

Progetto Finalizzato CLIMAGRI – CAMBIAMENTI CLIMATICI E AGRICOLTURA

Sottoprogetto 3: Siccità, desertificazione e gestione delle risorse idriche

Linea di ricerca 3.3: MODELLO PREVISIONALE DELLE CONSEGUENZE DELL'AUMENTO DELLA TEMPERATURA E DELL'IRRADIANZA ULTRAVIOLETTA SULLA DINAMICA DI POPOLAZIONI ZOOPLANCTONICHE DI INTERESSE IN ACQUACOLTURA

Responsabile: Dr. Maurizio Severini (ISAC – CNR) Relazione tecnico-scientifica sull'attività svolta nel corso del Terzo Anno

Roma, gennaio 2006

Firma

INTRODUZIONE

Le ricerche svolte dalla nostra Unità Operativa (UO) nell'ambito del Progetto Finalizzato (PF) CLIMAGRI (Linea 3.3) sono state rivolte allo studio delle influenze della variabilità climatica sull'attività di acquacoltura in mare. Il principale obiettivo era la costruzione di un *modello matematico*: un modello matematico con cui *simulare* la fenologia e la dinamica delle popolazioni zooplanctoniche del Lago di Fogliano (Sabaudia), sito scelto come principale riferimento in natura dei nostri studi. Il modello matematico Delay Simulator (DS), da noi sviluppato è una evoluzione dei modelli a ritardo distribuito (Distributed Delay Models-DDMs), che hanno trovato applicazione nello studio della dinamica di popolazione di singole specie, delle interazioni preda-predatore, della fenologia e della dinamica di popolazioni peciloterne e sono stati impiegati per guidare il controllo delle infestazioni di artropodi e per sviluppare sistemi di controllo integrati dei parassiti delle colture agrarie (*Integrated Pest Management-IPM*). Tuttavia, essi simulano soltanto la fenologia e la dinamica delle popolazioni negli stadi giovanili del ciclo vitale. Essi vanno bene per il periodo che va dalla nascita alla maturazione sessuale, ma non considerano lo stadio adulto ed i meccanismi di riproduzione (Severini et al., 2004a). Questo obiettivo è stato raggiunto inserendo nel modello DDM un algoritmo capace di simulare lo stadio adulto degli individui ed i meccanismi riproduttivi. Ciò permette al nuovo modello di simulare, in via di principio, il ciclo vitale di tutte le popolazioni peciloterne, comprese le multivoltine e quindi anche delle popolazioni zooplanctoniche del Lago di Fogliano. Il secondo obiettivo della nostra UO era quello di realizzare dei microcosmi. La simulazione dell'impatto delle variabili dell'ambiente fisico sulle popolazioni biologiche, oltre che con un modello matematico, si può fare con un modello analogico. Si tratta di costruire dei microcosmi nei quali allevare popolazioni standard in condizioni fisiche controllate (modelli biologici). Le condizioni fisiche vengono variate in relazione agli scenari climatici previsti e si osserva il comportamento delle popolazioni allevate. Questi microcosmi si possono impiegare sia in laboratorio che in natura. Nel primo caso, essi sono uno strumento essenziale per la stima dei parametri dei modelli matematici, nel secondo un riferimento essenziale per la loro *validazione*.

IL MODELLO MATEMATICO

Le caratteristiche di base del modello sono state descritte dettagliatamente nelle Relazioni Tecnico-Scientifiche del Primo e del Secondo anno, per cui qui vengono riportate in maniera sintetica, mentre si darà spazio ai risultati delle applicazioni del modello DS.

Il modello matematico è un modello *compartimentale*, in cui ciascun compartimento rappresenta uno *stadio* (o *fenofase*) del ciclo vitale e la temperatura $T(t)$ costituisce la funzione forzante del modello. Consideriamo lo stadio giovanile del ciclo vitale (Fig.1). Al tempo t esso sarà 'occupato' da una densità di popolazione $N(t)$ mentre il suo ingresso e la sua uscita saranno attraversati rispettivamente dai flussi di individui $R_i(t)$ ed $R_u(t)$ legati tra loro da un sistema di H equazioni differenziali lineari del primo ordine noto come *Modello a Ritardo Distribuito* ('Distributed Delay Model) o DDM (Manetsch, 1976).

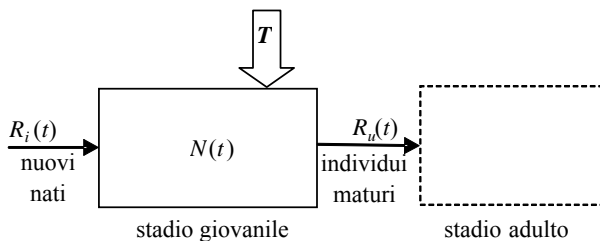


Fig 1 – Rappresentazione dello stadio giovanile (dalla nascita degli individui alla loro maturazione).

L'esperienza dimostra che gli individui che entrano in questo stadio trascorrono del tempo al suo interno (*tempo di residenza*) e dopo un certo tempo (*ritardo*) ne fuoriescono maturi. Questo ritardo viene simulato nei modelli DDM attraverso lo sviluppo di un sistema equivalente in cui lo stadio giovanile *osservabile* è rappresentato da una successione di H sub-stadi *non osservabili* tutti uguali tra loro. Il sistema, a temperatura costante (modello Time Invariant Delay-TID), nel caso particolare in cui il flusso di ingresso sia una *Funzione Delta* di Dirac (che simula una coorte di individui) si può risolvere ricorsivamente ed ammette la soluzione analitica, nota come *Distribuzione di Erlang*.

$$r_H(t) = \frac{\left[\frac{H}{DEL}\right]^H}{(H-1)!} \cdot e^{-\left[\frac{H}{DEL}\right]t} \cdot t^{H-1}$$

La Distribuzione di Erlang può essere considerata una funzione di densità di probabilità (probabilità di un individuo di maturare in un dato intervallo di tempo) ed il suo *valore atteso* viene indicato con *DEL* (*Delay*) e rappresenta il tempo medio necessario agli individui della coorte per maturare, cioè il ritardo medio col quale la maturazione segue la nascita. Se la temperatura è variabile, il modello TVD (Time Varying Delay) non ammette una soluzione analitica e deve essere risolto per via *numerica*. La soluzione di questo modello in cui il parametro D tiene conto della *mortalità* degli individui nello stadio giovanile calcolata come attrito (Vansickle, 1977), è la seguente (Alilla et al., 2004; Alilla et al., 2005):

$$r_H(j+1) = r_H(j) + \frac{H}{DEL(j)} \cdot \left\{ r_{H-1}(j) - \left(1 + \frac{DEL(j) + [D-1] \cdot DEL(j-1)}{H} \right) \cdot r_H(j) \right\}$$

Riscrivendo l'equazione in maniera opportuna si può procedere alla soluzione numerica che dà come risultato il flusso giornaliero di individui che escono maturi dallo stadio giovanile (Pesolillo et al., 2004). La soluzione dà i flussi giornalieri di maturazione di una coorte, cioè degli individui nati in uno stesso giorno. Nella maggior parte delle popolazioni naturali ogni giorno nascono nuovi individui. I nuovi nati in giorni successivi vengono rappresentati come un insieme multi-coorti, cioè come una successione di coorti (una successione di Funzioni Delta) che entrano una per giorno nel modello TVD. Il modello simula in maniera soddisfacente quello che si osserva in natura dove individui *nati dopo* raggiungono la maturità prima di individui *nati prima* e dà in uscita una successione di coorti diversa da quella in ingresso (Fig. 2). Le coorti d'individui maturi che escono dal modello TVD entrano nello stadio adulto. Questo stadio non si può simulare con un modello TVD perché il sistema di equazioni di quest'ultimo non tiene conto della riproduzione. Perciò è stato costruito un nuovo modello costituito da *due compartimenti* posti tra l'uscita del modello TVD di una generazione e l'ingresso del modello TVD della generazione successiva (Fig. 2). Nel primo compartimento (*B*) viene simulato il meccanismo di *riproduzione* e nel secondo (*S*) quello di sopravvivenza dei nuovi nati (Fig. 2). Nella figura 3 è riportata una rappresentazione (molto) schematica del modello DS implementato su foglio di calcolo. Nella prima colonna (A) viene riportato il tempo j in giorni a partire dalla prima oviposizione della stagione, nella seconda (B) la temperatura media giornaliera $T(j)$, nella terza (C) il ritardo istantaneo $DEL(j)$. I parametri del modello DDM sono calcolati dai dati di queste tre colonne ed entrano nel primo ritardo variabile (TVD₁). Nella colonna G viene riportato il flusso giornaliero di nuovi nati e nella riga 5 sono riportati i dati della coorte iniziale in ingresso.

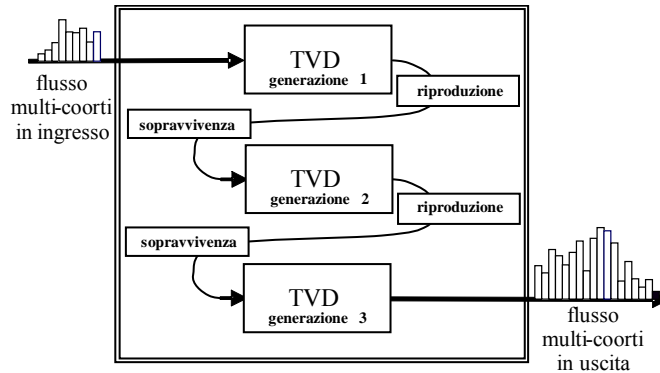


Fig 2 – Schema del modello DS per una popolazione multivoltina con tre generazioni, basato su tre modelli TVD collegati in serie.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	N	O
1																				
2		Parametri					TVD1					Riproduzione 1		TVD2					Riproduzione 2	
3																				
4																				
5	0	T(0)	DEL(0)	W(0)	AA(0)	BB(0)	r_{00}	r_{01}	r_{02}	...	r_{0H}			r_{00}	r_{01}	r_{02}	...	r_{0H}		
6	1	T(1)	DEL(1)	W(1)	AA(1)	BB(1)	r_{10}							r_{10}						
7	2	T(2)	DEL(2)	W(2)	AA(2)	BB(2)	r_{20}							r_{20}						
8	3	T(3)	DEL(3)	W(3)	AA(3)	BB(3)	r_{30}							r_{30}						
9	4	T(4)	DEL(4)	W(4)	AA(4)	BB(4)	r_{40}							r_{40}						
10	5	T(5)	DEL(5)	W(5)	AA(5)	BB(5)	r_{50}							r_{50}						
11	6	T(6)	DEL(6)	W(6)	AA(6)	BB(6)	r_{60}							r_{60}						
12	7	T(7)	DEL(7)	W(7)	AA(7)	BB(7)	r_{70}							r_{70}						
13	8	T(8)	DEL(8)	W(8)	AA(8)	BB(8)	r_{80}							r_{80}						
14	9	T(9)	DEL(9)	W(9)	AA(9)	BB(9)	r_{90}							r_{90}						
15	10	T(10)	DEL(10)	W(10)	AA(10)	BB(10)	r_{100}							r_{100}						
16	11	T(11)	DEL(11)	W(11)	AA(11)	BB(11)	r_{110}							r_{110}						
17	12	T(12)	DEL(12)	W(12)	AA(12)	BB(12)	r_{120}							r_{120}						

Fig. 3– Struttura del modello DS su foglio di calcolo.

CAMPIONAMENTI E SIMULAZIONI IN NATURA

Volendo impiegare il modello Simulatore di Ritardo alla simulazione della dinamica delle popolazioni zooplanctoniche del Lago di Fogliano abbiamo dovuto stimare i parametri del modello relativi alla popolazione di studio. Generalmente, la *stima dei parametri* di un modello è una operazione complessa perché richiede dati ed esperimenti ad hoc. Abbiamo cercato di superare tali difficoltà in parte attraverso gli *esperimenti di laboratorio* ed i *campionamenti in natura* ed in parte cercando nella *letteratura scientifica* i dati ed i parametri mancanti. Una lunga ed approfondita analisi della letteratura ci ha permesso non solo di fare una prima stima dei parametri del modello DS per le popolazioni di *Copepodi* ma anche di stimare i parametri di due popolazioni interagenti: la vite (*Vitis vinifera*) e la tignoletta (*Lobesia botrana*).

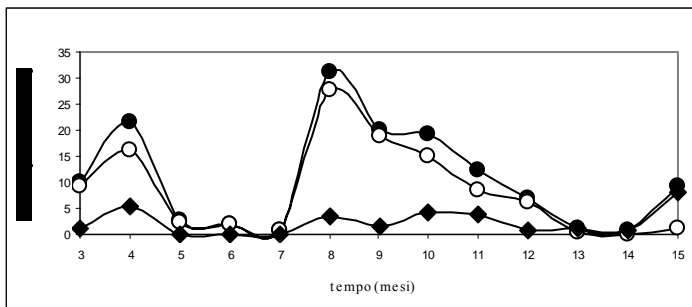
Campionamenti delle popolazioni zooplanctoniche del Lago di Fogliano.

I Copepodi sono risultati, sulla base della campagna di campionamenti durata 12 mesi ed iniziata nel Marzo 2003, i componenti principali dello zooplancton del Lago di Fogliano.

Il Lago di Fogliano (Parco del Circeo, LT) è il più settentrionale ed il più grande (superficie 403.8 ha) dei 4 laghi costieri appartenenti al Parco Nazionale del Circeo (LT). Le sue acque sono salmastre (salinità compresa tra 3,0 e 4,5 %) e la sua profondità non supera i 2 metri. A causa della piccola altezza dell'acqua e di una vegetazione lacustre (*Ruppia maritima*) molto fitta ed affiorante in superficie a partire da Giugno, il lago è esposto al rischio di crisi anossiche.

Nella relazione tecnico-scientifica del secondo anno sono stati riportati i risultati parziali dei campionamenti effettuati fino al mese di Dicembre 2003, in questa sede vengono esposti in maniera completa con l'inserimento dei successivi campionamenti eseguiti nei primi tre mesi del 2004. In collaborazione con la Dr.ssa Laura Aguzzi e la Dr.ssa Luisa Parrella, abbiamo eseguito prelievi mensili della componente zooplanctonica del lago. Il programma di campionamento è stato predisposto sulla base di studi precedentemente effettuati (Giorgi et al., 1996). Sono state individuate 5 stazioni, 4 delle quali corrispondono a quelle già monitorate nel 1992-93 (Giorgi et al., 1996), mentre la quinta è stata posizionata nel centro del lago. In ciascun punto per ciascun campionamento sono stati filtrati 300 litri d'acqua tramite una trappola di Patalas da 15 litri con una maglia di 0.1 mm. I campioni sono stati fissati in formalina sul posto ed analizzati successivamente presso il Laboratorio Centrale di Idrobiologia (MIPAF). In laboratorio i campioni sono stati sciacquati, portati ad un volume iniziale noto ed analizzati allo stereomicroscopio dopo essere stati frazionati. I valori medi dei principali taxa dello zooplancton del lago misurati mese per mese (composizione in Specie) sono riportati nella tabella 1, gli andamenti temporali delle concentrazioni di Copepodi, dei restanti taxa messi insieme e dello zooplancton totale sono mostrati nella Fig. 4. Allo scopo di dare una descrizione sintetica della stagionalità dello zooplancton del lago, le densità dei vari taxa sono state raggruppate in: i) Zooplancton totale: tutti gli individui zooplanctonici, indipendentemente dalla Classe e dallo stadio di appartenenza, ii) Copepoda: larve ed adulti di Copepodi, indipendentemente dall'Ordine e dallo stadio di appartenenza, iii) Altro: larve ed adulti zooplanctonici non appartenenti alla Sottoclasse dei Copepodi.

TAXA [ind/l]	3	4	5	6	7	8	10	12	1	2	3
Cop. Arpacticoidi	0,08	0,12	0,05	0,78	0,24	2,23	1,08	1,27	0,02	0,05	0,11
Cop. Calanoidi	43,21	55,6	4,59	0,23	0,85	36,7	0,96	0,18	0,06	0,03	0,01
Cop. Cyclopoidi	0,027	0,04	0,01	0,24	0,05	0,97	0,56	0,06	0,03	0	0,01
A. margalefi	43,15	55,5	4,59	0,23	0,83	36,3	0,93	0,18	0,06	0,03	0,01
A. clausi	0,053	0,03				0,01					
I. Policheti	4,953	23,3	0,33	0,03	0,01	0,03	8,21	0,07	0,14	0,26	0,78
I. Cirripedi	0,026	0,93	0	0	0	0,41	1,04	0,03	0,04	0	0,07
I. Copepodi	1,917	25,1	7,52	8,18	2,62	97,7	71,5	30	1,13	0,41	4,91
I. Gasteropodi		0,59	0,07	0,01	0,01	0	0,29	0,11	0,18	0,16	0,18
I. Lamellibranchi		2,51	0,23	0,13	0,13	17,1	11,9	4,17	4,96	3,53	39,6
I. Decapodi	0,066										
I. Tunicati		0,1									
I. Planula		0,15	0,05								
Ostracodi				0,79	0,01			0,01			



Tab 1- Valori medi dei principali taxa (individui/litro) misurati nelle 5 stazioni del Lago di Fogliano nel periodo Marzo 2003-Marzo 2004, (l. indica gli stadi larvali).

Fig. 4- Andamento di diversi taxa zooplanctonici nel Lago di Fogliano nel periodo 2003-04. Densità di popolazione (ind/l) dello zooplancton totale (cerchietti pieni), dei Copepodi (cerchietti vuoti) e delle restanti specie zooplanctoniche (rombi pieni). I numeri 13, 14 e 15 si riferiscono rispettivamente ai mesi Gennaio, Febbraio e Marzo 2004.

La densità dei Copepodi (e dello zooplancton) mostra un andamento bimodale con due massimi: uno in Aprile e l'altro in Agosto e due minimi: il primo - piuttosto ampio - nei mesi di Maggio, Giugno, Luglio ed il secondo nei mesi di Dicembre, Gennaio, Febbraio. Mentre il secondo minimo va messo certamente in relazione con le basse temperature invernali, il primo potrebbe essere stato causato dall'abbondante sviluppo della vegetazione lacustre (*Ruppia maritima*) che potrebbe aver sottratto significative quantità di ossigeno all'acqua del lago, ai pesci ed allo zooplancton.

I risultati dei campionamenti effettuati dal nostro gruppo (2003-04) sono stati confrontati con quelli fatti negli stessi punti undici anni prima dal gruppo della Dr.ssa Giorgi (1992-93). Lo scopo era di verificare se, nel tempo intercorso, è avvenuto qualche cambiamento significativo nel popolamento zooplanctonico del lago. I risultati del confronto sono riportati nella Tab. 2 e nella Fig. 5.

Ordine [%]	03-04	92-93
Arpacticoidi	4,4646	32,653
Calanoidi	94,042	66,245
Ciclopoidi	1,4931	1,1025

Specie [%]	03-04	92-93
<i>A. margalefi</i>	99,939	73,03
<i>A. clausi</i>	0,0608	25,448

Tab 2– Confronto tra le percentuali medie dei copepodi (per ordine a sinistra e per specie a destra) campionati durante il periodo 2003-04, e quelle dei rilevamenti del '92-93 (Giorgi et al., 1996).

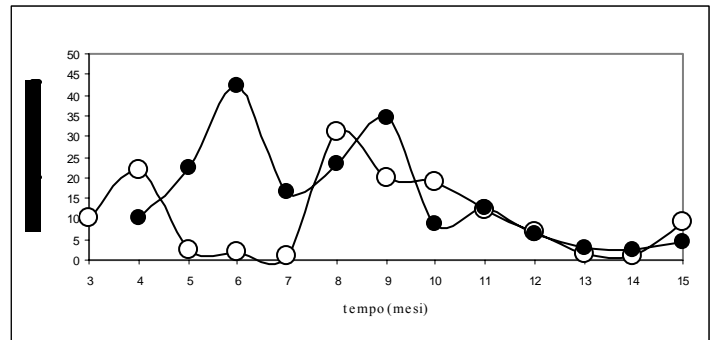


Fig. 5– Andamenti mensili della densità di organismi zooplanctonici (individui/litro) rilevati nel Lago di Fogliano nella campagna di misure del 1992-93 (cerchietti pieni) ed in quella del 2003-04 (cerchietti vuoti). I dati di Agosto 1992, mancanti dalla serie pubblicata, sono stati interpolati.

Il confronto tra i due campionamenti mette in evidenza che in passato: a) c'era il comportamento bimodale dell'andamento della densità di popolazione, b) il minimo di primavera-estate durava di meno, c) la stagione di sviluppo della popolazione iniziava più tardi di un mese (almeno), d) la densità dello zooplancton era maggiore. Queste differenze, insieme a quella della variazione della composizione in Specie (Tab.2), i campionamenti hanno infatti evidenziato che l'Ordine biologico delle popolazioni zooplanctoniche di gran lunga prevalente nel Lago di Fogliano è quello dei *Copepodi Calanoidi* (94%) e che questo è costituito quasi esclusivamente dalla Specie *Acartia margalefi* (99.9%), sembrano indicare un cambiamento nella biologia del lago. Il cambiamento può essere messo in relazione con la variabilità climatica a scala locale. Ad esempio, l'anticipo della stagionalità dello zooplancton potrebbe essere attribuibile all'impatto a scala locale dell'aumento di temperatura a scala globale. Tuttavia, questa interpretazione non può essere sostenuta sulla base degli scarsi dati a disposizione. Per questo, i dati dei campionamenti effettuati sono stati impiegati 'solo' come confronto con le simulazioni del modello DS.

Simulazioni delle popolazioni zooplanctoniche del Lago di Fogliano.

Per applicare il modello DS al popolamento zooplanctonico del lago, si dovevano stimare i parametri del modello per le popolazioni di *A. margalefi*. Non essendo disponibili i dati necessari e non potendo effettuare esperimenti di laboratorio ad hoc nel breve tempo a disposizione, ci siamo rivolti alla letteratura scientifica. Qui non abbiamo trovato i dati per *A. margalefi*; tuttavia, abbiamo trovato un articolo con i dati per *Acartia tsuensis* (Takahashi & Ohno, 1996). Considerando che le due Specie fanno parte dello stesso Genere, si è ritenuto lecito usare i dati dell'articolo per stimare - in via preliminare - i parametri del modello DS da applicare ai Copepodi del Lago di Fogliano. Nell'articolo di Takahashi & Ohno riportati i risultati di un esperimento di laboratorio in cui 36 coorti di 150 uova di *A. tsuensis* sono state allevate a 6 temperature costanti diverse. Per ciascuna di esse, viene riportato il tasso medio di sviluppo (giorni⁻¹) nello stadio giovanile. Mediante una regressione lineare su questi dati abbiamo calcolato i valori di F e T_0 (Severini & Gilioli, 2002). Il parametro di mortalità D è stato stimato, sempre dai dati dell'articolo, dividendo la mortalità media per la durata media dello stadio

giovanile e quello di stocasticità H confrontando i flussi di maturazione di *A. tsuensis* con simulazioni fatte col modello DS (Pesolillo, 2003). Inoltre, l'articolo mostra che le femmine di *A. tsuensis* vivono in media 8 giorni, producono 7.2 nuovi nati al giorno e costituiscono il 75% della popolazione. In base a questi dati è stato stimato in parametro di riproduzione B . Infine, il parametro di sopravvivenza S - che non può essere dedotto da esperimenti di laboratorio - è stato stimato per tentativi, attribuendo ad esso valori diversi e confrontando i risultati del modello DS con l'andamento dei campionamenti descritti nel lavoro di (D'Ambra et al. 1997) che si riferiscono al lago di Fogliano.

Per simulare la dinamica delle popolazioni di *Acartia* del Lago di Fogliano col modello DS mancava ancora un dato: l'andamento giornaliero della temperatura dell'acqua $T(j)$ per 365 giorni. E neanche questo era disponibile. Perciò, anche in questo caso, siamo dovuti ricorrere a ricostruzioni indirette. La stazione meteorologica con una serie completa (1995-2003) di misure di temperatura (orarie) più vicina al Lago di Fogliano (10 Km) è quella della rete SIAN-UCEA di Borgo San Michele (BSM). Dai dati misurati in questa stazione, abbiamo calcolato le temperature medie mensili dell'aria per l'anno 1995 e per tutti gli anni disponibili (temperatura media mensile climatica). Le medie del 1995 sono state confrontate con quelle dell'acqua del lago riportate, per lo stesso anno, nel report di D'ambra et al. (1997). Dal confronto si evince che la temperatura del lago è stata sempre maggiore di quella di BSM, esclusi i mesi di Febbraio e Dicembre (Tab. 3).

	Temperature medie mensili del 1995											
	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
B. S. M.	6,89	9,43	9,30	11,98	16,00	19,42	24,48	23,56	19,62	16,08	10,97	10,84
L. Fogliano	10	8	15	20	23,75	27,5	28,75	30	23,75	19,4	12,5	10
diff.	-3,11	1,43	-5,70	-8,02	-7,75	-8,08	-4,27	-6,44	-4,13	-3,32	-1,53	0,84

Tab 3– Differenza tra le temperature medie mensili di Borgo San Michele (B.S.M.) e del Lago di Fogliano. La temperatura del lago risulta più alta di quella dell'aria (differenze negative).

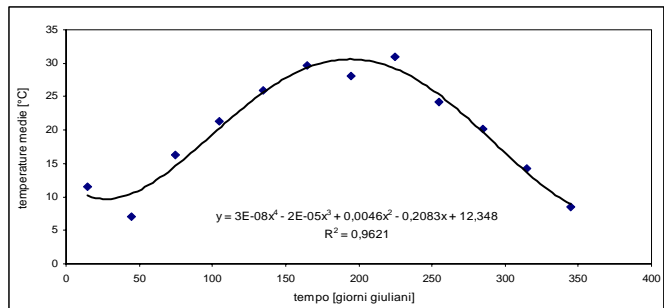


Fig. 6– Serie climatica delle temperature medie mensili dell'acqua del Lago di Fogliano e funzione interpolante polinomiale di quarto grado da cui è stata ricavata la serie climatica delle temperature medie giornaliere.

Le differenze tra le medie mensili delle temperature dell'anno 1995 sono state ritenute rappresentative di quelle climatiche (non si poteva fare altro) e sono state sommate (algebricamente) alla temperatura media climatica di BSM. Si sono ottenuti 12 valori di temperatura che abbiamo considerato rappresentativi dei valori medi mensili climatici del lago. Questi sono stati interpolati con una funzione polinomiale di quarto grado (Fig. 6) da cui sono stati calcolati, infine, i 365 valori di $T(j)$ da inserire nel modello DS (Navarra, 2004).

Quando tutti i dati necessari sono stati disponibili, abbiamo fatto 'girare' il modello DS per le popolazioni di *Acartia* del Lago di Fogliano, facendo un'ultima assunzione: che i 365 valori di $T(j)$ calcolati fossero rappresentativi della temperatura del lago nel periodo Marzo 2004 - Marzo 2004 a cui si riferiscono i campionamenti da noi effettuati. Per simulare l'andamento della densità di popolazione degli adulti (Fig. 7) durante l'intero periodo di crescita, il modello è stato fatto girare per 18 generazioni successive tenendo conto anche della presenza della vegetazione lacustre.

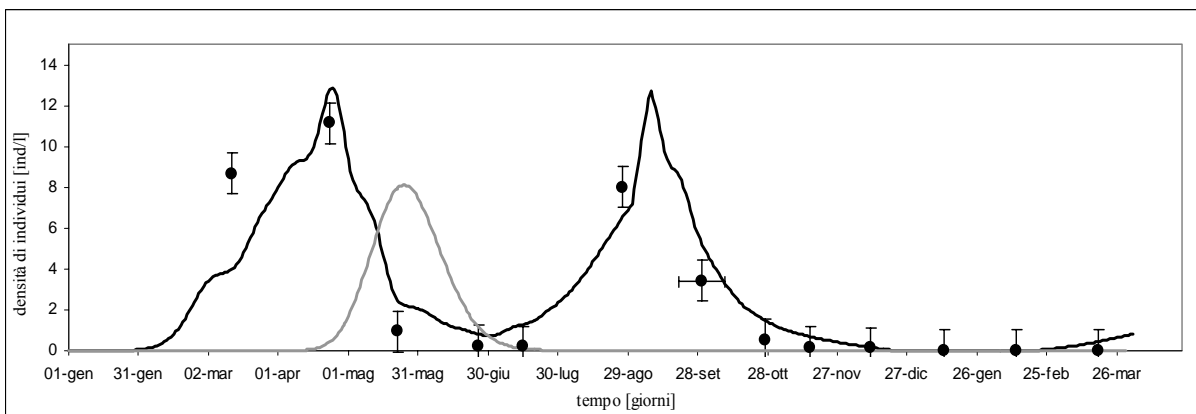


Fig. 7– Confronto tra la simulazione della densità di *Acartia* ottenuta col DS (linea continua nera) ed i campionamenti effettuati nel 2003-04 (cerchietti pieni). In grigio la simulazione dello sviluppo della *Ruppia maritima*.

Nel grafico (Fig. 7), l'andamento della densità zooplanctonica simulata (in nero) è confrontato con i campionamenti da noi effettuati (cerchietti pieni con barre d'errore). Malgrado il numero non piccolo di ipotesi fatte - soprattutto: sull'uso dei dati di *A. tsuensis* per *A. margalefi*, sulla stima del parametro di sopravvivenza S e sul ruolo della vegetazione lacustre sulla dinamica di popolazione di *Acartia* - il risultato ottenuto ci sembra, in via preliminare, accettabile. Anche se la simulazione non dà soddisfacentemente il valore dei due massimi relativi e l'inizio della stagione di crescita (Marzo), essa riproduce l'andamento bimodale della popolazione, il ruolo della vegetazione lacustre ed il declino autunno-invernale.

In ultimo, impiegando il modello DS, si è voluto tentare un *esercizio di previsione*. Sono state costruite nuove serie di temperature sottraendo ed aggiungendo 0.5, 1.0, 2.0 e 2.0 °C ai valori di $T(j)$ calcolati (Fig. 8). Queste, impiegate come variabili forzanti del modello, permettono una prima simulazione dell'andamento annuale del popolamento zooplanctonico del lago in scenari climatici futuri: sia in caso di riscaldamento che di raffreddamento dell'atmosfera. Il risultato della simulazione ottenuta con un aumento di temperatura di 2°C è mostrato nella Fig. 8. La linea nera rappresenta la situazione attuale (simulata) e quella grigia la situazione prevista. La simulazione della situazione prevista dà ancora un andamento bimodale ed evidenzia un anticipo di circa 10 giorni della stagione di crescita ed una riduzione della densità di individui presenti durante il massimo autunnale.

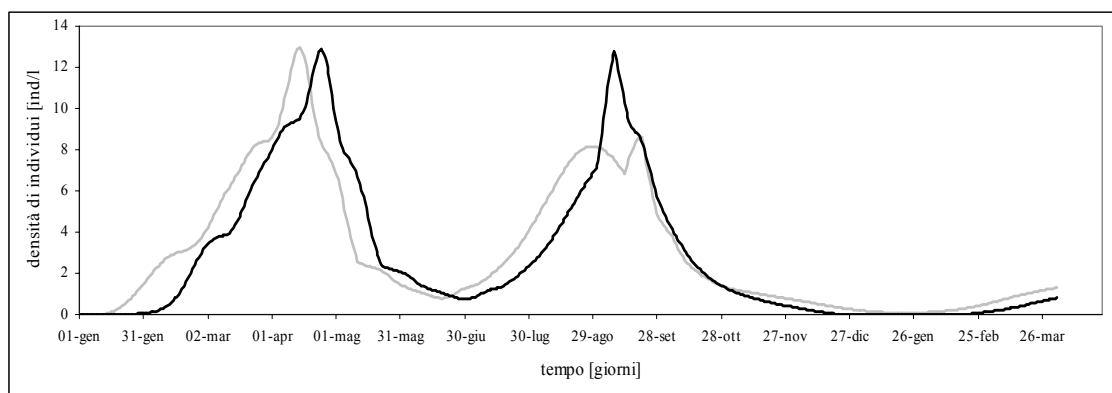


Fig. 8– Confronto tra la simulazione della densità di popolazione zooplanctonica ottenuta inserendo le temperature climatiche giornaliere medie di base (in nero) e quella ottenuta con l'aumento delle temperature(in grigio) di 2[°C] .

Effetto della temperatura sul sistema vite-tignoletta.

Considerando che il PF CLIMAGRI è finanziato dal Ministero delle Politiche Agricole e che la viticoltura è certamente d'interesse primario per l'agricoltura italiana, abbiamo ritenuto di dover presentare il modello Vite-Lobesia come sottoprodotto dell'attività della Linea di Ricerca 3.3. Il modello DS, in questo ambito, è stato impiegato per simulare: a) la fenologia della vite, b) la fenologia della tignoletta della vite (*Lobesia botrana*), c) il rischio di attacchi dell'insetto alla coltura nei vigneti della zona dei Castelli Romani di produzione del vino Frascati D.O.C. (Severini et al., 2004). Come funzione forzante del modello sono state inserite le serie di temperatura media giornaliera degli anni 1987, 88, 89 e 90 misurate nella stazione meteorologica di Ciampino del Servizio Meteorologico dell'A.M., sita nell'area. Il modello del ciclo annuale delle viti è realizzato tramite 4 modelli TVD in serie che simulano il passaggio della coltura attraverso le quattro fenofasi: germogliamento, fioritura, invaiatura, e maturazione. Dato che *L. botrana* nel Lazio compie 3 generazioni durante la stagione favorevole, ciascuna delle quali viene modellata attraverso i quattro stadi fondamentali (uovo, larva, crisalide e adulto), il modello che ne simula la dinamica è costituito da tre serie di quattro modelli TVD collegate da due moduli che simulano lo stadio adulto. Quest'ultimo è stato realizzato sulla base dell'algoritmo di Bieri (Bieri et al., 1983)

$$u(E) = \frac{c_1 \cdot (E - 16)}{c_2^{(E - 16)}}$$

dove $u(E)$ rappresenta la fertilità degli adulti, E l'invecchiamento degli adulti espresso in gradi giorno (*Day Degrees*, DD), c_1 e c_2 sono parametri del modello per *L. botrana*. I parametri del modello impiegati per la simulazione della dinamica della vite sono stati stimati da dati fenologici pubblicati nel rapporto (Egger et al., 1997), mentre quelli per il modello della tignoletta sono stati elaborati sulla base di dati pubblicati in (Baumgärtner & Baronio, 1988).

I risultati delle simulazioni del modello DS per la vite e la lobesia nell'area del Frascati DOC sono presentati nelle Figg. 9-11 (Severini et al., 2004b; Severini et al., 2005). Nella Fig. 9 sono mostrati i risultati delle simulazioni della fenologia della vite negli anni 1987-90. Essi mostrano una differenza di due settimane tra l'inizio più precoce e quello più tardivo della maturazione ed una differenza ancora più marcata tra le durate di maturazione. Conoscere in precedenza queste differenze può rappresentare un'utile indicazione per i viticoltori e le industrie di vinificazione. Inoltre, la conoscenza anticipata delle date delle fenofasi può aiutare gli operatori agricoli a stabilire meglio i calendari e le tecniche colturali. In Fig. 10 si riporta la simulazione della fenologia della tignoletta con le sue tre generazioni all'anno. Le aree evidenziate in grigio indicano la durata dei periodi di sovrapposizione tra le larve di seconda e terza generazione, periodi in cui, presumibilmente, la densità ed il danno sono maggiori. Infine, la simulazione dell'interazione tra lobesia e vite è mostrata nella figura 11. Qui le aree in grigio evidenziano la durata della sovrapposizione tra le fenofasi particolarmente esposte (fiori e frutti) e lo stadio larvale (dannoso) dell'insetto. I risultati di queste simulazioni non sono stati confrontati con i dati di campo (perché inesistenti) e pertanto anch'essi, come quello di Fig. 8, vanno considerati alla stregua di risultati di esercizi di simulazione. Il loro scopo serve a mostrare le possibilità del modello DS, più che a riprodurre situazioni reali. Tuttavia, la pratica dei viticoltori laziali, che solitamente non trattano le viti per la lobesia, sembra confermare il risultato di Fig. 11 che non mostra situazioni di rischio grave.

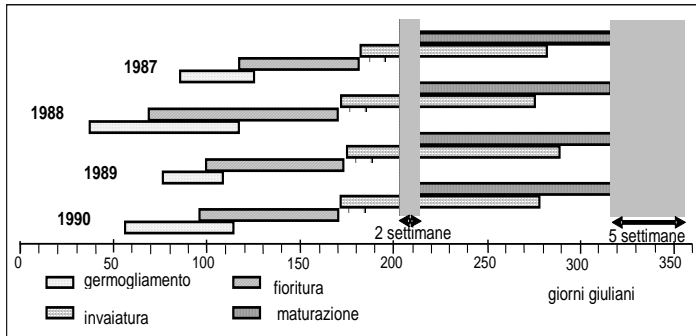


Fig. 9– Fenologia della vite nell'area dei Castelli Romani dal 1987 al 1990.

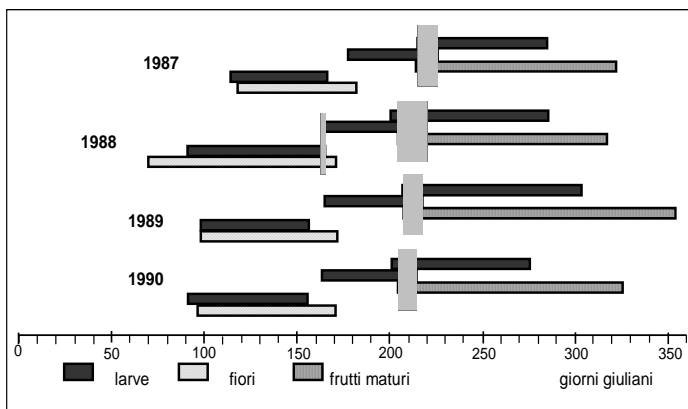


Fig. 11– Simulazione del sistema vite-tignoletta negli anni 1987-1990. Le aree in grigio rappresentano la durata delle sovrapposizioni tra le fenofasi della vite più ricettive e lo stadio dell'insetto più dannoso.

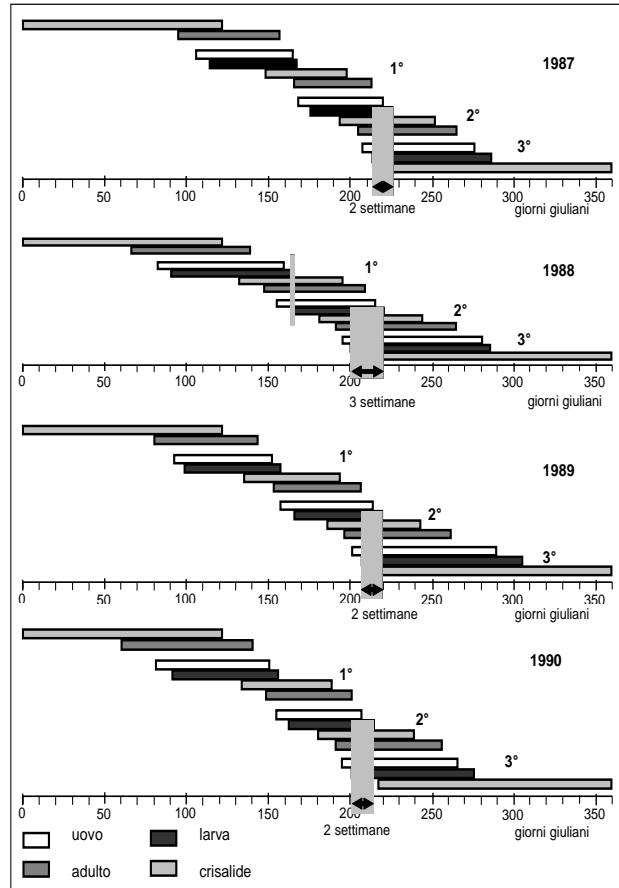


Fig. 10 – Fenologia della tignoletta nell'area dei Castelli Romani dal 1987 al 1990. In bianco la durata della comparsa delle uova, in nero quella delle larve, in grigio chiaro delle crisalidi ed in grigio scuro degli adulti.

ESPERIMENTI DI LABORATORIO E MICROCOSMI

Negli esperimenti di laboratorio sono stati progettati e realizzati *microcosmi* sperimentali per verificare su popolazioni standard (*Xenopus laevis* ed *Artemia salina*) il funzionamento degli algoritmi (tasso di sviluppo - temperatura) impiegati nel modello DS e per acquisire nuove informazioni sulle relazioni tra irradianza UV e sviluppo biologico. I microcosmi da noi realizzati sono acquari in vetro di capacità diverse (80 l, 50 l, 25 l, 10 l, 2 l) alloggiati in contenitori più grandi (generalmente di PVC). Tra le pareti dei contenitori e quelle degli acquari viene fatta circolare acqua distillata la cui temperatura è mantenuta costante ($\pm 0.2^\circ\text{C}$) al valore prefissato. Questo sistema permette di controllare la temperatura dell'acqua degli acquari senza perturbazioni. All'interno degli acquari sono state allevate le coorti di *X. laevis* (Anuri) e di *A. salina* (Anostraci) in condizioni standard di alimentazione, di ricambio d'acqua e di osservazione, in modo da poterle considerare come *modelli biologici* per lo studio degli impatti ambientali su popolazioni naturali. Per ambedue le Specie, gli esperimenti avevano inizio con coorti di nuovi nati. Mentre gli esperimenti con *X. laevis* venivano interrotti all'inizio della metamorfosi (stadio 58 della classificazione di Nieuwkoop & Faber, 1956), quelli con *A. salina* si sono protratti spesso per più generazioni successive (Eusepi, 2005). Ciò in dipendenza della diversa durata del periodo giovanile delle due Specie: per la prima circa 50 giorni, per la seconda circa 10. Per questo motivo, *X. laevis* è risultato più adatto per lo studio della funzione tasso di

sviluppo - temperatura e della funzione di Erlang per il modello TVD (Severini et al., 2004), mentre *A. salina* si è rivelata particolarmente adatta per le verifiche preliminari del modello DS.

Gli esperimenti con la radiazione ultravioletta erano basati sul confronto dei tempi di maturazione di una (o più) coorte esposta alla radiazione UVB nello stadio giovanile ed una (o più) di controllo. La scelta della banda spettrale della radiazione ultravioletta dipende dalla crescente consapevolezza dei danni che essa può arrecare ai sistemi viventi. Come per la temperatura, anche per la radiazione UVB, *X. laevis* si è rivelato più adatto di *A. salina* come sensore biologico di effetti ambientali a lunga scadenza, mentre quest'ultima è in grado di reagire più prontamente a condizioni di stress rapide. Segue una breve descrizione degli esperimenti eseguiti durante l'ultimo anno del Progetto.

Esperimenti *Artemia* - Erlang (a diverse temperature).

Gli esperimenti qui presentati si sono svolti nel Laboratorio di Bioclimatologia dell'ISAC sito nell'area di ricerca di Tor Vergata. Tale spazio è stato allestito durante l'ultimo anno del P.F. CLIMAGRI con l'obiettivo di realizzare un laboratorio costruito 'ad hoc' per studi di dinamica di popolazione.

Sono state eseguite due serie di esperimenti con microcosmi contenenti acquari da 2 litri con acqua alla salinità di 50g/l. Questi esperimenti avevano lo scopo di verificare se la distribuzione delle frequenze dei tempi di maturazione delle artemie a *temperature costanti e diverse* è sempre una funzione di Erlang. Nelle prime due serie (durata due mesi) sono state rilevate le frequenze di schiusa di cisti (stadio embrionale quiescente) di *Artemia* idratate contemporaneamente (Fig. 12, Fig. 13) (Di Giovenale, 2005). Nella prima serie, quattro coorti di 1200 cisti ciascuna (4800 cisti in totale) sono state fatte schiudere alla temperatura di $22.0 \pm 0.2^\circ\text{C}$; nella seconda serie, quattro coorti di uguale numerosità si sono schiuse a $24.0 \pm 0.2^\circ\text{C}$ e nella terza serie due coorti di 110 nauplii (220 nauplii in totale) sono state allevate a $28.0 \pm 0.2^\circ\text{C}$ fino al raggiungimento della maturità. Anche in questi esperimenti gli individui di *Artemia* ($> 1 \text{ mm}$) sono stati osservati uno ad uno al microscopio stereoscopico ed attribuiti ad uno stadi del ciclo vitale per costruire matrici stadio frequenza. Come sottoprodotto, tramite gli stessi esperimenti è stata determinata la funzione temperatura - tasso di sviluppo della Specie. Si può osservare che sia a 22°C che a 24°C (Figg. 12,13), l'andamento della *percentuale* delle frequenze di schiusa delle cisti (cerchietti) è regolato dalla distribuzione di Erlang (linea continua). Come dimostrato in (Carlini et al., 2001) anche l'andamento delle frequenze di maturazione delle coorti di nauplii allevate alla temperatura costante di 28°C risulta bene adattato alla Distribuzione di Erlang.

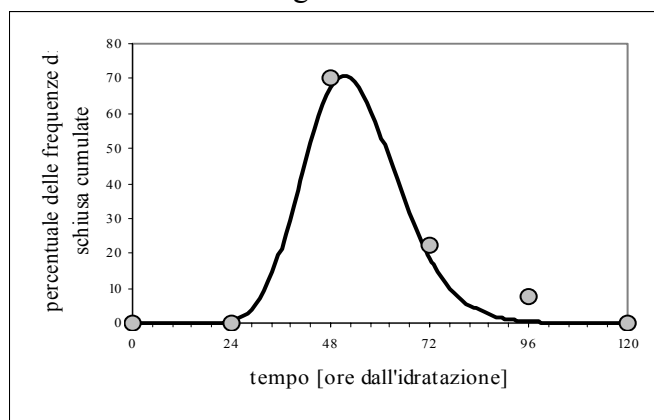


Fig. 13– Percentuale delle frequenze di schiusa di 4800 cisti di *A. salina* a 22°C (cerchietti) confrontate con la distribuzione di Erlang che le governa (curva continua).

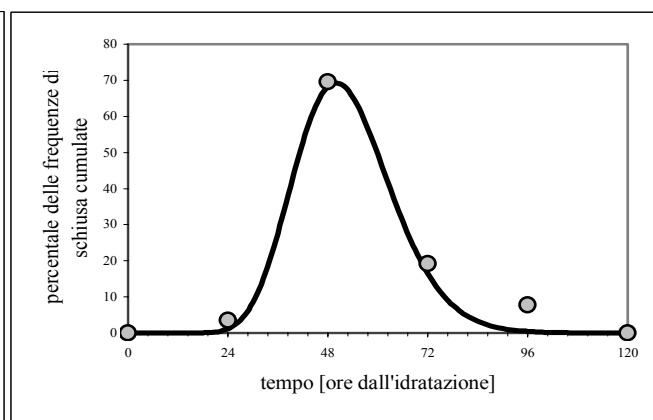


Fig. 14– Percentuale delle frequenze di schiusa di 4800 cisti di *A. salina* a 24°C (cerchietti) confrontate con la distribuzione di Erlang che le governa (curva continua).

Benché basati su un numero di dati minore di quelli dello *Xenopus* (Severini et al., 2004a), anche gli esperimenti sulla schiusa delle cisti e sulla maturazione dei nauplii di *Artemia* hanno dato risultati che confermano la teoria di Manetsch. Questi risultati, ottenuti a temperature diverse e per due stadi diversi del ciclo vitale, suggeriscono una grande versatilità del modello a ritardo distribuito e sono una giustificazione indiretta della validità del modello TVD.

Esperimenti *Artemia* in generazioni successive.

Al fine di stimare i parametri *B* ed *S* di popolazioni acquatiche (*Artemia* ad esempio) da utilizzare per le simulazioni con il modello DS, sono stati svolti due esperimenti in cui si sono trovate le condizioni ottimali per far sviluppare l'*Artemia* sino alla quarta generazione. Nei due esperimenti (entrambi a 24[°C], il primo alla salinità di 35 [g/l] ed il secondo a 20 [g/l]) si è osservato che il numero di nauplii (larve) vivi a dieci giorni dalla schiusa delle cisti aumenta linearmente di generazione in generazione (Fig. 15), così come il numero degli adulti (Fig. 16).

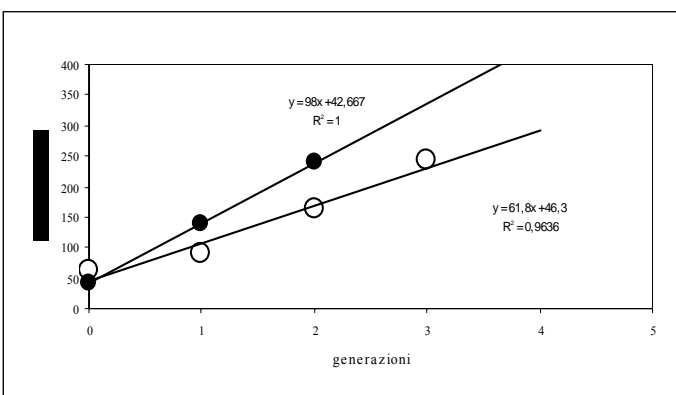
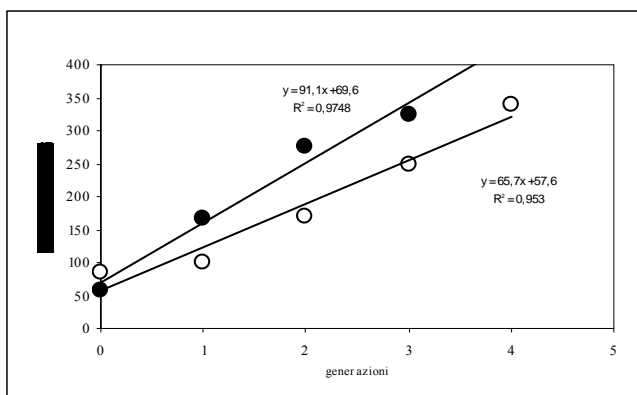


Fig. 15– Andamento del numero di nuovi nati di *A. salina* nelle diverse generazioni. I cerchi vuoti rappresentano i dati del primo esperimento quelli pieni i dati del secondo

Fig. 16– Andamento del numero di nuovi nati di *A. salina* nelle diverse generazioni. I cerchi vuoti rappresentano i dati del primo esperimento quelli pieni i dati del secondo

Esperimenti *Xenopus* - UVB.

Nell’ambito del P.F. CLIMAGRI sono state eseguite due serie di esperimenti con esposizione di coorti di *X. laevis* alla radiazione UVB nel corso dello stadio giovanile. Nella prima serie di tre esperimenti (durata 8 mesi), i cui risultati sono stati riportati nella relazione tecnica del primo anno, tre coorti di girini sono state esposte in laboratorio alla radiazione UVB emessa da una lampada fluorescente, mentre altre tre erano mantenute come controlli (Severini & Alilla, 2003; Severini et al., 2004b). Nella seconda serie di due esperimenti (durata 4 mesi), eseguiti durante l’ultimo anno del progetto, due coorti di girini sono state esposte alla radiazione solare naturale sul terrazzo dell’edificio di Fisica (Università La Sapienza) e due coorti mantenute come controlli. L’apparato sperimentale della seconda serie di esperimenti è costituito da due microcosmi. Per mantenere i microcosmi nelle stesse condizioni di temperatura, sono stati trasportati in natura (sul terrazzo dell’edificio di Fisica) entrambi i microcosmi. Il microcosmo dei girini di controllo era protetto dalla radiazione solare diretta e diffusa con una apposita struttura di polistirolo espanso che lasciava circolare aria. L’esposizione è avvenuta tutti i giorni nel periodo Maggio-Agosto 2004. I microcosmi venivano esposti dalle ore 11 del mattino per 2 ore, con tre intervalli regolari di mezz’ora per il controllo della temperatura (che doveva mantenersi uguale nei due microcosmi). Il risultato del primo dei due esperimenti, espresso in termini di frequenze di maturazione cumulate, è mostrato nella Fig. 17. Il ritardo che si osserva tra l’andamento dei flussi di maturazione della coorte esposta e di quella di controllo risulta inferiore a quanto presentato per i girini esposti alla radiazione UVB artificiale (dati riportati nella relazione tecnico-

scientifica del primo anno). Tale differenza potrebbe essere attribuita al fatto che, nel caso attuale, la coorte era esposta all'intero spettro della radiazione solare ed è noto che i fotoni di lunghezza d'onda minore degli UVB - in particolare quelli della luce blu - attivano i meccanismi di riparazione dei danni della radiazione ultravioletta. Anche se i due esperimenti della serie hanno dato risultati concordi, sono necessari altri esperimenti ed altre conferme per sostenere questa interpretazione.

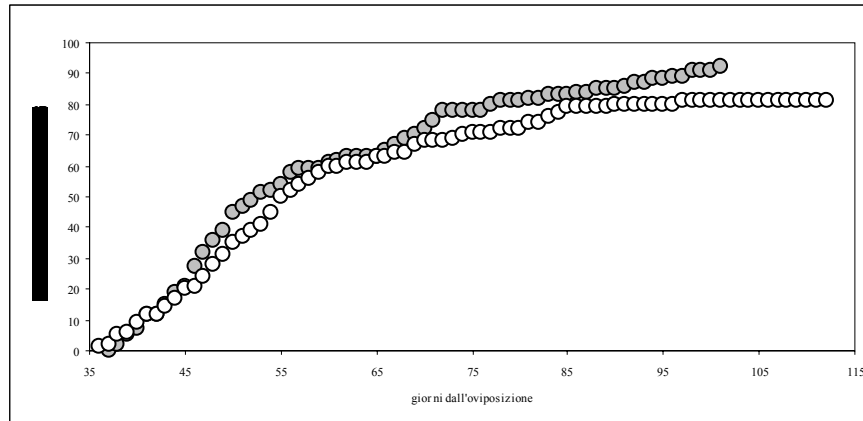


Fig. 17– Grafico dell'andamento dei flussi di maturazione cumulati dei girini esposti alla radiazione UV atmosferica (cerchietti vuoti) ed una di controllo (cerchietti pieni).

BIBLIOGRAFIA

- Alilla R., Severini M., Pesolillo S., 2004: Introduzione della temperatura variabile e della mortalità nei modelli di popolazione a ritardo distribuito. In: Dalla Marta A., Orlandini S. (Eds.). Atti III giornate Studio Metodi Numerici Statistici ed Informatici nella Difesa delle Colture Agrarie e Forestali, Firenze, 114–118.
- Alilla R., Severini M., Pesolillo S., 2005: Modello a ritardo distribuito a temperatura variabile per la simulazione dello sviluppo ontogenetico in stadi giovanili di popolazioni peciloterme. Rivista Italiana di Agrometeorologia (in press).
- Baumgärtner J., Baronio P., 1988: Modello fenologico di volo di *Lobesia botrana* Den & Schiff. (Lep. Tortricidae) relativo alla situazione ambientale della Emilia Romagna. Boll. Ist. Ent. "G. Grandi", Università Bologna, 43, 157–170.
- Bieri M., Baumgärtner J., Bianchi G., Delucchi V., von Arx R., 1983: Development and fecundity of pea aphid (*Acyrtosiphon pisum* Harris) as affected by constant temperatures and by pea varieties. Mitt. Schweiz. Ent. Ges., 56, 163–171.
- Carlini L., Severini M., Dattilo A.M., 2001: Il modello a ritardi distribuiti per la simulazione dello sviluppo di una popolazione biologica a temperatura costante: caso della specie *Artemia franciscana*. In Falcucci M. e Hull V. (Eds.): Atti del Convegno Nazionale della Società Italiana di Ecologia.
- D'Ambra et al., 1997: Studio della interrelazioni esistenti tra le popolazioni ittiche e le componenti biotiche ed abiotiche degli ambienti lagunari. Progetto per lo Sviluppo dell'Acquacoltura Nazionale del Ministero per le Politiche Agricole.
- Di Giovenale F., 2005: Frequenze dei tempi di schiusa di cisti di *Artemia franciscana* a temperatura costante e distribuzione di Erlang. Tesi di Laurea di I livello in Scienze Ambientali, Univ. della Tuscia.
- Egger E., Grasselli A., Greco G., Raspini L. Storchi P., 1997: Risposta fenologica e produttiva della vite nell'ambiente laziale. In: Calò A. (ed). Il determinismo climatico sulla fenologia della vite e la maturazione dell'uva in Italia. Arti grafiche. Conegliano (TV), 197–211.

- Eusepi E. 2005: Determinazione sperimentale della densità di popolazione di *Artemia franciscana* in generazioni successive (in condizioni di laboratorio). Tesi di Laurea di I livello in Scienze Ambientali, Univ. della Toscana.
- Giorgi U., Maccaroni A., Massa F., Ceccaroli C., Panella S., 1996: Alcune considerazioni preliminari sulla comunità zooplanctonica del Lago di Fogliano (1992-1993). Atti Conf. Studi e Ricerche sui laghi costieri del Parco Nazionale del Circeo (Fogliano, 1996), 93–101.
- Manetsch T.J., 1976: Time-Varying Distributed Delay Models and Their Use in Aggregative Models of Large Systems. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, 6, 547–553.
- Manly B.F., 1989: A review of methods for the analysis of stage-frequency data. In: *Estimation and Analysis of Insect Populations* (L. McDonald et al. eds.). *Lecture Notes in Statistics*, 55, Springer, Berlin, 492.
- Navarra D., 2004: Applicazione del modello a ritardo variabile per lo studio dell'effetto dei cambiamenti climatici sulla densità di popolazioni zooplanctoniche nella zona dei laghi costieri del Lazio. Tesi di Laurea in Scienze Ambientali I° Livello, Univ. della Toscana.
- Nieuwkoop P., Faber J. 1956: *Normal tables of Xenopus laevis*. Daudin, North Holland, Amsterdam.
- Pesolillo S., 2003: Il 'Delay Simulator': Modello dinamico di simulazione della densità di popolazione. Applicazione allo studio della stagionalità e della distribuzione spaziale dei copepodi nel Lago di Fogliano. Tesi di Laurea in Scienze Ambientali Univ. della Toscana.
- Pesolillo S., Severini M., Alilla R., 2004: Il modello simulatore di ritardo 'Delay Simulator' versione 2.0. Un modello di simulazione su foglio di calcolo elettronico della demografia e della fenologia delle popolazioni naturali. In: Dalla Marta A., Orlandini S. (Eds.). *Atti III giornate Studio Metodi Numerici Statistici ed Informatici nella Difesa delle Colture Agrarie e Forestali*, Firenze, 119–123.
- Severini M., Alilla R., 2003: Modello previsionale delle conseguenze dell'aumento della temperatura e dell'irradianza ultravioletta sulla dinamica di popolazioni zooplanctoniche d'interesse in acquicoltura. In: *Atti Workshop CLIMAGRI, Cambiamenti Climatici ed Agricoltura*. Cagliari, 137–145.
- Severini M., Gilioli G. 2002: Storia e filosofia dei modelli di simulazione nella difesa delle colture agrarie. *Notiz. Protez. Piante*, 15, 9–29.
- Severini M., Alilla R., Pesolillo S., 2004a: Impatto dell'aumento di temperatura e della irradianza ultravioletta sulle popolazioni zooplanctoniche d'interesse in acquicoltura. In: *CLIMAGRI, Cambiamenti Climatici ed Agricoltura*. UCEA, Roma, 105–113.
- Severini M., Baumgärtner J., Limonta L., 2003: Parameter estimation for the distribution delay based population models from laboratory data: egg hatching of *Oulema duftschmiedi* Redthenbacher (Coleoptera Chrysomelidae) as an example. *Ecological Modelling*, 167, 233–246.
- Severini M., Alilla R., Pesolillo S., Baumgärtner J., 2005: Fenologia della vite e della *Lobesia botrana* (Lep. Tortricidae) nella zona dei Castelli Romani. *Rivista Italiana di Agrometeorologia* (in press).
- Severini M., Alilla R., Pesolillo S., Comandini F. 2004b: Simulazione tramite il modello DS2.0 della fenologia della vite, degli attacchi di *Lobesia botrana* (Den & Schiff) (Lep. Tortricidae) e del tempo di raccolta dell'uva nella zona dei Castelli Romani. In: Dalla Marta A., Orlandini S. (Eds.). *Atti III giornate Studio Metodi Numerici Statistici ed Informatici nella Difesa delle Colture Agrarie e Forestali*, Firenze, 124–129.
- Severini M., Alilla R., Pesolillo S., Poli V., 2004c: Effetti subletali della radiazione UVB su coorti di *Xenopus laevis*. *Acta Biophysica Romana*, Roma, 66–67.
- Takahashi T., Ohno A., 1996: The temperature effect on the development of Calanoid Copepod, *Acartia tsuensis*, with some comments to morphogenesis. *Journal of Oceanography*, 52, 125–137.
- Vansickle J., 1977: Attrition in Distributed Delay Models. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, 7, 635–638.