

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 foraggere 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

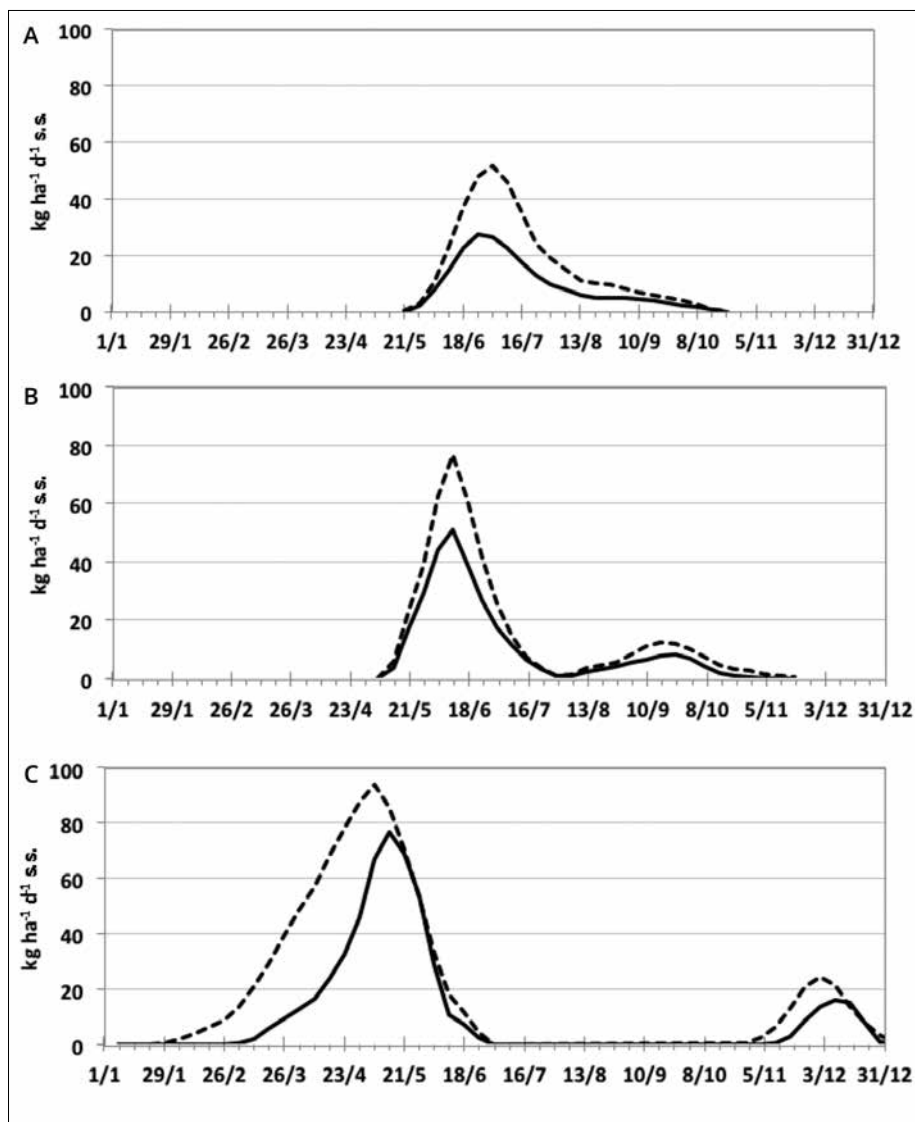


Fig. 1 Tassi di accrescimento giornalieri medi di pascoli italiani (rielaborato da Sarno et al., 1989). Linee intere: controllo non concimato; tratteggiate: N e P non limitanti. I principali fattori limitanti il tasso di crescita nei pascoli alpini (A) sono le basse temperature e la fisiologia delle 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

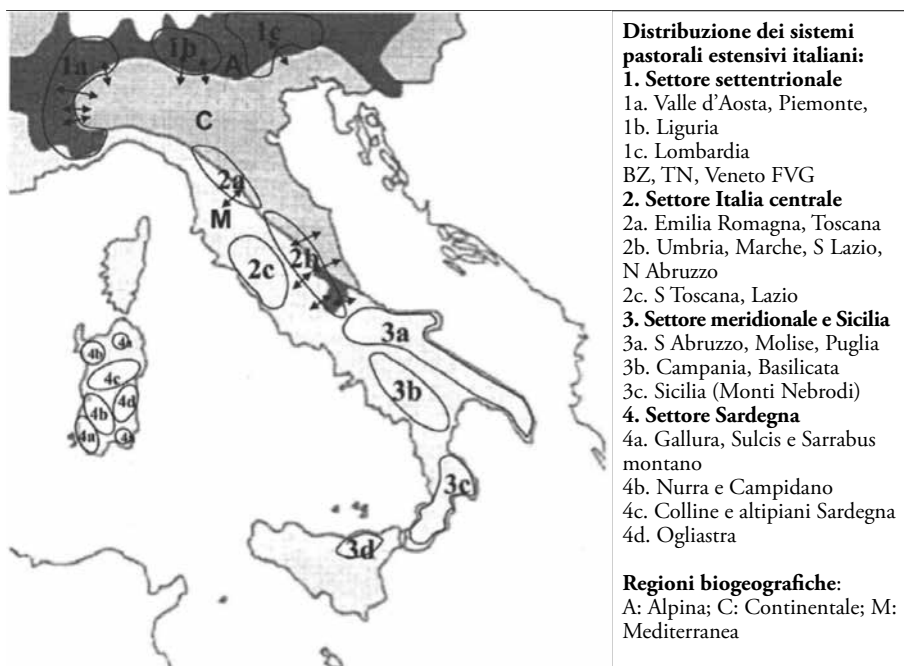


Fig. 2 Distribuzione dei sistemi pastorali estensivi italiani (LSGS) nelle regioni biogeografiche della penisola e delle isole italiane. Fonte: Caballero et al., 2009

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 CO₂ 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 avventi 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		ESP./RID. (%)	SP	CC	CF	NS	FR	XS	SV
			-87	2,4	3,2		66,2		25	3,1
			-77	1,1	11,6		79,2		2,6	5,5
			-100	7,4	0,4		79,8		12,3	0,1
			-3	0,4	0,7		50,3		47,9	0,7
			-100				20,7		78	1,3
			+294				2,4		97,5	0,1
			-76	6,7	5,2		37		37	14,2
	2070-2099		-97	0,9	0,9		63		31,9	3,2
			-87	0,3	5,7		84		5,4	4,6
			-100	0,1			86,3		13,6	0
			-5	0,4	0,7		55,4		41,9	1,6
			-100		0,5		50,5		48,5	0,5
			+179				10,2		89,6	0,3
			-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.

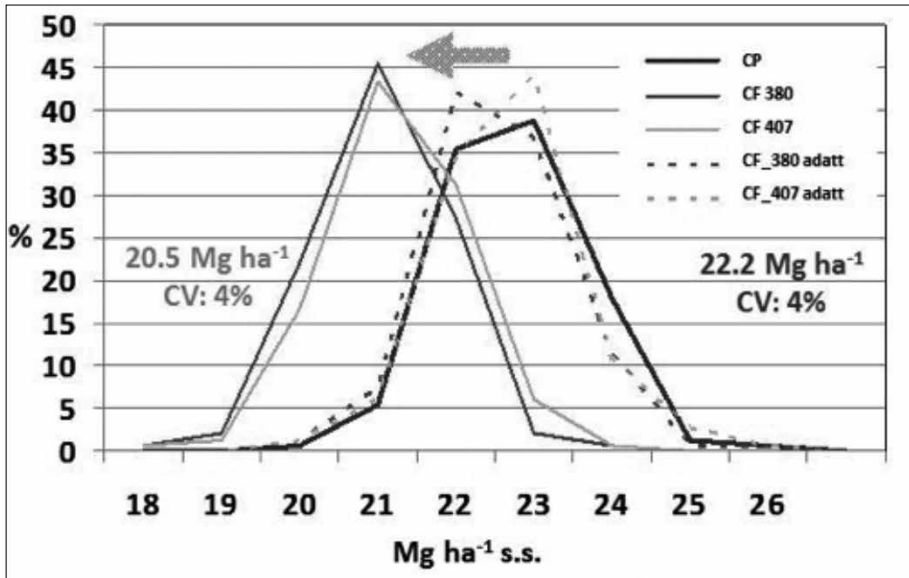


Fig. 3 Distribuzione di frequenza per la resa del mais in funzione dei diversi scenari meteorologici. CP: clima presente 2000-10; CF: clima futuro 2020-30; 380: $\text{CO}_2 = 380 \text{ ppm}$; 407: $\text{CO}_2 = 407 \text{ ppm}$; adatt: scenario di adattamento (vedi testo); CV: coefficiente di variabilità

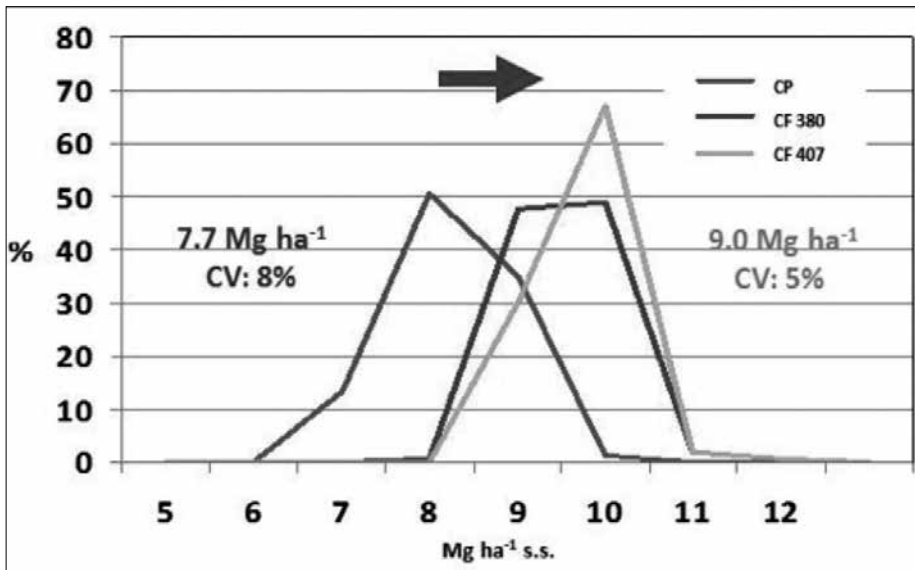


Fig. 4 Distribuzione di frequenza delle rese attese dagli erbai autunno-vernini irrigui di loglio italico nel distretto dell'Oristanese. CP: clima presente 2000-10; CF: clima futuro 2020-30; 380: $\text{CO}_2 = 380 \text{ ppm}$; 407: $\text{CO}_2 = 407 \text{ ppm}$. CV = coefficiente di variabilità

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)

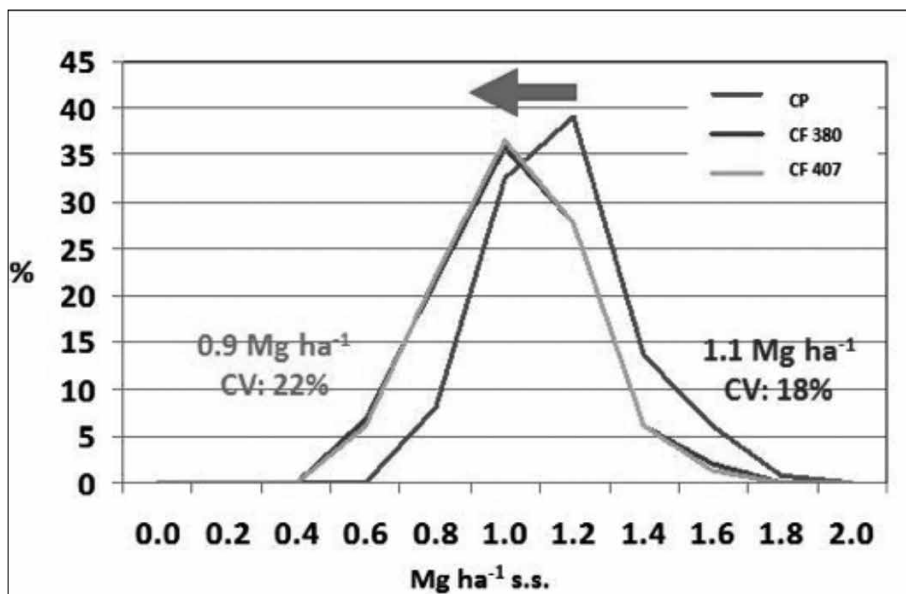


Fig. 5 Distribuzione di frequenza per la resa del pascolo nel periodo primaverile, in funzione dei diversi scenari climatici. CP: clima presente; CF: clima futuro; 380: CO_2 380 ppm; 407: CO_2 407 ppm. CV = coefficiente di variabilità

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

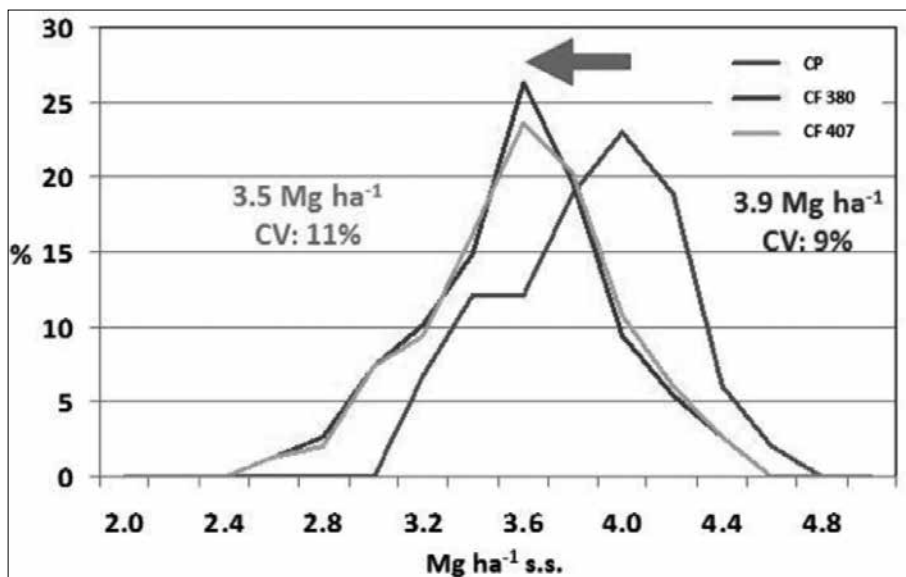


Fig. 6 Distribuzione di frequenza per la resa degli erbai asciutti in funzione dei diversi scenari meteorologici. CP: clima presente; CF: clima futuro; 380: $\text{CO}_2=380$ ppm; 407: $\text{CO}_2=407$ ppm. CV = coefficiente di variabilità

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.

- ASSENG 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., DIOLAIUTI 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., DICKSON, 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., TAGLIATORI 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., ZILIOUOTO 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., CAPORALI 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., LEMON 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-BRAVO 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.I., 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.
- SANTILOCCHI 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.