

EFFETTI DELLE VARIAZIONI CLIMATICHE SULLA VEGETAZIONE IN AMBIENTE MEDITERRANEO

F. Viola¹, D. Pumo¹, L.V. Noto¹, M. Cannarozzo¹ & G. La Loggia¹

(1) Dipartimento di Ingegneria Idraulica ed Applicazioni Ambientali, Università di Palermo, Viale delle Scienze, 90128, Palermo, Italia e-mail: viola@idra.unipa.it

SOMMARIO

In questo lavoro si valutano gli effetti combinati che la diminuzione delle precipitazioni e l'aumento delle temperature possono avere sullo stress idrico della vegetazione in ambiente mediterraneo. Le interazioni tra clima, suolo e vegetazione vengono valutate tramite un modello ecoidrologico numerico. Vengono esplorati diversi scenari climatici futuri e i loro effetti su vegetazioni di tipo arboreo ed erbaceo. I risultati mostrano un aumento dello stress idrico non compatibile con le condizioni di sopravvivenza per le specie arboree, a vantaggio delle specie erbacee.

1 INTRODUZIONE

Gli ecosistemi mediterranei si sono evoluti in un clima caratterizzato da piogge marcatamente fuori fase rispetto al periodo vegetativo delle piante ivi presenti. Durante la stagione umida, lo strato di suolo interessato dall'apparato radicale, specie se profondo, si ricarica di acqua che verrà usata dalla vegetazione nella seguente stagione di crescita, che di norma è caratterizzata da scarsa precipitazione e temperature più alte. In questo ambiente concorrono e convivono sia specie che, disponendo di un apparato radicale profondo, sono in grado di sfruttare le riserve accumulate in inverno, che specie con apparati radicali superficiali, che invece dipendono fortemente dall'intermittenza delle piogge (Rodríguez-Iturbe et al., 2001). La variabilità climatica, sia spaziale che temporale, ha generato una enorme biodiversità nelle specie presenti in aree mediterranee sino a costituire il 10% di tutte quelle esistenti (European Commission, 2001). Gli ecosistemi mediterranei aridi e semi-aridi, come quello siciliani, sono fortemente dipendenti dalla risorsa idrica e quindi dalle dinamiche dell'umidità del suolo, infatti lo stato vegetativo delle piante è funzione della facilità con cui esse possono estrarre l'acqua tramite l'apparato radicale (Porporato, et al., 2001). La variazione delle condizioni climatiche può alterare le dinamiche di umidità del suolo e di conseguenza far variare le condizioni di stress cui è sottoposta la vegetazione.

Le dinamiche di umidità del suolo possono essere correttamente riprodotte da un semplice modello di bilancio idrologico con input descritti da impulsi stocastici così come introdotto da Rodríguez-Iturbe et al. (1999). La distribuzione di probabilità dell'umidità del suolo all'interno della stagione di crescita, dipendente dalle forzanti climatiche, dalle perdite per evapotraspirazione, per percolazione profonda e del deflusso, è stata fornita, per fissato tipo di suolo e vegetazione, analiticamente da Laio et al. (2001), questa però è valida in condizioni stazionarie e cioè quando l'influenza

della condizione di umidità all'inizio della stagione di crescita può ritenersi trascurabile. Le peculiarità degli ambienti mediterranei rendono pertanto inapplicabile questo tipo di approccio, per soprattutto nel caso di vegetazione con apparati radicali profondi. Per tener in debito conto l'effetto della ricarica invernale Pumo *et al.* (2008) hanno introdotto un modello numerico che descrive l'andamento dell'umidità del suolo sia durante la fase di ricarica invernale, sia durante la stagione di crescita. Tale modello verrà utilizzato in questo lavoro al fine di valutare come le variazioni climatiche possano influenzare lo stato della vegetazione in un ambiente mediterraneo, come quello siciliano.

Le principali caratteristiche dei cambiamenti climatici attese nel bacino mediterraneo, dovute ad un incremento della CO₂, sono l'incremento della temperatura e la diminuzione delle piogge (Christensen *et al.*, 2007). Numerosi studi sulle serie storiche di pioggia concordano sulla loro diminuzione (Amanatidis *et al.*, 1993; Cannarozzo *et al.*, 2006; De Luis *et al.*, 2000; Esteban-Parra *et al.*, 1998; Giuffrida and Conte 1989; Kutiel *et al.*, 1996; Piervitali *et al.*, 1997). Questa poi sarà molto probabilmente accompagnata da un aumento dell'intensità degli eventi e da una riduzione del loro numero (IPCC, 2007). Poche informazioni si hanno invece su eventuali cambiamenti della distribuzione delle piogge nell'arco dell'anno, ma sulla base di studi sui trend registrati in passato (Cannarozzo *et al.*, 2006), si può prevedere comunque che la diminuzione delle piogge sarà prevalentemente concentrata nei mesi autunnali e invernali.

Nel presente lavoro si valuteranno quantitativamente gli effetti della variazione delle forzanti climatiche sullo stato della vegetazione. L'attenzione verrà concentrata sugli effetti, separati e combinati, che la diminuzione delle piogge e l'aumento delle temperature possono avere sullo stress idrico della vegetazione, trascurando l'influenza che l'incremento della concentrazione di CO₂ può avere sull'efficienza dei processi traspirativi (Chartzoulakis and Psarras, 2005). Altri studi in precedenza hanno valutato qualitativamente come l'effetto congiunto della riduzione delle piogge e dell'aumento della temperatura, conduca ad una diminuzione della risorsa idrica, provocando un aumento delle condizioni di stress (Palutikof *et al.*, 1994). Il presente studio differisce dai precedenti non solo per l'approccio quantitativo al problema, ma anche perché verrà valutata l'influenza, sullo stato della vegetazione, della variazione della frequenza e dell'intensità degli eventi di pioggia che caratterizzano ogni possibile scenario climatico futuro.

2 DESCRIZIONE DEL MODELLO ECOIDROLOGICO UTILIZZATO.

L'ecoidrologia è la scienza che studia le mutue interazioni tra il ciclo idrologico e gli ecosistemi naturali. Si propone, quindi, di studiare le dinamiche di interazione fra clima, suolo e vegetazione. L'umidità del suolo costituisce l'anello di congiunzione fra le variazioni climatiche e le dinamiche vegetative e pedologiche nello spazio e nel tempo. Fondamentale è la scelta del livello di analisi che si vuole perseguire, ed in particolare, in questo lavoro, si considera come scala temporale la stagione vegetativa (o stagione di crescita) e come scala spaziale quella di pochi metri. A tale livello di analisi, clima e suolo possono essere assunte come forzanti esterne al sistema in quanto non dipendenti dal grado di umidità del terreno.

Il modello ecoidrologico qui utilizzato, proposto da Pumo *et al.* (2008), è un

modello numerico in grado di superare le difficoltà precedentemente espresse, legate alla non applicabilità della condizione di stazionarietà in ambienti mediterranei e quindi all'impossibilità di utilizzare i più consolidati modelli ecidrologici analitici, ampiamente presenti in letteratura.

Gli ambienti mediterranei sono caratterizzati da una forte stagionalità delle piogge che si manifestano prevalentemente nel periodo autunnale ed invernale, durante la stagione vegetativa di riposo. Anche per le radiazioni solari e le temperature, che governano i processi evapotraspirativi, si ha una netta distinzione fra la stagione estiva-primaverile e la restante parte dell'anno. Per descrivere la stagionalità delle forzanti climatiche, il modello utilizzato distingue la modellazione della stagione di crescita della vegetazione da quella della stagione dormiente (o di riposo).

Per quanto riguarda il sistema suolo-vegetazione, si ipotizza che sia omogeneo per tipo di suolo e vegetazione presente, con spessore pari alla profondità radicale di quest'ultima; inoltre sia il tipo di suolo che il tipo di vegetazione vengono considerate invariabili nel tempo. Non si tiene conto di interazioni con falde sotterranee o scambi idrici laterali o ancora dell'effetto della pioggia battente sulla superficie del terreno. L'umidità relativa del suolo, mediata sia orizzontalmente che verticalmente, viene valutata risolvendo numericamente un'equazione del bilancio idrico. In base poi all'andamento nel tempo di tale umidità durante la stagione di crescita, viene valutata la risposta della vegetazione in termini di stress idrico.

2.1 Valutazione dell'umidità relativa del suolo

Il modello numerico che viene utilizzato per valutare gli effetti delle variazioni climatiche sulla vegetazione è basato sulla soluzione alla seguente equazione del bilancio idrico, mediante un metodo alle differenze finite:

$$\Delta s = s_{i+1} - s_i = \left(\frac{\varphi_i}{n \cdot Z_r} - \frac{\chi_i}{n \cdot Z_r} \right) \cdot \Delta t \quad (1)$$

Tale equazione consente la determinazione della variazione di umidità relativa del suolo Δs , in un prefissato intervallo temporale Δt . I termini n e Z_r rappresentano rispettivamente la porosità del terreno e la profondità radicale che si assumono dipendenti esclusivamente dalla tessitura del terreno il primo e dal tipo di vegetazione presente il secondo. Il loro prodotto è noto come spessore di suolo attivo e corrisponde al volume del terreno potenzialmente disponibile per l'immagazzinamento d'acqua.

Con il termine φ_i viene indicato il flusso di acqua entrante nel sistema al generico istante i -esimo, costituito dalle piogge al netto delle perdite per intercettazione fogliare da parte della vegetazione e per deflusso superficiale. L'altezza di pioggia viene considerata come una variabile indipendente casuale distribuita con media α mentre l'occorrenza degli eventi viene considerata come un processo stazionario di Poisson avente frequenza di interarrivo λ (Rodriguez-Iturbe et al., 2004). Per tener conto della variabilità annuale delle caratteristiche climatiche, il modello utilizzato, come detto precedentemente, considera due diverse stagioni, e cioè la stagione vegetativa di crescita e la stagione dormiente, ciascuna caratterizzata quindi da propri valori di α e λ . Per tenere conto dell'intercettazione fogliare si utilizza invece un modello a soglia fissa, il cui valore Δ dipende dal tipo di vegetazione. Il deflusso superficiale viene

calcolato come l'eccesso di pioggia netta rispetto alla capacità di immagazzinamento del terreno.

Con il termine χ_i viene invece indicato il flusso d'acqua uscente dal sistema al generico istante i -esimo, costituito dalle perdite per evapotraspirazione e percolazione profonda. In particolare, per umidità relativa del terreno al di sotto del punto di avvizzimento, s_w , si avrà soltanto evaporazione da suolo nudo. Mentre per umidità relativa del terreno compresa fra la capacità idrica di campo, s_{fc} , e il valore di incipiente chiusura stomatica, s^* , (dipendente dal tipo di vegetazione ma anche dal tipo di terreno) si avranno perdite costanti per evapotraspirazione pari al valore massimo potenziale. Infine per valori di umidità compresi fra s^* e s_w la pianta entra in fase di stress riducendo i consumi idrici e si assume una variazione lineare dal valore E_w in corrispondenza del punto di avvizzimento fino al valore di evapotraspirazione potenziale in corrispondenza del punto di incipiente chiusura stomatica. Infine quando l'umidità relativa del terreno supera la capacità idrica di campo, al valore di evapotraspirazione potenziale, vanno aggiunte le perdite per percolazione profonda che vengono modellate con legge esponenziale (caratterizzata dall'esponente β).

2.2 Stress per la vegetazione

Uno stress ecologico è una condizione prodotta in un organismo da un insufficiente livello di fattori ambientali (Lauenroth *et al.*, 1978). In molti ecosistemi, e specialmente in quelli caratterizzati da un clima arido o semi-arido, la carenza di acqua nel suolo costituisce il più importante fattore di stress per la vegetazione.

La riduzione del grado di saturazione del terreno abbassa il potenziale idrico della pianta, ne riducendo la traspirazione, causa quindi un abbassamento delle funzioni fisiologiche e provoca danni sempre più gravi alla pianta. Il contenuto idrico relativo critico, al di sotto del quale la pianta inizia a manifestare una condizione di stress, è quello che si ha in corrispondenza della fase incipiente di chiusura degli stomi, mentre il massimo valore di stress idrico si raggiunge in corrispondenza del punto di avvizzimento, al di sotto del quale la pianta subisce un danno permanente che la porta rapidamente alla morte.

In Porporato *et al.* (2001) vengono introdotti due indici analitici in grado di quantificare lo stress idrico di una pianta. Lo stress idrico statico ζ , che fornisce una descrizione statica degli effetti fisiologici indotti dallo stress idrico, è pari a zero per valori del contenuto idrico relativo maggiori o al più pari a s^* , mentre è pari all'unità per valori inferiori o al più pari a s_w . Per tutti i casi intermedi, esso può essere espresso mediante la seguente formulazione:

$$\zeta(s) = \left[\frac{s^* - s(t)}{s^* - s_w} \right]^q \quad (2)$$

dove l'esponente q tiene conto della non linearità della relazione fra stress della pianta e contenuto d'acqua nel suolo, e il cui valore dipende dalla specie vegetale e dal tipo di suolo (nel presente lavoro viene utilizzato $q=3$).

Utilizzando l'approccio numerico esposto precedentemente, è possibile valutare ad ogni istante temporale lo stress idrico relativo al valore di umidità del terreno,

calcolarne poi sia il valore medio durante la stagione di crescita sia un valore ancora più rappresentativo delle effettive condizioni della vegetazione ovvero lo stress idrico medio corretto $\langle \zeta' \rangle$ ottenuto relativamente ai soli periodi in cui si ha una situazione di stress.

Per poter studiare la gravità dello stress idrico subito da una specie vegetale durante la stagione di crescita, occorre tener conto dell'evoluzione dell'umidità del suolo durante tutta la stagione di crescita. Questa evoluzione è ben descritta da alcune caratteristiche dette *proprietà di crossing* e in particolare: 1) il numero di volte in cui il grado di umidità scende al di sotto del valore critico s^* ; 2) la durata delle escursioni sotto questo livello di soglia; 3) il volume del deficit di umidità durante queste escursioni.

Per tenere in considerazione tali aspetti, *Porporato et al.* (2001) hanno introdotto il concetto di stress idrico dinamico, combinando il valore medio corretto di stress idrico statico $\langle \zeta' \rangle$ con la durata media $\langle T_{s^*} \rangle$ ed il numero medio $\langle n_{s^*} \rangle$ dei periodi di stress idrico durante la stagione di crescita per la vegetazione. Lo stress idrico dinamico o stress totale dinamico medio durante la stagione di crescita, $\langle \theta \rangle$, viene definito come:

$$\langle \theta \rangle = \begin{cases} \left(\frac{\langle \zeta' \rangle \cdot \langle T_{s^*} \rangle}{k \cdot T_{seas}} \right)^{\langle n_{s^*} \rangle^{-\gamma}} & \text{se } \langle \zeta' \rangle \langle T_{s^*} \rangle < k \cdot T_{seas} \\ 1 & \text{se } \langle \zeta' \rangle \langle T_{s^*} \rangle \geq k \cdot T_{seas} \end{cases} \quad (3)$$

dove γ è una costante (pari a 0.5), k è un indice di resistenza della pianta allo stress idrico (in questo lavoro viene posto pari a 0.5 per specie erbacee e 0.7 per specie arboree), mentre T_{seas} è la durata in giorni della stagione di crescita. Seguendo le indicazioni di *Pumo et al.* (2008), lo stress idrico dinamico viene qui calcolato numericamente assieme a $\langle \zeta' \rangle$ ed alle proprietà di crossing. Valori di $\langle \theta \rangle$ prossimi ad 1 indicano.....

3 CASO STUDIO

Lo studio qui proposto fa riferimento a condizioni climatiche e di vegetazione riscontrate nel Bosco della Ficuzza, una riserva naturale di 7000 ha sita nel Nord della Sicilia. La riserva contiene prevalentemente specie arboree che si accompagnano ad arbusti e specie erbacee. Nel presente studio verranno considerate vegetazioni di tipo arboreo ed erbaceo per valutare la differente risposta ai diversi scenari futuri al variare della profondità radicale considerata, mentre il suolo sarà ipotizzato argilloso. La regione ha un clima di tipo mediterraneo, con estati calde e scarse precipitazioni ed inverni piovosi. La temperatura media annuale è di 16.2 °C. La media di pioggia annuale è di 75 cm, 55-60 dei quali sono concentrati in inverno. Per quanto concerne la stagione di crescita, essa ha una durata stimata in 214 giorni, dall'inizio di Aprile alla fine di Ottobre. I restanti 151 giorni costituiscono quindi la stagione dormiente.

L'analisi dei dati giornalieri di pioggia, registrati dall'OA-ARRA (*Osservatorio*

delle acque) dal 1977 al 1994 porge i valori medi dei tempi di interarrivo e delle intensità degli eventi α_g, λ_g nella stagione di crescita e di α_d, λ_d nella stagione umida. La conoscenza delle temperature medie, dell'umidità relativa e della velocità del vento consente il calcolo dei valori di evapotraspirazione massima nella stagione di crescita e nella stagione dormiente, $ET_{max,g}, ET_{max,d}$ rispettivamente, calcolati con l'equazione di Penman-Monteith.

3.1 Scenari di pioggia futuri

Gli scenari di pioggia sono rappresentati sulla scorta delle indicazioni di *Christensen et al.* (2007), che prevede una riduzione del 40% della pioggia annuale in 100 anni. Supponendo che tale riduzione si verifichi linearmente nel tempo, è possibile trattare anche scenari intermedi a 12.5, 25 e 50 anni. Si ipotizza inoltre che tale riduzione avvenga mantenendo costante il rapporto tra precipitazione nella stagione dormiente e quella nella stagione di crescita. I quattro scenari fin qui descritti sono riassunti in Tabella 1 dove sono confrontati anche con lo scenario attuale (scenario 0).

Se da un lato la riduzione delle precipitazioni appare molto probabile, soprattutto alla luce di studi sui trend pluviometrici effettuati in Sicilia (*Cannarozzo et al.*, 2006), da un altro canto sono non chiare le modalità con cui tale riduzione si verificherà. In altri termini non è ben chiaro come andranno a modificarsi le intensità medie e i tempi di interarrivo medi degli eventi. Non potendo quindi fornire una risposta univoca circa i valori futuri di α_i e λ_i ($i = g$ oppure d) viene proposta un'analisi, così come di seguito illustrata.

Volendo riprodurre il quantitativo di pioggia annuale Θ , sono univocamente determinate le piogge stagionali Θ_g, Θ_d rispettivamente nella stagione di crescita e in quella umida, in modo da mantenere inalterato il loro rapporto; queste piogge stagionali possono essere riprodotte con una qualsiasi combinazione di α_g, λ_g e α_d, λ_d tale che :

$$\begin{aligned}\alpha_g \lambda_g T_g &= \Theta_g \\ \alpha_d \lambda_d T_d &= \Theta_d\end{aligned}\tag{4}$$

Fissato il parametro λ_g , α_g è univocamente determinato dall'eq. (4). Supponendo che il rapporto λ_g / λ_d rimanga costante e pari al valore stimato dalla serie storica (0.429) è possibile risalire a λ_d e successivamente a α_d sempre tramite la eq. (4). È stato preso in esame un campo di variabilità di λ molto esteso, da un valore minimo di 0.05 giorno^{-1} (eventi rari e intensi) ad un massimo di 0.5 giorno^{-1} (eventi frequenti e poco intensi) con un passo di 0.05.

3.2 Scenari di temperatura futuri

Secondo le indicazioni di *Christensen et al.* (2007) si prevede un incremento della temperatura di 2.9 C° a 100 anni. Anche in questo caso, supponendo che tale aumento si manifesti linearmente nel tempo, si prenderanno in considerazione degli scenari intermedi a 12.5, 25 e 50 anni, per i quali l'incremento di temperatura è riportato in Tabella 1.

L'incremento della temperatura comporta un aumento dell'evapotraspirazione massima che è stato valutato numericamente utilizzando la formula di Thorntwaite e a partire dalla conoscenza dei valori mensili, riferiti allo scenario attuale, ricavati

mediante Penman-Monteith, pervenendo così a nuove stime di $ET_{max,g}$, $ET_{max,d}$.

| SCENARIO | Proiezione (anni) | Precipitazione | | | Var. Temp | Vegetaz. Erbacea | | Vegetaz. Arborea | |
|----------|----------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | | Θ (mm) | Θ_d (mm) | Θ_g (mm) | ΔT (°C) | $ET_{max,d}$ (mm/giorno) | $ET_{max,g}$ (mm/giorno) | $ET_{max,d}$ (mm/giorno) | $ET_{max,g}$ (mm/giorno) |
| 0 | 0 | 757 | 500 | 257 | 0 | 2.03 | 4.64 | 1.11 | 3.22 |
| P1 | 12.5 | 719 | 475 | 245 | 0 | 2.03 | 4.64 | 1.11 | 3.22 |
| P2 | 25 | 681 | 450 | 232 | 0 | 2.03 | 4.64 | 1.11 | 3.22 |
| P3 | 50 | 606 | 44 | 206 | 0 | 2.03 | 4.64 | 1.11 | 3.22 |
| P4 | 100 | 454 | 300 | 154 | 0 | 2.03 | 4.64 | 1.11 | 3.22 |
| T1 | 12.5 | 757 | 500 | 257 | 0.36 | 2.07 | 4.71 | 1.13 | 3.27 |
| T2 | 25 | 757 | 500 | 257 | 0.73 | 2.11 | 4.78 | 1.15 | 3.32 |
| T3 | 50 | 757 | 500 | 257 | 1.45 | 2.19 | 4.93 | 1.20 | 3.42 |
| T4 | 100 | 757 | 500 | 257 | 2.90 | 2.34 | 5.23 | 1.28 | 3.63 |
| PT1 | 12.5 | 719 | 475 | 245 | 0.36 | 2.07 | 4.71 | 1.13 | 3.27 |
| PT2 | 25 | 681 | 450 | 232 | 0.73 | 2.11 | 4.78 | 1.15 | 3.32 |
| PT3 | 50 | 606 | 44 | 206 | 1.45 | 2.19 | 4.93 | 1.20 | 3.42 |
| PT4 | 100 | 454 | 300 | 154 | 2.90 | 2.34 | 5.23 | 1.28 | 3.63 |

Tabella 1. Descrizione degli scenari futuri considerati.

4 EFFETTI DELLE VARIAZIONI CLIMATICHE

4.1 Effetti della diminuzione della pioggia

In questa sezione vengono analizzati gli effetti che la sola diminuzione di pioggia ha sullo stress vegetativo nella stagione di crescita. Pertanto gli scenari analizzati sono P1, P2, P3 e P4 così come descritti in Tabella 1. Vengono presi in esame due tipi di vegetazione con differente profondità radicale: specie arboree ($Z_r=150$ cm) ed erbacee ($Z_r=30$ cm). Oltre che per la differente profondità radicale, le specie differiscono per i valori di evapotraspirazione massima che sono maggiori per le specie arboree sia nella stagione dormiente che in quella di crescita (Tabella 1). Una ulteriore e fondamentale differenza tra le specie è costituita dalla diversa intercettazione fogliare. Per entrambe le specie si assume pari a 2 mm per le arboree, e a 0.5 mm per le erbacee.

I risultati delle elaborazioni sono presentati nella Figura 1a con riferimento alle specie arboree e in Figura 1b per le erbacee. In entrambi i casi la diminuzione della pioggia causa un aumento dello stress della vegetazione, che risulta marcatamente più grave per gli alberi. Per questi lo stress vegetativo risulta essere crescente anche all'aumentare della frequenza degli eventi λ_g (Figura 1a); ovvero quando questi diventano meno intensi. Si ritiene che ciò sia dovuto alla modellazione adottata per il fenomeno dell'intercettazione fogliare che, così per come è stata concepita, gioca un ruolo più rilevante nel caso di eventi frequenti. Con riferimento allo scenario attuale, si osservi come il semplice aumento della frequenza degli eventi (oggi $\lambda_g=0.2$) possa portare ad un incremento significativo dello stress, mentre l'eventuale riduzione produce una più moderata diminuzione dello stress.

Nel caso di specie erbacee (Figura 1b) si osserva invece un comportamento poco

sensibile alla variazione della frequenza λ_g ; tuttavia si osserva l'esistenza di un punto di minimo stress in corrispondenza di una frequenza che sembra decrescere al diminuire del quantitativo annuale di pioggia.

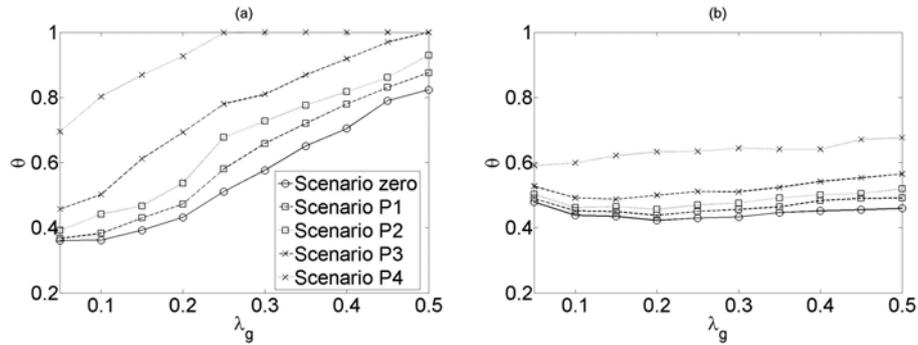


Figura 1. Effetto della variazione della pioggia sullo stress delle specie arboree (a) ed erbacee (b).

4.2 Effetti dell'aumento della temperatura

L'aumento della temperatura genera l'aumento dell'evapotraspirazione massima sia nelle specie arboree che nelle erbacee. I valori di $ET_{max,g}$, $ET_{max,d}$ influiscono poi sulle dinamiche di umidità del suolo che a loro volta determinano lo stress idrico. In questa sezione sono stati stimati gli stress idrici della vegetazione tenendo conto, nelle simulazioni, degli incrementi di evapotraspirazione massima. Negli scenari simulati (T1, T2, T3, T4) la pioggia annuale è mantenuta costante e pari al valore attuale al fine di evidenziare il ruolo svolto dal solo aumento della temperatura. I risultati, così come atteso, mostrano un incremento dello stress idrico, soprattutto per le specie arboree (Figure 2a e 2b). Gli effetti dell'aumento della sola temperatura risultano meno gravi di quelli relativi alla sola diminuzione delle piogge e comunque trascurabili rispetto all'effetto indotto dalla variazione della frequenza λ_g che gioca il medesimo ruolo per tutti gli scenari analizzati, stante l'andamento pressoché parallelo delle curve. Nel caso di vegetazione erbacea si riscontra nuovamente, ma in modo più evidente, la presenza di un minimo.

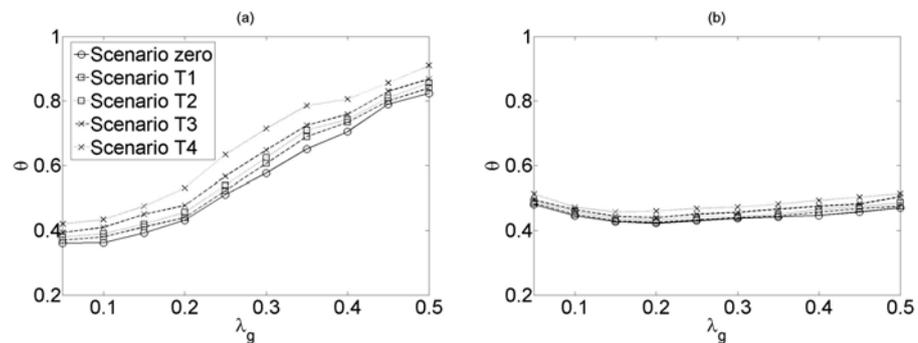


Figura 2. Effetto della variazione delle temperature sullo stress delle specie arboree (a) ed erbacee (b).

4.3 Effetti combinati.

Nelle precedenti sezioni sono stati valutati singolarmente gli effetti della diminuzione delle piogge e dell'aumento delle temperature. Vista la marcata non linearità della risposta della vegetazione in termini di stress alle forzanti climatiche, non è pensabile una sovrapponibilità di tali effetti, pertanto si è provveduto ad analizzare scenari caratterizzati dalla variazione di entrambe le variabili in modo da valutare l'effetto complessivo che queste variazioni hanno sullo stress idrico. Gli scenari considerati nelle simulazioni (PT1, PT2, PT3 e PT4) considerano contemporaneamente la diminuzione della pioggia e l'aumento della temperatura. I risultati sono illustrati nella Figura 3a per le specie arboree ed in Figura 3b per le erbacee. Il comportamento delle curve che descrivono lo stress è assai prossimo a quello che descriveva l'effetto della diminuzione delle piogge, a riprova che l'effetto dell'aumento delle temperature è di secondaria importanza rispetto a quello relativo alla variazione delle precipitazioni.

Si osservi come l'incremento di stress dovuto alla riduzione delle piogge e all'aumento delle temperature non porta mai a condizioni critiche per la vegetazione erbacea, suggerendo un vantaggio di queste sulle arboree. Quest'ultime nello scenario a 100 anni presentano stress unitario per diversi valori di λ_g (\geq di 0,2 l/giorno, ovvero eventi con frequenza superiore ad uno ogni cinque giorni con altezza media inferiore a 3.4 mm), il che in termini pratici comporta una elevata probabilità di non sopravvivenza.

A parità di pioggia i quattro scenari considerati sembrano avere un comportamento diverso al variare di λ_g . Infatti per quanto riguarda la vegetazione arborea, gli scenari PT1 e PT2, così come lo scenario 0 presentano due differenti concavità, con un flesso in corrispondenza di $\lambda_g=0.2 \div 0.25$ che sembra spostarsi verso sinistra (valori più bassi) al diminuire delle piogge. Il tratto di curva più vicino al punto di flesso, che di fatto è abbastanza prossimo al valore attuale di frequenza, può essere considerato come un tratto critico in quanto in esso sono più significativi gli effetti delle variazioni della frequenza λ_g . Man mano che ci si allontana da questa zona le curvature si riducono e quindi il sistema diventa meno sensibile alle variazioni della frequenza λ_g . Gli scenari PT3 e PT4, all'interno del range di λ_g considerato, sembrano avere invece soltanto una concavità verso il basso: l'incremento della frequenza produce effetti marginali minori. Per quanto riguarda invece la vegetazione di tipo erbacea, soltanto per l'ultimo scenario (PT4) si ottiene un andamento monotono crescente; per gli altri è ancora una volta presente un minimo in misura più o meno accentuata.

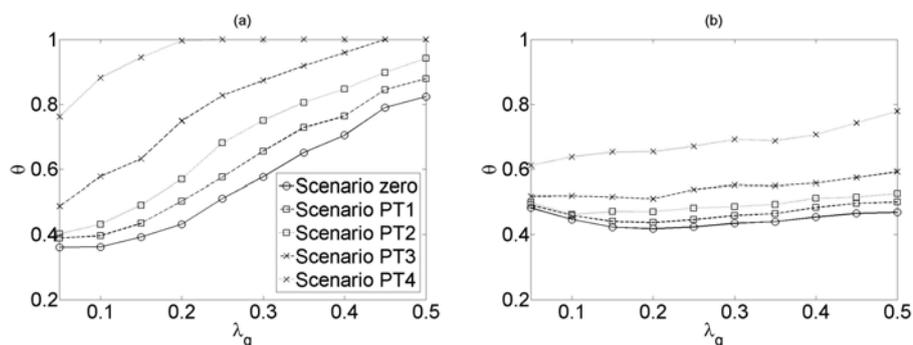


Figura 3. Effetto della variazione della pioggia e delle temperature sullo stress delle specie arboree (a) ed erbacee (b).

5 CONCLUSIONI

Gli effetti del cambiamento climatico in ambiente mediterraneo sono già visibili e ampiamente documentati. Le precipitazioni tendono a diminuire ed allo stesso tempo le temperature medie crescono, e si pensa che tale trend possa mantenersi costante se non addirittura essere amplificato. In questo lavoro sono stati analizzati gli effetti di tali cambiamenti sugli ecosistemi mediterranei. Tramite un modello ecoidrologico numerico sono state stimate le dinamiche di umidità del suolo ed il conseguente stress della vegetazione in scenari climatici futuri. In accordo con le previsioni di *Christensen et al.*, (2007) si è fatto riferimento a degli scenari futuri caratterizzati da una differente quantità e frequenza delle piogge e da differenti valori di temperatura. I risultati mostrano un incremento dello stress della vegetazione il cui primo responsabile è la diminuzione delle precipitazioni, mentre l'aumento delle temperature, seppur rilevante, appare come un fattore di secondaria importanza. Le specie arboree risultano essere quelle più sensibili ai cambiamenti climatici, tanto che alcuni scenari qui ipotizzati non risultano compatibili con la sopravvivenza di tali specie, pur considerando l'effetto benefico che invece potrebbe derivare dal verificarsi, a parità di pioggia stagionale, di eventi mediamente più intensi e meno frequenti, secondo quanto previsto da *IPCC*, (2007).

Ad avvantaggiarsi di tale situazione, in base ai risultati qui ottenuti, potrebbero essere le piante erbacee per le quali è comunque contenuto l'incremento dello stress idrico, dovuto alla diminuzione delle piogge, all'aumento delle temperature ed alla riduzione della frequenza degli eventi: esse pertanto risultano fin d'ora in grado di fronteggiare e di adattarsi ai previsti cambiamenti climatici.

BIBLIOGRAFIA

- Amanatidis, G.T., Paliatsos, A.G., Repapis, C.C. and Bartzis, J.G., Decreasing Precipitation Trend in the Marathon Area, Greece. *International Journal of Climatology*, 1993, 13(2): 191-201.
- Cannarozzo, M., Noto, L.V. and Viola, F., Spatial distribution of rainfall trends in Sicily (1921-

- 2000). *Physics and Chemistry of the Earth*, 2006, 31(18): 1201-1211.
- Chartzoulakis, K. and Psarras, G., Global change effects on crop photosynthesis and production in Mediterranean: the case of Crete, Greece. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2005, 106(2-3): 147-157.
- Christensen, J.H. et al., Regional Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- De Luis, M., Raventos, J., Gonzalez-Hidalgo, J.C., Sanchez, J.R. and Cortina, J., Spatial analysis of rainfall trends in the region of Valencia (East Spain). *International Journal of Climatology*, 2000, 20(12): 1451-1469.
- Esteban-Parra, M.J., Rodrigo, F.S. and Castro-Diez, Y., Spatial and temporal patterns of precipitation in Spain for the period 1880-1992. *International Journal of Climatology*, 1998, 18(14): 1557-1574.
- European Commission, RICAMARE: Background on Global change, biodiversity and conservation, European Commission, 2001.
- Giuffrida, A. and Conte, M., Long term evolution of the Italian climate outlined by using the standardized anomaly index (SAI), *Conference on Climate and Water (I)*, 1989, Helsinki, Finland, pp. 197.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2007.
- Kutiél, H., Maheiras, P. and Guika, S., Circulation and extreme rainfall conditions in the eastern Mediterranean during the last century. *International Journal of Climatology*, 1996, 16(1): 73-92.
- Laio, F., Porporato, A., Ridolfi, L. and Rodriguez-Iturbe, I., Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress - II. Probabilistic soil moisture dynamics. *Advances in Water Resources*, 2001, 24(7): 707-723.
- Lauenroth, W.K., Dodd J.L., & Sims P.L., The effects of water and nitrogen induced stresses on plant community structure in a semi-arid grassland, *Oecologia*, 1978, 36, pages 211-222.
- Palutikof, J.P., Goodess, C.M. and Guo, X., Climate-Change, Potential Evapotranspiration and Moisture Availability in the Mediterranean Basin. *International Journal of Climatology*, 1994, 14(8): 853-869.
- Piervitali, E., Colacino, M. and Conte, M., Signals of climatic change in the central-western Mediterranean basin. *Theoretical and Applied Climatology*, 1997, 58(3-4): 211-219.
- Porporato, A., Laio, F., Ridolfi, L. and Rodriguez-Iturbe, I., Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress - III. Vegetation water stress. *Advances in Water Resources*, 2001, 24(7): 725-744.
- Pumo, D., Viola, F. and Noto, L.V., Ecohydrology in Mediterranean areas: a numerical model to describe growing seasons out of phase with precipitations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2008, 12(1): 303-316.
- Rodriguez-Iturbe, I., Porporato, A., Laio, F. and Ridolfi, L., Intensive or extensive use of soil moisture: plant strategies to cope with stochastic water availability. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(23): 4495-4497.
- Rodriguez-Iturbe, I., Porporato, A., Ridolfi, L., Isham, V. and Cox, D.R., Probabilistic modelling of water balance at a point: the role of climate, soil and vegetation. *Proceedings of the Royal Society of London Series a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 1999, 455(1990): 3789-3805.