento da adottare per le future ricerche sull'approvvigionamento di alimenti zootecnici in un contesto di cambiamenti climatici.

ABSTRACT

The objective of this paper was to review the current and future perspectives of the research on the production of forages and feeds in Italy, starting from the analysis of the ongoing changes in Mediterranean and mountain environments, driven by the deep socio-economic changes that characterized the Italian agricultural contexts in the last decades. Two Italian research experiences are here reported on the potential impacts of climate change on the management and functioning of forage systems in different environmental contexts: intensive and agro-pastoral Mediterranean forage systems, Alpine and Apennine pastoral systems. The analyses are mainly referred to the expected evolution of the distribution of the mountain pastoral resources and of the forage production and stability of forage resources under Mediterranean conditions. From the case study analyses, strengths and weaknesses of the Italian forage systems were identified, from which effective adaptive responses to global changes could potentially emerge if adequate long term experimental research and innovative tools are used. Although the two research teams contributing to this paper operated in different contexts in terms of livestock systems, environmental conditions and research purposes, they identified common research priorities, pathways and methodologies, such as modelling tools and Landscape Information Systems, that could represent robust approaches to be adopted for future studies on the provision of forages and feeds for livestock farming in a climate changing world.

BIBLIOGRAFIA

- AIRES L.M.I., PIOC A., PEREIRA J.S. (2008): *Carbondioxide exchange above a Mediterranean C3/C4grassland during two climatologically contrasting years*, «Global Change Biology», 14, pp. 539-555.
- ALLOUCHE O., TSOAR A., KADMON R. (2006): *Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS)*, «Journal of Applied Ecology», 43, pp. 1223-1232.
- ARGENTI G., BIANCHETTO E., SABATINI S., STAGLIANÒ N., TALAMUCCI P. (2002): *Indicazioni operative per la gestione delle risorse pastorali nei Parchi Nazionali*, in *Linee guida per la gestione ecosostenibile delle risorse forestali e pastorali nei Parchi Nazionali*, Ciancio O., Corona P., Marchetti M., Nocentini S. (a cura di), Ministero dell'Ambiente e della Tutela del territorio, Servizio Conservazione della Natura, Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze, pp. 155-203.
- ARGENTI G., LOMBARDI G. (2012): *The pasture-type approach for mountain pasture description and management*, «Italian Journal of Agronomy», 7, pp. 293-299.
- ARONSON J., FLORET L., LE FLOCH E., OVALLE C., PONTANIER R. (1993): *Restoration and rehabilitation of degraded ecosystems in arid and semi-arid lands*, «Restoration Ecology», 1, pp. 8-17.

- ASSENSG S., EWERT F., ROSENZWEIG C., JONES J.W., HATFIELD J.L., RUANE A.C., BOOTE K.J., THORBURN P.J., ROTTER R.P., CAMMARANO D., BRISSON N., BASSO B., MARTRE P., AGGARWAL P.K., ANGULO C., BERTUZZI P., BIERNATH C., CHALLINOR A.J., DOLTRA J., GAYLER S., GOLDBERG R., GRANT R., HENG L., HOOKER J., HUNT L.A., INGWERSEN J., IZAURRALDE R.C., KERSEBAUM K.C., MULLER C., KUMAR S.N., NENDEL C., O'LEARY G., OLESEN J.E., OSBORNE T.M., PALOSUO T., PRIESACK E., RIPOCHE D., SEMENOV M.A., SHCHERBAK I., STEDUTO P., STOCKLE C., STRATONOVITCH P., STRECK T., SUPIT I., TAO F., TRAVASSO M., WAHA K., WALLACH D., WHITE J.W., WILLIAMS J.R., WOLF J. (2013): *Uncertainty in simulating wheat yields under climate change*, «Nature Climate Change», 3, pp. 827-832.
- BAGELLA S., CARIA M.C., FARRIS E., ROSSETTI I., FILIGHEDDU R. (2016): *Traditional land uses enhanced plant biodiversity in a Mediterranean agro-silvo-pastoral system*, «Plant Biosystems», 150 (2), pp. 201-207. doi: 10.1080/11263504.2014.943319.
- BAGELLA S., SALIS L., MARROSU M., ROSSETTI I., FANNI S., CARIA M.C., ROGGERO P.P. (2013): *Effects of long-term management practices on grassland plant assemblages in Mediterranean cork oak silvo-pastoral systems*, «Plant Ecology», vol. 214, pp. 621-631.
- BARTOLINI F., BAZZANI G. M., GALLERANI V., RAGGI M., VIAGGI D. (2007): *The impact of water and agriculture policy scenarios on irrigated farming systems in Italy: An analysis based on farm level multi-attribute linear programming models*, «Agricultural Systems», 93, pp. 90-114.
- BENISTON M., KELLER F., GOYETTE S. (2003): *Snow pack in the Swiss Alps under changing climatic conditions: an empirical approach for climate impacts studies*, «Theoretical and Applied Climatology», 74, pp. 19-31.
- BENNETZEN E.H., SMITH P., PORTER J.R. (2016): *Decoupling of greenhouse gas emissions from global agricultural production: 1970-(2050)*, «Global Change Biology», 22, pp. 763-781, doi: 10.1111/gcb.13120.
- BENVENUTI S. (2009): *Potenziale impatto dei cambiamenti climatici nell'evoluzione floristica di fitocenosi spontanee in agroecosistemi mediterranei*, «Italian Journal of Agronomy», 1, pp. 45-67.
- BJÖRK R.G., MOLAU U. (2007): *Ecology of Alpine snowbeds and the impacts of global change*, «Arctic, Antarctic and Alpine Research», 39, pp. 34-43.
- BLANCO G., GERLAGH R., SUH S., BARRETT J., DE CONINCK H., DIAZ MOREJON C., MATHUR R., NAKICENOVIC N., OFOSU AHENKORAH A., PAN J., PATHAK H., RICE J., RICHELIS R., SMITH S., STERN D., TOTH F., ZHOU P. (2014): *Drivers, Trends and Mitigation*, in *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, Cambridge, United Kingdom; New York, NY, USA.
- BLOOR J.M.G., BARTHES L., LEADLEY P.W. (2008): *Effects of elevated CO₂ and N on tree-grass interactions: an experimental test using Fraxinus excelsior and Dactylis glomerata*, «Functional Ecology», 22, pp. 537-546.
- BOCCHIOLA D., DIOLAUTI G. (2009): *Evidence of climatic trends in the Adamello glacier of Italy*, «Theoretical and Applied Climatology», 100, 3-4, pp. 351-369, 2010, doi: 10.1007/s00704-009-0186-x.
- BOCCHIOLA D., GROPELLI B. (2010): *Spatial estimation of Snow Water Equivalent at different dates within the Adamello Park of Italy*, «Cold Regions Science and Technology», 63 (3), pp. 97-109.
- BONANOMI G., INCERTI G., ALLEGREZZA M. (2013): *Assessing the impact of land abandonment, nitrogen enrichment and fairy-ring fungi on plant diversity of Mediterranean grasslands*, «Biodiversity and conservation», 22 (10), pp. 2285-2304.

- BREIMAN L (2001): *Random forests*, «Machine Learning», 45, pp. 5-32.
- BROWN R.A., ROSENBERG N.J. (1997): *Sensitivity of crop yield and water use to change in a range of climatic factors and CO₂ concentrations: a simulation study applying EPIC to the central USA*, «Agricultural and Forest Meteorology», 83, pp. 171-203.
- BROWN R.A., ROSENBERG N.J. (1999): *Climate change impacts on the potential productivity of corn and winter wheat in their primary United States growing regions*, «Climatic Change», 41, pp. 73-107.
- BÜTOF A., VON RIEDMATTEN L.R., DORMANN C.F., SCHERER-LORENZEN M., WELK E., BRUELHEIDE H. (2012): *The responses of grassland plants to experimentally simulated climate change depend on land use and region*, «Global Change Biology», 18, pp. 127-137.
- CABALLERO R., FERNÁNDEZ-GONZÁLES F., PÉREZ BADIA R., MOLLE G., ROGGERO P.P., BAGELLA S., D'OTTAVIO P., PAPANASTASIS V.P., FOTIADIS G., SIDIROPOULOU A., IPIKOU-
DIS I. (2009): *Grazing systems and biodiversity in Mediterranean areas: Spain, Italy and Greece*, «Revista Pastos», 39, 1, pp. 3-154.
- CAMPBELL A., KAPOV V., SCHARLEMANN J. P.W., BUBB P., CHENERY, A., COAD, L., DICK-
SON, B., DOSWALD N., KHAN M.S.I., KERSHAW F., RASHID M. (2009): *Review of the Literature on the Links between Biodiversity and Climate Change: Impacts, Adaptation and Mitigation*, Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal, Technical Series, No. 42, 124 pages.
- CANNONE N., DIOLAIUTI G., GUGLIELMIN M., SMIRAGLIA C. (2008): *Accelerating climate change impacts on alpine glacier forefield ecosystems in the European Alps*, «Ecological Applications», 18, pp. 637-648.
- CANNONE N., SGORBATI S., GUGLIELMIN M. (2007): *Unexpected impacts of climate change on alpine vegetation*, «Frontiers in Ecology and the Environment», 5, pp. 360-364.
- CARLIER L., ROTAR I., VLAHOVA M., VIDICAN R. (2009): *Importance and functions of grasslands*, «Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca», 37, pp. 25-30.
- CASALEGNO S., AMATULLI G., BASTRUP-BIRK A., DURRANT T., PEKKARINEN A. (2011): *Modelling and mapping the suitability of european forest formations at 1-km resolution*, «European Journal of Forest Research», 130, pp. 971-981.
- CAVALLERO A., ACETO P., GORLIER A., LOMBARDI G., LONATI M., MARTINASSO B., TAGLIA-
TORI C. (2007): *I tipi pastorali delle Alpi piemontesi*, Alberto Perdida Editore, Bologna.
- CAVALLERO A., CORGNATI M., PIAZZI M., SOSTER M. (2005a): *I tipi pastorali degli areali alpini piemontesi. Prima parte*, «Sherwood», 112, pp. 25-29.
- CAVALLERO A., CORGNATI M., PIAZZI M., SOSTER M. (2005b): *I tipi pastorali degli areali alpini piemontesi. Seconda parte*, «Sherwood», 113, pp. 35-40.
- CAVALLERO A., RIVOIRA G., TALAMUCCI P. (2002): *Pascoli*, in *Coltivazioni erbacee. Foraggiere e tappeti erbosi*, Baldoni R., Giardini L. (eds.), Patron Editore, Bologna, pp. 239-294.
- CAVALLERO A., TALAMUCCI P., GRIGNANI C., REYNERI A., ZILLOTTO U., SCOTTON M., BIANCHI A.A., SANTILOCCHI R., BASSO L., POSTIGLIONE L., CARONE F., CORLETO A., CAZZATO E., CASSANITI S., COSENTINO S., LITRICO P.G., LEONARDI S., SARNO R., STRINGI L., GRISTINA L., AMATO G., BULLITTA P., CAREDDA S., ROGGERO P.P., CAPO-
RALI F., D'ANTUONO L.F., PARDINI A., ZAGNI C., PIEMONTESE S., PAZZI G., COSTA G., PASCAL G., ACUTIS M. (1992): *Caratterizzazione della dinamica produttiva di pascoli naturali italiani*, «Rivista di Agronomia», 3 Suppl., pp. 325-343.
- CHAMAILLÉ-JAMMES S., BOND W.J. (2010): *Will global change improve grazing quality of grasslands? A call for a deeper understanding of the effects of shifts from C4 to C3 grasses for large herbivores*, «Oikos», 119, pp. 1857-1861.

- CHAPMAN R., ASSENG S. (2001): *An analysis of the frequency and timing of false break events in the Mediterranean region of Western Australia*, «Australian Journal of Agricultural Research», 52, pp. 367-376.
- CHAVAS D.R., IZAURRALDE R.C., THOMSON A.M., GAO X. (2009): *Long-term climate change impacts on agricultural productivity in eastern China*, «Agricultural and Forest Meteorology», 149 (6-7), pp. 1118-1128.
- CUTLER D.R., EDWARDS T.C. JR, BEARD K.H., CUTLER A., HESS K.T., GIBSON J., LAWLER J. (2007): *Random forests for classification in ecology*, «Ecology», 88, pp. 2783-2792. doi:10.1890/07-0539.1.
- DE GROOT R.S. (1987): *Assessment of the potential shifts in Europe's natural vegetation due to climatic change and the implications for conservation*, Young Scientists Summer Program 1987, Final Report, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxemburg (Austria).
- DEMURTAS C.E., SEDDAIU G., LEDDA L., CAPPAL C., DORO L., CARLETTI A., ROGGERO P.P. (2016): *Replacing organic with mineral N fertilization does not reduce nitrate leaching in double crop forage systems under Mediterranean conditions*, «Agriculture, Ecosystems & Environment», 219, pp. 83-92.
- DEYTIEUX V., MUNIER-JOLAIN N., CANEILL J. (2016): *Assessing the sustainability of cropping systems in single- and multi-site studies. A review of methods*, «European Journal of Agronomy», 72, pp. 107-126.
- DHAKHWA G.B., LEE CAMPBELL C., LEDUC S.K., COOTER E.J. (1997): *Maize growth: assessing the effects of global warming and CO₂ fertilization with crop models*, «Agricultural and Forest Meteorology», 87 (4), pp. 253-272.
- DIBARI C., ARGENTI G., MORIONDO M., STAGLIANÒ N., TARGETTI S., BINDI M. (2013): *Climate change impacts on distribution and composition of the Alpine Natural Pasturelands*, in Proc. 1st Annual Conference Climate change and its implications on ecosystem and society, Società Italiana per le Scienze del Clima, Lecce, Italy, pp. 578-586.
- DIBARI C., BINDI M., MORIONDO M., STAGLIANÒ N., TARGETTI S., ARGENTI G. (2016): *Spatial data integration for the environmental characterization of pasture macro-types in the Italian Alps*, «Grass and Forage Science», 71, pp. 219-234, DOI: 10.1111/gfs.12168.
- DIBARI C., ARGENTI G., CATOLFI F., MORIONDO M., STAGLIANÒ N., BINDI M. (2015): *Pastoral suitability driven by future climate change along the Apennines*, «Italian Journal of Agronomy», 10 (3), pp. 109-116.
- DIRNBÖCK T., DULLINGER S., GRABHERR G. (2003): *A regional impact assessment of climate and land-use change on alpine vegetation*, «Journal of Biogeography», 30, pp. 401-417.
- DONO G., CORTIGNANI R., DORO L., GIRALDO L., LEDDA L., PASQUI M., ROGGERO P.P. (2013): *Adapting to uncertainty associated with short-term climate variability changes in irrigated Mediterranean farming systems*, «Agricultural Systems», 117, pp. 1-12.
- DUBROVSKY M., TRNKA M., HOLMAN I. P., SVOBODOVA E., HARRISON, P. A. (2015): *Developing a reduced-form ensemble of climate change scenarios for Europe and its application to selected impact indicators*, «Climatic Change», 128 (3-4), pp. 169-186.
- DUMONT B., ANDUEZA D., NIDERKORN V., LUSCHER A., PORQUEDDU C., PICON-COCHARD C. (2015): *A meta-analysis of climate change effects on forage quality in grasslands: perspectives for mountain and Mediterranean areas*, «Grass and Forage Science», 70, pp. 239-254.
- EASTERLING W.E., CROSSON P.R., ROSENBERG N.J., MCKENNEY M.S., KATZ L.A., LEON K.M. (1993): *Paper 2. Agricultural impacts of and responses to climate change in the Missouri-Iowa-Nebraska-Kansas (MINK) region*, «Climatic Change», 24, pp. 23-61.

- ELITH J., GRAHAM C.H. (2009): *Do they? How do they? Why do they differ? On finding reasons for differing performances of species distribution models*, «Ecography», 32, pp. 66-77.
- ENGLER R., RANDIN C.F., THUILLER W., DULLINGER S., ZIMMERMANN N.E., ARAÚJO M.B., PEARMAN P.B., LE LAY G., PIEDALLU C., ALBERT C.H., CHOLER P., COLDEA G., DE LAMO X., DIRNBÖCK T., GÉGOUT J.C., GÓMEZ-GARCÍA D., GRYNES J.A., HEEGAARD E., HØISTAD F., NOGUÉS-BRAGO D., NORMAND S., PUCA M., SEBASTIÀ M.T., STANISCI A., THEURILLAT J.P., TRIVEDI M.R., VITTOZ P., GUISAN A. (2011): *21st century climate change threatens mountain flora unequally across Europe*, «Global Change Biology», 17, pp. 2330-41.
- EVANS J.S., CUSHMAN S.A. (2009): *Gradient modeling of conifer species using random forests*, «Landscape Ecology», 24, pp. 673-683.
- EVANS J.S., MURPHY M.A., HOLDEN Z. A., DREW C.A., WIERSMA Y. F., HUETTMANN F. (2011): *Modeling Species Distribution and Change Using Random Forest*, in *Predictive Species and Habitat Modeling in Landscape Ecology*, Drew C. A. et al. (eds), Cap. 8, pp. 139-159, Springer Science+Business Media. DOI 10.1007/978-1-4419-7390-0_8.
- GAVAZOV K., SPIEGELBERGER T., BUTTLER A. (2014): *Transplantation of subalpine wood-pasture turfs along a natural climatic gradient reveals lower resistance of unwooded pastures to climate change compared to wooded ones*, «Oecologia», 174, pp. 1425-35.
- GIARDINI A., VECCHIETTINI M. (2002): *Generalità sulle Colture da Foraggio*, in Baldoni R., Giardini R. (eds), *Coltivazioni Erbacee – Foraggiere e Tappeti Erbosi*, Patron Editore, Bologna, pp. 21-31.
- GIOLA P., BASSO B., PRUNEDDU G., GIUNTA F., JONES J.W. (2012): *Impact of manure and slurry applications on soil nitrate in a maize–triticale rotation: Field study and long term simulation analysis*, «European Journal of Agronomy», 38, pp. 43-53.
- GOTTFRIED M., PAULI H., FUTSCHIK A., AKHALKATSI M., BARANOK P., ALONSO J.L.B., COLDEA G., JAN D., ERSCHBAMER B., CALZADO M.R.F., KAZAKIS G., KRAJI J., LARSSON P., MALLAUN M., MICHELSEN O., MOISEEV D., MOISEEV P., MOLAU U., MERZOUKI A., NAGY L., NAKHUTSRISHVILI G., PEDERSEN B., PELINO G., PUSCAS M., ROSSI G., STANISCI A., THEURILLAT J.P., TOMASELLI M. (2012): *Continentwide response of mountain vegetation to climate change*, «Nature Climate Change», 2, pp. 111-115.
- GRABHERR G., GOTTFRIED M., PAULI H. (1994): *Climate effects on mountain plants*, «Nature», pp. 369-448.
- GRIGNANI C., ZAVATTARO L., SACCO D., MONACO S. (2007): *Production, nitrogen and carbon balance of maize-based forage systems*, «European Journal of Agronomy», 26, pp. 442-453.
- GUISAN A., THEURILLAT J.P. (2000): *Equilibrium modeling of alpine plant distribution and climate change: how far can we go?*, «Phytocoenologia», special issue 30, pp. 353-384.
- GUISAN A., THEURILLAT J.P., SPICHIGER R. (1995): *Effects of climate change on alpine plant diversity and distribution: the modeling and monitoring perspectives*, in Guisan A., Holten J.I., Spichiger R., Tessier L. (eds.), *Potential ecological impacts of climate change in the Alps and Fennoscandian mountains*, Ed. Conserv. Jard. Bot. Geneve, pp. 129-135.
- GUSMEROLI F. (2004): *Il piano di pascolamento: strumento fondamentale per una corretta gestione del pascolo*, in *Il sistema delle malghe alpine: aspetti agro-zootecnici, paesaggistici, turistici*, Quaderni SoZooAlp, 1, Nuove Arti Grafiche Artigianelli, Trento, pp. 27-41.
- HANLEY J.A., MCNEIL B.J. (1982): *The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve*, «Radiology», 143, pp. 29-36.
- HERRERO M., THORNTON P. (2010): *Livestock and greenhouse gas emissions: mitigation*

- options and trade-offs*, In *A presentation prepared for the CCAFS science meeting*, Cancun, Mexico, pp. 1-2.
- HIJMANS R.J., CAMERON S.E., PARRA J.L., JONES P.G., JARVIS A. (2005): *Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas*, «International Journal of Climatology», 25, pp. 1965-1978.
- HOFFMANN H., ZHAO G.; VAN BUSSEL L.G.J., ENDERS A., SPECKA X., SOSA C., YELURIPATI J., TAO F., CONSTANTIN J., RAYNAL H., TEIXEIRA E., GROSZ B., DORO L., ZHAO Z., WANG E., NENDEL C., KERSEBAUM K.C., HAAS E., KIESE R., KLATT S., ECKERSTEN H., VANUYTRECHT E., KUHNERT M., LEWAN E., RÖTTER R., ROGGERO P.P., WALLACH D., CAMMARANO D., ASSENG S., KRAUSS G., SIEBERT S., GAISER T., EWERT F. (2015): *Variability of effects of spatial climate data aggregation on regional yield simulation by crop models*, «Climate Research», 65, pp. 53-69.
- HOPKINS A., DEL PRADO A. (2007): *Implications of climate change for grassland in Europe: impacts, adaptations and mitigation options: a review*, «Grass and Forage Science», 62, pp. 118-126.
- IDDA L., FURESI R., PULINA P. (2010): *Economia dell'allevamento ovino*, Franco Angeli, Milano.
- ISPRA (2009): *Il progetto Carta della Natura alla scala 1:50.000*, ISPRA ed., Serie Manuali e Linee Guida n.48/2009.
- ISTAT (2010): *6° Censimento Generale dell'Agricoltura*.
- IZAURRALDE R.C., WILLIAMS J.R., MCGILL W.B., ROSENBERG N.J., JAKAS M.Q. (2006): *Simulating soil C dynamics with EPIC: Model description and testing against long-term data*, «Ecological Modelling», 192 (3), pp. 362-384.
- JOHNSTON R.Z., SANDEFUR H.N., BANDEKAR P., MATLOCK M.D., HAGGARD B.E., THOMA G. (2015): *Predicting changes in yield and water use in the production of corn in the United States under climate change scenarios*, «Ecological Engineering», 82, pp. 555-565.
- JONES J.W., HOOGENBOOM G., PORTER C.H., BOOTE K.J., BATCHELOR, W.D. HUNT L.A., WILKENS P.W., SINGH U., GIJSMAN A.J., RICHIE J.T. (2003): *The DSSAT cropping system model*, «European Journal of Agronomy», 18, pp. 235-265.
- KELLER F., GOYETTE S., BENISTON M. (2005): *Sensitivity analysis of snow cover to climate change scenarios and their impact on plant habitats in alpine terrain*, «Climatic Change», 72, pp. 299-319.
- KHAN N.A., YU P., ALI M., CONE J. W., HENDRIKS, W.H. (2015): *Nutritive value of maize silage in relation to dairy cow performance and milk quality*, «Journal of the Science of Food and Agriculture», 95, pp. 238-252.
- KLANDERUD K., TOTLAND O. (2007): *The relative role of dispersal and local interactions for alpine plant community diversity under simulated climate warming*, «Oikos», 116, pp. 1279-1288.
- KOLLAS C., KERSEBAUM K.C., NENDEL C., MANEVSKI K., MÜLLER C., PALOSUO T., CONRADT T. (2015): *Crop rotation modelling. A European model intercomparison*, «European Journal of Agronomy», 70, pp. 98-111.
- KOMAC B., DOMÈNECH M., FANLO R (2014): *Effects of grazing on plant species diversity and pasture quality in subalpine grasslands in the eastern Pyrenees (Andorra): implications for conservation*, «Journal for Nature Conservation», 22, pp. 247-55.
- KULLMAN L. (2002): *Boreal tree taxa in the central Scandes during the Late-Glacial: implications for Late-Quaternary forest history*, «Journal of Biogeography», 29, pp. 1117-1124.

- LEHTINEN T., SCHLATTER N., BAUMGARTEN A., BECHINI L., KRÜGER J., GRIGNANI C., ZAVATTARO L., COSTAMAGNA C., SPIEGEL H. (2014): *Effect of crop residue incorporation on soil organic carbon and greenhouse gas emissions in European agricultural soils*, «Soil Use and Management», 30, pp. 524-538.
- LESSCHEN J., VAN DEN BERG M., WESTHOEK H., WITZKE H., OENEMA O. (2011): *Greenhouse gas emission profiles of European livestock sectors*, «Animal Feed Science and Technology», 166, pp. 16-28.
- LI Y.P., YE W., WANG M., YAN X. D. (2009): *Climate change and drought: a risk assessment of crop-yield impacts*, «Climate Research», 39, pp. 31-46.
- LIU J., WILLIAMS J.R., ZEHNDER A.J.B., YANG H. (2007): *GEPIC-Modelling wheat yield and crop water productivity with high resolution on a global scale*, «Agricultural Systems», 94, pp. 478-493.
- LOBELL D.B., BURKE M. B. (2008): *Why are agricultural impacts of climate change so uncertain? The importance of temperature relative to precipitation*, «Environmental Research Letters», 3, pp. 1-8.
- LOVREGGIO R., MEDDOUR-SAHAR O., LEONE V. (2014): *Goat grazing as a wildfire prevention tool: abasic review*, «iForest», 7, pp. 206-268.
- LOZANO-PARRA J., MANETA M.P., SCHNABEL S. (2014): *Climate and topographic controls on simulated pasture production in a semiarid Mediterranean watershed with scattered tree cover*, «Hydrology and Earth System Sciences», 18, pp. 1439-1456.
- MA S., ACUTIS M., BARCZA Z., BEN TOUHAMI H., DORO L., HIDY, D., ROLINSKI S. (2014): *The grassland model intercomparison of the MACSUR (Modelling European Agriculture with Climate Change for Food Security) European knowledge hub*, in Proceedings of the 7th International Congress on Environmental Modelling and Software (iEMSs), June, pp. 15-19.
- MA S., LARDY R., GRAUX A.I., TOUHAMI H.B., KLUMPP K., MARTIN R., BELLOCCHI G. (2015): *Regional-scale analysis of carbon and water cycles on managed grassland systems*, «Environmental Modelling & Software», 72, pp. 356-371.
- MACRÌ M.C., ZILLI G. (2014): *Il comparto maidicolo italiano: redditività e criticità del settore*, INEA, <http://dspace.inea.it/handle/inea/1177>.
- MAIORANO A., REYNERI A., MAGNI A., RAMPONI, C. (2009): *A decision tool for evaluating the agronomic risk of exposure to fumonisins of different maize crop management systems in Italy*, «Agricultural Systems», 102, pp. 17-23.
- MANNETJE L. (2007): *Climate change and grasslands through the ages: an overview*, «Grass and Forage Science», 62, pp. 113-117.
- MARIOTTI A., PAN Y., ZENG N., ALESSANDRI A. (2015): *Long-term climate change in the Mediterranean region in the midst of decadal variability*, «Climate Dynamics», 44 (5-6), pp. 1437-1456.
- METZGER M.J., BUNCE R.G.H., JONGMAN R.H.G., MÜCHER C.A., WATKINS J.W. (2005): *A climatic stratification of the environment of Europe*, «Global Ecology and Biogeography», 14, pp. 549-563.
- MONSERUD R.A., LEEMANS R. (1992): *Comparing global vegetation maps with the Kappa statistic*, «Ecological Modelling», 62, pp. 275-293.
- MORARI F., LUGATO E., BERTI A., GIARDINI L. (2006): *Long-term effects of recommended management practices on soil carbon changes and sequestration in north-eastern Italy*, «Soil Use and Management», 22, pp. 71-81.
- MORGAN J.A., MILCHUNAS D.G., LECAIN D.R., WEST M., MOSIER, A.R. (2007): *Carbon dioxide enrichment alters plant community structure and accelerates shrub growth in the*

- shortgrass steppe*, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 104, pp. 14724-14729.
- MORIONDO M., JONES G.V., BOIS B., DIBARI C., FERRISE R., TROMBI G., BINDI M. (2013): *Projected shifts of wine regions in response to climate change*, «Climatic Change», 119, pp. 825-839.
- MORIONDO M., STEFANINI F.M., BINDI M. (2008): *Reproduction of olive tree habitat suitability for global change impact assessment*, «Ecological modelling», 218, pp. 95-109.
- MURPHY M.A., EVANS J.S., STORFER A.S. (2010): *Quantifying Bufo boreas connectivity in Yellowstone National Park with landscape genetics*, «Ecology», 91, pp. 252-261.
- NACHTERGAELE F., VAN VELTHUIZEN H., VERELST L., BATJES N., DIJKSHOORN K., VAN ENGELEN V., FISCHER G., JONES A., MONTANARELLA L., PETRI M. (2008): *Harmonized world soil database*, Rome: FAO and Laxenberg, Austria: IIASA.
- NIU X., EASTERLING W., HAYS C.J., JACOBS A., MEARNES L. (2009): *Reliability and input-data induced uncertainty of the EPIC model to estimate climate change impact on sorghum yields in the U.S. Great Plains*, «Agriculture Ecosystems & Environment», 129, pp. 268-276.
- NORMAN H.C., COCKS P.S., GALWEY N.W. (2005): *Annual clovers (Trifolium spp.) have different reproductive strategies to achieve persistence in Mediterranean-type climates*, «Australian Journal of Agricultural Research», 56, pp. 33-43.
- OZENDA P., BOREL J.L. (1995): *Possible responses of mountain vegetation to a global climatic change: the case of Western Alps*, in Guisan A., Holten J.L., Spichiger R., Tessier L. (eds.), *Potential ecological impacts of climate change in the Alps and Fennoscandian mountains*, Ed. Conserv. Jard. Bot. Geneve, pp. 137-144.
- PALMER W.C. (1965): *Meteorological drought*, Research paper 45, Washington, DC, US Weather Bureau.
- PARRY M.L., CARTER T.R. (1991): *Climatic changes and future land use potential in Europe*, in Fantechi R., Maracchi G., Almeida-Teixeira M.E. (eds.), *Environment and quality of life. Climate change and impacts: a general introduction*, Commission of European Communities, Bruxelles.
- PAULI H., GOTTFRIED M., DULLINGER S., ABDALADZE O., AKHALKATSI M., ALONSO J.L.B., COLDEA G., DICK J., ERSCHBMAER B., CALZADO R.F., GHOSH D., HOLTEN J.I., KANKA R., KAZAKIS G., KOLLÅR J., LARSON P., MOISEEV P., MOISEEV D., MOLAU U., MESA J.M., NAGY L., PELINO G., PUCA M., ROSSI G., STANISCI A., SYBERHUSET A.O., THEURILLAT J.P., TOMASELLI M., UNTERLUGGAUER P., VILLAR L., VITTOZ P., GRABHERR G. (2012): *Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits*, «Science», 336, p. 353.
- PAULI H., GOTTFRIED M., REITER K., KLETTNER C., GRABHERR G. (2007): *Signals of range expansions and contractions of vascular plants in the high Alps: observations (1994-2004) at the GLORIA master site Schrankogel, Tyrol, Austria*, «Global Change Biology», 13, pp. 147-156.
- PEETERS A. (2009): *Importance, evolution, environmental impact and future challenges of grasslands and grassland-based systems in Europe*, «Grassland Science», 55, pp. 113-125.
- PEREGO A., BASILE A., BONFANTE A., DE MASCELLIS R., TERRIBILE F., BRENNI S., ACUTIS M. (2012): *Nitrate leaching under maize cropping systems in Po Valley (Italy)*, «Agriculture, Ecosystems & Environment», 147, pp. 57-65.
- PETRARCA S., COGLIANI E., SPINELLI F. (2000): *La radiazione solare globale al suolo in Italia*, pubbl. ENEA.
- PETRICCIONE B. (2005): *Short-term changes in key plant communities of Central Apennines (Italy)*, «Acta Botanica Gallica», 152, pp. 545-561.

- PETRICCIONE B. (2009): *Impatti sullo stato degli ecosistemi di alta montagna*, in *I cambiamenti climatici in Italia: evidenze, vulnerabilità e impatti*, Castellari S., Artale V. (eds.), BononiaUniversity Press, Bologna, 8, pp. 215-220.
- PINNA M.V., ROGGERO P.P., SEDDAIU G., PUSINO A. (2014): *Soil sorption and leaching of active ingredients of Lumax® under mineral or organic fertilization*, «Chemosphere», 111, pp. 372-378.
- PORQUEDDU C., ATEs S., LOUHAICHI M., KYRIAZOPOULOS A.P., MORENO G., DEL POZO A., OVALLE C., EWING M.A., NICHOLS P.G.H. (2016): *Grasslands in 'Old World' and 'New World' Mediterranean-climate zones: past trends, current status and future research priorities*, «Grass and Forage Science», 71, pp. 1-35.
- PORQUEDDU C. (2014): *Sardinian grasslands and rangelands*, in *Grasslands and Herbivore Production in Europe and Effects of Common Policies*, Editions Quae, Versailles, France, pp. 184-190.
- PORTER J., XIE L., CHALLINOR, A., COCHRANE K., HOWDEN S., IQBAL M., LOBELL D., TRAVASSO M. (2014): *Food security and food production systems*, in Field C.B., Van Aalst M. (eds.), *Climate Change (2014): Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, IPCC, Cambridge, United Kingdom; New York, NY, USA.
- PRASAD A., IVERSON L., LIAW A. (2006): *Newer Classification and Regression Tree Techniques: Bagging and Random Forests for Ecological Prediction*, «Ecosystems», 9, pp. 181-199.
- PRIYA S., SHIBASAKI, R. (2001): *National spatial crop yield simulation using GIS-based crop production model*, «Ecological Modelling», 136 (2/3), pp. 113-129.
- PULINA A., BELLOCCHI G., SEDDAIU G., ROGGERO P.P. (2016): *Scenario analysis of alternative management options on the forage production and greenhouse gas emissions in Mediterranean grasslands*, Proc. 19th meeting of the FAO-CHIEAM Sub Network Mountain Pastures, Zaragoza, pp. 14-16 June 2015.
- REASON P., COLEMAN G., BALLARD D., WILLIAMS M., GEARTY M., BOND C., SEELEY C., MAUGHAN MCLACHLAN, E. (2009): *Insider voices: Human dimensions of low carbon technology*, University of Bath, Centre for Action Research in Professional Practice.
- REHFELDT G.E., CROOKSTON N.L., WARWELL M.V., EVANS J.S. (2006): *Empirical analyses of plant-climate relationships for the western United States*, «International Journal of Plant Science», 167, pp. 1123-1150.
- RIEDO M., GYALISTRAS D., FUHRER J. (2011): *Pasture responses to elevated temperature and doubled CO₂ concentration: assessing the spatial pattern across an alpine landscape*, «Climate Research», 17, pp. 19-31.
- ROGGERO P.P., BAGELLA S., DELIGIOS P., LEDDA L., GUTIERREZ M. (2010): *Gestione dell'abbandono dei seminativi italiani in aree svantaggiate*, Supplemento a «I Georgofili. Atti dell'Accademia dei Georgofili», serie VIII, vol. 7, pp. 147-172.
- ROGGERO P.P. (2016): *IC-FAR - Linking long term observatories with crop system modelling for a better understanding of climate change impact and adaptation strategies for Italian cropping systems*. Editorial, «European Journal of Agronomy», in press.
- ROGGERO P.P., BELON S., ROSALES M. (1996): *Sustainable feeding systems based on the use of local resources*, «Annales de Zootechnie», 45, suppl., pp. 105-118.
- SANTILLOCCI R., D'OTTAVIO P. (2005): *The evolution of cattle and sheep breeding systems in Central Italy over the past two centuries*, «EAAP Publication», 115, pp. 15-18.
- SARNO R., TALAMUCCI P., CAVALLERO A., STRINGI L. (Coordinatori) (1989): *Distribuzione della produzione dei pascoli in ambienti marginali italiani, guida alla valutazione della produttività*, CNR - PF IPRA, 175.

- SILVA E., MENDES A.B., ROSA H.J.D. (2016): *Dairy Farming Systems' Adaptation to Climate Change*, «Agricultural Sciences», 7(03), p. 137.
- SMIRAGLIA C., DIOLAIUTI G., MERCALLI L., CAT BERRO D., MORTARA G., GIARDINO M., POGLIOTTI P., BOSCO C., RUSCO E., MONTANARELLA L., PETRICCIONE B. (2009): *Gli impatti dei cambiamenti climatici sull'alta montagna*, in Castellari S., Artale V. (eds.), *I cambiamenti climatici in Italia: evidenze, vulnerabilità e impatti*, Bononia University Press, Bologna, 8, pp. 215-220.
- SMITH P., MARTINO D., CAI Z., GWARY D., JANZEN H., KUMAR P., MCCARL B., OGLE S., O'MARA F., RICE C. (2008): *Greenhouse gas mitigation in agriculture*, «Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences», 363, pp. 789-813.
- SNAYDON R.W. (1981): *The ecology of grazed pastures*, in Morley F.H.W. (ed), *Grazing animals*, Amsterdam, Elsevier, pp. 13-31.
- SOUSSANA J.F., GRAUX A.I., TUBIELLO F.N. (2010): *Improving the use of modelling for projections of climate change impacts on crops and pastures*, «Journal of experimental botany», 61 (8), pp. 2217-2228.
- STANISCI A., PELINO G., BLASI C. (2005a): *Vascular plant diversity and climate change in the alpine belt of the central Apennines (Italy)*, «Biodiversity and Conservation», 14, pp. 1301-1318.
- STANISCI A., PELINO G., GUISAN A. (2005b): *Cambiamenti climatici ed effetti sulla flora di alta quota nel Parco Nazionale della Majella*, Atti del convegno "La Biodiversità vegetale nelle aree protette in Abruzzo studi ed esperienze a confronto", Di Cecco M. e Andrisano T. (a cura di), Lama dei Peligni (CH), 29 ottobre 2005, pp. 192-210.
- STERNBERG M., GOLODETS C., GUTMAN M., PEREVOLOTSKY A., UNGAR E.D., KIGEL J., HENKIN Z. (2015): *Testing the limits of resistance: a 19-year study of Mediterranean grassland response to grazing regimes*, «Global Change Biology», 21 (5), pp. 1939-1950.
- SUBEDI R., TAUPE N., PELISSETTI S., PETRUZZELLI L., BERTORA C., LEAHY J.J., GRIGNANI C. (2016): *Greenhouse gas emissions and soil properties following amendment with manure-derived biochars: Influence of pyrolysis temperature and feedstock type*, «Journal of Environmental Management», 166, pp. 73-83.
- SUNDSETH K. (2010): *Natura 2000 - Nella regione Alpina*, Commissione europea Direzione generale dell'Ambiente, Comunità europee.
- TALAMUCCI P. (1992): *Appunti di agricoltura montana e alpicoltura - Paolo Talamucci*, CUSL, Firenze, Facoltà di Agraria e Scienze MM.FF.NN, 1992, 329 p.
- TAN G., SHIBASAKI R. (2003): *Global estimation of crop productivity and the impacts of global warming by GIS and EPIC integration*, «Ecological Modelling», 168, pp. 357-370.
- TARDELLA F. M., CATORCI A. (2015): *Context-dependent effects of abandonment vs. grazing on functional composition and diversity of sub-Mediterranean grasslands*, «Community Ecology», 16 (2), pp. 254-266.
- TARGETTI S., MESSERI A., STAGLIANO N., ARGENTI G. (2013): *Leaf functional traits for the assessment of succession following management in semi-natural grasslands: a case study in the North Apennines, Italy*, «Applied Vegetation Science», 16 (2), pp. 325-332.
- TARGETTI S., STAGLIANÒ N., MESSERI A., ARGENTI G. (2010): *A state-and-transition approach to alpine grasslands under abandonment*, «iForest», 3, pp. 44-51.
- THEURILLAT J.P. (1995): *Climate change and the alpine flora: some perspectives*, in Guisan A., Holten J.I., Spichiger R., Tessier L. (eds.): *Potential ecological impacts of climate change in the Alps and Fennoscandian mountains*, Ed. Conserv. Jard. Bot. Geneve, pp. 121-127.

- THEURILLAT J.P., GUISAN A. (2001): *Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps: A review*, «Climatic Change», 50, pp. 77-109.
- THORNTON P.K., VAN DE STEEG J., NOTENBAERT A., HERRERO M. (2009): *The impacts of climate change on livestock and livestock systems in developing countries: A review of what we know and what we need to know*, «Agricultural Systems», 101 (3), pp. 113-127.
- TRIVEDI M.R., BERRY P.M., MORECROFT M.D., DAWSON T.P. (2008a): *Spatial scale affects bioclimate model projections of climate change impacts on mountain plants*, «Global Change Biology», 14, pp. 1089-1103.
- TRIVEDI M.R., MORECROFT M.D., BERRY P.M., DAWSON T.P. (2008b): *Potential effects of climate change on plant communities in three mountain nature reserves in Scotland, UK*. Biological Conservation, 141, pp. 1665-1675.
- TUBIELLO F.N., AMTHOR J.S., BOOTE K.J., DONATELLI M., EASTERLING W., FISCHER G., GIFFORD R.M., HOWDEN M., REILLY J., ROSENZWEIG C. (2007): *Crop response to elevated CO₂ and world food supply*, A comment on "Food for Thought ..." by Long et al., «Science», 312, pp. 1918-1921.
- VITTOZ P., RANDIN C., DUTOIT A., BONNET F., HEGG O. (2009): *Low impact of climate change on subalpine grasslands in the Swiss Northern Alps*, «Global Change Biology», 15, pp. 209-220.
- WALLIS T.W.R., GRIFFITHS J.F. (1995): *An assessment of the weather generator (WXGEN) used in the erosion/productivity impact calculator (EPIC)*, «Agricultural and Forest Meteorology», 73, pp. 115-133.
- WALTHER G.R., BEISSNER S., BURGA C.A. (2005): *Trends in the upward shift of alpine plants*, «Journal of Vegetation Science», 16, pp. 541-548.
- WILLIAMS, J.R. (1995): *The EPIC model*, in Singh, V.P. (Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, pp. 909-1000.
- WILLIAMS J.R., RENARD K.G. (1995): *Assessments of soil erosion and crop productivity with process models (EPIC)*, in R.F. Follett B.A. Stewards (ed.), *Soil Erosion end Crop Productivity*, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison, WI., pp. 67-103.
- WISE R.M., FAZEY I., SMITH M.S., PARK S.E., EAKIN H.C., VAN GARDEREN E.A., CAMPBELL B. (2014): *Reconceptualising adaptation to climate change as part of pathways of change and response*, «Global Environmental Change», 28, pp. 325-336.
- ZHAO G., HOFFMANN H., VAN BUSSEL L.G.J., ENDERS A., SPECKA X., SOSA C., YELURIPATI J., TAO F., CONSTANTIN J., RAYNAL H., TEIXEIRA E., GROSZ B., DORO L., ZHAO Z., NENDE C., KIESE R., ECKERSTEN H., HAAS E., VANUYTRECHT E., WANG E., KUHNERT M., TROMBI G., MORIONDO M., BINDI M., LEWAN E., BACH M., KERSEBAUM K.C., RÖTTER R., ROGGERO P.P., WALLACH D., CAMMARANO D., ASSENG S., KRAUSS G., SIEBERT S., GAISER T., EWERT F. (2015): *Effect of weather data aggregation on regional crop simulation for different crops, production conditions, and response variables*, «Climate Research», vol. 65, pp. 141-157.
- ZHAO G., HOFFMANN H., YELURIPATI J., SPECKA X., NENDEL C., COUCHENEY E., KUHNERT M., TAO F., CONSTANTIN J., RAYNAL H., TEIXEIRA E., GROSZ B., DORO L., KIESE R., ECKERSTEN H., HAAS E., CAMMARANO D., KASSIE B.T., MORIONDO M., TROMBI G., BINDI M., BIERNATH C., HEINLEIN F., KLEIN C., PRIESACK E., LEWAN E., KERSEBAUM K.C., RÖTTER R., ROGGERO P.P., WALLACH D., SIEBERT S., GAISER T., EWERT F. (2016): *Evaluating the precision of eight spatial sampling schemes in estimating regional mean yields for two crops*, Environmental Modelling & Software, in press.

- ZHAO G., WEBBER H., HOFFMANN H., WOLF J., SIEBERT S., EWERT F. (2015): *The implication of irrigation in climate change impact assessment: a European-wide study*, «Global Change Biology», 21, pp. 4031-4048.
- ZILIOOTTO U., SCOTTON M., STRINGI L., TALAMUCCI P., PARDINI A., ZAGNI C., PIEMONTESE S., PAZZI G., CAVALLERO A., GRIGNANI C., REYNERI A., COSTA G., PASCAL G., ACUTIS M., BENCIVENGA M., CORLETO A., CAZZATO E., CASSANITI S., LITRICO P.G., LEONARDI S., BASSO F., CARONE F., DE FALCO E., POSTIGLIONE L., SARNO R., GRISTINA L., AMATO G., BIANCHI A.A., SANTILOCCHI R. (1992): *Caratterizzazione floristica dei pascoli italiani*, «Rivista Italiana di Agronomia», 26, 3 Suppl., pp. 259-324.
- ZILIOOTTO U., SCOTTON M., DA RONCH F. (2004): *I pascoli alpini: aspetti ecologici e vegetazionali*, «Quaderni SoZooAlp», pp. 11-26.
- ZUCCHETTA M. (2009): *Modelli di distribuzione dell'habitat per la gestione di specie lagunari di interesse alieutico e conservazionistico*, Tesi di dottorato in Scienze Ambientali, XXII ciclo, Facoltà di Scienze Ambientali, Università Ca' Foscari di Venezia.

GABRIELE DONO*, RAFFAELE CORTIGNANI*, DAVIDE DELL'UNTO*
E GRAZIANO MAZZAPICCHIO*

Una valutazione degli impatti produttivi ed economici del cambiamento della variabilità climatica in aree dell'agricoltura mediterranea

I. INTRODUZIONE

La Politica di sviluppo rurale dell'UE per il periodo 2014-2020 finanzia anche le azioni che le aziende agricole intraprenderanno allo scopo di adattarsi ai cambiamenti climatici (CC) (Unione Europea, 2013). Questi aiuti saranno erogati solo se le aziende agricole finanziano una parte del costo necessario a realizzare le azioni di adattamento. Pertanto, l'efficacia di questa politica europea dipenderà anche dalla capacità di suscitare l'interesse degli agricoltori a investire in quelle azioni. Ovviamente, sarà più facile catturare quest'interesse se le misure di adattamento saranno progettate rispetto a modifiche del clima che gli agricoltori percepiscono già come minaccia ai loro redditi. L'approccio descritto in queste pagine segue cerca proprio di valutare l'impatto economico del CC inquadrandolo nella normale gestione aziendale e specificando le possibilità di adattamento in riferimento alle opzioni gestionali delle varie tipologie di aziende agricole.

Questa prospettiva affianca molti altri approcci seguiti dalla ricerca scientifica per valutare le ripercussioni dei CC in agricoltura. Molti di questi approcci modellizzano i cicli di un ampio ventaglio di colture di cui specificano le condizioni ottimali per la crescita e gli effetti dei CC su di esse, considerando soprattutto le trasformazioni che potrebbero determinarsi a lunghissimo termine e per molte zone del pianeta (Iglesias et al., 2009; Semenov e Shewry, 2011; Palosuo et al., 2010; Rötter et al., 2012). Questi studi indicano i

* DAFNE – Università degli Studi della Tuscia

** Questo lavoro è stato realizzato con il contributo del progetto MACSUR (www.Macsur.eu) finanziato dal MiPAAF

principali fattori di stress, come l'aumento della siccità estiva e soprattutto della temperatura e permettono anche di valutare l'incertezza delle previsioni, confrontando i risultati di modelli diversi di simulazione. Infine, le stime sulla resa delle colture o sui fabbisogni dei fattori produttivi valutano anche alcuni impatti economici del CC. Queste valutazioni sono basilari e, tuttavia, non considerano le possibilità di adattamento degli agricoltori giacché non impiegano modelli economici che permettono di rappresentare e valutare i processi di scelta a livello settoriale, territoriale o aziendale.

Un contributo d'interesse sull'adattamento al CC è fornito dall'approccio ricardiano sviluppato da Mendelsohn che stima il rapporto econometrico tra il valore dei suoli e le condizioni climatiche sotto diverse condizioni climatiche e ambientali (Mendelsohn et al., 1994; Massetti e Mendelsohn, 2012). Con questo approccio Van Passel et al. (2012) confrontano le situazioni produttive di Paesi europei climaticamente diversi tra loro concludendo che il riscaldamento globale genera perdite economiche per gli allevamenti che variano da -8% a -44%. De Salvo et al. (2013) stimano invece la riduzione dei ricavi netti in una sub-regione alpina italiana, mentre Lang (2007) analizza le condizioni produttive in Germania e Fezzi et al. (2014) studiano la situazione della Gran Bretagna in cui mostrano anche le zone dove i CC hanno effetti prevalentemente positivi. Stimando i parametri di questo tipo di relazioni, quest'approccio vuole anche misurare le possibilità di adattamento degli agricoltori ai CC di lungo periodo. Il suo contributo è ovviamente apprezzabile e, tuttavia, va rilevato che confrontare condizioni tecnologiche, di approvvigionamento delle risorse e ambientali distanti tra loro, non analizza il modo in cui avviene l'adattamento e, quindi, non indica quali politiche perseguire per supportarlo al meglio.

L'approccio presentato in queste pagine affronta questi limiti integrando l'analisi del clima di una tipica zona irrigua mediterranea, con la stima della sua produzione agricola e con un modello economico che riproduce le scelte delle imprese agricole che vi operano. In particolare, il processo di scelta economica è rappresentato assumendo che gli agricoltori è impostano l'attività gestionale considerando la variabilità delle risposte produttive delle colture e degli allevamenti, in buona parte attribuita alla naturale variabilità del clima¹. In particolare, associando le aspettative produttive alla variabilità intrinseca del clima, gli agricoltori programmano l'attività premunendosi contro i più

¹ Il termine "naturale variabilità del clima" è utilizzato per identificare variazioni climatiche che non sono attribuibili a o influenzati da ogni attività connessa agli esseri umani (American Meteorological Society, 2014).

probabili errori di programmazione dovuti all'instabilità del clima.

Quest'approccio si applica stimando innanzitutto le distribuzioni di probabilità (PDF) delle variabili produttive nelle condizioni climatiche dell'area, assumendo che queste generano le aspettative degli agricoltori sulle condizioni produttive. Queste PDF, opportunamente discretizzate, sono poi inserite in un modello economico che rappresenta le scelte aziendali nelle condizioni d'incertezza dovute alla variabilità climatica. Quindi si confrontano i risultati in uno scenario presente e in uno futuro per valutare gli effetti del cambiamento nella distribuzione di probabilità degli eventi climatici sulle tipologie aziendali delle aree di studio. Le analisi condotte con quest'approccio hanno considerato il periodi futuri relativamente vicini. Una di queste ha confrontato le condizioni climatiche e produttive del periodo 2000-2010 e quelle previste per il 2010-2020 (Dono et al., 2013a; Dono et al., 2013b; Dono et al., 2014). Altre hanno invece confrontato le condizioni del 2000-2010 e quelle del 2020-2030 (Dono et al., 2014a, 2014b, 2014c). Con intervalli così brevi non si può parlare di Cambiamento Climatico classico che, infatti, può essere valutato solo quando si stabilizza un nuovo assetto del Clima e, quindi, in una prospettiva di lungo periodo. Si può invece parlare di cambiamento della variabilità climatica (CCV). Questo è importante perché può essere direttamente percepita dagli agricoltori ed è utile considerarla per definire le misure di supporto all'adattamento della Politica di sviluppo rurale che si sta progettando in questi mesi.

Naturalmente il CCV interessa tante variabili meteorologiche in fasi diverse dei cicli colturali e della gestione aziendale. Così, ogni studio si è dovuto soffermare solo su alcuni aspetti rilevanti per l'area in esame. Ad esempio, Dono et al. (2013, 2014) hanno esaminato la situazione di una zona irrigua mediterranea considerando che questa è esposta all'aumento delle temperature estive, che fanno aumentare i fabbisogni irrigui estivi misurati dall'evapotraspirazione netta (ET_N), ossia la differenza tra evapotraspirazione e piovosità. Inoltre, hanno considerato l'influenza del CCV nel ridurre la piovosità e le possibilità di accumulo idrico nel bacino artificiale che assicura l'irrigazione della zona. Lo studio considera anche l'effetto del CCV sulla produzione di latte bovino. Dono et al. (2014a) studia un'area molto vasta, localizzata nella Sardegna centro-occidentale, dove l'agricoltura è in parte irrigua, con foraggere, ortive, risicoltura e l'agrumicoltura, e in parte asciutta, con prati e pascoli permanenti. Lo studio considera sia le condizioni climatiche che influenzano la domanda irrigua, in cui tra l'altro è molto rilevante la produzione di latte bovino, anch'essa indagata per gli impatti delle maggiori temperature estive; sia le condizioni che influenzano la produzione foraggera per gli allevamen-

ti ovinu in collina. Una terza area di studio esamina sempre le condizioni di un'area irrigua, prevalentemente ortofrutticola, servita soprattutto intercettando le acque di un corso idrico, il Fiume Sele, in Provincia di Salerno (Dono et al., 2014b). L'analisi studia come possono variare le condizioni della domanda e dell'approvvigionamento idrico nel corso dell'anno, evidenziando effetti notevoli sul bilancio idrico anche in periodi diversi da quelli che costituiscono i classici picchi di domanda. Infine, è stata studiata anche l'area dalle province di Cremona e Piacenza, con la produzione del Grana Padano DOP. Qui l'analisi si è concentrata sugli effetti del CCV sulla coltivazione del mais da insilato e dell'erba medica per l'approvvigionamento foraggero degli allevamenti. Inoltre, è stato considerato l'impatto sulla produzione del latte bovino (Dono et al., 2014c).

L'analisi dei cambiamenti a breve termine delle variabili biofisiche e quella sull'implicazione di queste modifiche sulle scelte produttive delle aziende agricole possono supportare l'attuazione delle politiche di adattamento a scala regionale. In particolare, aiutano a individuare le variabili che rendono più incerte le varie fasi di cicli colturali. Inoltre aiutano a identificare le tipologie aziendali più vulnerabili al CCV, ossia un aspetto che sta diventando una priorità dei programmi di ricerca europei sulle misure di adattamento al CC del prossimo PSR (Orlandini et al., 2008; Reidsma et al., 2010). Ciò non risolve i problemi di specificazione delle misure a sostegno dell'adattamento al CC ma aiuta a discutere gli obiettivi da perseguire nei prossimi Programmi di sviluppo rurale.

2. MATERIALI E METODI

2.1 *Casi di studio: caratteristiche, gestione delle aziende agricole e incertezza del clima*

Le analisi economiche sono state condotte, negli ultimi anni, su varie aree di studio, nelle quali sono stati valutati gli impatti economici del CC su differenti variabili di interesse agricolo.

La prima area a essere studiata è stata quella del *Consorzio di bonifica della Nurra*, situata nel nord-ovest della Sardegna. Si tratta di un'area climatica omogenea del Mediterraneo (Brunetti et al., 2002 e 2004), che dagli anni cinquanta del secolo scorso sta conoscendo un trend negativo della piovosità, con aumenti di temperatura ed evapotraspirazione (García-Ruiz et al., 2011), sia su scala stagionale che annuale. Gli scenari climatici futuri indicano la

possibile accentuazione di questo andamento nel lungo periodo (García-Ruiz et al., 2011). Oltre che all'aumento dei fabbisogni irrigui delle colture, l'area vedrà anche ridursi le proprie disponibilità idriche. Il Consorzio di bonifica della Nurra distribuisce l'acqua per l'irrigazione prelevandola dal lago artificiale del Cuga, che rifornisce di acqua potabile anche vari comuni dell'area (~40% degli accumuli totali) (Dono et al., 2008; Dono e Mazzapicchio, 2010; Dono et al., 2013a; Dono et al., 2013b; Dono et al., 2014). La ricarica del bacino si deve soprattutto alle piogge autunno-primaverili che hanno un'alta variabilità spazio-temporale perché dipendono da circolazioni atmosferiche che a loro volta sono molto variabili sia su scala inter-stagionale che inter-annuale (Chessa et al., 1999, Delitala et al., 2000). Alcune aziende agricole dell'area fronteggiano questa instabilità, sia pure solo in parte, ricorrendo al prelievo di acque sotterranee tramite pozzi privati (Ghiglieri et al., 2009 e 2012). Questa zona irrigua mediterranea è innanzitutto esposta all'aumento delle temperature estive, che fanno aumentare i fabbisogni irrigui estivi. Questi sono misurati dall'evapotraspirazione netta (ET_N), ossia dalla differenza tra evapotraspirazione e piovosità. Lo studio considera inoltre che le modifiche delle condizioni climatiche estive, sintetizzate dall'indice TH (Temperature Humidity Index) influenzano anche la produzione di latte bovino. Infine, si considera che l'area è esposta alle variazioni di piovosità autunno-invernale che influenzano le possibilità di accumulo idrico nel bacino artificiale che le assicura l'irrigazione. L'aspetto è rilevante perché la dimensione del bacino che serve la zona non consente una gestione pluriennale degli accumuli idrici; dunque, le possibilità d'irrigazione di una stagione dipendono direttamente dall'entità delle piogge nell'autunno-inverno precedente.

Un altro studio ha riguardato un territorio localizzato nella Sardegna centro-occidentale, in parte di tipo pianeggiante e servito dall'irrigazione del Consorzio di Bonifica dell'Oristanese, in parte di tipo prevalentemente collinare, caratterizzato da condizioni di produzione agricola in asciutto (Dono et al., 2014a). Nella prima area si coltivano principalmente frumento, foraggiere e ortive. In essa è molto rilevante la produzione di latte bovino, nel distretto di Arborea dove si genera un rilevante indotto economico in un sistema che, oltre alla produzione del latte, è organizzato per la raccolta, il trattamento e il confezionamento di questo prodotto. Sono assai diffuse anche la risicoltura e l'agrumicoltura. Nella zona collinare è invece praticata un'agricoltura prevalentemente non irrigua, anche se la presenza di pozzi aziendali permette l'attingimento dalla falda e la pratica di colture irrigue. Più del 50% dell'area fuori Consorzio è dedicata ai prati e pascoli permanenti e vi è concentrata la gran parte degli allevamenti ovini da latte per un totale di quasi 372

mila capi. Lo studio di quest'area composita ha considerato innanzitutto le condizioni climatiche che influenzano la domanda irrigua. Questa ha una prima espressione primaverile-estiva per la produzione irrigua degli erbai di loietto; prosegue con le esigenze estive di ortaggi, foraggi e frutta. In questo caso si sono trascurate le modifiche nella piovosità: infatti, qui la dimensione del bacino che serve la zona è tale da consentire una gestione pluriennale degli accumuli idrici. Lo studio ha esaminato anche qui le condizioni della produzione di latte bovino, e gli impatti nella variazione delle temperature e dell'umidità estiva. Infine, nell'area collinare l'analisi ha valutato la variabilità delle condizioni che influenzano la produzione foraggera per gli allevamenti ovini in collina e gli effetti della sua modifica.

La terza zona comprende vari comuni in Provincia di Salerno e corrisponde all'area servita dal Consorzio di Bonifica in Destra del Fiume Sele (Dono et al., 2014b). Le analisi sono state svolte su tutta la superficie del Consorzio, circa 15.000 ettari, tutti irrigati seppure con differenti metodi di distribuzione. La maggior parte della superficie è servita da impianti tubati, che garantiscono acqua ad alta pressione, mentre una parte residuale è ancora servita da canali a pelo libero, e quindi con acqua non in pressione. L'approvvigionamento idrico è garantito, inoltre, dai numerosi pozzi aziendali presenti sul territorio, che garantiscono disponibilità di acqua anche nei mesi in cui il Consorzio non opera e nei periodi di maggior fabbisogno irriguo delle colture. Nell'agricoltura della zona sono prevalenti le colture orticole, in pieno campo e in serra, e l'allevamento bufalino. Circa due terzi della superficie sono coltivati con ortive in pieno campo e in serra, 15% con foraggiere e altrettanto con arboree da frutto. L'analisi studia come possono variare le condizioni della domanda irrigua e dell'approvvigionamento idrico dal corso fluviale nel corso dell'anno, evidenziando effetti notevoli anche in periodi diversi da quelli dei classici picchi della domanda irrigua.

L'ultima area a essere stata studiata è stata quella dalle province di Cremona e Piacenza, aree di produzione del Grana Padano DOP (Dono et al., 2014c). Su un totale di 4.840.018 forme di Grana prodotte, il 28% circa proviene da queste due province (CLAL, 2014), che comprendono 1.014 allevamenti su un totale di 6.868 nell'ambito delle 13 province attive produttrici (6° Censimento dell'Agricoltura, ISTAT 2010). In queste province viene allevato più del 23% dei 702.994 capi bovini dell'area. Quasi il 60% dei 65 mila ettari presi in analisi è coltivato a mais da insilato (a differente stadio di maturazione alla raccolta tra le due province), mentre più del 20% a erba medica (maggiormente diffusa nella provincia Piacenza, dove si rileva anche una maggiore produzione di fieno di prato stabile). Infine, è stata studiata

anche l'area dalle province di Cremona e Piacenza, con la produzione del Grana Padano DOP. Qui l'analisi si è concentrata sugli effetti del CCV sulla coltivazione del mais da insilato e dell'erba medica per l'approvvigionamento foraggero degli allevamenti. In particolare, si è considerato l'effetto del CCV sulle esigenze irrigue di quelle colture e dunque sulla pressione di domanda esercitata nell'area del bacino del Po. Inoltre, è stato considerato l'impatto generato dal cambiamento delle condizioni di temperatura e umidità sulla produzione del latte bovino.

2.2 I modelli e i dati utilizzati per l'analisi

Le analisi economiche dell'impatto del CC sul settore agricolo si basano sull'ipotesi che le aspettative degli agricoltori rispetto alle variabili climatiche dipendano dall'esperienza acquisita con la loro osservazione nel tempo. In particolare, si è assunto che un agricoltore, per raggiungere una buona consapevolezza riguardo agli esposti climatici del territorio in cui opera, guardi a un orizzonte temporale corrispondente ai 30 anni precedenti. Quindi per pianificare le scelte attuali, un agricoltore si basa sugli eventi climatici che si sono verificati nell'arco di questo periodo e allo stesso modo farà nel futuro. La differenza sta nel fatto che le condizioni climatiche che generano le aspettative presenti da quelle che le genereranno nel futuro sono cambiate e quindi gli agricoltori faranno scelte diverse. Queste diverse decisioni su come utilizzare le risorse che ha a disposizione hanno effetti sui risultati economici delle loro attività e misurando gli scostamenti di questi risultati rispetto al presente è possibile misurare l'impatto economico dei CC. In quest'ottica, due aspetti sono particolarmente rilevanti: il primo riguarda le variabili che possono essere più influenzate dal CC; il secondo riguarda la specificazione delle condizioni di clima presente e clima futuro. Le analisi hanno usato approcci diversi soprattutto in merito a quest'ultimo aspetto.

Nell'analisi svolta sulla Nurra si è lavorato a più riprese e con diversi approcci. Un primo lavoro di Dono e Mazzapicchio (2010) ha considerato tre livelli di disponibilità idrica nella diga del Cuga, basso medio e alto, ognuno con una certa probabilità di verificarsi. Lo scenario di clima presente (2004)² riflette le condizioni di disponibilità idrica del ventennio precedente (1984-2003). Il futuro è ottenuto proiettando al 2015 le pro-

² Il 2004 è stato scelto perché era disponibile un set completo di fotografie aeree della zona, utilizzato per calibrare i modelli economici.

bilità di ciascuno stato di disponibilità idrica ed emerge una progressiva riduzione degli accumuli. Un'analisi successiva ha considerato sia la disponibilità idrica nella diga, sia la domanda irrigua delle colture (Dono et al., 2013a; Dono et al., 2013b; Dono et al., 2014). In questo caso le aspettative nel presente sono state costruite utilizzando i dati del trentennio che precede il 2004, mentre quelle del futuro sono state stimate utilizzando le osservazioni meteorologiche del 2001-2009 per forzare il generatore climatico WXGEN a produrre 60 anni di clima sintetico. Questa costruzione si basa sull'ipotesi che le aspettative degli agricoltori nel decennio 2010-2020 saranno molto influenzate dall'esperienza di grande cambiamento climatico che hanno fatto nel decennio 2001-2009.

Nelle analisi relative alle aree di Oristano, Destra Sele e Area Padana (Dono et al., 2014a, 2014b, 2014c), le aspettative nel presente (2010) riguardano le rese delle colture, i fabbisogni irrigui, l' ET_N , la mortalità del bestiame allevato e la qualità del latte prodotto. Le aspettative sono state ricostruite sia nel presente che nel futuro (2020-2030) sulla base di due serie di dati fornite per quegli intervalli da un modello climatologico (RAMS). Questo ha permesso di ottenere scenari climatici correnti e futuri che sono coerenti tra loro rispetto al processo di generazione dei dati.

2.2.1 Stima delle PDF inserite nel modello economico

Le PDF delle variabili agricole dei vari casi di studio sono state costruite con i risultati ottenuti applicando i modelli colturali e zootecnici ai dati climatici degli scenari presenti e futuri. Le uscite di queste applicazioni sono state poi sottoposte a uno stimatore di massima verosimiglianza e a un test chi-quadrato per identificare nell'ambito di una vasta gamma di funzioni di distribuzione quella che meglio approssima il set di dati. Le PDF ottenute sono state divise in vari *stati della natura*, a ciascuno dei quali sono associati un valore di riferimento e una certa probabilità di verificarsi. Ad esempio la PDF relativa alla disponibilità di acqua per l'irrigazione è stata divisa in tre stati: basso (con probabilità del 25%), medio (50%) e alto (25%). Nel futuro, lasciando invariate le probabilità, sono stati variati i valori di riferimento di ciascuno stato.

La figura 1a fornisce un esempio dei risultati ottenuti stimando le PDF dell' ET_N nella Nurra (Dono et al., 2013a; Dono et al., 2013b; Dono et al., 2014). La figura si può leggere iniziando con la PDF ottenuta con i dati del trentennio 1951-1980 (la curva nera continua) e proseguendo fino alla

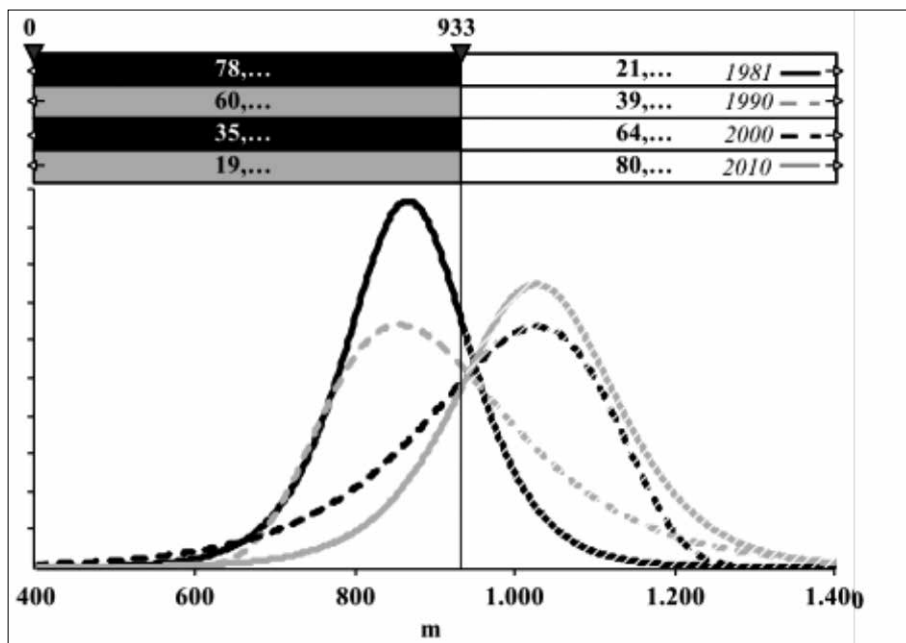


Fig. 1a PDF dell' ET_N dal 1983 al 2011

Fonte: Dono et al. 2014

PDF stimata con i dati del trentennio che finisce nel 2009 (la curva grigia continua)³.

L'analisi dei grafici mostra che negli anni appena trascorsi le PDF si sono già notevolmente spostate. In particolare, si può considerare la soglia di 933 millimetri che delimita lo stato di ET_N alta e che ha una probabilità di 0,21 sulla PDF del 1951-1980 (si veda la tabella inclusa nel grafico). I valori della tabella mostrano il progressivo aumento della probabilità di avere uno stato di ET_N alta da 0,21 nel 1951-1980 fino a 0,80 per la PDF stimata con i dati del trentennio 1980-2009.

La figura 1b confronta invece la PDF dell' ET_N nel *baseline presente* (anno 2004, stimata con i dati del trentennio 1974-2003), disegnata con la curva nera, e quella del futuro prossimo, curva grigia. Il confronto tra le due PDF mostra che nel futuro la probabilità di avere uno stato di ET_N alta dovrebbe aumentare da 0,25 a 0,34. I valori ottenuti con il test chi-quadro indicano che le funzioni stimate sono rappresentative dei dati osservati ($P = 0,94$).

³ Nel nostro approccio quest'ultima rappresenta le aspettative degli agricoltori nel 2010.

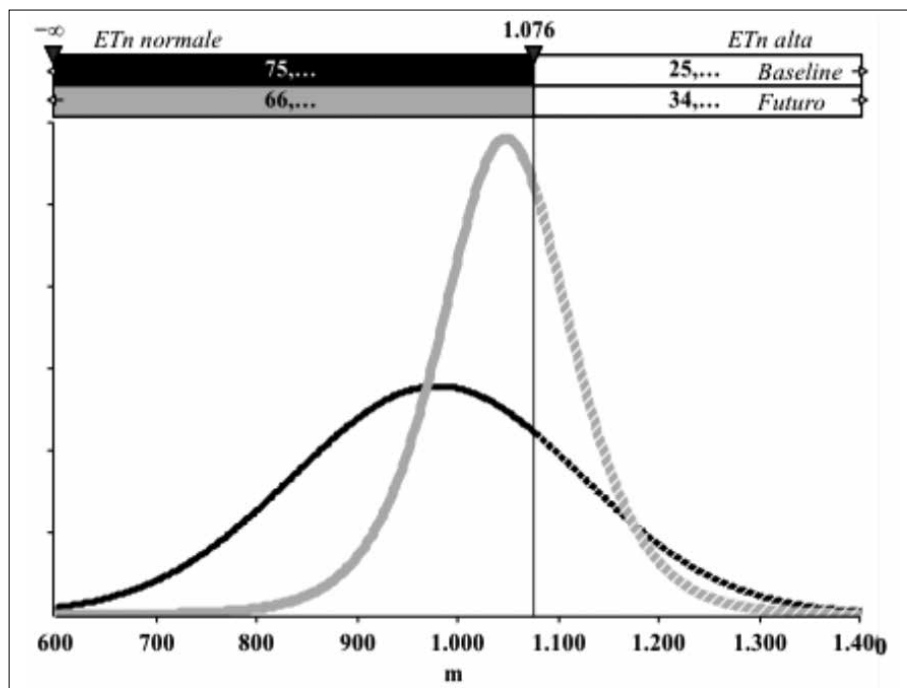


Fig. 1b PDF di ET_N nel baseline e nel futuro prossimo
 Fonte: Dono et al. 2014

Alle variazioni indicate dalla figura 1b corrispondono valori diversi di ET_N normale e alta, e relativi fabbisogni irrigui, nello scenario di riferimento *baseline* e in quello del futuro prossimo, tabella 1.

2.2.2 Il modello economico di PSD

Gli effetti della variabilità climatica sulle scelte degli agricoltori sono state rappresentate con un modello di Programmazione Stocastica Discreta (PSD) (Cocks, 1968; Rae, 1971; McCarl and Spreen, 1997; Hardaker et al., 2004; Connor et al., 2009). Questo modello simula un processo decisionale svolto in una condizione in cui lo stato di alcune variabili è incerto al momento della pianificazione stagionale e si definirà solo nei mesi successivi (*stadi*). In quei mesi le variabili incerte potranno assumere valori diversi (*stati della natura*) che condizioneranno in modo differente i successivi *stadi* e infine i risultati produttivi. Dunque, al momento della programmazione il decisore, nel nostro caso l'agricoltore, può solo assegnare un livello di probabilità a ogni *stato*

SCENARI		BASELINE		$\Delta\%$ DEL FUTURO RISPETTO AL BASELINE	
STATI DELLA NATURA		NORMALE	ALTO	NORMALE	ALTO
ET_N (mm)		934	1.145	9,9	-1,1
Fabbisogni irrigui totali (m ³ /ha)	Mais da insilato	5.122	5.444	10,5	6,5
	Mais da granella	6.811	7.163	11,6	8,6
	Erba medica IRR	5.704	6.541	1,2	1,4
	Erba medica DRY	1.987	2.063	-11,0	-4,5
Rese (ton/ha s.s.)	Mais da insilato	17,8	18,5	8,3	5,1
	Mais da granella	12,0	12,1	7,0	7,9
	Erba medica IRR	6,6	6,2	22,3	40,9
	Erba medica DRY	6,1	4,9	-15,4	-7,7
Wue (kg ss/mm)	Mais da insilato	34,7	34,0	-2,0	-1,3
	Mais da granella	17,6	16,9	-4,1	-0,6
	Erba medica IRR	11,6	9,4	20,9	39,0
	Erba medica DRY	30,9	24,0	-4,9	-3,4

Tab. 1 ET_N , fabbisogni irrigui, rese e efficienza d'uso dell'acqua (Wue) del mais e dell'erba medica – valori assoluti del baseline e cambiamenti percentuali del futuro rispetto al baseline. Fonte: Dono et al. 2014

della natura e definire delle azioni correttive per proseguire al meglio l'attività produttiva qualora le scelte fatte si rivelino sub-ottimali, ossia non corrispondano allo *stato della natura* che veramente si è presentato.

Pertanto, utilizzando la PSD, si assume che gli agricoltori pianifichino la loro attività optando per gli *stati della natura* che massimizzano il reddito atteso, calcolato ponderando le possibilità di avere risultati ottimali ma anche risultati sub-ottimali⁴. Pianificare considerando che possano verificarsi risultati sub-ottimali porta a effettuare scelte precauzionali, e dunque a ottenere in ogni caso un reddito inferiore rispetto a quello che sarebbe conseguibile in un contesto di certezza sulla soluzione ottimale. Questo costo dell'incertezza può crescere se il CC, o il CCV, modifica la probabilità o i valori rappresentativi degli stati della natura: l'impatto del CCV può così essere valutato confrontando i risultati forniti dal modello PSD in uno scenario di clima presente e futuro.

La specificazione del modello PSD

La rappresentazione matematica compatta del modello PSD utilizzato in quest'analisi può essere definita come:

⁴ Come accennato, il risultato ottimale si consegue se l'attività è pianificata sulla base della combinazione di *stati della natura* che realmente si verifica. Un risultato sub-ottimale si ha invece quando si verificano altre condizioni, diverse da quella attesa e scelta per pianificare l'attività.

$$\max_{X_1, XR_{n_s}} z = Gl X_1 - \sum_{n=2}^N \sum_{s=1}^S P_s Cr XR_{n_s} + Pm Qm \quad (1)$$

soggetto a:

$$A X_1 \leq B \quad (2)$$

$$A_s X_1 \leq B + \sum_{n=2}^N XR_{n_s} \quad \forall s \quad (3)$$

$$N Y_s X_1 + \sum_{n=2}^N XR_{n_s} \geq R \quad \forall s \quad (4)$$

$$X_1 \geq 0 \text{ and } XR_{n_s} \geq 0 \quad \forall s \quad (5)$$

dove n è il numero di *stadi* del processo decisionale ed s sono gli *stati della natura* che possono essere assunti dalla variabile incerta. X_1 è la terra, la cui allocazione avviene nel primo stadio; XR_{n_s} sono le azioni correttive svolte negli *stadi* seguenti ($n=2, \dots, N$) per rispondere all'avverarsi di uno tra i vari possibili *stati*. Le azioni correttive modificano la disponibilità di risorse aggiuntive ed hanno un costo (Cr). L'equazione (1) è la funzione obiettivo (z) che somma i margini lordi (Gl) delle attività scelte nel primo stadio (X_1), i costi (Cr) delle azioni correttive XR_{n_s} . I valori delle attività incerte negli *stati della natura* sono pesate con le loro probabilità (P_s) e sommate per gli n *stadi*. Infine, la funzione obiettivo somma i ricavi per il latte, in base ai prezzi (Pm) e alla quantità totale (Qm) ottenuti con il clima presente e nel futuro⁵. Il vincolo (2) si riferisce alle risorse terra e lavoro: A è la matrice dei vincoli tecnici e B è la quantità di risorse disponibili. Il vincolo (3) si riferisce alle risorse idriche e mostra che l'incertezza riguarda A_s , i fabbisogni di adattamento delle colture irrigate, e che le scelte coinvolgono azioni correttive, XR_{n_s} , negli *stadi* (n) per ogni *stato* (s). Il vincolo (4) riguarda l'alimentazione animale: N sono gli apporti unitari degli elementi nutrizionali, R sono i fabbisogni nutritivi delle categorie di bestiame. L'incertezza riguarda Y_s , ossia le rese delle colture da foraggio, e le scelte implicano azioni correttive, XR_{n_s} , negli *stadi* (n) per ogni *stato* (s).

⁵ La notazione matematica del modello considera gli effetti del clima presente e futuro sui ricavi del latte bovino. Gli effetti sui costi di produzione del latte sono invece considerati nella parte del modello che rappresenta la produzione e l'acquisto di foraggio: qui sono previste azioni correttive in caso di condizioni sub-ottimali. Azioni correttive simili riguardano la produzione e l'acquisto di foraggi per il settore ovino. In questo caso, tuttavia, la produzione estiva di latte è irrilevante, quindi, il modello trascura gli impatti climatici su di esso.

Il numero di stadi, parametri e variabili dipende dallo specifico caso oggetto di studio. Per esempio, nel modellizzare l'incertezza sulla disponibilità di acqua in una diga, Calatrava e Garrido (2005) hanno suddiviso il processo decisionale sull'allocazione della risorsa terra in due *stadi*, ciascuno con stati della natura corrispondenti a diversi livelli di disponibilità idrica. Dono et al. (2013b) hanno invece considerato tre *stadi*, considerando, oltre all'incertezza sulle disponibilità idriche in diga, anche quella sui fabbisogni irrigui delle colture.

Per la calibrazione dei modelli di PSD costruiti nelle aree di Oristano, del Destra Sele e Padana è stato anche utilizzato l'approccio della Programmazione Matematica Positiva (PMP). In questo modo i modelli replicano esattamente l'uso del suolo effettivamente osservato nell'anno di riferimento. Negli studi in esame l'uso del suolo nel 2010 è stato costruito in ciascuna area di studio con dati di fotografia aerea, con dati forniti dai Consorzi di Bonifica operanti in quelle zone, e con dati delle aziende rappresentative della rete FADN.

3. DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Le analisi svolte con l'approccio presentato nelle pagine precedenti hanno mostrato in tutti i casi che le aspettative degli agricoltori così come simulate per il periodo futuro dovrebbero essere di fabbisogni irrigui delle colture maggiori di quelli presenti e, dall'altra parte, di riduzione della disponibilità idrica. Dovrebbe crescere anche l'aspettativa di condizioni di temperatura e umidità estiva più pesanti per la produzione di latte di quei mesi. Conversi et al. (2010) hanno evidenziato tendenze e impatti analoghi di CCV lavorando sugli ecosistemi mediterranei. Un altro contributo generale di questo approccio è di esaminare l'effetto combinato di cambiamenti diversi, che talvolta non agiscono in maniera addizionale ma sono sinergici e in qualche caso sono compensativi. In particolare, si sono analizzati due fattori di incertezza climatica, fabbisogni irrigui e disponibilità idriche, che dipendono da variabili atmosferiche diverse, che agiscono in periodi diversi. Di esse si è stimato l'impatto economico specifico e congiunto, a livello aziendale e territoriale, come non sempre possono fare le classiche analisi agronomiche o le valutazioni di tipo ricardiano. È emerso che nei territori studiati l'impatto economico maggiore si deve al calo delle disponibilità idriche mentre l'incertezza sull' ET_N ha soprattutto effetti sull'ambiente perché riduce l'uso degli input chimici ma aumenta pure l'uso dell'acqua di falda.

La tabella 2 sintetizza i risultati ottenuti applicando il modello PDS nelle quattro aree di studio e riporta la stima dell'impatto del CCV sul livello di

AREA DI STUDIO	RN DI AREA	USO ANNUALE DELL'ACQUA D'IRRIGAZIONE	
		CONSORTILE	FALDA
Nurra	-3,8	-33,2	1,2
Oristanese	-2,6	1,9	0,1
Pianura Padana	-2,1	8,4	
Destra Sele	-0,8	15,8	33,4

Tab. 2 *Stima dell'impatto sul reddito netto totale delle aree di studio e sull'uso dell'acqua d'irrigazione*

TIPOLOGIE	BASELINE (000 €)			CCV TOTALE	ACQUA IN DIGA	IRRIGAZIONE ET _N
	ML	RN	RN + CAP	Δ% RISPETTO AL BASELINE		
Bovine latte grandi	1.306,8	389,3	655,2	-3,4	-1,8	-4,2
Bovine latte medie	99,2	40,8	58,4	0,1	-1,2	-1,0
Miste grandi	27,5	16,8	26,3	4,9	3,7	3,1
Miste medie	27,5	18,7	22,6	-12,6	-12,8	-0,4
Miste piccole	4,2	3,0	3,3	-2,6	-3,2	0,8
Olivicole medio-grandi	13,1	-8,5	40,4	-2,9	-3,8	1,4
Olivicole piccole	1,2	-0,9	3,9	-0,9	-2,1	0,1
Orticole medio-grandi	28,5	21,4	26,0	-23,1	-19,1	4,9
Orticole piccole	5,1	2,7	3,2	-44,8	-43,6	-0,2
Ovine latte medio-grandi	48,7	24,1	29,8	-3,4	0,6	-3,4
Ovine latte piccole	20,2	9,9	13,0	-3,2	-0,3	-3,1
Viticole grandi	14.447,9	5.778,9	5.778,9	0,0	0,0	0,0
Viticole medio-piccole	43,9	26,3	26,5	-0,5	-0,4	0,0
Aziende grandi	2.194,7	845,2	922,6	-0,6	-0,4	-0,8
Aziende medie	34,1	19,1	27,9	-1,5	-1,2	1,4
Aziende piccole	6,8	4,1	6,0	-7,1	-7,3	-0,1

Tab. 3 *Margine lordo (ML), reddito netto (RN) e RN più pagamenti Pac (RN+Cap) per tipologia aziendale: valori assoluti (000 €) e variazioni percentuali del RN+Cap*

Fonte: Dono et al. 2014

reddito netto totale di ogni area agricola e la stima dell'impatto sull'uso della risorsa idrica. Si può notare che gli effetti generali sono molto diversi e variano dal quasi 4% del reddito netto nella Nurra (Nord Sardegna), che si deve alla riduzione nei livelli di accumulo idrico nella diga all'1% nel Destra Sele. Questi effetti di reddito si accompagnano, però, a modifiche notevoli nell'uso delle risorse e la tabella mostra come potrà variare l'uso dell'acqua per irrigazione. C'è il calo notevolissimo nell'uso dell'acqua d'irrigazione fornita dal Consorzio di bonifica nella Nurra, dovuta alla diminuzione degli accumuli idrici in diga stimati per il futuro. C'è anche l'apprezzabile espansione negli

usi idrici dal corso fluviale sia nel Nord Italia, che nel Sud del Paese. In particolare, in quest'ultima zona è impressionante l'aumento degli attingimenti alle falde acquifere.

A fronte di quest'impatto generale è però ancora più interessante l'effetto sulle varie tipologie aziendali che operano nelle aree di studio. Gli effetti sulle varie aziende sono infatti assolutamente diversificati, con tipologie che soffrono l'impatto del CCV notevolmente più della media. Tutto ciò emerge con chiarezza dalla tabella 3 che mostra gli impatti sulle singole tipologie nell'area della Nurra riportando i cambiamenti del reddito netto inclusivo dei pagamenti della Pac ($RN + Pac$)⁶. Le ultime tre righe della tabella riportano gli impatti totali del CCV e quelli specifici delle sue due componenti, ossia la riduzione dell'acqua in diga e l'aumento dei fabbisogni irrigui delle colture.

Emerge che le aziende ortive subiscono l'effetto maggiore, che è anzitutto dovuto alla riduzione delle disponibilità idriche in diga. Soffrono molto anche le aziende miste medie, che sono la gran parte delle unità produttive dell'area: da risultati non mostrati in tabella si rileva che il declino dei loro redditi si deve al fatto che queste aziende perdono proprio la produzione ortiva. Quest'ultima si espande invece nelle aziende miste grandi che si avvantaggiano del cambiamento simulato. Inoltre, mentre l'effetto generale di reddito e quello sulle aziende coltivatrici è dovuto soprattutto alla riduzione nelle disponibilità idriche, le aziende bovine da latte e le ovine, soffrono soprattutto per l'aumento delle temperature estive. L'area è dunque collocata in una regione in cui gli aumenti delle temperature e dell'umidità estiva iniziano ad avere effetti di un certo rilievo sulla produzione del latte bovino.

Le ultime tre righe della tabella riportano l'impatto sui gruppi delle piccole, medie e grandi aziende, divise in base ai valori di $NI + Pac$, con soglie di € 24.000 e 50.000 €. Si nota che le aziende più piccole soffrono la riduzione del reddito più marcata; inoltre, il calo del reddito delle tipologie più grandi è consistente a causa della riduzione nelle bovine da latte di grande dimensione.

Naturalmente va considerato che altri effetti rilevanti, non considerati in questi studi, potranno affiancarsi a quelli in esame. Ad esempio, ci potrà essere un impatto notevole del cambiamento nelle condizioni che determinano le infezioni batteriche o fungine o gli attacchi dei parassiti animali. Allo stesso

⁶ Si notino le differenze tra aziende rappresentate, in cui le aziende viticole e le bovine da latte più grandi coltivano superfici e ottengono redditi ben più alti degli altri tipi. In contrasto, la dimensione economica media delle aziende di piccole dimensioni è davvero minuscola. Inoltre, i pagamenti della Pac hanno un rilievo notevole per le aziende di piccole e medie imprese e per le Aziende olivicole dove generano un valore apprezzabile di $NI + Pac$ e invertono il valore negativo di NI .

modo potranno modificarsi le condizioni da cui dipendono i livelli qualitativi dei prodotti. In questo studio si considerano gli effetti sulla qualità del latte (contenuto in grasso e proteine) e con essi quelli sui prezzi pagati agli agricoltori. Non si considerano invece gli effetti sulla qualità delle produzioni vegetali, da quelle ortofrutticole a quelle cerealicole, olivicole e vitivinicole.

4. CONCLUSIONI

L'approccio descritto in queste pagine è diverso da quelli basati sulla classica costruzione degli scenari di cambiamento del clima che si riferiscono a orizzonti temporali di lunghissimo termine, 30-50 anni. Questa prospettiva rende alquanto difficile l'impiego di modelli economici basati sulle condizioni vigenti della tecnica, delle strutture aziendali e dei mercati. Quest'approccio invece non solo permette di utilizzare questi tipi di riferimento ma, concentrandosi sui cambiamenti a breve termine, permette anche di focalizzare l'attenzione sui possibili effetti di misure per l'adattamento al CC che è già in atto in questo periodo. Quest'aspetto è rilevante perché il cambiamento del clima nel lungo periodo potrebbe non essere percepito dalle imprese come una minaccia immediata, tale da sollecitarne l'impegno a cofinanziare le azioni promosse dalle misure di adattamento. Così, un approccio che, come questo, cerca di indicare le tipologie aziendali che stanno già subendo gli effetti dei cambiamenti in corso può aiutare a progettare le misure di adattamento al CC che si stanno implementando nei PSR.

I risultati delle analisi condotte con quest'approccio mostrano che il cambiamento della variabilità del clima che si osserva in condizioni mediterranee può avere un'influenza rilevante in zone che già soffrono di carenza idrica e in cui i sistemi di distribuzione dell'acqua irrigua hanno limitate possibilità di regolazione pluriennale. I cambiamenti in corso nella variabilità delle precipitazioni, nella temperatura massima e nella concentrazione di CO₂ vanno tutti considerati per sforzarsi di aumentare la resilienza dei sistemi agricoli nel prossimo futuro. Questi cambiamenti possono essere già un pericolo per le colture irrigue tradizionali e per i loro sistemi di produzione, a un livello che può anche indurre l'abbandono di attività redditizie quali l'orticoltura e la produzione del latte bovino. Dato l'aumento relativo della temperatura e della domanda di acqua, è strategico accrescere e stabilizzare la disponibilità d'acqua. A tale scopo si dovrebbe investire per migliorare l'efficienza delle infrastrutture collettive per lo stoccaggio e la distribuzione dell'acqua nei Consorzi di bonifica. Questo investimento produrrebbe anche un impatto ambientale positivo grazie alla minore

estrazione di acque sotterranee, la cui qualità è già minacciata in particolare nelle isole e nelle zone costiere e può ulteriormente peggiorare se il CCV fa aumentare la domanda per l'acqua di irrigazione.

L'integrazione di competenze disciplinari diverse in un'analisi a scala di bacino è stata basilare per simulare le risposte agricole ai cambiamenti nella variabilità del clima. Essa ha mostrato che i CCV hanno effetti diversi in momenti e su comparti agricoli diversi e che richiedono specifiche misure di adattamento. La modellazione presentata in questo lavoro dovrebbe svilupparsi ulteriormente perché adesso ignora gli effetti del CCV su parassiti e patogeni delle colture e degli allevamenti, che potrebbero far aumentare i costi per le misure di controllo. È importante considerare anche l'impatto della CCV su altri aspetti della produzione agricola, come la lavorabilità dei suoli e le condizioni di vita del bestiame e la qualità dei prodotti.

Un limite importante dell'analisi appare, però, l'assunzione che gli agricoltori, data l'esperienza sugli eventi meteorologici di questi anni, desumano che le PDF di quelle variabili climatiche vanno spostandosi proprio nel modo stimato dallo studio. Su questo non ci sono prove. Anzi, mentre in un contesto climatico stabile è ragionevole ipotizzare che le aspettative nate dall'esperienza trentennale effettivamente guidano la programmazione aziendale, è arduo mantenere quest'assunzione in una situazione di cambiamento. In altre parole, gli agricoltori potrebbero non riconoscere il cambiamento pesando gli eventi in base alla frequenza trentennale, come fatto per stimare le PDF di questo studio. C'è dunque un notevole spazio di approfondimento, ad esempio sulla formazione delle aspettative in un contesto di cambiamento radicale, che richiede d'integrare l'analisi con altri modelli di comportamento e di formazione della conoscenza. Nonostante ciò, lo schema analitico che supporta questo lavoro può dare ancora altri frutti. Ad esempio può essere impiegato per stimare le conseguenze economiche di un'errata valutazione del cambiamento da parte degli agricoltori e, quindi, di una programmazione dell'attività ancora basata sulle vecchie PDF. Questo genere di analisi potrebbe rivelare che l'effetto di quell'errore è apprezzabile ed è utile investire per accrescere la consapevolezza degli agricoltori sulle modifiche in corso: questa potrebbe anche risultare la misura che è più urgente finanziare con i nuovi PSR.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY (2014): «climate variability», Glossary of Meteorology, available online: <http://glossary.ametsoc.org/wiki/term> (last access: 15 July 2014).

- BROWN R.A., ROSENBERG N.J. (1999): *Climate Change Impacts on the Potential Productivity of Corn and Winter Wheat in their Primary United States Growing Regions*, «Climatic Change», 41, 1, pp. 73-107.
- BRUNETTI M., MAUGERI M., NAVARRA A., NANNTI T. (2002): *Droughts and Extreme Events in Regional Daily Italian Precipitation Series*, «International Journal of Climatology», 22, pp. 543-558.
- BRUNETTI M., MAUGERI M., MONTI F., NANNTI T. (2004): *Changes in Daily Precipitation Frequency and Distribution in Italy Over the Last 120 Years*, «Journal of Geophysical Research», 109, pp. 1-16.
- CALATRAVA J., GARRIDO A. (2005): *Modelling water markets under uncertain water supply*, «European Review of Agricultural Economics», June, 32, 2 pp. 119-142.
- CHESSA P.A., CESARI D., DELITALA A.M.S. (1999): *Regimes of Precipitation and Temperature in Sardinia (Italy) and the Related Synoptic Situations*, «Theoretical and Applied Climatology», 63, pp. 195-222.
- COCKS K.D. (1968): *Discrete stochastic programming*, «Management Science», 15, pp. 72-79.
- CONNOR J., SCHWABE K., KING D., KACZAN D., KIRBY M. (2009): *Impacts of Climate Change on Lower Murray Irrigation*, «The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics», 53, pp. 437-456.
- CONVERSI A., FONDA UMANI S., PELUSO T., MOLINERO J.C., SANTOJANNI A., EDWARDS M. (2010): *The Mediterranean Sea Regime Shift at the End of the 1980s, and Intriguing Parallelisms with Other European Basins*, «PLoS ONE», 5, 5, e10633. doi:10.1371/journal.pone.0010633. pp. 1-15.
- DELITALA A.M.S., CESARI D., CHESSA P.A. (2000): *Precipitation Regimes Over Sardinia (Italy) During the 1946-1993 Rainy Season and Associated Large-Scale Climatic Variations*, «International Journal of Climatology», 20, pp. 519-542.
- DE SALVO M., RAFFAELLI R., MOSER R. (2013): *The Impact of Climate Change on Permanent Crops in an Alpine Region: A Ricardian Analysis*, «Agricultural Systems», 118, pp. 23-32.
- DONO G., CORTIGNANI R., DORO L., GIRALDO L., LACETERA N., LEDDA L., PASQUI M., QUARESIMA S., VITALI A., ROGGERO P.P., MAZZAPICCHIO G. (2014): *Una valutazione integrata degli impatti produttivi ed economici del cambiamento della variabilità climatica in un'area mediterranea irrigua*, «Questione Agraria», fascicolo n. 4, anno 2014, ISSN: 19714017.
- DONO G., CORTIGNANI R., DELL'UNTO D., MAZZAPICCHIO G., PASQUI M., ROGGERO P.P., DORO L., MULA L., LACETERA N., VITALI A. (2014a): *Effetti economici del cambiamento climatico nell'area dell'Oristanese*, in *L'agricoltura italiana è pronta ai cambiamenti climatici? La parola al Progetto Agrosenari*, Roma, 29-30 Ottobre 2014, Centro Congressi Palazzo Rospigliosi.
- DONO G., MAZZAPICCHIO G., CORTIGNANI R., DELL'UNTO D., PASQUI M., ALFIERI S. M., BASILE A., BONFANTE A., ROGGERO P.P., MULA L., (2014b): *Effetti economici del cambiamento climatico nell'area del Destra Sele*, in *L'agricoltura italiana è pronta ai cambiamenti climatici? La parola al Progetto Agrosenari*, Roma, 29-30 Ottobre 2014, Centro Congressi Palazzo Rospigliosi.
- DONO G., CORTIGNANI R., DELL'UNTO D., MAZZAPICCHIO G., PASQUI M., ROGGERO P.P., MULA L., LACETERA N., VITALI A. (2014c): *Effetti economici del cambiamento climatico nell'area Padana*, in *L'agricoltura italiana è pronta ai cambiamenti climatici? La parola al Progetto Agrosenari*, Roma, 29-30 Ottobre 2014, Centro Congressi Palazzo Rospigliosi.

- DONO G., CORTIGNANI R., DORO L., GIRALDO L., LEDDA L., PASQUI M., ROGGERO PP. (2013a): *Adapting to Uncertainty Associated With Short-Term Climate Variability Changes in Irrigated Mediterranean Farming Systems*, «Agricultural Systems», 117, pp. 1-12.
- DONO G., CORTIGNANI R., DORO L., GIRALDO L., LEDDA L., PASQUI M., ROGGERO PP. (2013b): *Integrated Assessment of Productive and Economic Impacts of Change in Climate Variability in an Irrigated Agricultural Catchment Under Mediterranean Conditions*, «Water Resources Management», August, 27, 10, pp. 3607-3622.
- DONO G., MAZZAPICCHIO G. (2010): *Uncertain water supply in an irrigated Mediterranean area: an analysis of the possible economic impact of Climate Change on the farm sector*, «Agricultural Systems», 103, 6, pp. 361-370.
- DONO G., MARONGIU S., SEVERINI S., SISTU G., STRAZZERA E. (2008): *Studio sulla gestione sostenibile delle risorse idriche: analisi dei modelli di consumo per usi irrigui e civili*, ENEA, Collana Desertificazione - Progetto RIADE. Roma, ISBN 88-8286-155-4.
- GARCÍA-RUIZ J.M., LÓPEZ-MORENO J.I., VICENTE-SERRANO S.M., LASANTA-MARTÍNEZ T., BEGUERÍA S. (2011): *Mediterranean Water Resources in a Global Change Scenario*, «Earth-Science Reviews», 105, 3-4, April, pp. 121-139.
- GHIGLIERI G., CARLETTI A., PITTALIS D. (2012): *Analysis of Salinization Processes in the Coastal Carbonate Aquifer of Porto Torres (NW Sardinia, Italy)*, «Journal of Hydrology», 432 pp. 43-51.
- GHIGLIERI G., BARBIERI G., VERNIER A., CARLETTI A., DEMURTAS N., PINNA R. & PITTALIS D. (2009): *Potential risks of nitrate pollution in aquifers from agricultural practices in the Nurra region, northwestern Sardinia, Italy*, «Journal of hydrology», 379 (3), pp. 339-350.
- HARDAKER J.B., HUIRNE R.B.M., ANDERSON J.R., LIEN G. (2004): *Coping with risk in agriculture*, second edition, CAB International, Wallingford.
- IGLESIAS A., GARROTE L., QUIROGA S., MONEO M. (2009): *Impacts of Climate Change in Agriculture in Europe*, PESETA-Agriculture Study, Office for Official Publications of the European Communities, EUR – Scientific and Technical Research series, Luxembourg.
- LANG G. (2007): *Where Are Germany's Gains from Kyoto? Estimating the Effects of Global Warming on Agriculture*, «Climatic Change», 84, 3, pp. 423-439.
- MASSETTI E., MENDELSON R. (eds.) (2012): *The Impact of Climate Change on US Agriculture: A Cross-Section, Multi-Period, Ricardian Analysis*, in Ariel Dinar and Robert Mendelsohn, Handbook on Climate Change and Agriculture, Edward Elgar. Northampton, Massachusetts, USA.
- MCCARL B.A., SPREEN T.H. (1997): *Applied mathematical Programming Using Algebraic Systems*, available on line: <http://agecon2.tamu.edu/people/faculty/mccarlb/bruce/mccspr/thebook.pdf> (last access: 20 June 2014).
- MENDELSON R., NORDHAUS W.D. AND SHAW D. (1994): *The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis*, «The American Economic Review», 84 (4), pp. 753-771.
- MOSNIER C., AGABRIEL J., LHERM M., REYNAUD A. (2009): *A Dynamic Bio-Economic Model to Simulate Optimal Adjustment of Suckler Cow Farm Management and Market Shocks in France*, «Agricultural Systems», 102, pp. 77-88.
- MOSNIER C., AGABRIEL J., LHERM M., REYNAUD A. (2011): *On-Farm Weather Risk Management in Suckler Cow Farms: A Recursive Discrete Stochastic Programming Approach*, XIII EAAE Congress Change and Uncertainty Challenges for Agriculture, Food and Natural Resources, August 30-September 2, ETH Zurich, Zurich, Switzerland.

- ORLANDINI S., NEJEDLIK P., EITZINGER J., ALEXANDROV V., TOULIOS L., CALANCA P., TRNKA M., AND OLESEN J E. (2008): *Impacts of climate change and variability on European agriculture*, «Annals of the New York Academy of Sciences», 1146, no. 1, pp. 338-353.
- PALOSUO T., KERSEBEAUM K.C., ANGULO C., HLAVINKA P., MORIONDO M., OLESEN J. E., PATIL R. H., RUGET F., RUMBAUR C., TAKAC J., TRNKA M., BINDI M., CALDAG B., EWERT F., FERRISE R., MIRSCHEL W., SAYLAN L., SISKI B., ROTTER R. (2010): *Simulation of Winter Wheat Yield and Its Variability in Different Climates of Europe*, «European Journal of Agronomy», 35, pp. 103-114.
- RAE A.N. (1971): *An empirical application and evaluation of discrete stochastic programming in farm management*, «Am. J. Agric. Econ.», 53 (4), pp. 625-638.
- REIDSMA P., EWERT F., LANSINK A.O. & LEEMANS R. (2010): *Adaptation to climate change and climate variability in European agriculture: the importance of farm level responses*, «European Journal of Agronomy», 32 (1), pp. 91-102.
- SEMENOV M.A., SHEWRY P.R. (2011): *Modelling Predicts that Heat Stress, Not Drought, Will Increase Vulnerability of Wheat in Europe*, «Scientific Reports», 1, pp. 1-5. DOI: 10.1038/srep000066
- UNIONE EUROPEA (2013): *Regolamento (UE) n. 1305/2013 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 17 dicembre 2013, sul sostegno allo sviluppo rurale da parte del Fondo europeo agricolo per lo sviluppo rurale (FEASR) e che abroga il regolamento (CE) n. 1698/2005 del Consiglio*.
- VAN PASSEL S., MASSETTI E., MENDELSON R. (2012): *A Ricardian Analysis of the Impact of Climate Change on European Agriculture*, «FEEM Nota di Lavoro», 083.2012, November.

NICOLA LACETERA*, UMBERTO BERNABUCCI*, ANDREA VITALI*,
BRUNO RONCHI*, ALESSANDRO NARDONE*

Le aree fondamentali della ricerca per la sostenibilità della zootecnia italiana in un contesto di cambiamenti climatici

INTRODUZIONE

A partire dalla fine degli anni '80 hanno iniziato a operare con una certa continuità anche in Italia diversi gruppi di ricerca che si sono cimentati nello studio delle relazioni tra clima e allevamento animale. In contesti come Stati Uniti, Israele e Australia tale studio riconosce origini più remote (anni '60) e quanto realizzato in Italia nella fase iniziale ha preso spunto dalle risultanze emerse dalle attività di ricerca condotte in questi Paesi. Vedremo più avanti come tuttavia le attività di ricerca condotte nel nostro Paese negli ultimi 25 anni si siano rapidamente affrancate da quelle realizzate in altri contesti geografici e riconoscano ormai da diverso tempo connotati che sono molto spesso di assoluta peculiarità perché fondati su prerogative specifiche delle attività di allevamento animale condotte in Italia.

Vale la pena ricordare fin d'ora che le relazioni tra allevamento animale e clima sono di natura bidirezionale e che pertanto anche il loro studio si caratterizza nel senso della bidirezionalità. In sintesi, bisogna cioè considerare che se da un lato è certamente vero e noto da tempo che le condizioni climatiche possono esercitare un'influenza sulle attività di allevamento è anche vero, e ciò rappresenta il risultato di acquisizioni più recenti, che tali attività possono fornire un contributo non trascurabile alle emissioni di gas con effetto climalterante. In questa logica non sorprende pertanto di poter riconoscere in Italia gruppi di ricerca diversi che hanno operato e ancora operano in uno solo o in entrambi i suddetti contesti. Tra questi gruppi, sia per il numero di anni di impegno sia per la quantità e la qualità dei risultati acquisiti, una menzione particolare la

* *Università degli Studi della Tuscia*

meritano quelli operanti presso l'Università degli Studi della Tuscia (Viterbo), l'Università Cattolica del Sacro Cuore (Piacenza), l'Università degli Studi di Foggia, l'Università degli Studi di Milano e il Centro di Ricerca per le Produzioni Foraggere e Lattiero-Casearie (Reggio Emilia).

Per completare il quadro generale e una breve cronistoria delle attività di ricerca condotte in Italia nell'ambito delle relazioni tra clima e allevamento animale si ritiene interessante ricordare che a partire dai primi anni '90 sono stati realizzati diversi progetti di ricerca finanziati da istituzioni nazionali e/o internazionali (EU) che hanno visto la partecipazione attiva e qualificata di ricercatori Italiani. Tra questi, in ordine cronologico e ormai completati, i progetti RAISA (CNR), diversi COFIN/PRIN e FIRB (MIUR), CLIMANIMAL, SELMOL, INNOVAGEN, AGROSCENARI & FILIGRANA (MIPAF), una ricerca Finalizzata e una Corrente (MINSAL), CIRCE e GASOFF (EU). A questi si aggiungono quindi i progetti MACSUR (MIPAF) e RUMINOMICS (EU) ancora in corso di realizzazione. Con poche eccezioni, le attività di ricerca condotte nell'ambito di questi progetti hanno riguardato le specie ruminanti e ancora più in particolare i bovini allevati per la produzione di latte. Dal confronto con le attività di ricerca condotte in altri Paesi (es. Stati Uniti, Australia e Brasile) emerge come il livello di attenzione prestato in Italia ad altre forme di allevamento (es. bovini da carne, suini e specie avicole) sia da considerare estremamente limitato se non addirittura nullo. Infine, solo in alcuni casi i suddetti progetti hanno previsto un approccio di tipo multidisciplinare. Esempi in tal senso si possono riconoscere nei progetti CLIMANIMAL, AGROSCENARI, FILIGRANA e MACSUR.

A sottolineare l'interesse e l'importanza che le interazioni tra clima e animali di allevamento rivestono attualmente all'interno della comunità scientifica italiana, si ritiene utile ricordare che nell'ambito dell'Associazione per la Scienza e le Produzioni Animali (associazione scientifica nazionale che ha tra i suoi scopi principali quello di favorire il progresso delle scienze e delle tecnologie in ambito zootecnico) operano ormai da qualche anno due diverse Commissioni (Adattabilità dei Sistemi Zootecnici ai Cambiamenti Climatici e Ecological Footprint e Produzioni Animali) che considerate congiuntamente affrontano il problema di tali interazioni in maniera bidirezionale.

CAMPI DI INDAGINE

L'analisi attenta delle ricerche condotte nel contesto delle relazioni tra clima e allevamento animale a livello sia Italiano sia internazionale per-

mette di identificare i seguenti principali campi di indagine: analisi del cambiamento climatico, valutazione dell'impatto diretto e indiretto delle condizioni climatiche sugli animali di allevamento, identificazione di interventi/strategie di adattamento a condizioni climatiche sfavorevoli, valutazione del contributo delle attività di allevamento ai processi di cambiamento climatico e messa a punto di pratiche di mitigazione/riduzione delle emissioni climalteranti riconducibili agli allevamenti. A chiarimento di ciò, è utile far presente che per impatto diretto si intende l'impatto che i fattori di natura climatica esercitano sul comportamento e sulle funzioni fisiologiche degli animali con conseguenze che possono essere a carico del benessere e della salute, delle performance produttive e riproduttive e delle aspettative di vita. A titolo di esempio si può citare il caso delle temperature ambientali elevate che determinano l'attivazione dei meccanismi di termoregolazione che intervengono per evitare/limitare il rialzo della temperatura corporea. Il calo del consumo di alimento e delle attività metaboliche, gli aggiustamenti a carico del sistema cardiocircolatorio, le perdite di acqua attraverso la sudorazione e/o l'iperventilazione polmonare sono tra i meccanismi termoregolatori principali attraverso cui il caldo ambientale esercita un'influenza negativa diretta negli animali di allevamento (Bernabucci et al., 2010). Per impatto indiretto si deve invece intendere quello che le condizioni climatiche esercitano sugli animali per il tramite degli effetti che le stesse hanno sulla disponibilità quanti-qualitativa di alimenti e di acqua e/o sulla sopravvivenza/capacità di proliferazione da parte di agenti patogeni e/o di loro vettori (Gaughan et al., 2009).

Il confronto tra quanto prodotto in Italia in questi campi della ricerca rispetto a quanto prodotto a livello internazionale consente di affermare che il contributo Italiano al complesso delle conoscenze attualmente disponibili non è stato uniforme e che si passa da situazioni in cui il contributo può essere considerato senza dubbio molto rilevante (valutazione dell'impatto diretto delle condizioni climatiche sugli animali di allevamento) a situazioni in cui tale contributo è risultato scarso (valutazione dell'impatto indiretto delle condizioni climatiche sugli animali di allevamento, valutazione del contributo delle attività di allevamento ai processi di cambiamento climatico e messa a punto di pratiche di mitigazione/riduzione delle emissioni climalteranti derivanti dalle attività di allevamento) e a situazioni in cui il contributo deve essere considerato medio (identificazione di interventi/strategie di adattamento a condizioni climatiche sfavorevoli).

AREE FONDAMENTALI DELLA RICERCA

Per ciascuno dei campi di indagine descritti nella sezione precedente è possibile identificare aree specifiche di ricerca che devono essere considerate fondamentali per la sostenibilità della zootecnia italiana nel contesto dei cambiamenti climatici. Tale identificazione, su cui si riferisce dettagliatamente nei paragrafi seguenti, si è basata su quanto finora emerso dalle ricerche condotte in ciascuno dei campi descritti sopra nonché di valutazioni di natura climatica, demografica, sociale ed economico-commerciale relative al nostro Paese.

Analisi del cambiamento climatico

L'analisi della letteratura nazionale e internazionale su questo argomento consente di reperire un numero imponente di lavori che hanno riguardato in termini sia retrospettivi sia di scenario l'evoluzione dei principali parametri che concorrono alla definizione della condizione climatica. Più in particolare, l'attenzione dei ricercatori in questo campo si è concentrata soprattutto sulla temperatura, sulle precipitazioni e sugli eventi climatici estremi così come si può evincere anche consultando l'ultimo rapporto prodotto dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2013).

In questo contesto, sulla base dei risultati di studi di natura sia retrospettiva sia di scenario, il bacino del Mediterraneo risulta uno degli hot spot del surriscaldamento globale (Giorgi e Bi, 2005; Giorgi, 2006). In altre parole, la previsione largamente condivisa è che l'area geografica del bacino sarà soggetta nel suo complesso a un incremento significativo della temperatura ambientale che potrà pertanto causare effetti particolarmente deleteri. Più in particolare, per quanto riguarda le condizioni climatiche sul territorio italiano il Rapporto "Gli Indicatori del Clima in Italia nel 2014", pubblicato da Ispra nel numero di Luglio 2015 (ISPRA, 2015), riporta che nel 2014 la temperatura media sul territorio Italiano è stata superiore di 1,57°C rispetto ai valori del CliNo di riferimento 1961-90 (l'anomalia della temperatura media minima è stata addirittura di +1,72°C), mentre la temperatura media a livello globale del 2014 ha superato solo di 0,89°C la media del CliNo di riferimento. Pertanto, sul territorio italiano nel 2014 si è registrata un'anomalia di valore quasi doppio rispetto a quella registrata a livello globale. Ai fini degli effetti sulle condizioni degli animali ancor più penalizzante è la crescente anomalia dei giorni con onde di calore a partire dal 1980 (fig. 1).

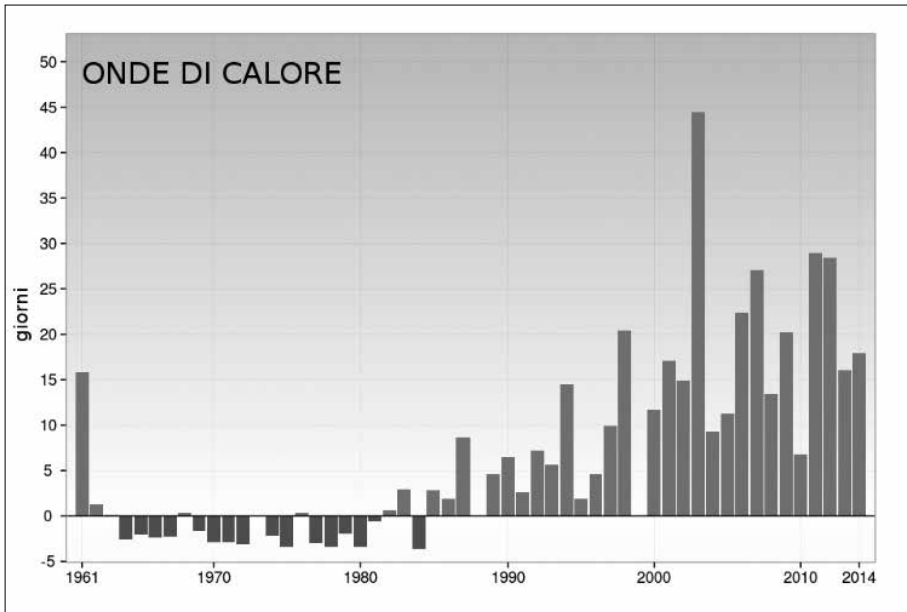


Fig. 1 *Serie delle anomalie medie annuali del numero di giorni con onde di calore (WSDI) in Italia rispetto al valore normale 1961-1990*

Modelli recenti applicati al bacino del Mediterraneo prevedono, per la fine di questo secolo, un aumento della temperatura dell'aria compreso tra $+2^{\circ}\text{C}$ e $+6,5^{\circ}\text{C}$, che risulta, specialmente nel valore minimo, più elevato di quello stimato per il pianeta nel suo complesso (IPCC 2007). Oltre a ciò, in uno studio recente condotto nell'ambito del progetto europeo CIRCE (Climate Change and Impact Research: the Mediterranean Environment) è stato riportato che per le decadi passate e per quelle prossime (lo studio arriva a considerare fino al 2050) il bacino del Mediterraneo è andato e andrà incontro anche a un aumento significativo del valore del temperature-humidity index (THI) che rappresenta un indice che combina i valori della temperatura e dell'umidità dell'aria e che è stato molto utilizzato per la valutazione degli effetti del caldo negli animali di allevamento (Segnalini et al., 2011; Segnalini et al., 2013). In sintesi, il primo di questi studi (Segnalini et al., 2011) ha dimostrato che all'interno dell'area del Mediterraneo, l'Italia, così come anche altri Paesi, è andata incontro negli ultimi 50 anni circa a un graduale aumento dei valori del THI con valori registrati che durante il periodo estivo sono risultati tali da imporre agli animali allevati condizioni di stress termico da caldo. Il secondo studio (Segnalini et al., 2013) ha invece dimostrato che l'Italia, insieme a Francia e Spagna, è il

Paese tra quelli del bacino del Mediterraneo in cui è previsto il maggiore incremento dei valori del THI che nel corso dei periodi estivi della decade 2041-2050 potrà raggiungere le 4 unità e comportare un peggioramento significativo delle condizioni di benessere e di salute e della produttività degli animali di interesse zootecnico (fig. 2).

Tra gli effetti indiretti dei CC, rilevanti saranno le riduzioni di precipitazioni e il loro regime a fronte delle produzioni vegetali per l'alimentazione (in regime stallino o pascolivo) degli animali. I diagrammi ombrotermici di 13 stazioni hanno messo in evidenza una riduzione media di 86 mm nel periodo 1981-2010 rispetto al 1951-1980. La riduzione per la stazione di Bologna è stata addirittura di 200 mm (550 *vs* 761) (Nardone e Ranieri, *in press*).

Ebbene, alla luce di questi risultati e di quelli riportati in diversi altri studi, sembra pertanto legittimo indicare che lo sviluppo di scenari climatici su scala geografica ridotta per aree del Paese particolarmente sensibili al cambiamento climatico nonché vocate nei confronti della attività di allevamento (es. pianura padana), debba rappresentare un'area di ricerca fondamentale la cui implementazione potrebbe consentire di comprendere meglio quali saranno le condizioni climatiche future e di individuare e testare per tempo strategie di adattamento che siano adatte ai contesti pedoclimatici, culturali, economici, sociali e manageriali in cui dovranno essere calate.

Sulla base di quanto previsto a livello planetario in merito all'aumento della frequenza, della durata e dell'intensità degli eventi climatici estremi (es. ondate di calore) (IPCC, 2013) di grande interesse sembra inoltre lo sviluppo di linee di ricerca che possano consentire di prevedere gli eventi climatici estremi. Anche in questo caso, l'utilità di realizzare tali ricerche risiede in ciò che ne deriverebbe in termini di adozione di misure di adattamento utili a limitare i danni dell'evento climatico estremo. Peraltro, è facile immaginare come l'avanzamento delle conoscenze in questo specifico settore della meteorologia avrebbe un carattere di rilevanza internazionale potendo produrre risultati potenzialmente spendibili anche in altri contesti geografici.

Infine, di grande rilievo sembra anche l'implementazione di ricerche che possano consentire lo sviluppo e la definitiva validazione di indici bioclimatici che includano parametri aggiuntivi rispetto alla temperatura e all'umidità dell'aria (es. radiazione solare e velocità dell'aria). La loro inclusione consentirebbe una migliore definizione della condizione climatica/microclimatica degli allevamenti e soprattutto di tenere nel dovuto conto parametri (es. radiazione solare) che esercitano un ruolo importante in sistemi di allevamento (es. pascolo) nei confronti dei quali si rileva un interesse crescente da parte del mondo degli allevatori, dell'opinione pubblica e del legislatore.

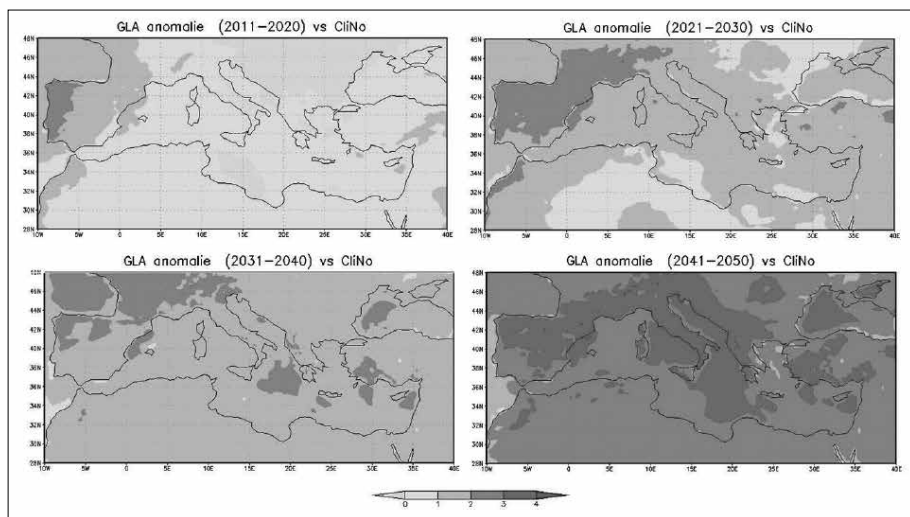


Fig. 2 Anomalie del THI estivo (GLA, mesi di Giugno, Luglio e Agosto) previste per le decadi 2011-2020, 2021-2030, 2031-2040 e 2041-2050 rispetto al CliNo (Climate Normal, 1971-2000) (Segnalini et al., 2013, modificato)

Valutazione dell'impatto diretto e indiretto delle condizioni climatiche sugli animali di allevamento

Gli studi sull'impatto delle condizioni climatiche sugli animali di allevamento sono stati e verranno ragionevolmente ancora condotti in ambienti controllati (celle climatizzate), in campo e per la valutazione di alcuni aspetti di natura più fine anche in vitro (utilizzando cellule di varia natura isolate da diverse specie). Pur tenendo conto che i risultati forniti da questi diversi approcci possono essere non sempre perfettamente sovrapponibili, il dato generale è tuttavia quello che nel caso di superamento di valori soglia della temperatura dell'aria e/o del THI, gli animali allevati, con alcune differenze quanti-qualitative legate principalmente alla specie, alla razza, all'età, alla fase fisiologica e al livello produttivo vanno incontro a modificazioni più o meno importanti di alcune funzioni fisiologiche (consumo di alimento, frequenza respiratoria, assetto endocrino, temperatura corporea, etc.) che possono ripercuotersi in senso negativo sullo stato di benessere/salute, sulle performance produttive (quanti-qualitative) e riproduttive e sulle aspettative di vita degli stessi (Gaughan et al., 2009; Bernabucci et al., 2010; Nardone et al., 2010).

In questo campo, una prima area di ricerca che certamente merita di essere considerata fondamentale per la zootecnia italiana è rappresentata dagli effetti

del cambiamento climatico sulla qualità delle produzioni zootecniche (latte, carne e uova). Una serie di studi condotti in Italia negli ultimi 15 anni circa ha messo in evidenza con chiarezza che l'allevamento dei bovini e degli ovini da latte in condizioni di clima caldo è responsabile di un deterioramento significativo della qualità del latte che nuoce al suo valore nutrizionale, all'attitudine nei confronti della caseificazione e/o alla qualità dei formaggi (Bernabucci et al., 2002; Summer et al., 2003; Albenzio et al., 2005; Ronchi et al., 2005; Bernabucci et al., 2015). Ebbene, alla luce delle sfide che attendono il nostro Paese sul fronte del mercato globale degli alimenti di origine animale e in considerazione del fatto che il terreno della qualità è l'unico su cui l'Italia può avere ragionevoli possibilità di successo nei confronti dei competitors internazionali, si ritiene sia indispensabile l'acquisizione di ulteriori elementi di conoscenza circa gli effetti della condizione climatica sulla qualità del latte, della carne e delle uova. Peraltro, come già ricordato in precedenza, va tenuto presente che mentre sul latte si può anche ritenere che una parte importante di informazioni in questo senso sia già disponibile, viceversa sul fronte della produzione di carne e uova gli effetti delle condizioni di clima caldo sugli aspetti qualitativi risultano complessivamente molto poco indagati con conseguente mancanza quasi totale di informazioni. Un interesse particolare in questo ambito potrebbero ad esempio rivestire ricerche mirate a verificare se l'allevamento in condizioni di clima caldo dei suini pesanti destinati alla produzione di salumi possa associarsi a variazioni qualitative delle carni, dello loro attitudine alla lavorazione/stagionatura e in ultima analisi ad alterazioni della qualità dei prodotti lavorati, trasformati, conservati. Alcune indicazioni nel senso di un effetto negativo dello stress da caldo sulla qualità della carne suina risultano al momento disponibili per i suini leggeri da macelleria (Gregory, 2010).

Un'altra area della ricerca che riveste senza dubbio un'importanza strategica per il nostro Paese è quella riguardante i rischi che i cambiamenti climatici possono comportare per la salute animale. Tali rischi possono essere declinati in vario modo (IPCC, 2014) e per i fini di questo contributo ci si limiterà a considerare quelli indiretti legati agli effetti che la condizione climatica può esercitare nei confronti della sopravvivenza e/o della proliferazione degli agenti patogeni e/o dei loro vettori. È ancora molto vivo il ricordo dell'epidemia di febbre catarrale maligna degli ovini, malattia a eziologia virale più comunemente nota come blue tongue o lingua blu che durante l'estate e l'autunno del 2000 ha interessato l'Italia e che è stata una delle epidemie di blue tongue più estese mai verificatesi in Europa. La malattia fu diagnosticata in circa 7.000 allevamenti tra Sardegna, Sicilia e Calabria e la morbilità e la

mortalità finali furono rispettivamente di circa il 18% e il 3% ([http://blue-tongue.izs.it/bluetongue/doc_tec/analisi%20del%20rischio/relazione%20analisi%20dei%20rischi%20BT%20-%20Italia%20\(versione%20completa\).pdf](http://blue-tongue.izs.it/bluetongue/doc_tec/analisi%20del%20rischio/relazione%20analisi%20dei%20rischi%20BT%20-%20Italia%20(versione%20completa).pdf)). Le perdite registrate complessivamente, tra ovini e caprini morti e abbattuti a seguito della malattia, furono pari a oltre 275.000 capi. Ebbene, il virus della blue tongue è trasmesso da insetti appartenenti al genere *Culicoides* che, rispetto alla tradizionale distribuzione in un'area geografica delimitata approssimativamente tra il 40° parallelo Nord e il 35° Sud, si ritiene abbiano ampliato il loro areale verso nord proprio in virtù dell'incremento delle temperature che ne consentono ora la sopravvivenza durante i mesi più freddi dell'anno anche a latitudini diverse da quelle indicate (Pursue et al., 2005; Lacetera et al., 2013). A partire dall'anno 2000 è stato quindi un susseguirsi di epidemie che si sono spinte peraltro a interessare anche paesi Europei più a nord dell'Italia. Il punto su cui ci si vuole soffermare è che di fronte alla prima epidemia di questa malattia il nostro Paese fu colto largamente impreparato per la gestione della nuova emergenza sanitaria. In particolare, giova ricordare quali furono gli effetti collaterali negativi (principalmente morti, aborti, calo della produzione latte, della fertilità e immunodepressione) che si verificarono nella popolazione ovi-caprina a seguito dell'impiego di vaccini vivi attenuati provenienti dal Sud Africa e del costo aggiuntivo che fu rappresentato dagli indennizzi che vennero riconosciuti per tali danni agli allevatori (Lacetera e Ronchi, 2004; <http://www.aslcagliari.it/index.php?xsl=7&s=718&v=2&c=2495>). Alla luce dei numerosi studi che hanno dimostrato come i cambiamenti climatici potranno causare una maggiore diffusione di malattie la cui trasmissione è legata a vettori biologici (IPCC, 2014) e di quelli che hanno anche evidenziato come tale rischio possa in qualche misura essere anche previsto/quantificato (Wittmann et al., 2001), si ritiene pertanto lecito indicare che anche questa debba rappresentare un'area specifica della ricerca meritevole di implementazione. I risultati che ne potranno scaturire sarebbero particolarmente utili per predisporre per tempo quanto necessario per prevenire e/o contenere la diffusione di malattie "nuove/esotiche" all'interno delle popolazioni di animali allevati limitando al massimo i connotati di emergenza/improvvisazione della loro gestione in caso di insorgenza.

Un ultimo aspetto su cui si ritiene di dover spendere alcune parole è infine quello che ancora sul fronte della salute individua nei cambiamenti climatici un'occasione di rafforzamento del concetto di One Health. Al di là delle numerose segnalazioni circa il rischio di aumento dell'incidenza di zoonosi trasmesse da vettori animati (Gale et al., 2010; Porretta et al., 2013), un caso

paradigmatico è quello dei rischi sanitari derivanti dalla presenza di micotossine nella catena alimentare e che chiama in causa l'uomo, gli animali e anche le piante. Diversi studi hanno infatti dimostrato che le temperature ambientali elevate possono rappresentare un fattore importante per l'insorgenza di infezioni fungine a carico dei cereali sia durante lo sviluppo in campo sia durante lo stoccaggio (Paterson e Lima, 2010) e che il cambiamento climatico in atto potrà pertanto determinare un aumento del rischio di attacco ai cereali da parte di funghi produttori di micotossine (Van der Fels-Klerx et al., 2013) con conseguente aumento del rischio di ingresso di queste nella catena alimentare pianta, animale/alimenti di origine animale, uomo. Alla luce di ciò appare quindi legittimo auspicare che vi possano essere occasioni di ricerche interdisciplinari che consentano di guardare ai rischi derivanti dalla presenza di micotossine nella catena alimentare con una logica di sistema che metta insieme competenze agronomiche, di patologia vegetale, zootecniche, veterinarie e di medicina umana.

*Identificazione di interventi/strategie di adattamento
a condizioni climatiche sfavorevoli*

L'IPCC ha definito l'adattamento ai cambiamenti climatici come l'insieme degli interventi di aggiustamento dei sistemi naturali o umani in risposta a stimoli climatici in atto o attesi che sono in grado di ridurre gli effetti negativi della variabile climatica e/o di metterne in risalto e valorizzarne le opportunità benefiche (IPCC, 2014).

Analogamente, la Commissione Europea ha indicato che adattamento ai cambiamenti climatici significa prepararsi in anticipo ad affrontarne gli effetti avversi mettendo in atto le azioni appropriate che consentano di prevenire/minimizzare i danni che questi possono causare o di trarre vantaggio dalle opportunità che gli stessi possono fornire. La stessa Commissione ha quindi aggiunto che se pianificata correttamente, l'adozione preventiva/precoce di misure di adattamento può tradursi in un significativo risparmio di denaro e di vite (http://ec.europa.eu/clima/policies/adaptation/index_en.htm).

Con riferimento all'adattamento dei sistemi zootecnici ai cambiamenti climatici, va innanzitutto rilevato come questo possa fare riferimento a interventi messi in atto in fasi diverse dei cicli di produzione del latte, della carne e delle uova. In particolare, tali azioni possono riferirsi sia alle fasi produttive a monte di quelle di allevamento (es. produzione di alimenti per il bestiame) sia a quelle di allevamento/gestione degli animali vere e proprie. Nei paragrafi

che seguono ci si limiterà a indicare quelle che possono essere considerate come le aree fondamentali della ricerca relativamente alle sole fasi di allevamento in senso stretto.

Parlare di adattamento degli allevamenti ai cambiamenti climatici significa sostanzialmente prendere in considerazione interventi con effetti nel breve-brevissimo periodo rivolti alla modifica delle condizioni ambientali (raffrescamento), all'aumento dell'efficienza dei meccanismi fisiologici deputati alla produzione e/o alla dispersione di calore da parte degli animali, alla fornitura di nutrienti utili a contrastare gli effetti dello stress termico da alte temperature, e alla realizzazione di azioni di miglioramento genetico che possano consentire nel medio-lungo periodo di aumentare la tolleranza degli animali nei confronti della condizione di caldo ambientale.

Brevemente, la ricerca italiana in questo campo ha fornito e ha certamente le potenzialità per poter continuare a fornire un contributo importante all'avanzamento delle conoscenze soprattutto per quanto riguarda la messa a punto di interventi di modifica delle condizioni ambientali utili per ridurre il grado di stress termico degli animali durante il periodo estivo (Calegari et al., 2012) e l'identificazione di possibili approcci per la selezione di animali in grado di sopportare meglio le condizioni di ambiente caldo (Bernabucci et al., 2014; Biffani et al., 2015). Su entrambi questi aspetti, il fatto di doversi confrontare già ora con la necessità di difendersi dai rischi creati dal caldo ambientale che caratterizza i periodi estivi, mette l'Italia nella condizione di poter svolgere un ruolo di leader a livello Europeo/Internazionale sul fronte scientifico, e del trasferimento tecnologico e industriale.

Infine, ricollegandoci a quanto riportato in precedenza circa l'impatto della condizione climatica sulla qualità delle produzioni, inclusa quella igienico sanitaria, va rilevato che allo stato attuale risultano poco indagati e pertanto meritevoli certamente di maggiore attenzione, quelli che possono essere gli interventi di adattamento che consentano di prevenire/limitare gli effetti negativi delle condizioni di clima caldo sui parametri che concorrono alla definizione della qualità degli alimenti di origine animale. Per quanto pure riportato sopra, l'implementazione di quest'area della ricerca risulterebbe pertanto di importanza strategica fondamentale per la competitività della zootecnia italiana di fronte alle sfide globali che impongono al nostro Paese di mettere in atto tutto quanto necessario per mantenere elevati gli standard qualitativi che sono stati raggiunti nel campo della produzione alimentare.

*Valutazione del contributo delle attività di allevamento
ai processi di cambiamento climatico e messa a punto di pratiche
di mitigazione/riduzione delle emissioni climalteranti*

L'esame della letteratura riguardante la valutazione dell'impatto che le attività di allevamento possono avere sui processi di cambiamento climatico nonché di quella riferita alla individuazione di interventi di mitigazione, consente di rilevare che l'Italia si è mossa con un ritardo significativo rispetto ad altri Paesi, sia Europei (Olanda, Danimarca, etc.) sia extraeuropei (Australia, Nuova Zelanda, etc.), e che pertanto l'apporto finora fornito dai ricercatori Italiani all'avanzamento delle conoscenze in questi contesti deve considerarsi complessivamente limitato. Tuttavia, l'esame della stessa letteratura consente anche di evidenziare come vi siano ancora ambiti nei quali la ricerca sta operando per trovare risposte ed entro i quali vi possono certamente essere opportunità perché la ricerca italiana si inserisca e fornisca il proprio contributo di nuove conoscenze.

Tra questi, importante anche per i risvolti pratico-applicativi, quello entro il quale vengono svolte attività di studio e di ricerca mirate allo sviluppo di sistemi/modelli che consentano di affinare, semplificare e standardizzare i metodi per il calcolo in condizioni di campo delle emissioni climalteranti riconducibili alle attività di allevamento (Del Prado et al., 2013).

Con riferimento alle attività di ricerca sulla mitigazione, spazi significativi di interesse generale sussistono per esempio nei tentativi messi in atto per individuare, chiarire e cercare di risolvere le situazioni di conflitto (trade off) che sussistono tra gli interventi utili per la riduzione delle emissioni climalteranti e altri importanti aspetti dell'allevamento tra i quali ad esempio l'adattamento alle condizioni climatiche, il benessere animale e la salvaguardia della biodiversità (Bustamante et al., 2014). Come già ricordato in precedenza, il raffrescamento degli ambienti di allevamento attraverso la ventilazione e l'uso di acqua rappresenta una strategia efficace e sempre più largamente utilizzata per cercare di alleviare lo stress termico da caldo negli animali di allevamento. Se da un lato l'impiego di energia per alimentare i sistemi suddetti rappresenta senza dubbio un fattore negativo ai fini delle emissioni climalteranti, dall'altro lato gli stessi sistemi sono utili per mantenere condizioni ottimali di benessere e allo stesso tempo, ciò facendo, per mantenere livelli elevati di efficienza e quindi per contenere in ultima istanza i livelli emissivi (intensità di emissione) espressi per unità di prodotto (litro latte, kg carne, etc.). Numerosi studi hanno indicato come l'allevamento intensivo di razze cosmopolite altamente selezionate sia più efficiente rispetto a quello estensivo di razze

locali e come ciò vada ovviamente a vantaggio anche delle emissioni climateranti (Knapp et al., 2014). L'adozione di logiche legate esclusivamente alla contabilizzazione delle emissioni da parte della componente animale rappresenta però un rischio per la salvaguardia di forme di allevamento alternative a quella intensiva, per il mantenimento della biodiversità nonché, in ultima analisi, per la salvaguardia di aspetti importanti della qualità dei prodotti di origine animale a cui le nostre produzioni sono legate in maniera indissolubile. Pertanto, è auspicabile che in questo ambito si proceda sviluppando e adottando logiche più complesse. Sviluppo e adozione di logiche che siano adeguatamente accompagnati dalla messa a punto di modelli di calcolo che prendano in esame l'intero ciclo di vita di un prodotto e che consentano per esempio di dare il giusto peso alla salvaguardia della biodiversità e della qualità delle produzioni.

Infine, l'attenzione crescente da parte dell'opinione pubblica e del legislatore nei confronti di questi aspetti dell'allevamento e gli impegni sempre maggiori che i diversi Paesi, incluso il nostro, stanno assumendo a livello internazionale sul fronte della riduzione delle emissioni anche da parte del comparto agricolo, suggerisce la necessità che il mondo della ricerca italiana si adoperi per il trasferimento delle conoscenze già disponibili attraverso un'intensificazione e lo studio di nuove forme di interazione con gli stakeholders (in primis allevatori, associazioni di categoria e industria). Ciò permetterebbe di aumentare la sensibilità del mondo della produzione nei confronti del problema generale nonché di facilitare l'adozione di pratiche di mitigazione che consentano di limitare i livelli di emissione.

CONCLUSIONI

L'implementazione delle aree della ricerca individuate nei paragrafi precedenti rappresenterebbe senza alcun dubbio motivo di rafforzamento della zootecnia italiana nel contesto dei cambiamenti climatici.

Uno dei motivi fondamentali di tale rafforzamento sta nel fatto che la ricerca in tali aree risponde a bisogni specifici della zootecnia italiana (es., qualità dei prodotti) e che pertanto si rende necessario operare in maniera autonoma senza possibilità di avvalersi di avanzamenti della ricerca realizzata in altri Paesi.

Altro motivo ritenuto importante è rappresentato dal fatto che sembrano sussistere tutte le condizioni di partenza perché le attività di ricerca individuate nel presente lavoro producano risultati in grado di aumentare in maniera

significativa la competitività della ricerca italiana a livello internazionale con conseguente miglioramento della capacità di attrarre risorse.

Infine, altro aspetto conclusivo ritenuto importante è che, in virtù delle criticità evidenziate nel nostro Paese nel contesto delle condizioni climatiche attuali e degli scenari climatici futuri, uno sforzo politico ulteriore rispetto a quelli fatti finora (es. bandi ARIMNET) andrebbe prodotto per la creazione di opportunità di finanziamenti Europei alla ricerca riservati ai Paesi del bacino del Mediterraneo. Per tutto quanto detto finora i gruppi di ricerca Italiani presentano peraltro i connotati ideali per svolgere il ruolo di leader nell'ambito di gruppi di ricerca di carattere multinazionali.

RIASSUNTO

Nel contesto delle ricerche condotte sulle relazioni tra clima e allevamento animale, i principali campi di indagine sono rappresentati dall'analisi del cambiamento climatico, dalla valutazione dell'impatto delle condizioni climatiche sugli animali di allevamento, dall'identificazione di interventi di adattamento a condizioni climatiche sfavorevoli, dalla valutazione del contributo delle attività di allevamento ai processi di cambiamento climatico e dalla messa a punto di pratiche di riduzione delle emissioni climalteranti. Per ciascuno di tali campi sono identificabili aree di ricerca che devono essere considerate fondamentali per la sostenibilità della zootecnia italiana. Tra queste, lo sviluppo di scenari climatici su scala geografica ridotta per aree del Paese particolarmente sensibili al cambiamento climatico nonché vocate nei confronti della attività di allevamento, lo studio degli effetti del cambiamento climatico sulla qualità delle produzioni zootecniche e la messa a punto di interventi di adattamento che ne possano evitare la compromissione, la messa a punto di strategie che permettano la risoluzione di conflitti che possono sussistere tra la salvaguardia della biodiversità e le emissioni di gas climalteranti e la sperimentazione di percorsi di certificazione dei prodotti di origine animale che possano conferire alle attività di riduzione delle emissioni il carattere di opportunità e non di ulteriore penalizzazione per il comparto zootecnico.

ABSTRACT

In the context of the relationships between climate and animal husbandry, the main research fields are represented by the analysis of climate change, by the evaluation of the impact of climate on livestock, by the identification of adaptation measures, by the evaluation of the contribution of farming activities to climate change and by the development of practices to reduce greenhouse gas emissions. Within each of these fields, research areas that should be considered important for the sustainability of the Italian animal husbandry may be identified. Among them, the development of climate scenarios on a reduced geographic scale by considering areas of the country particularly sensitive to climate change and highly vocated towards farming activities, the study of the effects

of climate change on the quality of livestock production and the development of adaptation measures, which could prevent its impairment, the development of strategies to enable the resolution of conflicts that may exist between the protection of biodiversity and emissions of greenhouse gases and finally the establishment of certification processes for products of animal origin that may confer to mitigation actions the nature of opportunity rather than that of further penalization for the livestock sector.

BIBLIOGRAFIA

- ALBENZIO M., SANTILLO A., CAROPRESE M., MARINO R., CENTODUCATI P., SEVI A. (2005): *Effect of different ventilation regimens on ewes' milk and Canestrato Pugliese cheese quality in summer*, «J. Dairy Res.», 72, pp. 447-455.
- BERNABUCCI U., LACETERA N., RONCHI B., NARDONE A. (2002): *Effects of the hot season on milk protein fractions in Holstein cows*, «Animal Research», 51 (1), pp. 25-33.
- BERNABUCCI U., LACETERA N., BAUMGARD L.H., RHOADS R.P., RONCHI B., NARDONE A. (2010): *Metabolic and hormonal acclimation to heat stress in domesticated ruminants*, «Animal», 4, pp. 1167-1183.
- BERNABUCCI U., BIFFANI S., BUGGIOTTI L., VITALI A., LACETERA N., NARDONE A. (2014): *The effects of heat stress in Italian Holstein dairy cattle*, «J. Dairy Sci.», 97, pp. 471-486.
- BERNABUCCI U., BASIRICÒ L., MORERA P., DIPASQUALE D., VITALI A., PICCIOLI CAPPELLI F., CALAMARI L. (2015): *Effect of summer season on milk protein fractions in Holstein cows*, «J. Dairy Sci.», 98, pp. 1815-1827.
- BIFFANI S., BERNABUCCI U., LACETERA N., VITALI A., AJMONE MARSAN P., MACCIOTTA N.P.P., NARDONE A. (2015): *Breeding and Genetics: Genomic methods and application—Dairy W87 A GWAS on heat tolerance phenotypes for Italian Holstein bulls*, «J. Anim. Sci.», 93 Suppl. s3/«J. Dairy Sci.», 98 Suppl. 2, 649 (abs.).
- BUSTAMANTE M., ROBLEDÓ-ABAD C., HARPER R., MBOW C., RAVINDRANAT N.H., SPERLING F., HABERL H., PINTO A.S., SMITH P. (2014): *Co-benefits, trade-offs, barriers and policies for greenhouse gas mitigation in the agriculture, forestry and other land use (AFO-LU)*, «Global Change Biol.», 20, pp. 3270-3290.
- CALEGARI F., CALAMARI L., FRAZZI E. (2012): *Misting and fan cooling of the rest area in a dairy barn*, «Int. J. Biometeorol.», 56, pp. 287-295.
- DEL PRADO A., CROSSON P., OLESEN J.E., ROTZ A. (2013): *Whole-farm models to quantify greenhouse gas emissions and their potential use for linking climate change mitigation and adaptation in temperate grassland ruminant-based farming systems*, «Animal», 7, pp. 373-385.
- GALE P., ESTRADA-PEÑA A., MARTINEZ M., ULRICH R.G., WILSON A., CAPELLI G., PHIPPS P., DE LA TORRE A., MUÑOZ M.J., DOTTORI M., MIOULET V., FOOKS A.R. (2010): *The feasibility of developing a risk assessment for the impact of climate change on the emergence of Crimean-Congo haemorrhagic fever in livestock in Europe: a Review*, «J. Appl. Microbiol.», 108, pp. 1859-1870.
- GAUGHAN J.B., LACETERA N., VALTORTA S.E., KHALIFA H.H., HAHN G.L., MADER T.L. (2009): *Response of domestic animals to climate challenges*, in *Biometeorology for adaptation to climate variability and change*, Eds., Ebi K.L., Burton I., McGregor G.R., Springer-Verlag, Heidelberg (Germany), pp. 131-170.
- GIORGI F. (2006): *Climate change hot-spots*, «Geophys. Res. Lett.», 33, L08707.

- GIORGI F., BI X. (2005): *Update regional precipitation and temperature changes for the 21st century from ensembles of recent AOGCM simulations*, «Geophys. Res. Lett.», 32, L21715.
- GREGORY N.G. (2010): *How climatic changes could affect meat quality*, «Food Res. Int.», 43, pp. 1866-1873.
- KNAPP J.R., LAUR G.L., VADAS P.A., WEISS W.P., TRICARICO J.M. (2014): *Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and impact of reducing emissions*, «J. Dairy Sci.» 97, pp. 3231-3261.
- IPCC (2007): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.
- IPCC (2014): *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.
- ISPRA (2015): *Gli Indicatori del Clima in Italia nel 2014*.
- LACETERA N., RONCHI B. (2004): *Evaluation of antibody response and nonspecific lymphocyte blastogenesis following inoculation of a live attenuated bluetongue virus vaccine in goats*, «Am. J. Vet. Res.», 65, pp. 1331-1334.
- LACETERA N., SEGNALINI M., BERNABUCCI U., RONCHI B., VITALI A., TRAN A., GUIS H., CAMINADE C., CALVETE C., MORSE A., BAYLIS M., NARDONE A. (2013): *Climate induced effects on livestock population and productivity in the Mediterranean area*, in *Regional Assessment of Climate Change in the Mediterranean*, Advances in Global Change Research 51, Eds., Navarra A., Tubiana L., Springer Science+Business Media, Dordrecht (Netherlands), 135-156.
- NARDONE A., RONCHI B., LACETERA N., RANIERI M.S., BERNABUCCI U. (2010): *Effects of climate changes on animal production and sustainability of livestock systems*, «Livest. Sci.», 130, pp. 57-69.
- NARDONE A., RANIERI M.S. (in press): *Cambiamenti climatici: utilizzo dell'acqua nelle attività agricole e analisi del consumo per unità di prodotto*, 3^a Meeting Internazionale di Bioetica della Biosfera, Isernia 20-21 giugno 2014.
- PURSUE B.V., MELLOR P.S., ROGERS D.J., SAMUEL A.R., MERTENS P.P.C., BAYLIS M. (2005): *Climate change and the recent emergence of bluetongue in Europe*, «Nat Rev Microbiol», 3, pp. 171-181.
- RONCHI B., BERNABUCCI U., LACETERA N., NARDONE A. (1995): *Milk fatty acid composition in cows exposed to hot environment*, Atti XI Congr. Naz. Ass. Sc. Prod. Anim., pp. 353-354.

- PATERSON R.R.M., LIMA N. (2010): *How will climate change affect mycotoxins in food?*, «Food Res. Int.», 43, pp. 1902-1914.
- PORRETTA D., MASTRANTONIO V., AMENDOLIA S., GAIARSA S., EPIS S., GENCHI C., BANDI C., OTRANTO D. URBANELLI S. (2013): *Effects of global changes on the climatic niche of the tick Ixodes ricinus inferred by species distribution modelling*, «Parasites & Vectors», 6, p. 271.
- SEGNALINI M., NARDONE A., BERNABUCCI U., VITALI A., RONCHI B., LACETERA N. (2011): *Dynamics of the temperature-humidity index in the Mediterranean basin*, «International Journal of Biometeorology», 55, pp. 253-263.
- SEGNALINI M., BERNABUCCI U., VITALI A., NARDONE A., LACETERA N. (2013): *Temperature humidity index scenarios in the Mediterranean basin*, «International Journal of Biometeorology», 57, pp. 451-458.
- SUMMER A., FRANCESCHI P., BOLLINI A., FORMAGGIONI P., TOSI F., MARIANI P. (2003): *Seasonal variations of milk characteristics and cheesemaking losses in the manufacture of Parmigiano-Reggiano cheese*, «Vet. Res. Comm.», 27, SUPPL. 1, pp. 663-666.
- VAN DER FELS-KLERX HJ, VAN ASSELT ED, MADSEN MS, OLESEN JE (2013): *Impact of climate change effects on contamination of cereal grains with deoxynivalenol*, «PLOS ONE», 8 (9): e73602. doi:10.1371/journal.pone.0073602.
- WITTMANN E.J., MELLOR P.S., BAYLIS M. (2001): *Using climate data to map the potential distribution of Culicoides imicola (Diptera: Ceratopogonidae) in Europe*, «Rev Sci Tech», 20, pp. 731-740.

Finito di stampare in Firenze
presso la tipografia editrice Polistampa
nel luglio 2016