

POLITECNICO DI MILANO

SEDE DI MILANO LEONARDO

SCUOLA DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E TERRITORIALE  
CORSO DI STUDI IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO



Analisi e controllo di un sistema  
forestale soggetto ad infestazioni di  
processionaria del pino  
*Thaumetopoea pityocampa*

Relatore  
Prof.ssa Gragnani Alessandra

Bressan Matteo      matr. 783676  
Constantinescu Dario      matr. 782188

A.A. 2012 - 2013



# Ringraziamenti

Vorremmo innanzitutto ringraziare la Professoressa Alessandra Gagnani per il supporto e l'aiuto fornitoci e per essere stata sempre paziente e comprensiva.

Ringraziamo anche tutti i professori del corso di laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, che con passione hanno sempre tentato di aprirci la mente verso nuove strade.

Un grosso, immenso, grazie va anche ai nostri compagni di viaggio La Fra, Grazia, Dani, Davide e Luca con cui abbiamo condiviso, fra mille lezioni e progetti, questi anni faticosi e fantastici.



# Abstract

Le infestazioni del lepidottero defogliatore processionaria del pino *Thaumetopoea pityocampa* in numerose foreste europee rappresentano un problema economico e sanitario di notevole importanza. Le esplosioni demografiche che caratterizzano la dinamica della popolazione di questo insetto raggiungono la massima intensità ogni 5-8 anni. È necessario quindi attuare metodi di prevenzione e controllo degli eventi di infestazione, così da minimizzare i danni da questi prodotti.

L'obiettivo dell'elaborato è comprendere gli effetti delle infestazioni su un ecosistema forestale attraverso un modello matematico e presentare una metodologia che permetta di confrontare diversi metodi di intervento, studiando le conseguenze che la loro applicazione ha sull'interazione tra insetti defogliatori ed alberi ospiti.

Il modello descrive le interazioni tra la biomassa di aghi di pino (divisi in due classi di età) e la biomassa degli insetti, la quale ha una dinamica demografica dipendente dalla variazione della temperatura media giornaliera. Lo studio degli andamenti del modello ha evidenziato risultati in accordo con quanto descritto in letteratura.

La stima degli effetti dei possibili interventi è stata effettuata modificando opportunamente il modello ed analizzando la variazione prodotta su un insieme di indicatori riguardanti le caratteristiche delle infestazioni e la condizione complessiva della biomassa fogliare.

Da questa analisi, si è notato che nessuna delle politiche fornisce risultati positivi su ogni aspetto considerato. Gli interventi con un'azione di breve termine non portano sempre ad un risultato ottimale nel controllo degli eventi di infestazione, ma risultano positivi per la condizione forestale, mentre gli interventi di lungo termine non presentano alcun risultato negativo.

Si è studiata inoltre l'applicazione di un intervento di breve termine con un'analisi costi-benefici considerando due diversi obiettivi di gestione della

foresta, mostrando la presenza di un problema di compromesso tra due diversi portatori di interesse, presente anche nel caso di applicazione congiunta di due interventi.

**Parole chiave:** processionaria del pino; *thaumetopoea pityocampa*; modello di popolazione; dinamica di popolazione; controllo delle infestazioni.

**Keywords:** ppm; pine processionary moth; *thaumetopoea pityocampa*; population model; population dynamics; pest management.

# Indice

<b>Abstract</b>	<b>i</b>
<b>Elenco figure</b>	<b>v</b>
<b>Elenco tabelle</b>	<b>viii</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>2 La specie</b>	<b>5</b>
2.1 Ciclo biologico . . . . .	5
2.2 Distribuzione ed effetti della temperatura . . . . .	10
2.3 Ospiti e predatori . . . . .	11
<b>3 Il modello</b>	<b>15</b>
3.1 Variabili di stato . . . . .	15
3.2 Temperatura . . . . .	16
3.3 Equazioni . . . . .	18
3.4 Stima dei parametri . . . . .	25
3.5 Andamenti del modello . . . . .	27
<b>4 Politiche di intervento</b>	<b>33</b>
4.1 Indicatori . . . . .	34
4.2 Interventi indiretti . . . . .	40
4.3 Interventi diretti . . . . .	48
<b>5 Analisi costi benefici e analisi multi-obiettivo</b>	<b>61</b>
5.1 Analisi costi benefici . . . . .	62
5.2 Analisi multi-obiettivo e frontiera di Pareto . . . . .	68
5.3 Analisi dell'applicazione di più interventi . . . . .	70

<b>6 Conclusioni</b>	<b>73</b>
<b>A Formulazione matematica delle funzioni del modello</b>	<b>77</b>
<b>B Definizione matematica degli indicatori</b>	<b>83</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>90</b>



# Elenco delle figure

2.1	Ciclo vitale della processionaria del pino durante un anno . . .	6
2.2	Uova di processionaria del pino . . . . .	8
2.3	Esemplare di larva di processionaria del pino . . . . .	9
2.4	Farfalla di processionaria del pino . . . . .	10
3.1	Andamento della temperatura modellizzata . . . . .	17
3.2	Relazione tra ciclo biologico della processionaria e andamento della temperatura . . . . .	17
3.3	Andamento della funzione di Holling di tipo II al variare della biomassa fogliare di alberi giovani . . . . .	19
3.4	Andamento della funzione $\delta(T)$ al variare della temperatura .	20
3.5	Andamento della funzione $ex_G$ al variare della densità di larve $L$	21
3.6	Andamento della funzione $\varphi(T)$ al variare della temperatura .	22
3.7	Andamento della funzione $\mu_T(T)$ al variare della temperatura	23
3.8	Andamento della funzione $\theta(T)$ al variare della temperatura .	24
3.9	Andamento delle funzioni $\varphi(T)$ e $\theta(T)$ al variare della temperatura . . . . .	25
3.10	Andamento nel tempo delle variabili $G(t)$ e $V(t)$ in assenza di insetti . . . . .	28
3.11	Andamento nel tempo della Biomassa totale in assenza di insetti	28
3.12	Andamento nel tempo del modello a temperatura costante pari a 10.34 °C . . . . .	29
3.13	Andamento delle variabili nello spazio delle fasi a temperatura costante pari a 10.34°C . . . . .	30
3.14	Andamento del modello a temperatura variabile . . . . .	31
3.15	Particolare dell'andamento di $L(t)$ con temperatura variabile	31

4.1	Rappresentazione grafica dei picchi maggiori di una soglia fissata	35
4.2	Rappresentazione grafica del tempo di ritorno fra due picchi (vedi <i>Fig.4.1</i> ) . . . . .	36
4.3	Rappresentazione grafica della durata di un'infestazione . . . . .	36
4.4	Rappresentazione grafica della definizione di intensità di infestazione . . . . .	37
4.5	Rappresentazione grafica dei minimi di biomassa fogliare inferiori ad una soglia fissata . . . . .	38
4.6	Rappresentazione grafica del tempo di ritorno fra due minimi di biomassa fogliare . . . . .	38
4.7	Rappresentazione grafica dell'area fra minimi successivi . . . . .	39
4.8	Variazione percentuale degli indicatori della biomassa larvale durante le infestazioni al variare della densità di predatori $Z$ [kg/ha] . . . . .	41
4.9	Variazione percentuale degli indicatori della biomassa larvale sul lungo periodo e degli indicatori aggregati al variare della densità di predatori $Z$ [kg/ha] . . . . .	42
4.10	Variazione percentuale degli indicatori della biomassa fogliare al variare della densità di predatori $Z$ [kg/ha] . . . . .	43
4.11	Dinamica della biomassa di aghi e della biomassa fogliare totale con $P = 1.2 \frac{ton}{ha}$ , in assenza di insetti . . . . .	44
4.12	Variazione percentuale degli indicatori della biomassa larvale durante le infestazioni al variare della densità di biomassa forestale non predabile $P$ [ton/ha] . . . . .	45
4.13	Particolare della variazione percentuale della media di tempi di ritorno al variare del parametro $P$ [ton/ha] . . . . .	46
4.14	Variazione percentuale degli indicatori della biomassa larvale sul lungo periodo e degli indicatori aggregati al variare della densità di biomassa forestale non predabile $P$ [ton/ha] . . . . .	46
4.15	Variazione percentuale degli indicatori della biomassa fogliare al variare della densità di biomassa forestale non predabile $P$ [ton/ha] . . . . .	47
4.16	Andamento della funzione $\rho(T)$ al variare della temperatura . . . . .	49
4.17	Variazione percentuale degli indicatori della biomassa larvale durante le infestazioni al variare della densità di addetti $U$ [addetti/ha] . . . . .	50

4.18	Variazione percentuale degli indicatori della biomassa larvale sul lungo periodo e degli indicatori aggregati al variare della densità di addetti $U$ [addetti/ha] . . . . .	51
4.19	Variazione percentuale degli indicatori della biomassa fogliare al variare della densità di addetti $U$ [addetti/ha] . . . . .	51
4.20	Trappola a feromoni . . . . .	52
4.21	Variazione percentuale degli indicatori della biomassa larvale durante le infestazioni al variare della mortalità $\mu_p$ [giorni <sup>-1</sup> ] . . . . .	53
4.22	Variazione percentuale degli indicatori della biomassa larvale sul lungo periodo e degli indicatori aggregati al variare della mortalità $\mu_p$ [giorni <sup>-1</sup> ] . . . . .	54
4.23	Variazione percentuale degli indicatori della biomassa fogliare al variare e al variare della mortalità $\mu_p$ [giorni <sup>-1</sup> ] . . . . .	54
4.24	Andamento in un anno di infestazione delle traiettorie della biomassa larvale con e senza l'uso di bio-insetticida . . . . .	57
4.25	Variazione percentuale degli indicatori della biomassa larvale durante le infestazioni al variare della mortalità indotta dall'insetticida $\mu_L$ [giorni <sup>-1</sup> ] . . . . .	58
4.26	Variazione percentuale degli indicatori della biomassa larvale sul lungo periodo e degli indicatori aggregati al variare della mortalità indotta dall'insetticida $\mu_L$ [giorni <sup>-1</sup> ] . . . . .	59
4.27	Variazione percentuale degli indicatori della biomassa fogliare al variare della mortalità indotta dall'insetticida $\mu_L$ [giorni <sup>-1</sup> ] . . . . .	59
5.1	Relazione lineare tra bio-insetticida e mortalità indotta . . . . .	62
5.2	Valori dei costi totali per il taglio della legna al variare della quantità di bio-insetticida . . . . .	67
5.3	Valori dei costi totali per l'utilizzo ricreativo al variare della quantità di bio-insetticida . . . . .	67
5.4	Visualizzazione delle alternative di intervento nello spazio degli obiettivi . . . . .	68
5.5	Frontiera di Pareto nello spazio degli obiettivi . . . . .	69



# Elenco delle tabelle

3.1	Parametri relativi biomassa fogliare . . . . .	26
3.2	Parametri relativi alla biomassa larvale . . . . .	27
4.1	Tipi di intervento principali . . . . .	34
4.2	Indicatori e obiettivi. . . . .	39
4.3	Valori degli indicatori nel caso in cui nessuna politica venga applicata . . . . .	40
5.1	Valori di aumento percentuale dei benefici totali per il taglio della legna rispetto all'alternativa di non intervento ( <i>Eq.5.10</i> )	71
5.2	Valori di aumento percentuale dei benefici totali per l'uso ricreativo rispetto all'alternativa di non intervento ( <i>Eq.5.10</i> ) .	71
6.1	Effetto delle politiche indirette sugli indicatori, in base al criterio stabilito. La freccia indica la variazione dell'indicatore all'aumentare dell'intensità dell'intervento; in verde è indicato un effetto positivo, in rosso un effetto negativo, in blu un effetto incerto. . . . .	75
6.2	Effetto delle politiche dirette sugli indicatori, in base al criterio stabilito. La freccia indica la variazione dell'indicatore all'aumentare dell'intensità dell'intervento; in verde è indicato un effetto positivo, in rosso un effetto negativo, in blu un effetto incerto. . . . .	75



# Capitolo 1

## Introduzione

In ambito Europeo, alcune delle aree naturali più estese sono coperte da foreste di conifere ed in particolare, nelle aree più temperate, da pinete. Queste particolari foreste sono di grande importanza non solo dal punto di vista naturalistico, ma anche per il loro valore economico, in quanto utilizzate per le attività legate alla silvicoltura, nonché per il loro valore ricreativo; tuttavia, la loro fruibilità è spesso messa a repentaglio dalle infestazioni di insetti defogliatori.

Il defogliatore più pericoloso per questi habitat è la processionaria del pino *Thaumetopoea pityocampa* (Denis & Schiffermüller), insetto appartenente all'ordine dei lepidotteri, le cui larve attaccano gli alberi delle specie appartenenti al genere *Pinus*. Le larve dell'insetto, presenti in nidi costruiti sulla chioma dei pini, si cibano degli aghi e, quando sono presenti in quantità elevate, provocano una riduzione dell'attività fotosintetica e nutritiva degli alberi colpiti e, oltre a rallentarne la crescita, causano un loro indebolimento, rendendoli vulnerabili.

La processionaria del pino ha un areale molto ampio, la cui estensione sta aumentando a causa degli effetti dei cambiamenti climatici globali; esso comprende tutto il bacino del Mediterraneo e si spinge fino alle zone centrali della Francia [Robinet et al., 2006].

La popolazione dell'insetto presenta esplosioni demografiche caratteristiche, di durata compresa tra 1 e 3 anni, intervallate da lunghe fasi di latenza, che vanno dai 5 agli 8 anni [Roversi, 1997]. Durante queste esplosioni, oltre alle gravi conseguenze della defogliazione degli alberi, insorgono anche problemi di tipo sanitario ed ecologico, in quanto le larve sono ricoperte di

peli urticanti, dannosi non solo per l'uomo ma anche per gli animali che entrano in contatto con essi; in particolare, gli effetti sanitari sull'uomo a seguito di un contatto con i peli comprendono reazioni allergiche e dermatiti [La Fuente et al., 1999]; gli effetti descritti sono tanto più gravi quanto più è intensa l'infestazione.

Data l'entità del problema e la sua diffusione, è necessario studiare la messa in atto di interventi di prevenzione e di controllo degli eventi di infestazione, che siano efficaci non solamente su un orizzonte temporale di breve termine, ma anche in un'ottica di lungo termine.

L'obiettivo del presente elaborato è analizzare il fenomeno delle infestazioni dovute a processionaria del pino, attraverso un modello matematico che descriva la dinamica della popolazione dell'insetto, con lo scopo di comprendere le conseguenze delle infestazioni sulla condizione della foresta. Inoltre, si vuole presentare una metodologia che consenta di studiare gli effetti che i possibili interventi provocano sul sistema ecologico, servendosi del modello costruito.

Il lavoro che sarà presentato prende spunto da un elaborato di tesi redatto nell'anno accademico 2002-2003 da Lucia Bogoni, nel quale è stato analizzato il problema delle infestazioni della processionaria del pino con un modello preda-predatore. Prendendo come punto di partenza questo studio, sarà riformulato il modello matematico, riprendendo ed ampliando alcune idee già presenti ed introducendo nuovi elementi, affinché esso possa descrivere meglio le infestazioni.

Il fenomeno delle esplosioni demografiche sarà descritto da un sistema di equazioni differenziali a tre variabili di stato, che metteranno in relazione la biomassa fogliare dei pini (divisi in due classi di età) con la biomassa degli insetti defogliatori, focalizzandosi sull'attività trofica dello stadio larvale del parassita ai danni della biomassa di aghi. Si introdurrà inoltre la dipendenza dei parametri dalla variazione della temperatura media giornaliera, poiché il ciclo biologico compiuto dagli insetti dipende fortemente da questa variabile ambientale.

L'analisi delle possibili politiche di controllo delle infestazioni sarà effettuata studiando gli effetti di ogni intervento e della sua intensità di applicazione su un insieme di indicatori, grandezze definite in modo tale da descrivere delle particolari caratteristiche del sistema, riguardanti sia la dinamica delle esplosioni della biomassa di insetti sia le condizioni della biomassa fo-



gliare dei pini presenti nella foresta. Le modalità di intervento che saranno analizzate sono quelle maggiormente utilizzate per le foreste colpite dal problema delle infestazioni di processionaria del pino: l'inserimento di predatori naturali dell'insetto (lotta biologica), l'introduzione di varietà di alberi non colpiti dalla processionaria (lotta silvicola), la distruzione meccanica dei nidi invernali delle larve, le trappole a feromoni e l'utilizzo di un bio-insetticida. I primi due interventi sono classificati come azioni indirette e a lungo termine, i rimanenti come azioni dirette e a breve termine. Ogni politica sarà introdotta nelle equazioni del modello e sarà studiata la variazione degli indicatori al variare dell'intensità di applicazione dell'intervento determinando, per ogni indicatore, se esso sia migliorato o peggiorato, in base a determinati criteri.

Si studierà inoltre la possibilità di intervento attraverso bio-insetticida, mediante un'analisi effettuata con un approccio del tipo costi-benefici e considerando due diversi obiettivi di gestione del bosco: lo sfruttamento della biomassa di pini come legna da taglio e l'uso del bosco a fini turistici e ricreativi. Successivamente, si evidenzierà il problema della presenza di due obiettivi, mostrando il risultato di un'analisi multi-obiettivo. Sarà presentata anche un esempio di studio dell'utilizzo di due diverse strategie, accoppiando l'uso del bio-insetticida, intervento di breve termine, alla lotta biologica, di lungo termine.



## Capitolo 2

# La specie

La processionaria è un insetto appartenente all'ordine dei lepidotteri, ed è così chiamata per l'abitudine di muoversi in lunghe file nel corso dei suoi spostamenti. Le specie più comuni presenti in Italia sono la processionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa*, Denis et Schiffermüller, 1775) e la processionaria della quercia (*Thaumetopoea processionea*, Linnaeus, 1758). In particolare, la presenza di processionaria del pino nelle foreste di conifere è costante e fa parte di quell'insieme di relazioni trofiche necessarie alla vita di un bosco. Nonostante questo, periodicamente avvengono forti fluttuazioni nel numero degli individui della popolazione dell'insetto e questo provoca gravi danni alle foreste e può costituire anche problemi di natura sanitaria per l'uomo.

### 2.1 Ciclo biologico

Gli insetti della specie processionaria del pino (spesso abbreviato con PPM, dall'anglosassone *Pine Processionary Moth*) sono insetti univoltini (*Fig.2.1*), cioè compiono il loro ciclo vitale nell'arco di un anno e gli adulti muoiono dopo avere deposto le uova. La deposizione avviene solitamente tra la metà di giugno e la fine di agosto.

A partire dalla metà di agosto, in funzione delle condizioni termiche, le uova cominciano a schiudersi dando vita alle larve. Queste iniziano la loro attività scheletrizzando gli aghi del pino ospite e, con i loro fili sericei, costruiscono nidi provvisori, formati sulle parti più soleggiate e alte della zona periferica della chioma.

In ottobre, le larve iniziano la costruzione di un nido più voluminoso, ben visibile nella parte alta degli alberi e in posizione soleggiata, all'interno del quale trovano rifugio e superano l'inverno. Durante le ore notturne, con temperature al di sopra di 0°C, le larve si spostano in fila indiana per raggiungere le varie parti della chioma e nutrirsi degli aghi, seguendo la traccia del filo sericeo emesso dalla larva che guida la processione.

Verso la fine di maggio le larve scendono al suolo e, muovendosi in processione, si spostano sul terreno alla ricerca di un luogo dove interrarsi; si interrano di solito in radure ben illuminate o ai margini del bosco, nei luoghi più soleggiati e caldi, scavando una buca di profondità che va da 5 a 30 cm a seconda del clima e dell'altitudine, chiudendosi all'interno di un bozzolo, passando quindi allo stadio di crisalide.

La maggior parte degli adulti compare dalla seconda metà di giugno a tutto agosto, con un massimo nel mese di luglio; il momento dello sfarfallamento varia in funzione della latitudine, dell'altitudine e dell'esposizione alla luce solare. Tuttavia, una parte dei bruchi che si incrisalida non si trasforma in farfalle durante l'estate, bensì trascorre il periodo estivo, l'inverno e la primavera in quiescenza e completa il ciclo con lo sfarfallamento nell'estate dell'anno successivo o, nelle zone di montagna, addirittura dopo 3-4 anni. Questo fenomeno è chiamato diapausa. [Pollini, 1998].

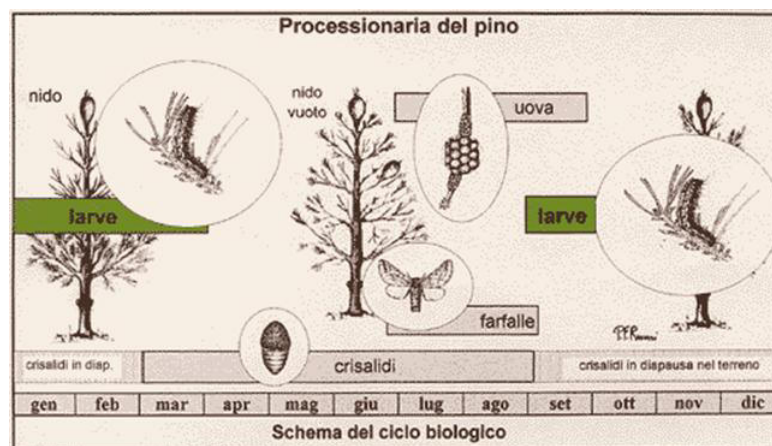


Figura 2.1: Ciclo vitale della processionaria del pino durante un anno

Recenti studi hanno infine dimostrato l'esistenza di popolazioni stabili di PPM il cui ciclo di vita è spostato, cioè lo sviluppo larvale di queste popolazioni avviene durante l'estate. Si è inoltre scoperto che esse sono in grado di coesistere nello stesso habitat di altre popolazioni di processionaria con ciclo biologico tradizionale, incrementando quindi i danni sulle foreste, causati dalla loro azione [Pimentel et al., 2006].

## Le infestazioni

La popolazione di processionaria del pino è in grado di dar luogo ad imponenti esplosioni demografiche (picchi); gli intervalli di latenza fra due picchi demografici possono variare in funzione delle caratteristiche ambientali passando da 5-8 anni di latenza seguiti da 2-3 anni di esplosione rilevati per pinete alpine e appenniniche al di sopra degli 800 m s.l.m., a 2 anni di latenza seguiti da pullulazioni della durata di 3-5 anni per pinete della fascia prealpina e appenninica, situate a quote inferiori. Nelle aree costiere, in genere, le diverse fasi hanno una periodicità intermedia tra i valori sopracitati [Roversi, 1997]. In generale una pineta viene considerata gravemente infestata se mediamente sono presenti più di 10 nidi per albero [Aimi et al., 2006].

## Le uova

Dopo l'accoppiamento, le femmine depongono uova di forma approssimativamente sferica, di colore grigio-bianco, che misurano circa 1 mm di diametro. Le ovature, lunghe 30 mm, avvolgono ad anello la base degli aghi di pino e contengono da 70 a oltre 300 uova. Sono rivestite all'esterno da peli squamosi dai colori brillanti che vanno dal grigio-argento al giallo-bruno provenienti dall'addome della femmina, che hanno il compito di cementare le uova fra loro rendendole indistinguibili l'una dall'altra (*Fig.2.2*).

## Le larve

Le larve della processionaria sono presenti dalla fine dell'estate fino alla primavera successiva; hanno abitudini gregarie e lo sviluppo avviene attraverso



Figura 2.2: Uova di processionaria del pino

cinque stadi evolutivi. Per ognuno di essi, la larva perde l'esoscheletro e lo sostituisce con uno nuovo che possa assecondare la crescita del corpo. Nelle prime due mute ha colore verdastro macchiato di nero. Già a partire dal terzo stadio le larve presentano sull'addome corti peli biancastri fortemente urticanti sia per le persone che per gli animali; questi sono presenti anche sugli esoscheletri lasciati nell'ambiente durante le mute.

All'arrivo dell'autunno, le larve hanno superato il terzo stadio e, unendosi ad altri gruppi, formano numerose colonie che daranno vita ai nidi invernali. La struttura di questi ricoveri è tale da assorbire il calore solare durante il giorno e trattenere quello prodotto dalle larve, mantenendo così al loro interno temperature superiori a quelle esterne. Le dimensioni dei nidi invernali variano secondo il numero di soggetti ospitati, anche 150-200. Sono formati da lanugine biancastra interrotta da aperture che servono al passaggio delle larve. Internamente, i nidi sono divisi da tramezze comunicanti con un'apertura più grande posta in alto, nella parte più rigonfia. Nel nido le larve, aggrovigliate l'una sull'altra, trascorrono i mesi invernali al riparo dalle basse temperature. Ogni pianta può ospitare nidi in numero e dimensioni molto variabili. Alla fine dell'inverno, quando le temperature medie cominciano a mantenersi superiori a 6-7 °C, escono definitivamente dal nido e ricominciano a nutrirsi. In questa fase, la voracità delle larve è molto elevata e gli effetti delle defogliazioni possono essere molto importanti.

Alla fine di aprile, le larve raggiungono il completo sviluppo (*Fig.2.3*). In questa fase hanno una lunghezza di circa 30-50 mm, sono pelose, con il capo nerastro ed il corpo di colore grigiastro nella parte dorsale, mentre nella parte ventrale vi sono delle sfumature ocracee. Il dorso presenta dei ciuffi di peli rosso-brunastri che si dipartono da tubercoli; questi peli fanno assumere alla larva una colorazione rossastro-rugginosa, non dovuta, quindi, al colore del corpo, ma al colore dei peli.



Figura 2.3: Esempio di larva di processionaria del pino

## Le crisalidi

All'inizio di maggio, le larve raggiungono il luogo prescelto e qui tessono un bozzolo entro il quale avviene la metamorfosi. Esso presenta una colorazione bruna leggermente brillante, con l'addome chiaro tendente al giallo ed una riga scura centrale nella parte ventrale dei segmenti addominali. Il periodo in cui rimangono interrate prima dello sfarfallamento è dipendente dalla temperatura del sito e può variare da 1.5 fino a 7 mesi nei luoghi più caldi [Battisti et al., 2000]. Le crisalidi sono soggette ad un'interruzione dello sviluppo e non tutte quindi si schiuderanno nell'anno della loro formazione, ma in alcuni casi la diapausa può durare da uno a tre anni o più. Sembra che questo possa dipendere dalla temperatura e dalla qualità del cibo ingerito nel periodo larvale.

## Gli adulti

Quando le temperature medie si mantengono stabilmente sopra i 14 °C , dalle crisalidi cominciano ad emergere le farfalle. La farfalla ha le ali anteriori grigie e le posteriori biancastre con una macchia grigio-nera sul margine interno. L'apertura alare è di 30-40 mm, il corpo tozzo e peloso è bruno-arancione e l'addome è ricoperto di peli giallicci scuri (*Fig.2.4*). La femmina è, in genere, poco più grande del maschio. Il maschio è un buon volatore, ma la femmina può raggiungere distanze maggiori (sino a 15 km) dal punto di uscita dal terreno. La vita degli adulti è molto breve, di solito non dura più di uno o due giorni poiché essi non sono provvisti di organi predisposti per il nutrimento. Dopo l'accoppiamento, la femmina vola alla ricerca della pianta più adatta per la deposizione delle uova: in genere predilige le piante isolate o comunque quelle il cui profilo si stacca dalle altre. In generale non si riscontrano differenze nella scelta della specie della pianta ospite all'interno di quelle del genere *Pinus* [Hóðar et al., 2002]. Le uova vengono deposte attorno a due aghi di pino e cementate l'una sull'altra.



Figura 2.4: Farfalla di processionaria del pino

## 2.2 Distribuzione ed effetti della temperatura

La processionaria del pino è un insetto presente in tutto il bacino del Mediterraneo, nel nord Africa e nel Medio Oriente, dove il clima è caratterizzato



da estati calde e secche [Battisti et al., 2005]. Essendo un insetto attivo durante i mesi invernali, il suo areale, specialmente nel sud Europa, è limitato dalle temperature invernali. Durante l'inverno, infatti, se la temperatura scende al di sotto di  $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$  si ha la morte di tutte le larve all'interno dei nidi; inoltre, anche una temperatura media mensile inferiore a  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  risulta letale per la specie [Robinet et al., 2007]. Le condizioni microclimatiche definiscono la distribuzione della processionaria del pino, governando l'attività di nutrimento nei mesi freddi. Infatti, durante l'inverno le larve si nutrono solo se la temperatura all'interno del nido durante il giorno supera i  $9\text{ }^{\circ}\text{C}$  (temperatura di attivazione) e se la temperatura durante la notte successiva non scende al di sotto di  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  [Battisti et al., 2005].

La distribuzione della processionaria del pino, inoltre non è influenzata dalla distribuzione delle piante ospiti [Hóðar et al., 2002].

Data la forte correlazione fra la temperatura e il ciclo vitale e l'areale di questo insetto, questi ultimi sono influenzati evidentemente anche da fenomeni di cambiamento climatico globale. Inverni sempre più miti, infatti, hanno fatto sì che il limite dell'areale della PPM in Francia si sia spostato di circa 87 Km a nord fra il 1972 ed il 2004 [Battisti et al., 2005, Robinet et al., 2006] arrivando fino alle porte di Parigi. Inoltre, il fenomeno ha prodotto anche un'espansione altitudinale di questo insetto stimata essere circa di 110-230 m [Battisti et al., 2005]. Ciò ha dato modo alla processionaria di colonizzare zone che prima erano al riparo proprio per via delle rigide temperature invernali. L'areale della processionaria del pino è quindi in espansione e si prevede che la colonizzazione di zone sempre più ampie di territorio provocherà un aumento dei danni economici e dei problemi sanitari.

### 2.3 Ospiti e predatori

Gli ospiti preferiti di questo insetto defogliatore sono principalmente il pino nero (*Pinus nigra*), il pino silvestre (*Pinus silvestris*), il pino marittimo (*Pinus pinaster*), il pino d'Aleppo (*Pinus halepensis*), il pino mugo (*Pinus mugo*), il pino strobo (*Pinus strobus*), il pino da pinoli (*Pinus pinea*), il pino insigne (*Pinus radiata*), il cedro dell'Himalaia (*Cedrus deodora*), il cedro dell'Atlante (*Cedrus atlantica*) e occasionalmente il larice (*Larix decidua*) [OEPP/EPPO, 2004].

Sebbene la scelta della specie ospite per la deposizione delle uova sia ca-

suale, è stato riscontrato un maggior tasso di sopravvivenza delle larve che nei primi stadi si trovano su ospiti delle specie di pino silvestre e di pino nero, poiché gli aghi di queste due varietà sono da ritenersi di qualità migliore rispetto a quelli del pino marittimo, anch'esso oggetto dello stesso studio. Questo ha come conseguenza che in foreste omogenee, come le pinete dedicate alla silvicoltura, le larve trovano più facilmente ospiti adatti alla loro crescita, causando così esplosioni più importanti. Al contrario ambienti eterogenei forniscono meno possibilità agli insetti, contenendo quindi le esplosioni [Hódar et al., 2002].

Nonostante le importanti defogliazioni, raramente il danno diretto prodotto dall'insetto sulle specie vegetali è tale da portare alla morte dell'albero ospite. Le conseguenze più gravi, infatti, sono dovute ad un danno di tipo indiretto: in seguito ad attacchi ripetuti, le piante subiscono ritardi di sviluppo e si indeboliscono, divenendo più facilmente preda di altri fitofagi e parassiti. [OEPP/EPPO, 2004]

Le specie antagoniste della processionaria del pino si possono suddividere in due principali categorie: i parassitoidi e i predatori.

I parassitoidi delle uova sono gli antagonisti principali della crescita della processionaria, soprattutto nelle foreste italiane, dove attaccano fino al 45% delle uova. Le specie parassitarie più frequenti sono *Tetrastichus servadeii* Domenichini (Hym.: Eulophidae) e *Ooencyrtus pityocampae* Mercet (Hym.: Encyrtidae) ma si hanno evidenze anche di attacchi da parte di *Trichogramma* sp. e *Anastatus bifasciatus* Boyer de Fonscolombe (Hym.: Eupelmidae) [Biliotti, 1958, Battisti, 1989]. In particolare le specie *T. servadeii* e *O. pityocampae* emergono due volte all'anno: in tarda primavera dalle uova parassitate la stagione precedente e durante l'estate dalle uova appena deposte, mentre la specie *T. servadeii* può presentarsi anche solo una volta all'anno o anche, in alcuni casi, ogni due anni.

I maggiori predatori di processionaria del pino sono per lo più uccelli che includono l'insetto nella loro dieta a seconda dello stadio evolutivo in cui si trova. Tra questi si ha, ad esempio, la cinciallegra (*Parus major*), un piccolo passero sedentario ampiamente diffuso in Europa. Generalmente la sua dieta è molto varia; tuttavia, durante la stagione riproduttiva nutre i suoi pulcini essenzialmente con larve di lepidottero. Si è osservato che in molti paesi Mediterranei si nutre sia di uova di processionaria sia di larve, indipendente-

mente dallo stadio in cui si trovano (quindi sia larve giovani nei primi stadi sia larve adulte). Il periodo in cui la predazione è massima è durante i mesi di febbraio-marzo quando si nutre praticando dei fori all'interno dei nidi invernali ed estraendo le larve al suo interno. Altre due specie di passeriformi quali la cincia dal ciuffo (*Lophophanes cristatus*) e la cincia mora (*Periparus ater*) sono in grado di nutrirsi di larve ai primi stadi evolutivi.

Un altro uccello in grado di predare la processionaria, è il cuculo (*Cuculus canorus*) che è considerato specializzato nel nutrirsi di larve di lepidotteri provviste di peli urticanti, specialmente quelle negli stadi finali [Barbaro and Battisti, 2011]. Un diverso organismo che si nutre di larve di processionaria è il sicofante (*Calosoma sycophanta* L.), un insetto della famiglia dei coleotteri che a causa della sua voracità e dell'alta capacità riproduttiva è considerato come un importante agente di controllo sulle infestazioni di foreste e colture [Kanat and Mol, 2008].

L'upupa (*Upupa epops*) è un uccello considerato come grande predatore della processionaria del pino e di altri insetti dannosi per le foreste e per le colture; le larve e le crisalidi di lepidottero, infatti, rappresentano oltre il 60% della sua dieta. Nelle piantagioni di pini dell'Europa del sud, soprattutto in Italia e Francia, l'upupa è specializzata nel nutrirsi di crisalidi di *T. pityocampa* benché queste siano al di sotto del terreno [Battisti et al., 2000, Barbaro and Battisti, 2011]. Poiché le crisalidi possono presentare una diapausa prolungata e quindi rimanere interrato per più di anno, sono una risorsa sempre presente per l'upupa. Nelle piantagioni di pino nero del nord Italia oltre il 70% delle crisalidi può essere consumato da questo predatore, contribuendo alla prevenzione di esplosioni demografiche nella popolazione di processionaria del pino [Barbaro and Battisti, 2011].

Infine, esistono anche specie di uccelli che si nutrono delle farfalle di processionaria durante il periodo estivo, in cui queste sono presenti, come il caprimulgo europeo (*Caprimulgus europaeus*) [Biliotti, 1958].

Importante è sottolineare come durante l'intera durata del ciclo biologico della processionaria del pino questa sia cacciata da diversi tipi di predatori.



## Capitolo 3

# Il modello

Per capire a fondo le interazioni fra le popolazioni e, successivamente, riuscire a capire quali potrebbero essere gli effetti di determinate azioni sul sistema biologico, è utile costruire un apparato matematico che rappresenti i fenomeni naturali descritti nel capitolo precedente. Questo apparato è composto da un sistema di equazioni differenziali attraverso il quale si descrive la variazione nel tempo della popolazione considerata.

### 3.1 Variabili di stato

Data la natura delle interazioni che si vogliono descrivere, si può supporre che la dinamica dei pini sia rappresentata dalla variazione nel tempo della biomassa di aghi e che la dinamica delle processionarie sia modellizzata dalla variazione nel tempo della biomassa di uno solo fra gli stadi evolutivi.

Interpretando l'interazione fra queste due popolazioni come un fenomeno di predazione e, poiché l'effetto degli insetti è diverso a seconda dell'età degli alberi, si è reso necessario dividere la dinamica della biomassa fogliare in due compartimenti, che rappresentano rispettivamente la biomassa fogliare di alberi giovani (non riproduttivi) e la biomassa fogliare di alberi vecchi (riproduttivi). I pini più giovani, infatti, al contrario di quelli vecchi, si riprendono meglio e con maggiore velocità dopo aver subito una forte defogliazione, dato che traggono la maggior parte del nutrimento dalle riserve di carbonio e azoto del suolo. [Jacquet et al., 2013]

Per quanto concerne le larve, come descritto nel capitolo riguardante il ciclo biologico, nella loro vita attraversano quattro fasi evolutive: uova, larve,

crisalidi e infine farfalle. Tuttavia, poiché l'interazione trofica fra le specie avviene solamente quando l'insetto è allo stadio larvale, si è deciso di modellizzare solamente quest'ultimo e di riassumere al suo interno gli altri stadi vitali.

Le variabili di stato utilizzate sono quindi le seguenti:

- $G$ : biomassa di aghi appartenenti ad alberi giovani. Si misura in  $\frac{ton}{ha}$ ;
- $V$ : biomassa di aghi appartenenti ad alberi vecchi. Si misura in  $\frac{ton}{ha}$ ;
- $L$ : biomassa di larve, e, più in generale, biomassa di insetti presenti. Si misura in  $\frac{kg}{ha}$ .

### 3.2 Temperatura

Un ruolo di fondamentale importanza nella descrizione della dinamica delle due specie è ricoperto dalla temperatura, in quanto l'intero ciclo vitale, la crescita e la possibilità di sopravvivenza della processionaria sono regolati dalla variazione termica [Buffo et al., 2007]. La descrizione dell'andamento della temperatura è modellizzato da una funzione sinusoidale di periodo 365 giorni (*Eq.3.1*), descritta dai parametri  $T_o$ , che rappresenta la temperatura media annuale, e  $\varepsilon$  che è legato allo scostamento massimo e minimo dalla temperatura media, pari a  $\varepsilon \cdot T_o$ .

I parametri sono stati ricavati dall'interpolazione di un insieme di dati di temperature medie mensili misurate alla stazione meteorologica di Naturno (BZ), in Val Venosta; si è scelta questa particolare stazione in quanto in questo territorio, da tempo, sussiste un problema legato alle esplosioni demografiche di processionaria del pino. L'equazione analitica utilizzata è la seguente:

$$T(t) = T_o \cdot \left(1 + \varepsilon \cdot \sin \frac{2\pi}{365} t\right) \quad (3.1)$$

I parametri così ricavati sono rispettivamente  $T_o=10.34$  °C e  $\varepsilon=0.96$  e l'andamento della temperatura è quello mostrato in *Fig.3.1*.

Infine, si può mettere in relazione il ciclo biologico descritto nel capitolo 2 con l'andamento annuale della temperatura come in *Fig.3.2*.

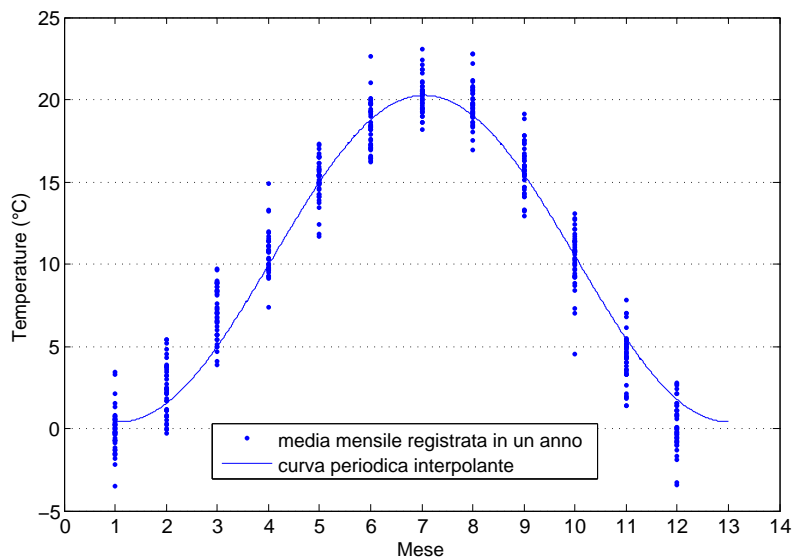


Figura 3.1: Andamento della temperatura modellizzata

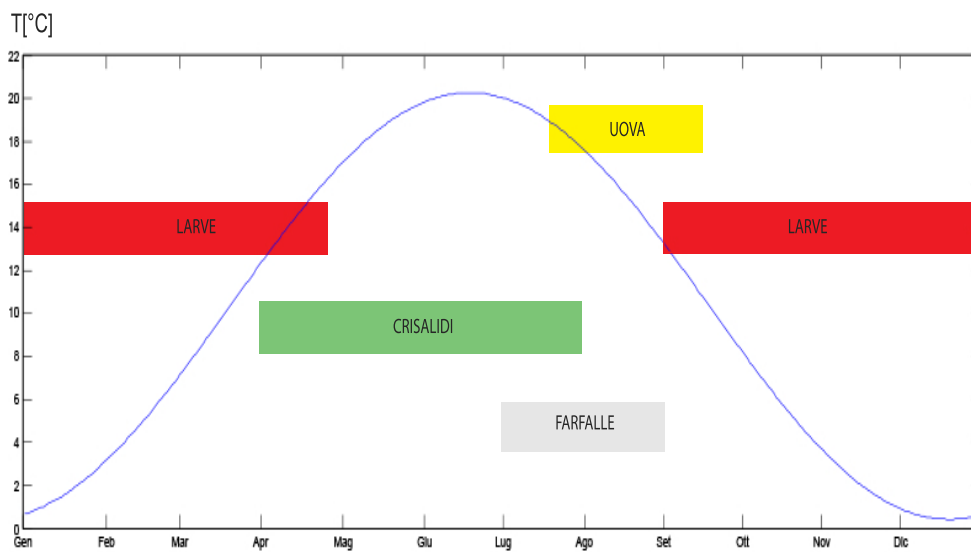


Figura 3.2: Relazione tra ciclo biologico della processionaria e andamento della temperatura

### 3.3 Equazioni

Per esprimere i fenomeni demografici e le relazioni trofiche fra le variabili si è ricorso al seguente sistema di equazioni differenziali:

$$\begin{aligned} \frac{dG}{dt} = \dot{G} = n_{VG}V + n_GG - \mu_GG - b_GG^2 - c_{GV}GV - iG - \delta(T)\frac{\alpha_GG}{\beta + G + V}L + \\ - ex_G(L)G \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\frac{dV}{dt} = \dot{V} = iG + n_VV - \mu_VV - b_VV^2 - \delta(T)\frac{\alpha_VV}{\beta + G + V}L - ex_V(L)G \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} = \dot{L} = e\delta(T)\left(\frac{\alpha_GG}{\beta + G + V} + \frac{\alpha_VV}{\beta + G + V}\right)L + \varphi(T)\left(-\gamma L^2 + \frac{\alpha_LL}{\beta_L + L}Z - \mu_LL\right) + \\ -\mu_T(T)\frac{h}{h + L}L - \theta(T)\mu_pL \end{aligned} \quad (3.4)$$

La formulazione matematica di tutte le funzioni è presente in Appendice A. Il termine  $\dot{G}$  nell'Eq.3.2 rappresenta la variazione nel tempo di biomassa fogliare (aghi) di alberi giovani, descritta dai seguenti termini:

$\cdot n_{VG}V$ : nascita di biomassa fogliare di alberi giovani attraverso la riproduzione di alberi vecchi. Il parametro  $n_{VG}$  è il tasso di riproduzione e viene espresso in *giorni*<sup>-1</sup>.

$\cdot n_GG$ : crescita di biomassa fogliare di alberi giovani dovuta al consumo di risorse ed è supposta proporzionale alla stessa biomassa fogliare di alberi giovani esistente. Il parametro  $n_G$  rappresenta il tasso di crescita e viene espresso in *giorni*<sup>-1</sup>.

$\cdot \mu_GG$ : mortalità naturale della biomassa fogliare di pini giovani. Il parametro  $\mu_G$  rappresenta il tasso di mortalità naturale e viene espresso in *giorni*<sup>-1</sup>.

$\cdot b_GG^2$ : competizione per le risorse fra gli alberi giovani. Il parametro  $b_G$  rappresenta il tasso di mortalità della biomassa fogliare dovuto alla competizione fra alberi giovani e viene espresso in  $\frac{ha}{ton \cdot giorno}$ .



· $c_{GV}GV$ : fenomeno di competizione fra alberi di diverse età. In particolare i pini più anziani, a causa della loro maggiore altezza, ombreggiano i pini più giovani impedendo loro di ricevere il giusto apporto di luce solare, limitando quindi la crescita della loro biomassa fogliare. Il parametro  $c_{GV}$  rappresenta il tasso di mortalità di biomassa fogliare di alberi giovani, dovuta alla competizione con alberi più anziani; viene espresso in  $\frac{ha}{ton \times giorni}$ .

· $iG$ : fenomeno di invecchiamento di biomassa fogliare di pini giovani che quindi passa ad essere biomassa fogliare di pini vecchi. Il parametro  $i$  rappresenta il tasso di invecchiamento della biomassa e viene espresso in  $giorni^{-1}$ .

· $\delta(T) \frac{\alpha_G G}{\beta + G + V} L$ : fenomeno di predazione della biomassa fogliare di pini giovani da parte della processionaria del pino modellizzato attraverso la risposta funzionale di Holling di tipo II:  $\frac{\alpha_G G}{\beta + G + V}$  (Fig. 3.3). Questa dipende da due parametri:  $\alpha_G \left[ \frac{ton(biomassa)}{kg(larve) \times giorni} \right]$  che esprime il massimo tasso di rimozione da parte di un'unità di biomassa larvale e  $\beta \left[ \frac{ton}{ha} \right]$  che esprime la quantità di biomassa di aghi presenti quando il tasso di rimozione raggiunge la metà del suo valore massimo.

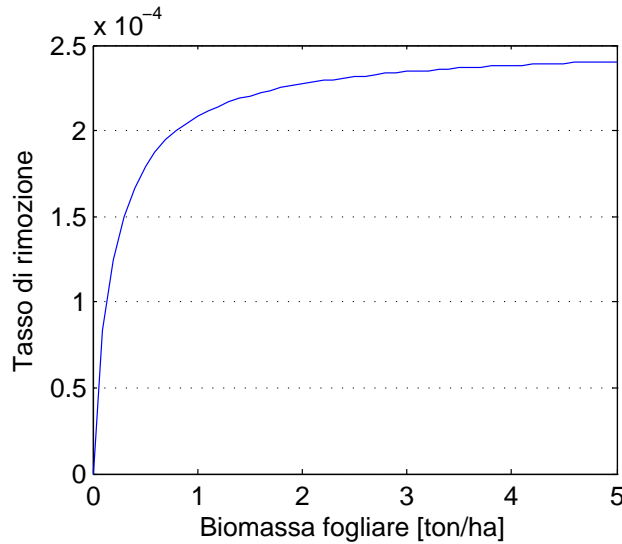


Figura 3.3: Andamento della funzione di Holling di tipo II al variare della biomassa fogliare di alberi giovani

Si nota come al denominatore siano presenti sia il termine che quantifica

la biomassa fogliare di alberi giovani (G) sia quello che quantifica quella degli alberi vecchi (V), in quanto la predazione da parte delle larve avviene sul complesso di tutta la biomassa presente.

Il fenomeno di rimozione di biomassa avviene solamente quando gli insetti sono allo stadio larvale e quindi, per tenere conto di questo aspetto, si è introdotta la funzione  $\delta(T)$  dipendente dalla temperatura (*Fig.3.4*). In particolare, questa è adimensionale e compresa fra 0 e 1; ha il ruolo di modulare il tasso di predazione facendo sì che il suo valore sia massimo per temperature comprese fra 7 °C e 15 °C, tipicamente autunnali (dopo la schiusa delle uova e fino alla formazione dei primi nidi invernali) e primaverili (dopo l'uscita dai nidi invernali e fino al momento della trasformazione in crisalide (si veda *Fig.3.2*). Per temperature maggiori di questo intervallo gli insetti sono già allo stadio crisalide e quindi la funzione  $\delta(T)$ , così come il tasso di predazione, assumono valore nullo. Nei mesi invernali le larve si nutrono solamente quando le temperature massime giornaliere sono intorno ai 9 °C e, contemporaneamente, nella notte successiva non scendono al di sotto di 0 °C [Battisti et al., 2005, Robinet et al., 2007]; quindi se la media giornaliera non è inferiore a 4.5 °C. La funzione  $\delta(T)$  di biomassa è quindi nulla se la temperatura media scende sotto questa soglia mentre comincia a crescere se è al di sopra.

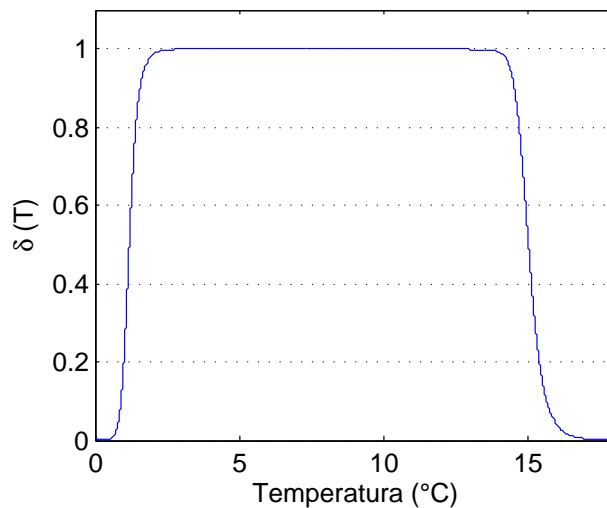


Figura 3.4: Andamento della funzione  $\delta(T)$  al variare della temperatura

$\cdot ex_G(L)G$ : extra mortalità causata dall'indebolimento delle piante a seguito di una significativa perdita di biomassa fogliare. Il parametro  $ex_G$  è dipendente dal numero di larve; si considera nullo per un valore inferiore a una soglia  $L_S$  oltre il quale cresce fino a saturare al suo valore massimo (Fig.3.5). Viene espresso in  $giorni^{-1}$ .

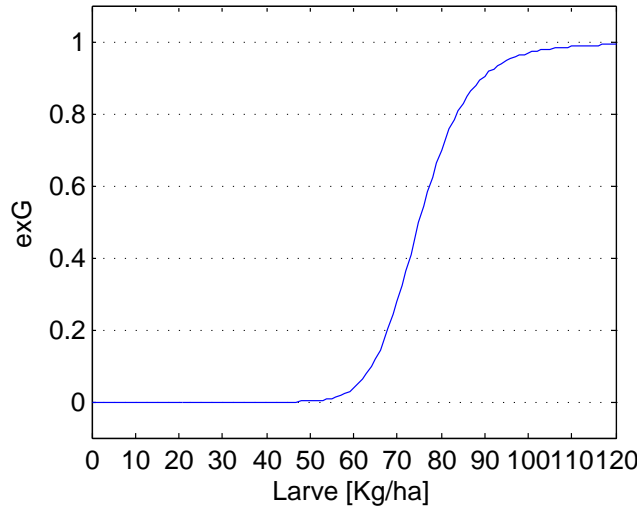


Figura 3.5: Andamento della funzione  $ex_G$  al variare della densità di larve  $L$

Il termine  $\dot{V}$  nell'Eq.3.3 rappresenta la variazione nel tempo della biomassa fogliare (aghi) di alberi vecchi ed è influenzata dai seguenti termini:

$\cdot n_V V$ : crescita di biomassa fogliare appartenente ad alberi vecchi per il consumo di risorse. Il parametro  $n_V$  viene espresso in  $giorni^{-1}$

$\cdot \mu_V V$ : mortalità naturale della biomassa fogliare di pini vecchi. Il parametro  $\mu_V$  è il tasso di mortalità ed è espresso in  $giorni^{-1}$

$\cdot b_V V^2$ : competizione fra la biomassa di alberi vecchi. Il parametro  $b_V$  è espresso in  $\frac{ha}{ton \cdot giorno}$ . Si nota come questo sia l'unico termine di competizione che colpisce gli aghi dei pini vecchi dato che essi non risentono della competizione con alberi giovani poiché, essendo più alti, hanno a disposizione molta più luce solare e, avendo radici più profonde, raggiungono più facilmente i nutrienti del terreno.

$\cdot \delta(T) \frac{\alpha_V V}{\beta + G + V} L$ : fenomeno di defogliazione del comparto della biomassa fogliare di alberi vecchi ed è modellizzata analogamente a quella precedentemente

descritta per la biomassa fogliare di alberi giovani.

I termini non spiegati hanno lo stesso significato di quanto descritto precedentemente.

La termine  $\dot{L}$  nell'*Eq.3.4* rappresenta la variazione di biomassa larvale nel tempo e dipende dai seguenti parametri:

$\cdot e\delta(T)\left(\frac{\alpha_V V}{\beta+G+V} + \frac{\alpha_G G}{\beta+G+V}\right)L$ : termine di accrescimento della biomassa larvale dovuta all'ingestione di biomassa fogliare. Il parametro  $e$  descrive l'efficienza di conversione fra i due comparti e viene espresso in  $\frac{kg(larve)}{ton(biomassa\ fogliare)}$ .

$\cdot \varphi(T)$ : è una funzione adimensionale, dipendente dalla temperatura, che indica l'esistenza dello stadio larvale. Assume il valore 1 durante il periodo in cui la temperatura ha un valore tale da permettere l'esistenza dello stadio larvale (*Fig.3.2*) mentre assume valore 0 durante gli altri periodi dell'anno, quando gli insetti sono presenti solamente sotto forma di crisalidi, farfalle o uova (*Fig.3.6*). Questa funzione ha il compito di modulare i fenomeni tipici dello stadio larvale come mortalità naturale, competizione intraspecifica e predazione da parte dei predatori naturali di seguito descritti.

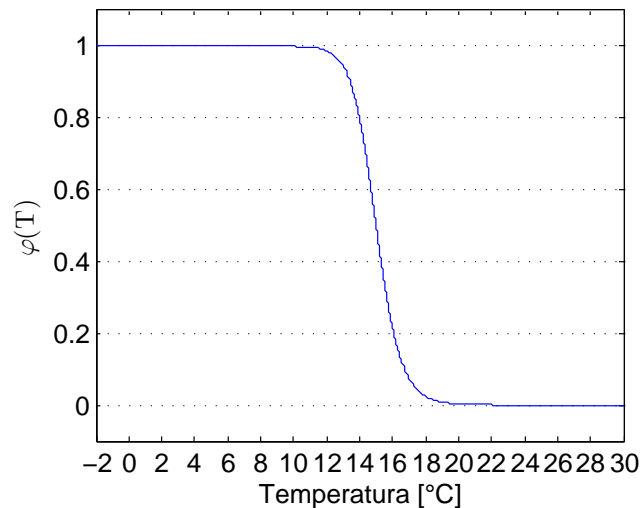


Figura 3.6: Andamento della funzione  $\varphi(T)$  al variare della temperatura

$\cdot \mu_L L$ : mortalità naturale delle larve, il parametro  $\mu_L$  si esprime in *giorni*<sup>-1</sup>

$\cdot \gamma L^2$ : rappresenta il fenomeno di competizione intraspecifica fra le larve; il parametro  $\gamma$  è proporzionale alla probabilità di morte di due unità di biomassa di larve che competono per la stessa risorsa ed è espresso in  $\frac{ha}{kg \times giorni}$ .

$\cdot \frac{\alpha L}{\beta L + L} Z$ : extra mortalità della biomassa larvale dovuta alla predazione dei predatori naturali come il cuculo o il sicofante che si cibano di larve. Questo fenomeno è modellizzato attraverso una risposta funzionale di Holling di tipo II già presentata in precedenza. Inoltre, poiché la dinamica delle larve è molto più veloce di quella dei loro predatori, il termine  $Z$  che quantifica la densità di questi ultimi sul territorio, espressa in  $\frac{kg(predatori)}{ha}$ , è ipotizzato costante nel tempo.

$\cdot \mu_T(T) \frac{h}{h+L} L$ : extra mortalità dovuta alle basse temperature invernali (*Fig. 3.7*). Il parametro  $\mu_T(T)$  aumenta al diminuire della temperatura mentre  $\frac{h}{h+L}$  diminuisce all'aumentare del numero di larve in quanto queste hanno la possibilità di costruire nidi con più individui e quindi fronteggiare meglio le temperature rigide [Hóðar et al., 2004, Ronnås et al., 2010].

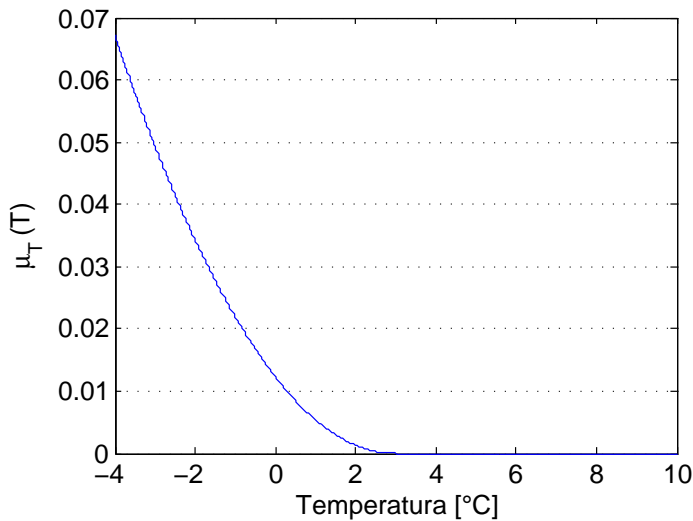


Figura 3.7: Andamento della funzione  $\mu_T(T)$  al variare della temperatura

La funzione  $\mu_T(T)$ , a differenza delle altre funzioni dipendenti da temperatura, non satura per temperature molto basse ma continua a crescere, poiché, per valori molto bassi di temperatura, tutte le larve vanno incontro alla morte [Robinet et al., 2007]. Questa mortalità è espressa in  $giorni^{-1}$ .

$\cdot\mu_p\theta(T)L$ : rappresenta la mortalità nel periodo che intercorre fra il momento in cui le larve si interrano diventando crisalidi e quello in cui le uova si schiudono dando vita alla successiva generazione. La funzione  $\theta(T)$  (*Fig.3.8*) assume valore 0 quando le temperature sono tipiche del periodo in cui gli insetti sono allo stadio larvale, mentre assume valore 1 per gli altri valori di temperatura (si veda *Fig.3.2*).

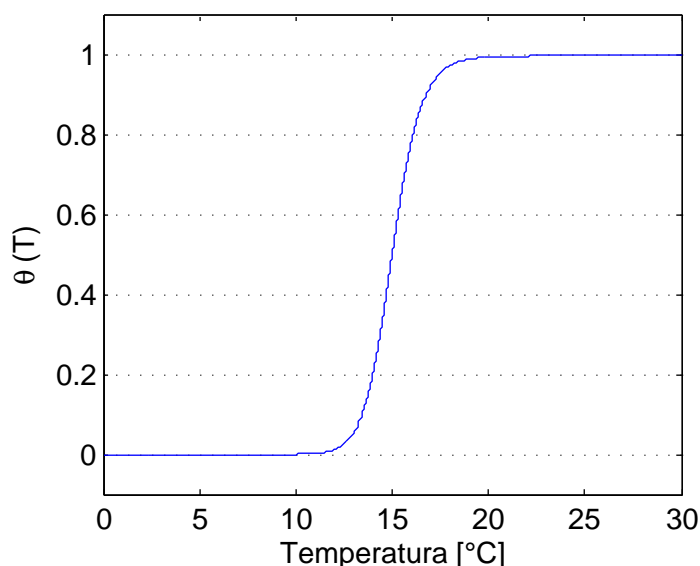


Figura 3.8: Andamento della funzione  $\theta(T)$  al variare della temperatura

Con questo termine vengono riassunti tutti i fenomeni che portano alla diminuzione della biomassa totale degli insetti nel periodo descritto dalla funzione  $\theta(T)$ , come ad esempio la predazione delle crisalidi da parte dell'upupa. Il parametro  $\mu_p$  è proporzionale alla perdita di biomassa che avviene durante questo periodo ed è espresso in  $giorni^{-1}$ . Si noti come la funzione  $\theta(T)$  abbia un andamento complementare alla funzione  $\varphi(T)$  (*Fig.3.9*) e come entrambe abbiano un passaggio graduale fra i valori di massimo e di minimo, in quanto è lecito supporre che sia il passaggio fra lo stadio larvale e quello di crisalide sia la schiusa delle uova siano fenomeni gradualmente (*Fig.3.2*).

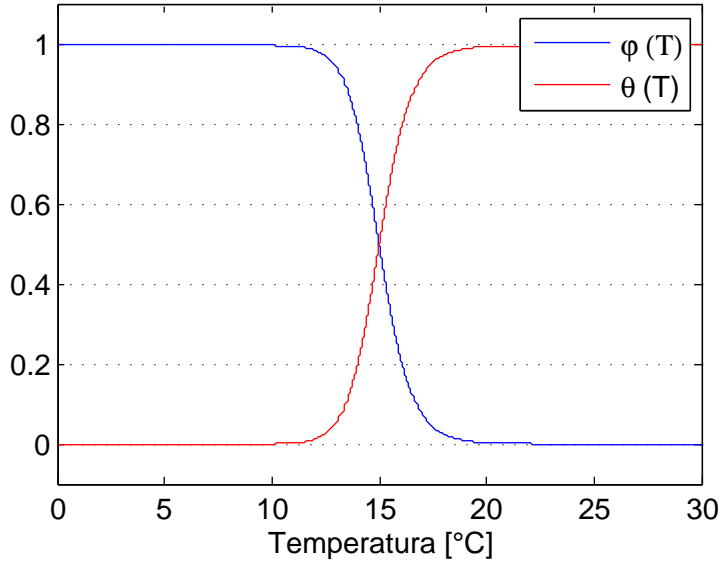


Figura 3.9: Andamento delle funzioni  $\varphi(T)$  e  $\theta(T)$  al variare della temperatura

### 3.4 Stima dei parametri

Una volta capiti i meccanismi che regolano il fenomeno e descritte le interazioni fra le variabili, è necessario assegnare un valore ai parametri introdotti. Questa, in generale, è un'operazione complessa, in quanto sarebbe necessario avere a disposizione una serie di dati sperimentali legati ai termini del modello precedentemente spiegati. Attraverso questi dati e una comparazione con le evidenze espresse in letteratura, mediante un processo di calibrazione e successiva validazione, si possono stimare i valori dei parametri che meglio adattano l'andamento delle uscite del modello all'andamento reale delle popolazioni descritte.

Tuttavia, in questo caso, i dati sperimentali riguardanti l'andamento delle popolazioni sono sempre contestuali a studi effettuati su orizzonti temporali troppo brevi per poter essere utilizzati nella modalità descritta. Di conseguenza, si calibrerà il valore dei parametri facendo sì che le popolazioni abbiano la stessa dinamica qualitativa descritta in letteratura.

I parametri riguardanti la dinamica della biomassa fogliare (riportati in *Tab.*

3.1) sono stati stimati sapendo che una foresta composta per la maggior parte di pini silvestri (*Scots Pine*), all'equilibrio e in assenza di insetti defogliatori o altre patologie raggiunge, in media, le  $4.29 \frac{ton}{ha}$  di biomassa fogliare [Lehtonen, 2005]. È necessario precisare che la dinamica degli alberi è molto lenta, ed essendo i parametri espressi in  $giorni^{-1}$ , questi risultano essere molto piccoli.

<i>Parametri biomassa fogliare</i>		
<i>Parametri</i>	<i>Valori</i>	<i>Unità di misura</i>
$n_{VG}$	$1.46 \cdot 10^{-5}$	1/ <i>giorni</i>
$n_G$	$4.4 \cdot 10^{-3}$	1/ <i>giorni</i>
$\mu_G$	$3 \cdot 10^{-4}$	1/ <i>giorni</i>
$b_G$	$2.4 \cdot 10^{-4}$	<i>ha/(ton · giorno)</i>
$c_{GV}$	$5.5 \cdot 10^{-4}$	<i>ha/(ton · giorno)</i>
$i$	$2 \cdot 10^{-3}$	1/ <i>giorni</i>
$n_V$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	1/ <i>giorni</i>
$\mu_V$	$4.7 \cdot 10^{-5}$	1/ <i>giorni</i>
$b_V$	$6 \cdot 10^{-4}$	<i>ha/(ton · giorno)</i>

Tabella 3.1: Parametri relativi biomassa fogliare

Alcuni parametri che influenzano la dinamica della biomassa di larve si possono ricavare da letteratura. Le larve, lasciate in assenza di cibo per 8 settimane a una temperatura compresa fra  $0^\circ\text{C}$  e  $9^\circ\text{C}$ , subiscono una mortalità del 10 % [Hoch et al., 2009] e da questa informazione è possibile ricavare che il parametro di mortalità naturale  $\mu_L$  sia uguale a  $2 \cdot 10^{-3} \text{giorni}^{-1}$ .

Per quanto riguarda l'azione predatoria sulla biomassa larvale, in particolare quella dovuta al predatore *Cuculus canorus*, vi sono evidenze che un maschio adulto riesca a cibarsi di circa 32 larve agli ultimi stadi in circa 2 ore (cioè una larva ogni 4 minuti) e che il massimo che questo possa mangiare in un giorno sia di circa 40 larve [Barbaro and Battisti, 2011]. Da questi dati si possono ricavare i parametri della risposta funzionale di Holling di tipo II usata per modellizzare questa interazione; in particolare questi risultano essere  $\alpha_L = 3.6 \cdot 10^{-2} \frac{kg(larve)}{kg(predatori) \cdot t}$  e  $\beta_L = 0.74 \text{kg}(larve)$ .

Gli altri parametri sono stati calibrati per cercare di ottenere un andamento che presenti infestazioni cicliche di periodo fra 5 e 8 anni, tipiche di questo fitofago. Complessivamente i parametri riguardanti la dinamica delle larve sono riportati in *Tab.3.2*.



<i>Parametri biomassa larvale</i>		
<i>Parametri</i>	<i>Valori</i>	<i>Unità di misura</i>
$e$	300	$kg(larve)/ton(biomassa)$
$\mu_L$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1/giorni$
$\alpha_{G,V}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$ton/kg(L) \cdot giorno$
$\beta_{G,V}$	0.4	$ton/ha$
$\gamma$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1/giorni^2 \cdot kg(larve)$
$\alpha_L$	$3.6 \cdot 10^{-2}$	$kg(larve)/kg(predatori) \cdot t$
$\beta_L$	0.74	$kg(larve)$
$Z$	1.2	$kg(predatori)/ha$
$h$	4	[/]
$\mu_P$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1/giorni$

Tabella 3.2: Parametri relativi alla biomassa larvale

### 3.5 Andamenti del modello

Fissando i parametri del modello ai valori riportati nelle *Tab.3.1* e *3.2* si ottengono una serie di comportamenti caratteristici di biomassa di aghi e di larve riportati nelle *Fig.* da *3.10* a *3.15*

Il primo andamento caratteristico è quello della biomassa di aghi supponendo che gli insetti siano assenti. Per ottenere questo andamento si pone la condizione iniziale delle larve  $L(0) = 0$ . Questa imposizione fa sì che, data la formulazione del modello, per qualunque istante di tempo  $t$  si abbia che  $L(t) = 0$ . Impostando le condizioni iniziali della biomassa fogliare dei pini come:

$$G = 0.001; \quad V = 0.001;$$

l'andamento delle variabili  $G$  e  $V$  risulta quello in *Fig.3.10*, mentre il comportamento della biomassa complessiva di aghi presenti nella foresta è quello mostrato in *Fig.3.11*. La foresta raggiunge un valore di biomassa fogliare pari a circa 4.6 kg/ha in un tempo pari a circa 15 anni, poi rimane a questo valore di equilibrio, in cui è prevalente la presenza di biomassa fogliare di pini vecchi rispetto a quella di pini giovani. Tale valore è in accordo con quanto riportato in [Lehtonen, 2005].

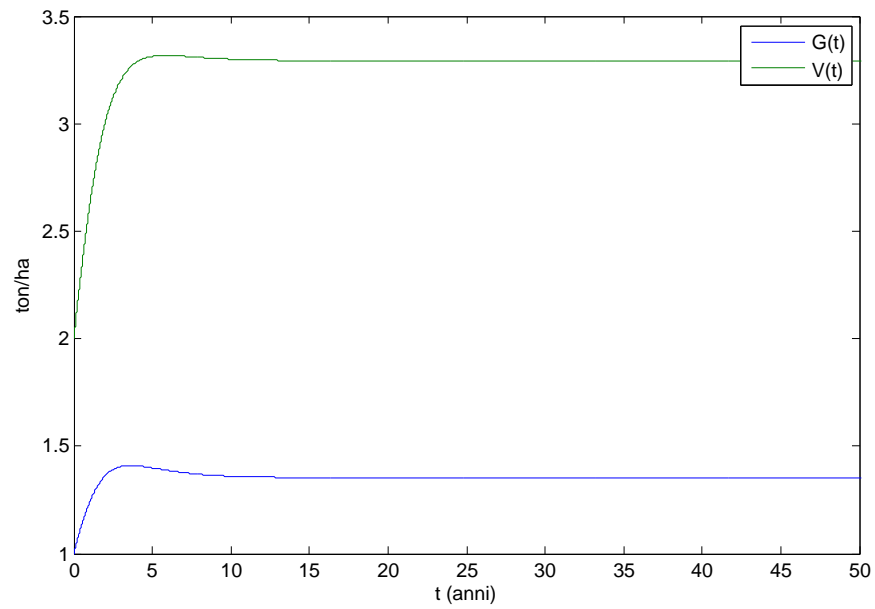


Figura 3.10: Andamento nel tempo delle variabili  $G(t)$  e  $V(t)$  in assenza di insetti

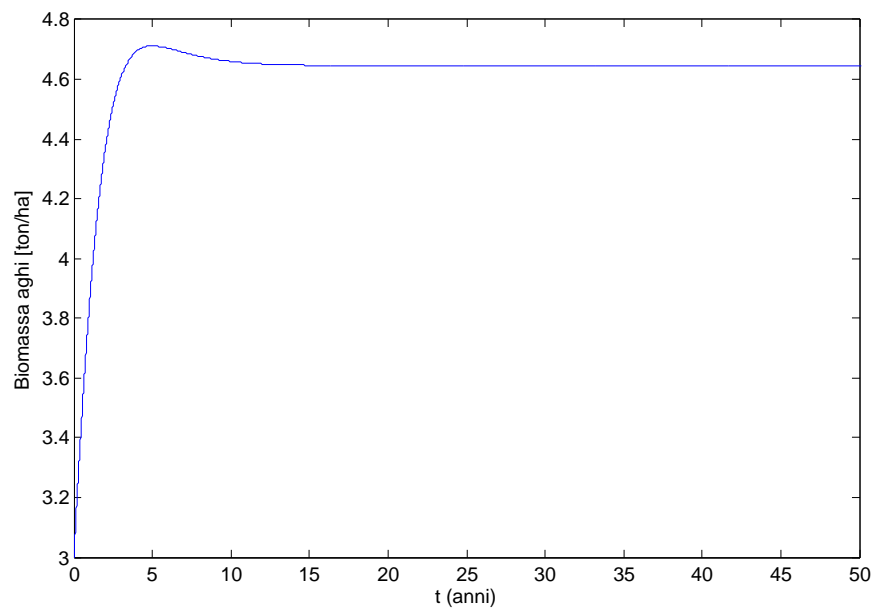


Figura 3.11: Andamento nel tempo della Biomassa totale in assenza di insetti

Il secondo andamento caratteristico (*Fig.3.12*) è quello in cui sono presenti anche le larve in relazione trofica con gli aghi di pino, supponendo che la temperatura rimanga costante al suo valore medio. Si impone quindi la condizione iniziale delle larve  $L(0) = 0.001$ , mentre nell'*Eq.3.1* si imposta  $\varepsilon$  al valore  $\varepsilon = 0$ .

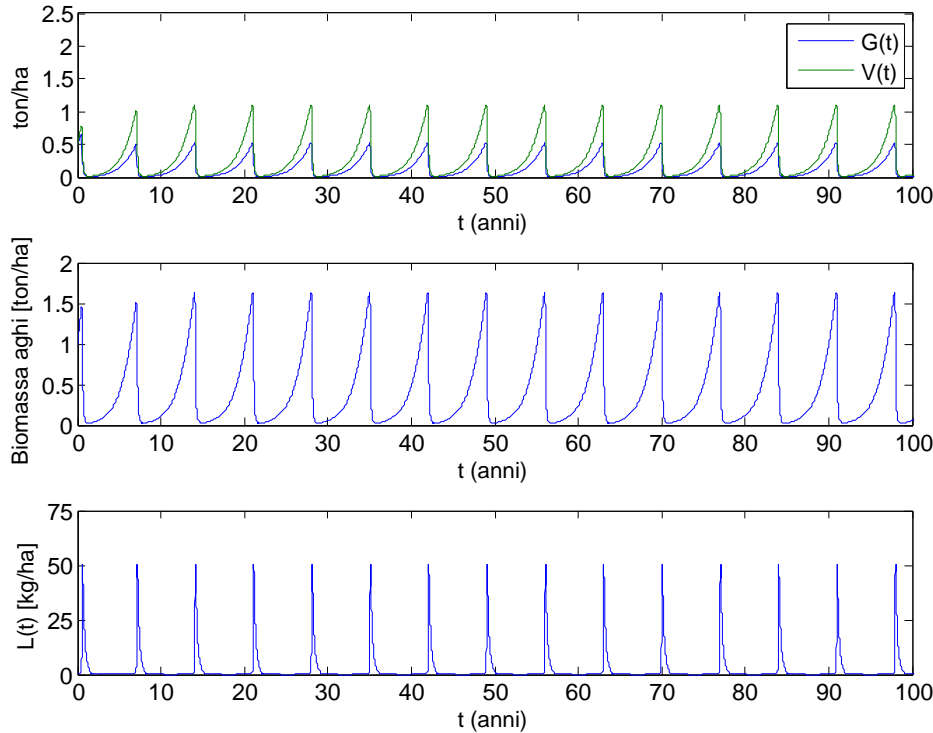


Figura 3.12: Andamento nel tempo del modello a temperatura costante pari a  $10.34^\circ\text{C}$

Dopo un transitorio iniziale, l'andamento si assesta su un comportamento ciclico. Il ciclo è caratterizzato da picchi di biomassa di larve pari a circa  $51 \text{ kg/ha}$ , corrispondenti a circa 11 nidi/albero [Branco et al., 2008]. Il numero di nidi per pino risulta tipico di foreste gravemente infestate [Aimi et al., 2006]. L'intervallo fra picchi successivi di circa 7 anni. Il tipo di comportamento corrisponde qualitativamente a ciò che accade in un modello di infestazione forestale: si notano le caratteristiche esplosioni ricorrenti della popolazione dei parassiti.

Si intuisce che il sistema presenta una dinamica del tipo lento-veloce: le variabili che descrivono gli aghi, infatti, sono caratterizzate da una dinamica lenta, dell'ordine delle decine di anni, mentre le larve hanno una dinamica

più veloce, dell'ordine dei giorni.

Nella *Fig.3.13* è rappresentata la traiettoria delle variabili di biomassa fogliare totale ( $G(t) + V(t)$ ) e di biomassa larvale  $L(t)$  nel piano delle fasi, cioè il piano che rappresenta i valori che assumono le variabili di stato del sistema in ogni istante  $t$  della simulazione. Nel diagramma delle fasi si osserva il ciclo sul quale il sistema si è assestato.

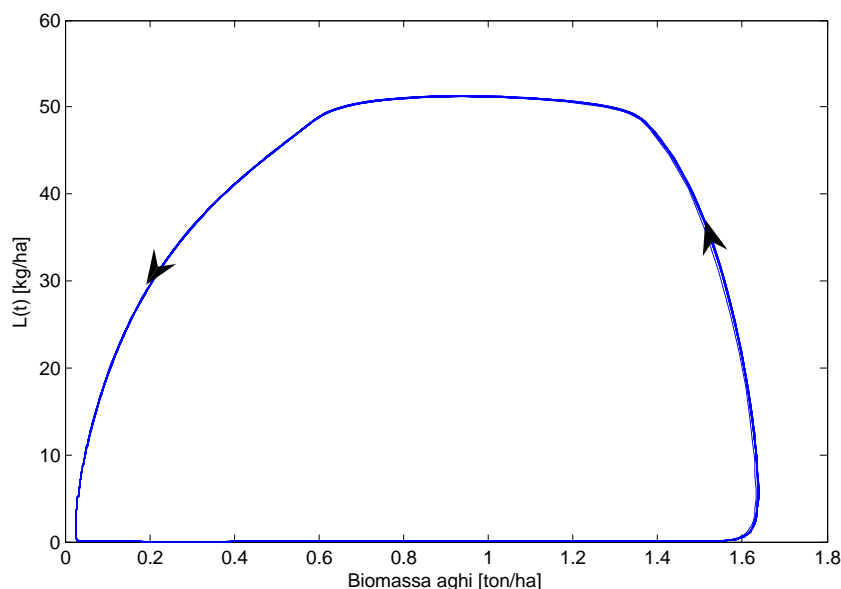


Figura 3.13: Andamento delle variabili nello spazio delle fasi a temperatura costante pari a  $10.34^{\circ}\text{C}$

Il modello è stato costruito perché possa descrivere le variazioni nelle dinamiche dovute alla variazione di temperatura. Per studiare il comportamento del modello a temperatura variabile, si riporta il parametro  $\varepsilon$  al suo valore originario di 0.96. Gli andamenti sono quelli rappresentati in *Fig.3.14*, visualizzando, rispetto a prima, più anni di simulazione. Si vede come la presenza di una variabilità nelle temperature induca il sistema ad assumere un comportamento caotico, sia da un'infestazione all'altra sia all'interno delle singole infestazioni. I valori di picco della quantità di insetti durante ogni esplosione cambiano da un evento all'altro, mentre il tempo di ritorno dei picchi delle infestazioni non varia di molto e risulta di poco superiore al periodo del ciclo osservato nel caso a temperatura costante (sull'orizzonte di simulazione di 300 anni è pari a circa 8 anni).

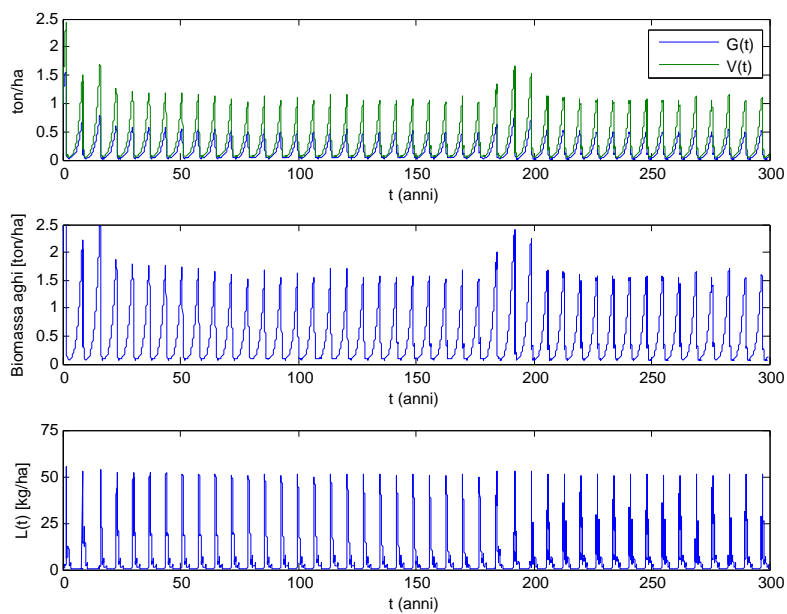


Figura 3.14: Andamento del modello a temperatura variabile

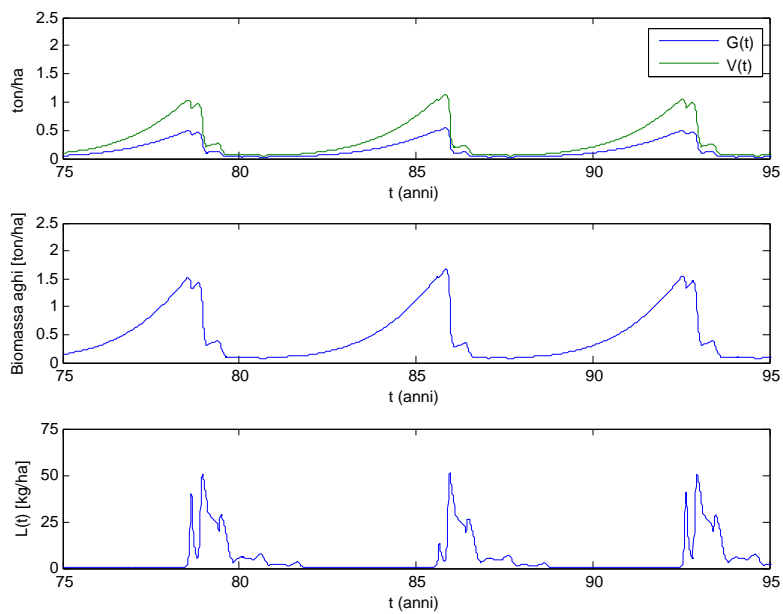


Figura 3.15: Particolare dell'andamento di  $L(t)$  con temperatura variabile

Nella *Fig.3.15* è rappresentato un ingrandimento del grafico dell'andamento della variabile delle processionarie, in cui si nota meglio il comportamento caotico dovuto alla variazione della temperatura durante l'anno.

## Capitolo 4

# Politiche di intervento

Le infestazioni dovute alle processionaria del pino sono eventi problematici dal punto di vista forestale, poiché si producono danni all'ecosistema in quanto quando sono presenti in quantità elevate, in seguito alla defogliazione, provocano una riduzione dell'attività fotosintetica e nutritiva degli alberi colpiti e, oltre a rallentarne la crescita, causano un loro indebolimento, rendendoli vulnerabili. Inoltre, a questo si aggiunge un problema di carattere sanitario poiché le larve sono ricoperte di peli urticanti, dannosi non solo per l'uomo ma anche per gli animali che entrano in contatto con essi; in particolare, gli effetti sanitari sull'uomo a seguito di un contatto con i peli comprendono reazioni allergiche e dermatiti [La Fuente et al., 1999]; gli effetti descritti sono tanto più gravi quanto più è intensa l'infestazione. La lotta alla processionaria è quindi resa obbligatoria fin dal 1926 (D.M. 20.05.1926, Nr. 138 aggiornato dal D.M. 30.10.2007) su tutto il territorio italiano, nelle aree in cui l'insetto minaccia seriamente la produzione o la sopravvivenza del popolamento arboreo e/o costituisca un rischio per la salute di persone ed animali.

Più in generale, la lotta alla processionaria del pino è mirata al controllo e al contenimento dell'abbondanza di insetti. È bene sottolineare che non esiste una tecnica che permetta la completa eradicazione della specie, che d'altra parte non sarebbe nemmeno auspicabile. L'obiettivo del controllo deve essere quindi il ripristino del naturale equilibrio bio-ecologico della foresta [Minerbi et al., 2001].

Gli interventi atti al controllo di un sistema naturale sono anche chiamati *politiche* nel campo della modellistica ambientale, quindi sarà possibile in-

contrare questo termine, da intendere come sinonimo di intervento.

Gli interventi da applicare possono essere suddivisi in due categorie: di tipo indiretto e di tipo diretto. Gli interventi di tipo indiretto non agiscono direttamente sulla biomassa larvale ma influenzano fattori ambientali legati alla dinamica degli insetti; si prevede quindi che il loro effetto si realizzi sul lungo periodo. Gli interventi di tipo diretto, al contrario, agiscono direttamente sulla biomassa larvale presente ed hanno un effetto immediato di breve periodo, mentre a lungo termine non modificano in alcun modo l'andamento della biomassa larvale a meno di una loro nuova applicazione. Da qui consegue che i primi sono interventi considerati di prevenzione, che quindi devono essere messi in atto dopo un attento studio e con aspettative a lungo termine, mentre i secondi sono da intendersi come interventi di emergenza, atti al contenimento dell'infestazione e dei problemi ad essa associati, ma non sono efficaci a lungo termine se non riapplicati. In *Tab.4.1* si riportano i principali tipi di intervento classificati secondo la distinzione appena proposta.

<i>Interventi Indiretti</i>	<i>Interventi Diretti</i>
Lotta biologica Lotta silvicola	Uso di pesticidi e bio-insetticidi Trappole a feromoni Distruzione dei nidi invernali

Tabella 4.1: Tipi di intervento principali

Ciascuno di questi interventi ha una modellizzazione differente, che verrà analizzata dettagliatamente nei prossimi paragrafi.

Per poter comparare fra loro diversi interventi è necessario valutare l'effetto che hanno sull'ecosistema considerato, attraverso diverse simulazioni del modello e mediante la definizione di variabili di prestazione chiamate *indicatori*, che a loro volta sono funzioni dei risultati delle simulazioni effettuate. L'efficacia degli interventi può essere determinata confrontando il valore che gli indicatori assumono al variare del tipo di intervento e al variare dell'intensità con cui questo è applicato.

## 4.1 Indicatori

La comprensione degli effetti positivi e negativi che un determinato intervento provoca sul sistema è un procedimento che si ottiene analizzando delle



grandezze chiamate indicatori. Per ogni indicatore è opportuno stabilire in quale misura esso rappresenti la situazione desiderabile, cioè, in questo caso specifico, se esso vada massimizzato o minimizzato. Per ogni intervento, variandone l'intensità, si ottiene una variazione degli indicatori; di conseguenza, si possono valutare gli effetti che una o più politiche inducono sul sistema.

Gli indicatori che sono stati proposti si dividono in due categorie: indicatori che riguardano lo stato di infestazione delle larve e indicatori che riguardano la condizione della biomassa fogliare. Nei paragrafi seguenti, sono presentate le descrizioni e le formulazioni degli indicatori divisi per categorie e gli obiettivi associati ad ognuno di essi.

### Indicatori di infestazione larvale

Per la descrizione della biomassa di larve, sono stati scelti i seguenti indicatori:

- **Media dei picchi di infestazione** [ $kg/ha$ ]: è il valor medio dei picchi di infestazione, cioè i massimi della biomassa larvale  $L(t)$  superiori ad una certa soglia  $S_P$  e distanti più di 365 giorni (*Fig. 4.1*). Per ottenere un miglioramento delle condizioni del sistema questo indicatore va minimizzato.

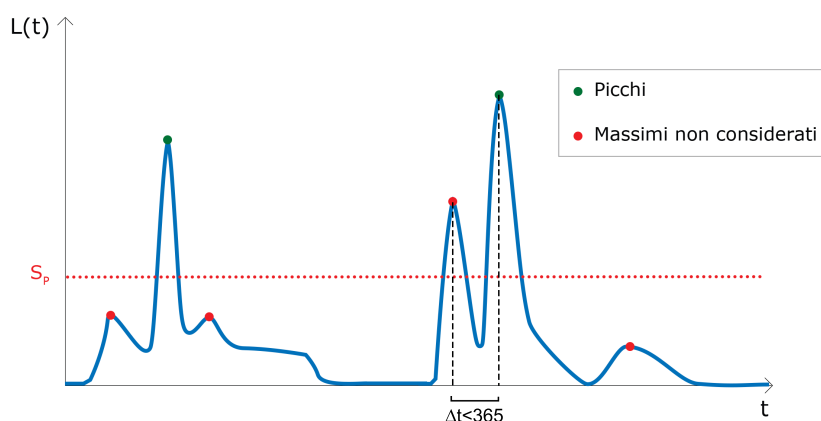


Figura 4.1: Rappresentazione grafica dei picchi maggiori di una soglia fissata

- **Media dei tempi di ritorno** [ $anni$ ]: è il valor medio dei tempi di ritorno dei picchi, cioè dell'intervallo di tempo tra un picco e quello

avvenuto dopo di esso (*Fig.4.2*). Per ottenere un miglioramento delle condizioni del sistema questo indicatore va massimizzato.

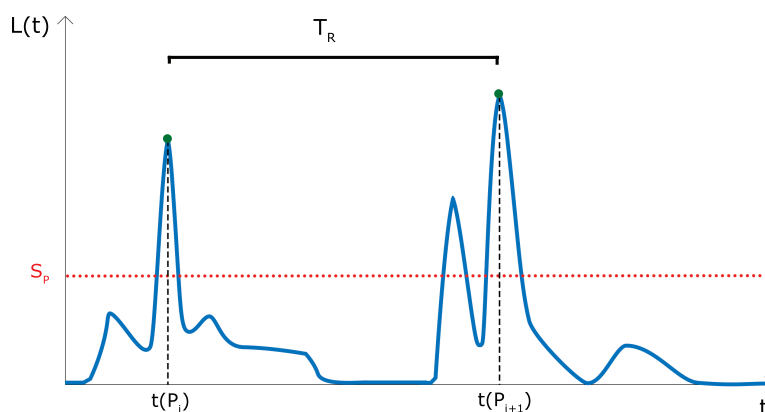


Figura 4.2: Rappresentazione grafica del tempo di ritorno fra due picchi (vedi *Fig.4.1*)

- **Media delle durate di infestazione** [*giorni*]: è il valor medio della durata delle infestazioni, cioè l'intervallo di tempo in cui si considera presente un'infestazione (quando la biomassa larvale supera una certa soglia  $s_{inf}$ , si veda *Fig.4.3*). Per ottenere un miglioramento delle condizioni del sistema questo indicatore va minimizzato.

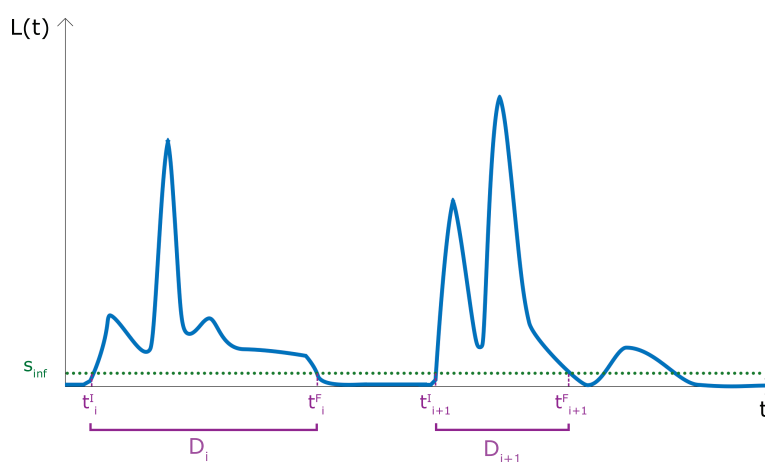


Figura 4.3: Rappresentazione grafica della durata di un'infestazione

- **Valore medio di insetti** [ $kg/ha$ ]: è la media integrale della biomassa di insetti  $l(t)$ , calcolata su tutto l'orizzonte temporale. Per ottenere un miglioramento delle condizioni del sistema questo indicatore va minimizzato.
- **Rapporto tra picchi e tempo di ritorno** [ $kg/(ha \cdot anno)$ ] è il rapporto tra la media dei picchi di infestazione e la media dei tempi di ritorno. Per ottenere un miglioramento delle condizioni del sistema questo indicatore va minimizzato.
- **Media delle intensità di infestazione** [ $(kg \cdot anno)/ha$ ]: è il valor medio delle intensità di infestazione, calcolate come area sottesa dalla curva della funzione della biomassa larvale ( $L(t)$ ) ad ogni infestazione (Fig.4.4). Per ottenere un miglioramento delle condizioni del sistema questo indicatore va minimizzato.

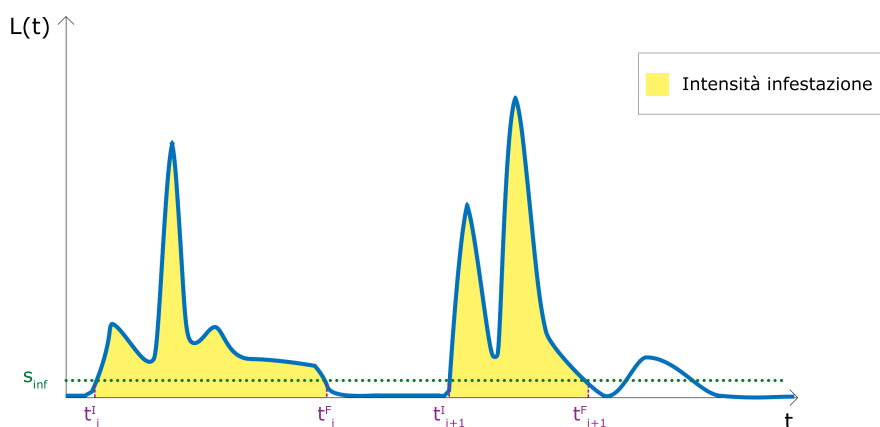


Figura 4.4: Rappresentazione grafica della definizione di intensità di infestazione

### Indicatori della condizione della biomassa fogliare

Per quanto riguarda la biomassa di aghi, sono stati scelti i seguenti indicatori, facendo riferimento sempre alla biomassa fogliare totale  $A(t) = G(t) + V(t)$

- **Media dei minimi di biomassa di aghi** [ $ton/ha$ ]: è il valor medio dei minimi di biomassa fogliare inferiori ad una certa soglia  $S_{min}$

(Fig.4.5). Per ottenere un miglioramento delle condizioni del sistema questo indicatore va massimizzato.

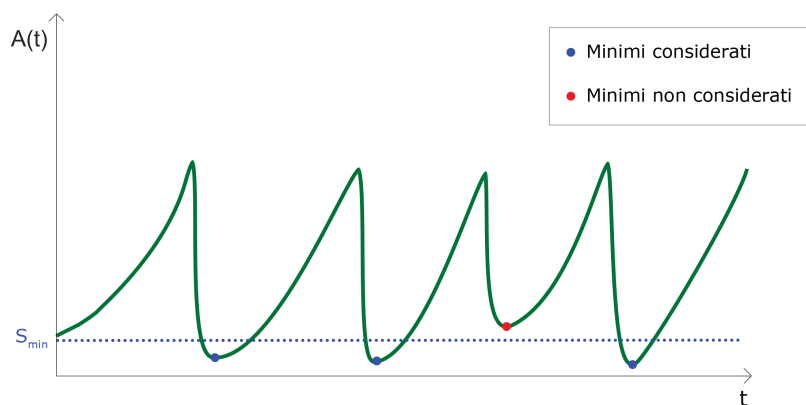


Figura 4.5: Rappresentazione grafica dei minimi di biomassa fogliare inferiori ad una soglia fissata

- **Media dei tempi di ritorno dei minimi [anni]:** è il valor medio dei tempi di ritorno corrispondenti ai minimi di biomassa, cioè degli intervalli di tempo che intercorrono tra un minimo e il successivo (Fig. 4.6). Per ottenere un miglioramento delle condizioni del sistema questo indicatore va massimizzato.

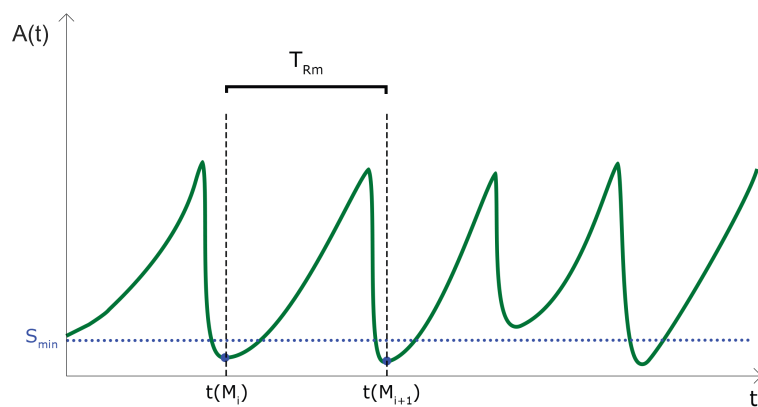


Figura 4.6: Rappresentazione grafica del tempo di ritorno fra due minimi di biomassa fogliare

- **Media delle aree tra minimi successivi:**  $[(ton \cdot anni)/ha]$ : è il valor medio delle aree sottese dalla curva della funzione di biomassa totale  $(A(t))$ , calcolate tra un minimo ed il successivo (*Fig. 4.7*). Per ottenere un miglioramento delle condizioni del sistema questo indicatore va massimizzato.

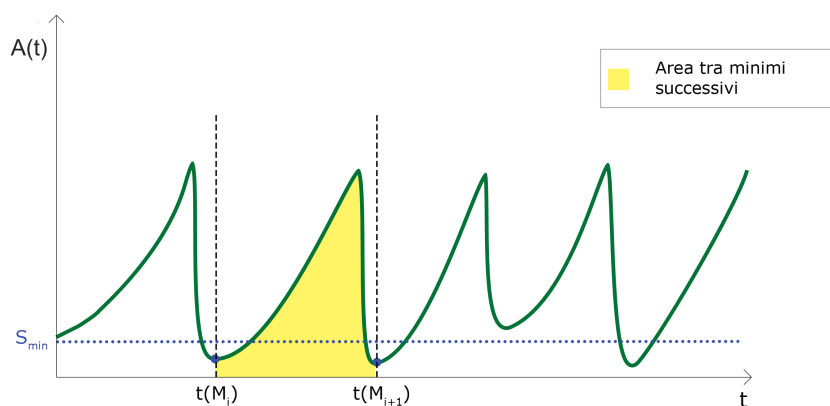


Figura 4.7: Rappresentazione grafica dell'area fra minimi successivi

## Indicatori e obiettivi

Nella *Tab.4.2* sono riassunti gli indicatori e gli obiettivi ad essi associati.

Indicatore	Obiettivo
Media dei picchi di infestazione	Minimizzare
Media dei tempi di ritorno	Massimizzare
Media delle durate di infestazione	Minimizzare
Valore medio di insetti	Minimizzare
Rapporto tra picchi e tempo di ritorno	Minimizzare
Media delle intensità di infestazione	Minimizzare
Media dei minimi di biomassa di aghi	Massimizzare
Media dei tempi di ritorno dei minimi	Massimizzare
Media delle aree tra minimi successivi	Massimizzare

Tabella 4.2: Indicatori e obiettivi.

Vengono inoltre mostrati in *Tab.4.3* i valori che assumo gli indicatori nel caso in cui nessuna politica di intervento sia applicata.

<i>Indicatori</i>	<i>Valori</i>	<i>Unità di misura</i>
<i>Media picchi</i>	51.5	<i>kg/ha</i>
<i>Tempi ritorno picchi</i>	6.2	<i>anni</i>
<i>Durata infestazioni</i>	1081	<i>giorni</i>
<i>Media larve</i>	4.5	<i>kg/ha</i>
<i>Picchi/tempo ritorno</i>	8.2	<i>kg/(ha · anno)</i>
<i>Intensità infestazione</i>	19.44	<i>kg · anno/ha</i>
<i>Media minimi aghi</i>	0.073	<i>ton/ha</i>
<i>Tempi ritorno minimi</i>	4.9	<i>anni</i>
<i>Area biomassa aghi</i>	3.5	<i>ton · anno/ha</i>

Tabella 4.3: Valori degli indicatori nel caso in cui nessuna politica venga applicata

Nei paragrafi successivi, al variare dell'intensità di ciascun intervento, sarà analizzata la variazione percentuale degli indicatori rispetto al caso base. Essendo  $I$  il valore di un indicatore per una data intensità di un intervento ed essendo  $I_0$  il valore dello stesso indicatore nel caso senza intervento, la variazione percentuale viene calcolata come:

$$Var \% (I) = \frac{I - I_0}{I_0} \cdot 100 \quad (4.1)$$

## 4.2 Interventi indiretti

### Lotta biologica

Gli uccelli insettivori sono sempre più fortemente ritenuti essere un mezzo di controllo biologico delle infestazioni degli insetti patogeni sia delle colture agricole che delle foreste. Inoltre, è provato che questi predatori sono molto efficienti e sono in grado di ridurre dal 20% fin anche al 100% la densità degli insetti di cui si nutrono [Barbaro and Battisti, 2011]. Nello studio di questo tipo di intervento sono comprese tutte le politiche di controllo biologico mirate ad un aumento dell'effetto della predazione sulla biomassa larvale; è importante sottolineare che questo termine riguarda solo la predazione ai danni delle larve e non quello ai danni degli altri stadi evolutivi. In particolare, prendiamo come esempio due specie ampiamente diffuse sul territorio, ovvero il cuculo (*Cuculus canorus*) e la cinciallegra (*Parus major*). Entrambe queste specie sono in grado di nutrirsi di larve di processionaria ma, mentre la prima si ciba solamente di larve agli stadi finali, la seconda

esercita la sua opera di predazione su tutti gli stadi larvali, avendo comunque un massimo di efficienza fra febbraio e marzo [Barbaro and Battisti, 2011]. Aumentare la densità di questi predatori non significa solamente inserire nuovi individui nell'ambiente, ma anche far sì che esso sia ideale per il loro insediamento e la loro crescita. Importante è quindi pensare di predisporre luoghi adatti dove questi uccelli possano nidificare e stabilirsi definitivamente, in modo da avere sempre il loro apporto al controllo della foresta, senza dover effettuare continui interventi di aumento degli individui della popolazione [Leblond et al., 2010]. Questo intervento viene inserito nel modello come un aumento del parametro  $Z$ , che rappresenta la densità dei predatori naturali. Dunque, per capire come questa politica influenzi la popolazione di processionaria del pino, è necessario osservare come variano i valori degli indicatori all'aumentare del parametro. Si può notare come, se si considerano solo gli episodi di infestazione, all'aumentare della densità dei predatori la media dei picchi di infestazione aumenti leggermente, mentre la media dei tempi di ritorno fra infestazioni successive aumenta molto e contestualmente diminuisce la durata media delle infestazioni (*Fig.4.8*).

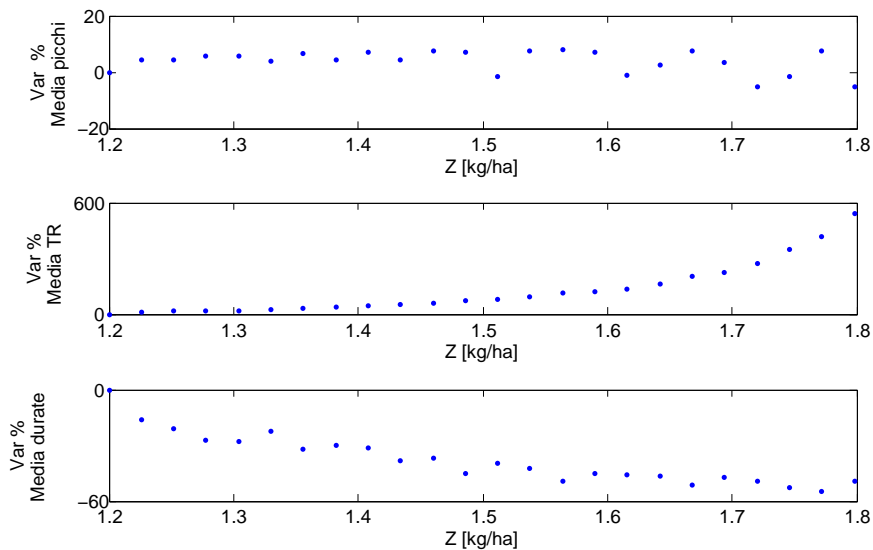


Figura 4.8: Variazione percentuale degli indicatori della biomassa larvale durante le infestazioni al variare della densità di predatori  $Z$  [kg/ha]

Come riporta la *Fig.4.9*, se si considera la totalità degli anni di simulazione (in questo caso 500 anni), la media degli insetti calcolata sul lungo periodo, tenendo conto anche della fase di latenza, risulta decrescente all'aumentare del valore di  $Z$ . Il rapporto fra la media dei picchi e la media dei tempi di ritorno diminuisce a causa dell'aumento di quest'ultimo termine, mentre la media delle intensità di infestazione rimane circa costante. Infine se si analizza la biomassa fogliare (*Fig.4.10*) possiamo vedere come ci sia anche un beneficio per la foresta. Infatti, se da una parte il valore minimo raggiunto dalla biomassa fogliare durante le infestazioni non varia di molto, assistiamo ad un aumento dei tempi di ritorno fra minimi successivi (analogamente a quanto accade per i tempi di ritorno delle infestazioni) e ad un miglioramento delle condizioni della foresta sul lungo periodo.

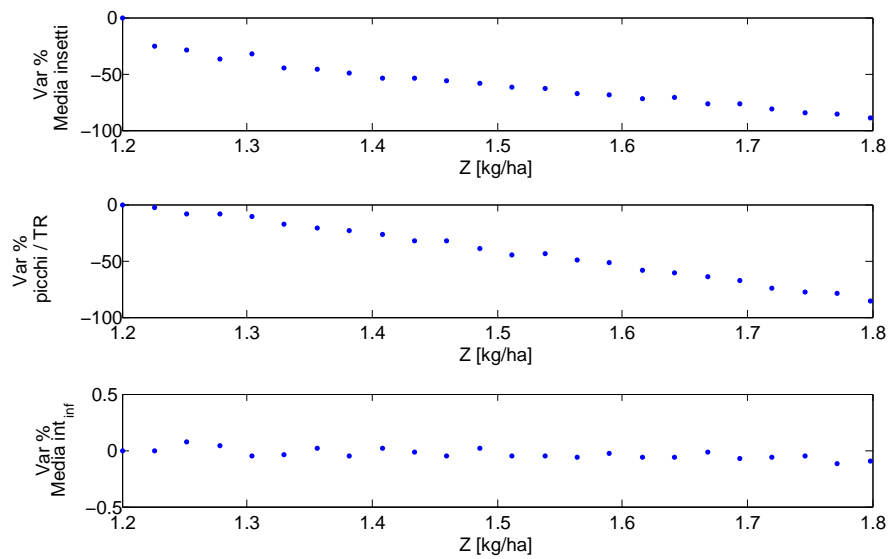


Figura 4.9: Variazione percentuale degli indicatori della biomassa larvale sul lungo periodo e degli indicatori aggregati al variare della densità di predatori  $Z$  [kg/ha]



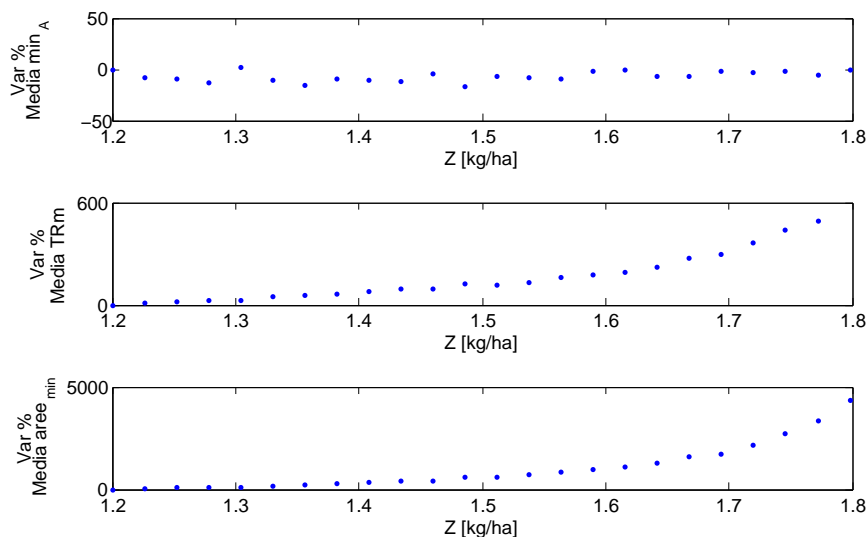


Figura 4.10: Variazione percentuale degli indicatori della biomassa fogliare al variare della densità di predatori  $Z$  [kg/ha]

Analizzando nel complesso la variazione degli indicatori proposti, questo intervento porta nella maggior parte dei casi a un miglioramento dei loro valori rispetto al caso senza intervento. La politica risulta essere quindi, nel suo complesso, efficace. Questo tipo di politica è molto vantaggiosa in quanto il costo di messa in opera è relativamente contenuto, inoltre essa è assolutamente ecologica e non necessita di essere applicata ogni anno. Tuttavia, il processo di colonizzazione da parte delle nuove popolazioni di insettivori potrebbe essere lungo e quindi i benefici si riscontrerebbero solamente nel lungo periodo. Per ottenere una maggiore efficacia si rende quindi necessario accoppiare questo intervento con altri almeno nei primi anni [Leblond et al., 2010].

### Lotta silvicola

Uno degli scopi della gestione delle foreste è il mantenimento e l'aumento della biodiversità [Grison, 1970]. In quest'ottica si inserisce un intervento di lotta alla processionaria come la lotta silvicola. Questa consiste nel sostituire, con opere di rimboschimento successive, i pini con alberi che non siano oggetto di attacchi da parte della processionaria del pino, come ad esempio

alberi di latifoglie. Inoltre è necessario evitare di mettere a dimora pini, in particolare il pino nero, soprattutto a quote inferiori ai 500 m. s.l.m. ed in zone particolarmente colpite dal parassita.

Alcune evidenze sperimentali, infatti, dimostrano che più il paesaggio è eterogeneo più sono rari i casi di infestazione [Hóðar et al., 2002]. L'efficacia è dovuta alla riduzione sia del numero che della disponibilità di piante ospiti di cui le larve possono nutrirsi [Leblond et al., 2010].

La politica viene modellizzata aggiungendo alle Eq.3.2 e 3.3 della biomassa fogliare un termine di competizione, rispettivamente  $-c_p PG$  per la biomassa di aghi di alberi giovani e  $-c_p PV$  per la biomassa di aghi di alberi vecchi. Il parametro  $P$  indica la biomassa di latifoglie nella foresta, anch'esso è espresso come tonnellate di biomassa fogliare per ettaro ed è supposto costante. Il parametro  $c_p$  rappresenta la mortalità per competizione fra i pini e le latifoglie che si è supposto avere un valore paragonabile al parametro che rappresenta la competizione fra pini vecchi, in particolare  $c_p = 0.006$ . L'aggiunta di questo termine di competizione ha come effetto una diminuzione della biomassa fogliare dei pini all'equilibrio (Fig.4.11) che viene sostituita da biomassa di latifoglie.

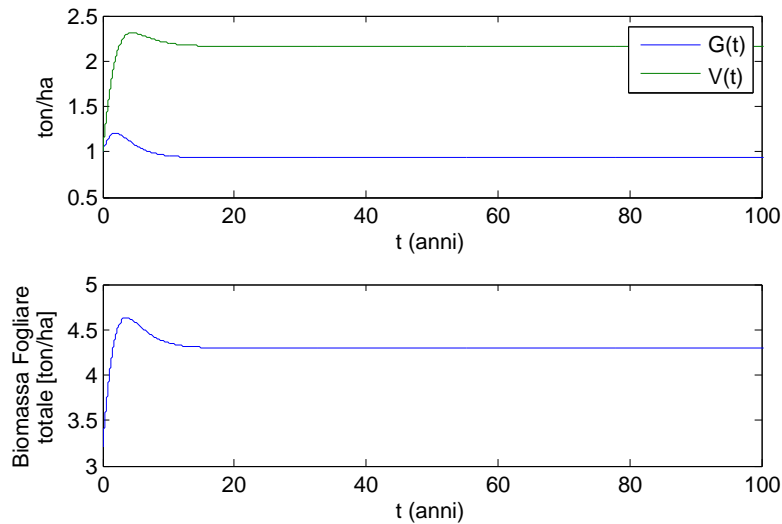


Figura 4.11: Dinamica della biomassa di aghi e della biomassa fogliare totale con  $P = 1.2 \frac{\text{ton}}{\text{ha}}$ , in assenza di insetti

Una diminuzione di biomassa fogliare dei pini, inoltre, ha un effetto diretto sulla dinamica della processionaria. Infatti, avendo meno cibo a dispo-

sizione ed essendo questo cibo meno reperibile, in quanto la distribuzione spaziale dei pini risulterebbe più frazionata ed il paesaggio più eterogeneo, le larve non riescono più a crescere in modo rapido, non dando quindi luogo ad esplosioni demografiche.

Si è studiato come variano i valori degli indicatori all'aumentare del parametro  $P$ , valutando la loro variazione percentuale rispetto al caso senza intervento. Si può vedere in *Fig.4.12* che la media dei picchi durante i periodi di infestazione rimane pressoché costante, cominciando a diminuire sensibilmente solo per valori alti di intervento. La media dei tempi che intercorrono fra due infestazioni successive, al contrario, cresce moltissimo, implicando, per valori alti dell'intervento, la quasi scomparsa delle larve.

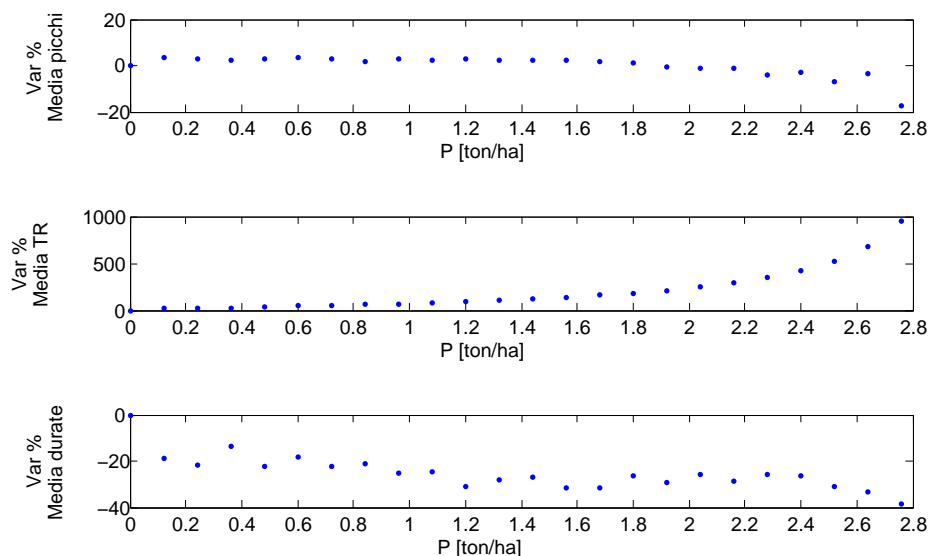


Figura 4.12: Variazione percentuale degli indicatori della biomassa larvale durante le infestazioni al variare della densità di biomassa forestale non predabile  $P$  [ton/ha]

Come si può notare in *Fig.4.13* anche valori intermedi di intervento portano a un sensibile aumento del tempo di ritorno, fino ad avere un aumento del 100%. Inoltre, anche la media delle durate di infestazione, pur assumendo valori molto variabili, mostra un andamento decrescente.

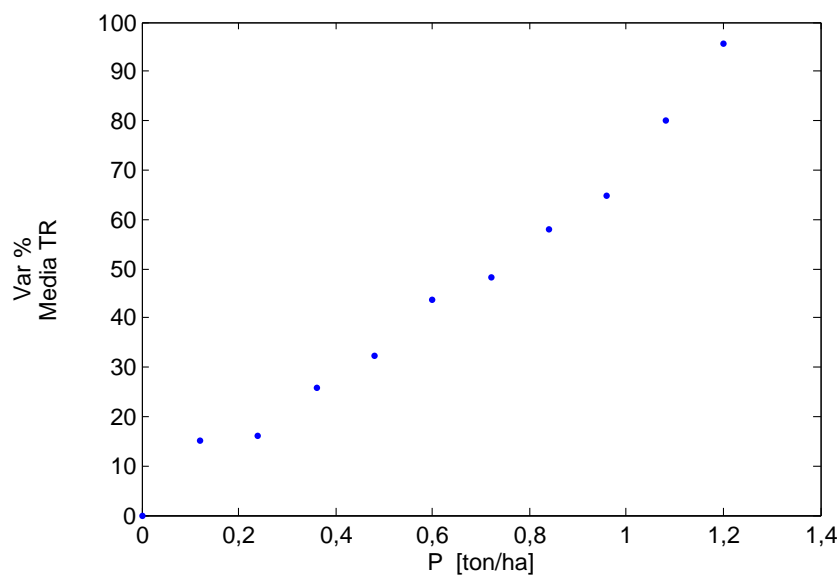


Figura 4.13: Particolare della variazione percentuale della media di tempi di ritorno al variare del parametro  $P$  [ton/ha]

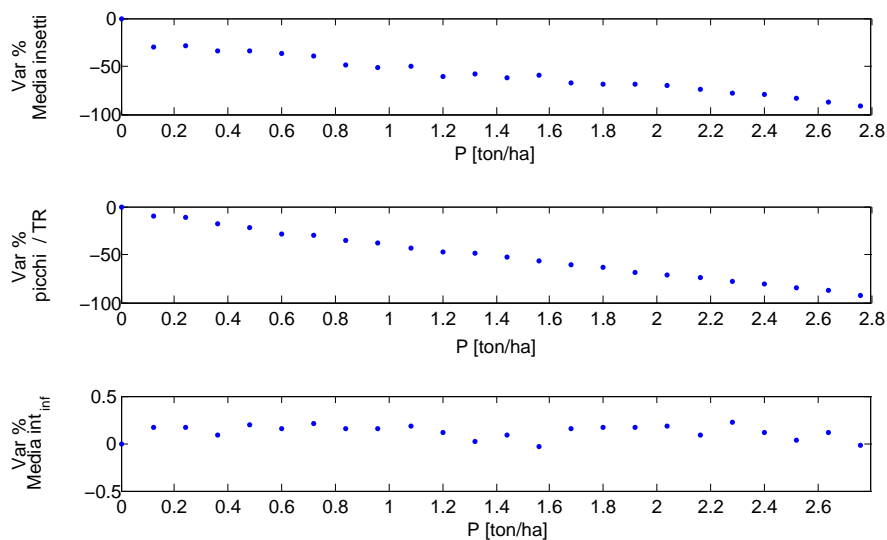


Figura 4.14: Variazione percentuale degli indicatori della biomassa larvale sul lungo periodo e degli indicatori aggregati al variare della densità di biomassa forestale non predabile  $P$  [ton/ha]

In *Fig.4.14* si può notare come, all'aumentare dell'intensità dell'intervento, la media delle larve sul lungo periodo cali sensibilmente arrivando ad una diminuzione vicina al 100%, cioè ad una quasi scomparsa delle larve. Inoltre, si nota una diminuzione del rapporto fra picchi e tempi di ritorno, mentre l'intensità di infestazione rimane pressoché costante. Infine, per quanto riguarda la biomassa fogliare dei pini, si vede che, come riportato in *Fig.4.15*, il minimo raggiunto dalla biomassa fogliare di aghi durante gli episodi di infestazione subisce una riduzione dovuta alla progressiva sostituzione di pini con altre specie. Il tempo di ritorno fra minimi successivi aumenta moltissimo così come l'indicatore riguardante le aree fra minimi successivi, implicando un miglioramento delle condizioni generali della foresta.

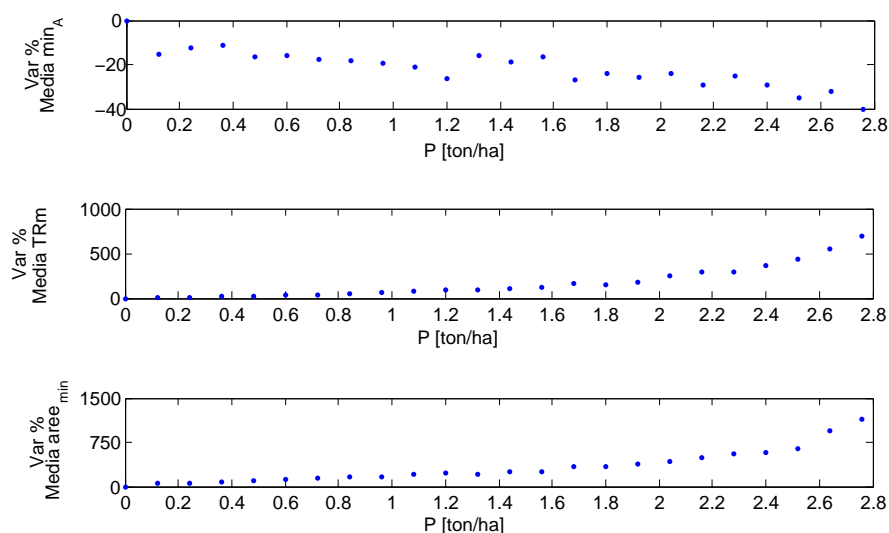


Figura 4.15: Variazione percentuale degli indicatori della biomassa fogliare al variare della densità di biomassa forestale non predabile  $P$ [ton/ha]

Alla luce della variazione osservata degli indicatori possiamo dire che questo intervento risulta molto efficace anche per valori intermedi di intensità del controllo applicato. Infatti, già per valori intermedi, si nota come si abbia un netto miglioramento della maggior parte degli indicatori. Questo tipo di intervento, inoltre, ha il vantaggio di preservare e ripristinare la biodiversità, non solo vegetale ma anche animale, tipica delle foreste naturali in quanto

su questi alberi differenti possono trovare dimora nuove specie di volatili e di altri insetti, che a loro volta possono contribuire al controllo delle esplosioni di popolazioni di processionaria. Tuttavia, un intervento con queste caratteristiche inizierà ad essere efficace solamente dopo un periodo molto lungo, cioè quando la presenza di latifoglie sia già consolidata all'interno dell'ecosistema [Leblond et al., 2010]. Questa modalità di controllo non è applicabile laddove si hanno pinete destinate al taglio per lo sfruttamento del legname.

### 4.3 Interventi diretti

#### Distruzione meccanica dei nidi invernali

Questo intervento consiste nel campionamento e nella distruzione manuale dei nidi invernali. L'utilizzo della rimozione meccanica è adatto nell'ambito di territori poco estesi, come terreni di verde urbano, giardini privati e piccoli appezzamenti di terreno boschivo. La lotta è effettuata da addetti appositamente addestrati [Minerbi et al., 2001] e dotati di attrezzatura protettiva (soprattutto per evitare il contatto coi peli urticanti), che individuano i nidi e li rimuovono, tagliando i rami su cui sono presenti. Se i nidi si trovano ad altezze troppo elevate, si deve ricorrere a mezzi elevatori o all'utilizzo di fucili per abbattere i rami su cui posano. Successivamente, i nidi invernali sono inceneriti in contenitori appositi, per evitare la diffusione dei peli urticanti [Leblond et al., 2010]. Questo tipo di intervento può essere effettuato solamente quando vi è la presenza dei nidi invernali, vale a dire fra i mesi di dicembre e febbraio. L'introduzione di questa politica nel modello è effettuata considerando l'azione degli addetti paragonabile al un processo di caccia di un predatore. Gli addetti agiscono sulle larve distruggendone i nidi e la loro azione è tanto più veloce quanto più nidi sono presenti. Una presenza esigua di nidi implica una minore velocità di rimozione da parte degli addetti. Si inserisce quindi un termine di predazione con risposta funzionale di Holling di tipo II nell'*Eq. 3.4*, che diventa:

$$\begin{aligned} \dot{L} = e\delta(T) \left( \frac{\alpha_G G}{\beta + G + V} + \frac{\alpha_V V}{\beta + G + V} \right) L + \varphi(T) \left( -\gamma L^2 - \frac{\alpha_L L}{\beta_L + L} Z - \mu_L L \right) + \\ -\mu_T(T) \frac{h}{h + L} L - \theta(T) \mu_p L - \rho(T) \frac{\alpha_U L}{\beta_U + L} U \end{aligned} \quad (4.2)$$

dove  $\rho(T)$  è la funzione che rende attiva la politica solamente nei mesi invernali. In particolare, essa assume la forma di *Fig.4.16*;  $\alpha_U$  è il massimo tasso di rimozione dei nidi da parte degli addetti, mentre  $\beta_U$  è il numero di larve presenti quando il tasso di rimozione è a metà del suo valore massimo.

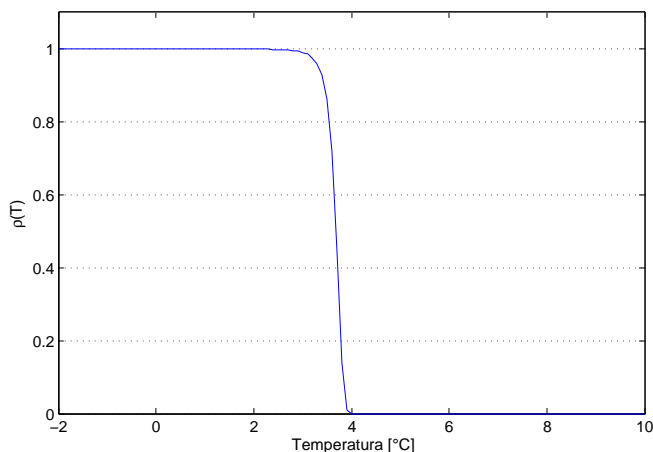


Figura 4.16: Andamento della funzione  $\rho(T)$  al variare della temperatura

Nel caso in esame si impostano i parametri della politica ai seguenti valori (ricavati da dati presenti in [Minerbi et al., 2001]):

$$\begin{aligned} \alpha_U &= 1.05 \frac{kg(larve)}{addetto \cdot giorno} \\ \beta_U &= 20 \quad kg(larve) \end{aligned} \quad (4.3)$$

Inoltre l'intervento non viene applicato ( $U = 0$ ) se nei mesi autunnali la biomassa di larve è inferiore a una soglia di 6 kg/ha.

Variando progressivamente il termine  $U$ , misurato in [addetti/ha], che rappresenta il numero di persone assunte per rimuovere i nidi, si ottiene la situazione presentata nelle *Fig. 4.17*, *4.18* e *4.19*.

In *Fig.4.17* si nota che, rispetto al caso di assenza di intervento, è presente un aumento del valore dei picchi di circa il 60% rispetto al valore iniziale; d'altra parte, si constata un aumento dell'indicatore del tempo di ritorno, che mostra una variazione positiva e si porta a valori molto elevati. Le durate delle infestazioni, diminuite dell'80% circa rispetto al caso di assenza di intervento, rimangono costanti all'aumentare degli addetti.

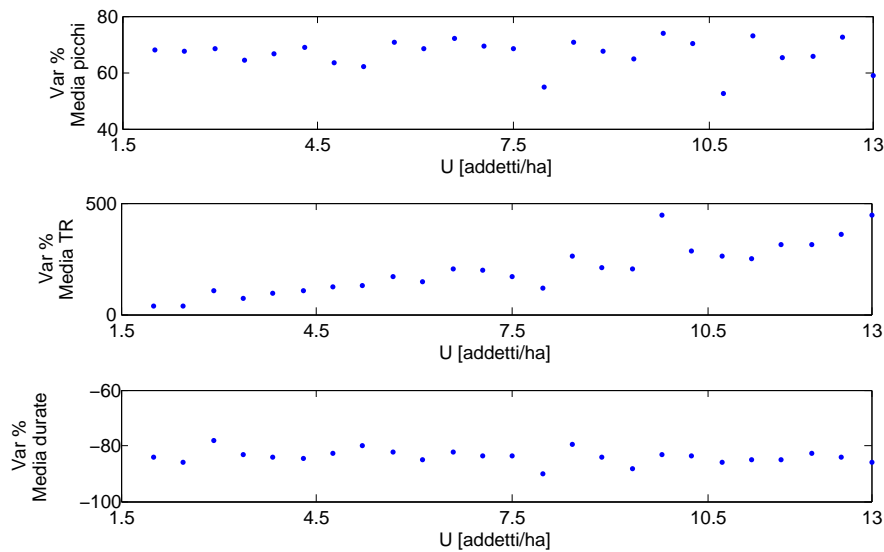


Figura 4.17: Variazione percentuale degli indicatori della biomassa larvale durante le infestazioni al variare della densità di addetti  $U$  [addetti/ha]

In riferimento alla *Fig.4.18*, si nota anche un calo della biomassa media di larve, che arriva fino ad una diminuzione prossima all'80%. Inoltre l'indicatore del rapporto tra media dei massimi e tempo di ritorno prima aumenta e poi diminuisce all'aumentare dell'intensità dell'intervento. L'intensità di infestazione, ha un andamento variabile, dovuto all'effetto della soglia considerata. Si può vedere che, in ogni caso, essa sia diminuita rispetto al valore iniziale.

Analizzando gli indicatori della biomassa fogliare (*Fig.4.19*), si nota un miglioramento di tutti i loro valori, interpretabile come un miglioramento delle condizioni della foresta.



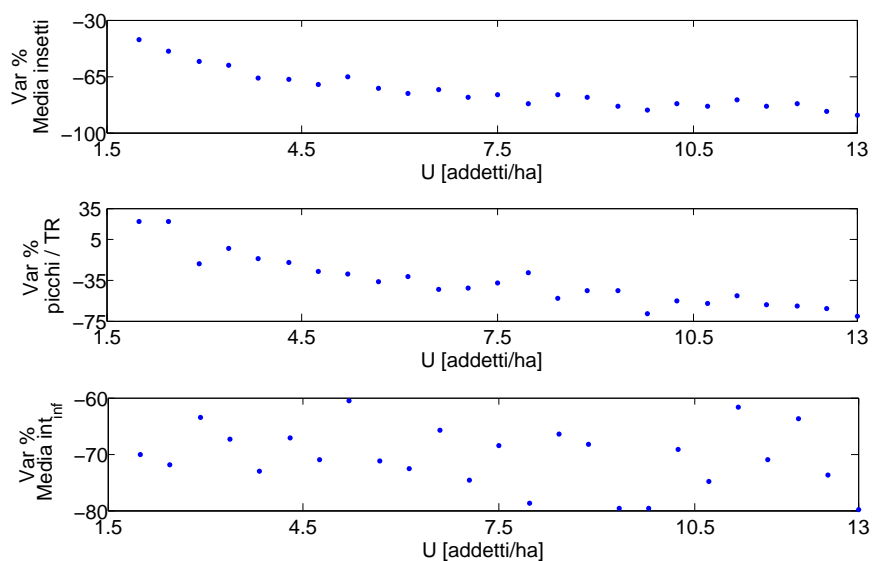


Figura 4.18: Variazione percentuale degli indicatori della biomassa larvale sul lungo periodo e degli indicatori aggregati al variare della densità di addetti  $U$  [addetti/ha]

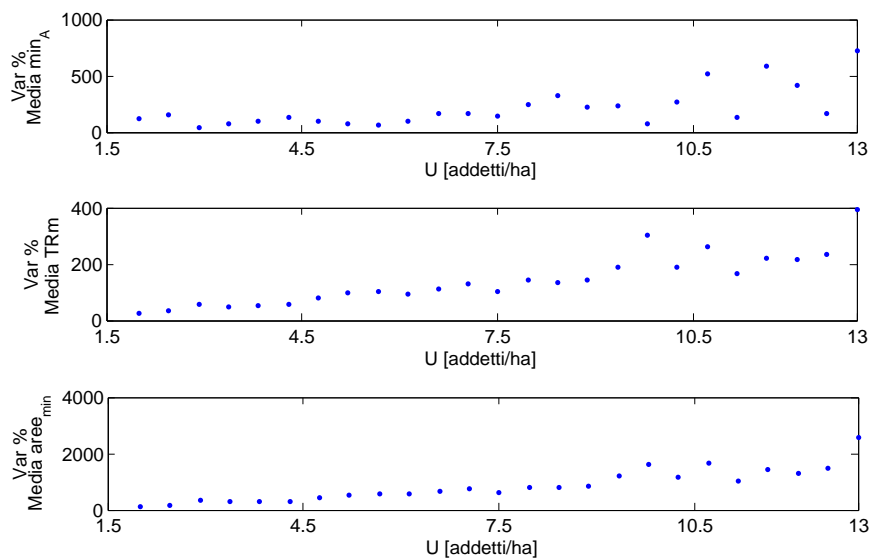


Figura 4.19: Variazione percentuale degli indicatori della biomassa fogliare al variare della densità di addetti  $U$  [addetti/ha]

In generale, questa politica produce un effetto positivo sulla maggioranza degli indicatori, ad eccezione della media di biomassa larvale presente durante le infestazioni che aumenta, producendo quindi un effetto indesiderato. La rimozione meccanica presenta vantaggi economici solamente su aree piccole e quando si ha a che fare con pini di piccola taglia; su aree estese sarebbe infatti necessario un gran numero di addetti [Minerbi et al., 2001] e, in caso di alberi troppo alti, i costi dell'attrezzatura risulterebbero elevati. Altro svantaggio è il rischio di allergia a cui si sottopongono gli addetti, la cui protezione richiede numerosi strumenti, anch'essi contribuenti all'innalzamento dei costi [Leblond et al., 2010].

### Trappole a feromoni

L'intervento si basa sull'uso di un feromone di sintesi per catturare le farfalle di sesso maschile durante il periodo di volo degli adulti, al fine di ridurre la probabilità di accoppiamento e, di conseguenza, il numero complessivo di uova deposte. Le farfalle di sesso femminile secernono naturalmente questa sostanza e la liberano nell'ambiente, per attirare gli individui di sesso opposto.

Il feromone sessuale femminile sintetizzato si inserisce in trappole (un esempio è mostrato in *Fig.4.20*); queste sono appese a supporti (come gli stessi pini, pali o recinzioni) e diffondono il feromone, attirando le farfalle di processionaria. Alla fine del periodo di cattura esse sono svuotate e possono essere riutilizzate l'anno successivo [Leblond et al., 2010].



Figura 4.20: Trappola a feromoni

Per introdurre la politica nel modello, è necessario modificare il valore del parametro  $\mu_p$ ; all'aumentare di quest'ultimo, infatti, aumenta l'effetto delle trappole a feromoni, poiché ad una diminuzione del numero di uova corrisponde un aumento di perdita di biomassa da una generazione a quella successiva.

Il progressivo aumento di questo parametro produce i risultati presentati nelle *Fig.4.21*, *4.22* e *4.23*. Nella *Fig.4.21*, riferita alla biomassa larvale, si nota che la variazione percentuale degli indicatori rispetto al valore iniziale non è molto alta e rimane a valori minori del 10%.

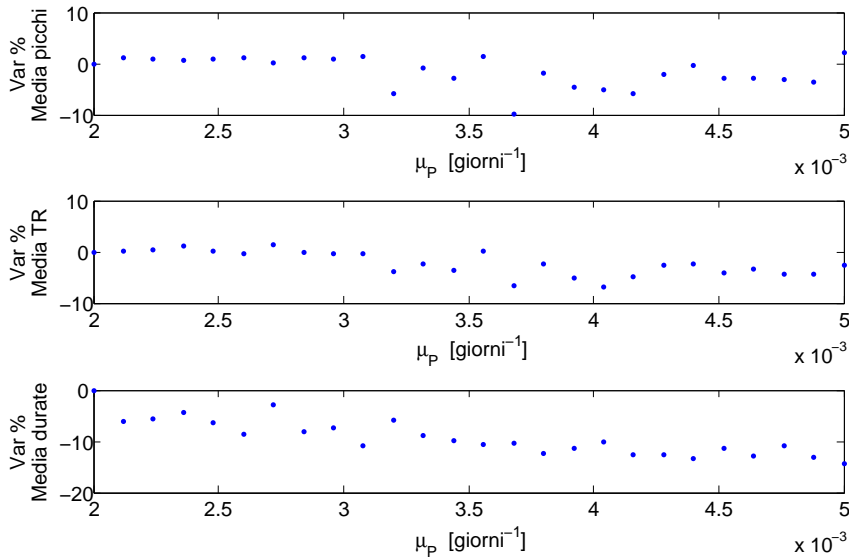


Figura 4.21: Variazione percentuale degli indicatori della biomassa larvale durante le infestazioni al variare della mortalità  $\mu_p$  [giorni<sup>-1</sup>]

Una considerazione analoga si può fare per i primi due indicatori della *Fig.4.22*: la media degli insetti subisce una piccola variazione (10 %), così come il rapporto tra picchi e tempi di ritorno. Si nota inoltre una diminuzione della media dell'intensità di infestazione.

Per quanto riguarda gli indicatori sulla biomassa di aghi (*Fig.4.23*), essi presentano tutti un miglioramento all'aumentare dell'intensità di intervento, nonostante gli aumenti percentuali non siano molto elevati.

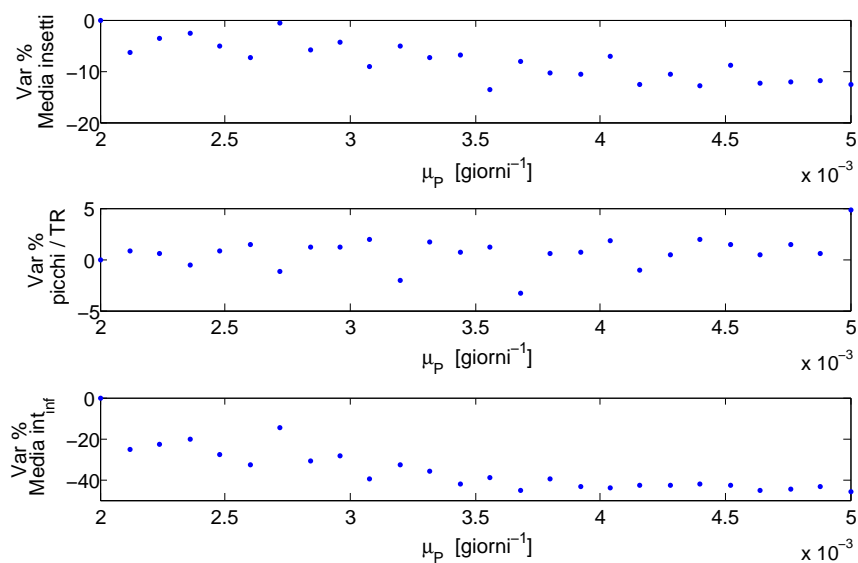


Figura 4.22: Variazione percentuale degli indicatori della biomassa larvale sul lungo periodo e degli indicatori aggregati al variare della mortalità  $\mu_p$  [giorni<sup>-1</sup>]

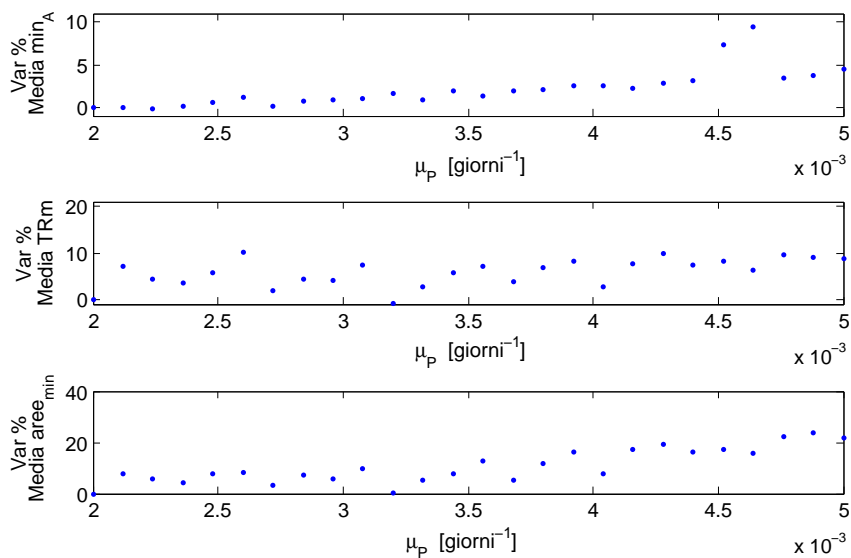


Figura 4.23: Variazione percentuale degli indicatori della biomassa fogliare al variare e al variare della mortalità  $\mu_p$  [giorni<sup>-1</sup>]

Dai risultati degli indicatori sembra che questa politica non sia particolarmente efficace se attivata singolarmente. D'altra parte, le trappole a feromoni hanno il vantaggio di essere facili da applicare e di avere una manutenzione poco onerosa. Oltre al controllo della popolazione, sono utili anche a effettuare un monitoraggio delle processionarie presenti nel periodo di volo [Leblond et al., 2010]. Si precisa che questo metodo è in fase sperimentale e non è ancora chiara la sua efficacia. Infatti, si è riscontrato che esso sia più idoneo in zone isolate e con la popolazione di processionaria in fase di latenza, mentre in fase di culmine della presenza di insetti si incorre in un peggioramento delle condizioni degli alberi su cui sono poste le trappole [Roversi, 1997].

È bene evidenziare che esiste anche una politica alternativa a quella descritta che ha la stessa descrizione dal punto di vista modellistico e, quindi, gli stessi effetti sul sistema. In particolare, se si considera l'azione di predazione dell'upupa (*Upupa Epops*) che avviene sulle crisalidi si può immaginare una politica che punti all'aumento della presenza di questo uccello al fine di contenere il numero di crisalidi e quindi prevenire le esplosioni demografiche. Questo verrebbe modellizzato, analogamente a quanto accade per le trappole a feromoni, come un aumento del parametro  $\mu_p$  nell'*Eq. 3.4*, producendo i medesimi effetti. Quindi, in generale, tutti gli interventi che non influenzano lo stadio larvale ma altri stadi evolutivi si traducono nel modello come una variazione del parametro  $\mu_p$  e i loro effetti sono analoghi a quelli descritti per le trappole a feromoni.

### **Insetticida e bio-insetticida**

Nei paesi del Mediterraneo dove le infestazioni sono più gravi e frequenti, l'intervento di controllo oggi più usato prevede l'uso di vari insetticidi chimici e biologici che si sono provati essere efficaci nel prevenire il diffondersi degli insetti, apparentemente senza nessun danno ambientale [Cayuela et al., 2011]. Il principale prodotto chimico usato contro la processionaria è il *diflubenzuron* (formulazione commerciale Dimilin®), che è caratterizzato da un ampio spettro d'azione e da una notevole persistenza [Tiberi and Panzavolta, 2001]. L'effetto prodotto è un'inibizione della possibilità dell'insetto di effettuare la muta [Leblond et al., 2010] che quindi lo porta alla morte durante questo processo. Questo particolare prodotto attacca tutti gli insetti che effettuano

la muta [Tiberi and Panzavolta, 2001] ma risulta essere innocuo nei confronti degli animali omeotermi. Quindi, nonostante la sua efficacia, l'uso è sconsigliato se non in casi molto particolari, in quanto nell'area trattata porterebbe alla morte una moltitudine di insetti fondamentali per la biodiversità dell'ecosistema [Leblond et al., 2010, Tiberi and Panzavolta, 2001].

Negli ultimi decenni, tuttavia, si sono sviluppati insetticidi alternativi di tipo biologico, composti per lo più da varietà di batteri in grado di aggredire e portare alla morte le larve di processionaria del pino. Quello di gran lunga più utilizzato nei paesi mediterranei è rappresentato da formulati a base di ceppi selezionati del batterio sporigeno *Bacillus thuringiensis* var. *kurstaki* (*BTK*) [Cebeci et al., 2010, Avtzis, 1998, Battisti et al., 1998, Roversi, 1997]. Le tossine rilasciate da *B. thuringiensis* bloccano l'attività intestinale dell'insetto provocandone la morte. Le possibilità d'impiego dei vari ceppi di questo batterio sono limitate all'utilizzo contro fitofagi che si alimentano delle piante dall'esterno rodendone i tessuti, come appunto fanno i lepidotteri defogliatori, ma risulta essere completamente innocuo per l'uomo e per qualunque animale a sangue caldo [Roversi, 1997].

L'effetto di questo particolare bio-insetticida sulle larve di processionaria del pino è influenzato da molti fattori sia climatici sia legati al ciclo di sviluppo dell'insetto. Infatti, l'effetto è massimo se le larve si trovano nei primi stadi di sviluppo mentre risulta molto limitato negli stadi avanzati, in quanto l'attività di rimozione della biomassa è minore [Minerbi et al., 2001, Battisti et al., 1998]. Inoltre, l'efficacia è limitata anche dai fenomeni climatici che, combinati con la poca persistenza nell'ambiente del bio-insetticida, fanno sì che sia necessario avere condizioni meteorologiche molto particolari per massimizzarne l'effetto [Roversi, 1997, Minerbi et al., 2001]. Le condizioni migliori per l'applicazione risultano essere quindi: bruchi in secondo stadio larvale, assenza di vento durante il trattamento (per evitare fenomeni di deriva) e assenza di precipitazione nelle successive 48 ore (onde evitare il dilavamento del prodotto) [Minerbi et al., 2001]. L'intervento, a seconda della grandezza dell'area da trattare, viene solitamente effettuato mediante dispersione attraverso un elicottero (per aree molto estese) oppure mediante l'impiego di addetti che disperdono manualmente l'insetticida. In condizioni ottimali la mortalità che si produce sull'insetto è comunque variabile ed assume valori compresi fra il 70% [Cebeci et al., 2010] fin anche al 100% [Cebeci et al., 2010, Minerbi et al., 2001]. In condizioni sfavorevoli come, ad

esempio, un avanzato stadio larvale, si ottiene una mortalità che può essere anche inferiore al 10% [Tiberi and Panzavolta, 2001].

È necessario rimarcare che, al fine di contenere l'intensità delle infestazioni e ridurre i danni prodotti alle foreste, questo tipo di intervento va eseguito ogni qual volta si presenta un problema di infestazione. Nel modello questo viene espresso come un aumento del parametro  $\mu_L$  che rappresenta la mortalità naturale delle larve. In particolare, se la biomassa larvale supera una soglia di pericolo di 9 kg/ha [Minerbi et al., 2001], si attiva l'intervento aumentando per un periodo di 365 giorni la mortalità naturale delle larve  $\mu_L$ . In seguito, passato il periodo di intervento, il parametro in questione viene riportato al suo valore originale. L'intervento successivamente si riattiva ogni qual volta si supera la soglia di pericolo definita. In *Fig.4.24* si vede come un appropriato intervento attraverso bio-insetticida, in un possibile anno di infestazione, prevenga l'infestazione stessa facendo praticamente scomparire la popolazione larvale.

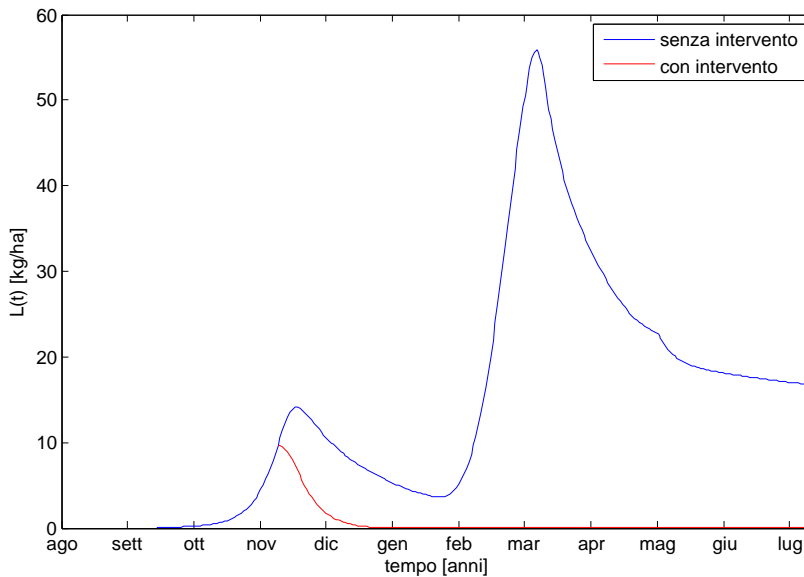


Figura 4.24: Andamento in un anno di infestazione delle traiettorie della biomassa larvale con e senza l'uso di bio-insetticida

Analizzando gli indicatori di infestazione larvale, riportati in *Fig.4.25*, si può vedere come la media dei picchi di infestazione cali drasticamente, in quanto il loro valore si mantiene sempre vicino alla soglia per cui si attiva

l'intervento, all'aumentare della mortalità indotta. La media dei tempi di ritorno diminuisce molto rispetto al valore iniziale, per poi portarsi a valori di poco migliori rispetto al caso senza intervento. La durata delle infestazioni, pur avendo un andamento discontinuo (dovuto alla dipendenza dell'indicatore dalla soglia fissata), mostra un profilo discendente ed ha comunque un valore più basso rispetto al caso di riferimento senza intervento.

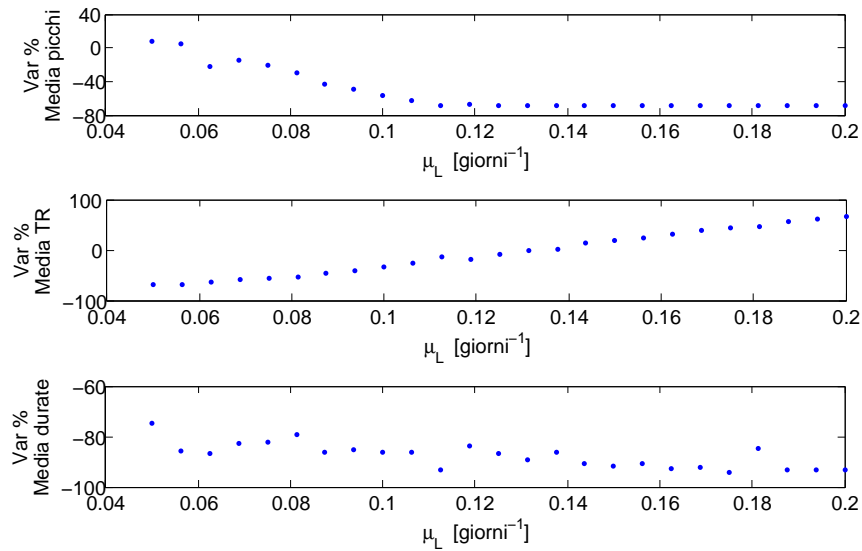


Figura 4.25: Variazione percentuale degli indicatori della biomassa larvale durante le infestazioni al variare della mortalità indotta dall'insetticida  $\mu_L$  [giorni<sup>-1</sup>]

In *Fig.4.26*, si può notare come una piccola dose di insetticida faccia aumentare il valore della media larvale, poiché diminuisce la popolazione quel tanto che basta per annullare la competizione intraspecifica, mettendo in condizione gli individui rimasti di avere un accesso facilitato alla biomassa fogliare, permettendo loro una maggiore crescita con infestazioni più frequenti. Aumentando la dose di insetticida si vede come questo indicatore diminuisca quasi del 100%, mentre il rapporto fra picchi e tempi di ritorno non mostra un sensibile miglioramento. L'intensità delle infestazioni diminuisce rispetto al valore iniziale, pur con un andamento non definito. L'effetto complessivo è quindi quello di avere picchi più contenuti ma più ravvicinate nel tempo.



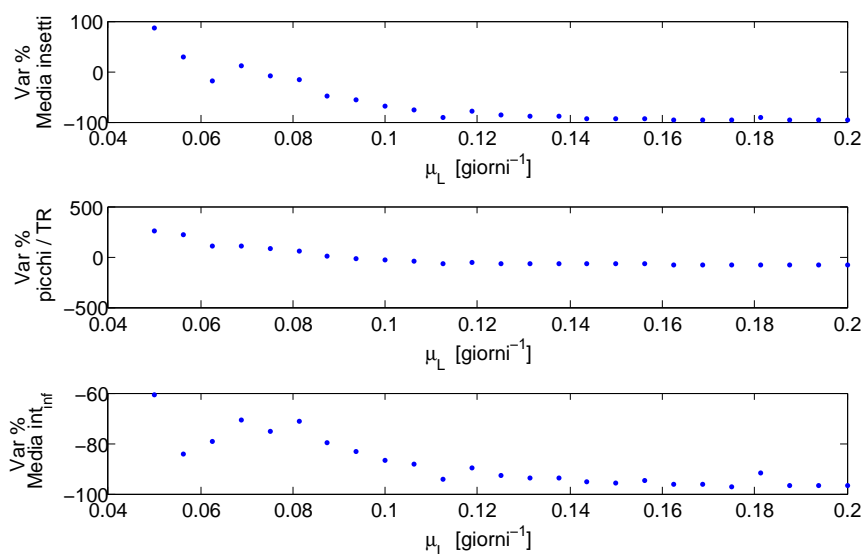


Figura 4.26: Variazione percentuale degli indicatori della biomassa larvale sul lungo periodo e degli indicatori aggregati al variare della mortalità indotta dall'insetticida  $\mu_L$ [giorni<sup>-1</sup>]

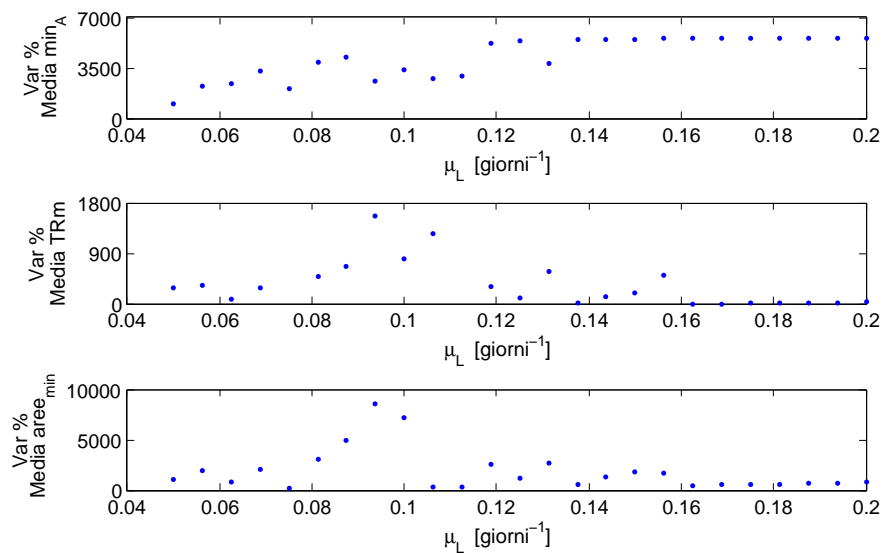


Figura 4.27: Variazione percentuale degli indicatori della biomassa fogliare al variare della mortalità indotta dall'insetticida  $\mu_L$ [giorni<sup>-1</sup>]

Analizzando gli indicatori della biomassa fogliare, riportati in *Fig.4.27*, si può notare come la media dei minimi della biomassa aumenti mentre non è possibile ricavare informazioni dagli altri indicatori, in quanto hanno un andamento molto discontinuo poiché dipendenti da una soglia. Considerando quindi la complessità degli indicatori analizzati, questa politica risulta efficace sulla maggior parte di essi solo per intensità d'intervento abbastanza elevate. Il grande vantaggio di questo metodo, ed anche il motivo per cui è largamente impiegato, è la grande selettività dell'agente patogeno utilizzato, poiché attacca solamente le larve di lepidottero. La difficoltà sta nel trovare il giusto periodo di intervento, soprattutto dal punto di vista meteorologico [Leblond et al., 2010]. Infatti, le condizioni climatiche devono essere in ogni caso buone mentre la scelta del periodo di applicazione presenta una serie di vantaggi e svantaggi [Battisti et al., 1998]. Un trattamento autunnale potrebbe essere vantaggioso poiché si va ad agire sui primi stadi larvali, che sono più vulnerabili, quindi una minore dose di prodotto causa una maggiore mortalità ed inoltre, riducendo il numero di larve presenti, si va ad aumentare l'incidenza della mortalità invernale sulle processionarie (che dipende inversamente dalla densità delle larve) [Tiberi and Panzavolta, 2001]. Tuttavia, in questo periodo i nidi provvisori delle larve non sono ancora visibili e quindi il trattamento deve essere estensivo su tutta l'ampiezza dell'area considerata [Minerbi et al., 2001, Battisti et al., 1998]. Questa tempistica di trattamento è consigliata in foreste di alto valore ambientale, dove si cerca di evitare anche il minimo danno da defogliazione [Battisti et al., 1998]. Un trattamento tardo invernale invece presenta, a parità di prodotto usato, una mortalità molto minore; ne consegue che la quantità di prodotto da usare per ottenere effetti importanti aumenta. Nonostante questo vi sono anche alcuni vantaggi, come la migliore possibilità di quantificare estensione ed entità dell'attacco e quindi circoscrivere il trattamento alle sole zone interessate; inoltre, l'impatto del prodotto su altri lepidotteri è praticamente nullo in quanto la maggior parte di essi non è attiva in questo periodo [Minerbi et al., 2001, Battisti et al., 1998]. Questa tempistica di applicazione del prodotto è consigliata per aree dove un certo danno da defogliazione può comunque essere tollerato [Battisti et al., 1998]. Inoltre, va sottolineato come il possibile uso di questa politica debba essere subordinato ad un efficiente sistema di monitoraggio della popolazione larvale, per capire quando sia presente il pericolo di un'infestazione.

## Capitolo 5

# Analisi costi benefici e analisi multi-obiettivo

La scelta di intervenire sull'ecosistema con un certo tipo di intervento rispetto ad un altro e l'intensità con cui esso debba essere applicato può dipendere da diversi criteri, stabiliti dalla persona o dall'associazione di persone che compie questa scelta. Un individuo (o gruppo di individui) che opera una scelta utilizzando un criterio è identificato con il nome di *decisore*. Affinché l'analisi del modello possa essere utile a decidere, è necessario stabilire a priori quali siano i criteri in base ai quali sono fatte determinate scelte; in altre parole, si devono individuare gli obiettivi che il decisore è intenzionato a perseguire.

In questo capitolo si analizzeranno dei possibili metodi decisionali riguardanti la quantità di bio-insetticida da utilizzare per il controllo delle infestazioni, trattati dal punto di vista di due decisori con obiettivi diversi:

- l'utilizzo della biomassa di alberi come legna da taglio, da vendere sul mercato;
- l'utilizzo della foresta a scopi turistici e ricreativi.

Il metodo utilizzato sarà inizialmente quello dell'analisi costi benefici (come effettuato in [Aimi et al., 2006] in riferimento a un caso di taglio di legname), riferendosi ai due decisori separatamente. Dopo aver effettuato questo studio, si analizzerà il problema ipotizzando che entrambi i decisori debbano raggiungere un compromesso, utilizzando quindi un'analisi multi-obiettivo.

Infine, si mostrerà lo studio di un'applicazione di due interventi congiunti: il trattamento con il bio-insetticida e la lotta biologica.

## 5.1 Analisi costi benefici

L'approccio dell'analisi costi benefici consiste nell'individuare, tra differenti alternative, quella che renda minima la funzione dei costi totali  $C_{tot}$ , calcolata come differenza tra costi degli interventi effettuati e benefici derivanti dalla loro applicazione su un orizzonte temporale  $H$  stabilito. Sia i costi che i benefici devono essere misurati in termini monetari, affinché possano essere confrontabili; i benefici che non rappresentano direttamente una variabile economica sono quindi da monetizzare. Si analizzerà il caso dell'utilizzo del bio-insetticida, ipotizzando che la scelta riguardi la quantità di prodotto  $q_{ins}[l/(ha \cdot intervento)]$  da diffondere nel bosco quando la biomassa larvale supera un valore di soglia  $\bar{L}_s$  durante un singolo evento di infestazione. L'effetto dell'insetticida si considera analogo a quello descritto nel capitolo 4.

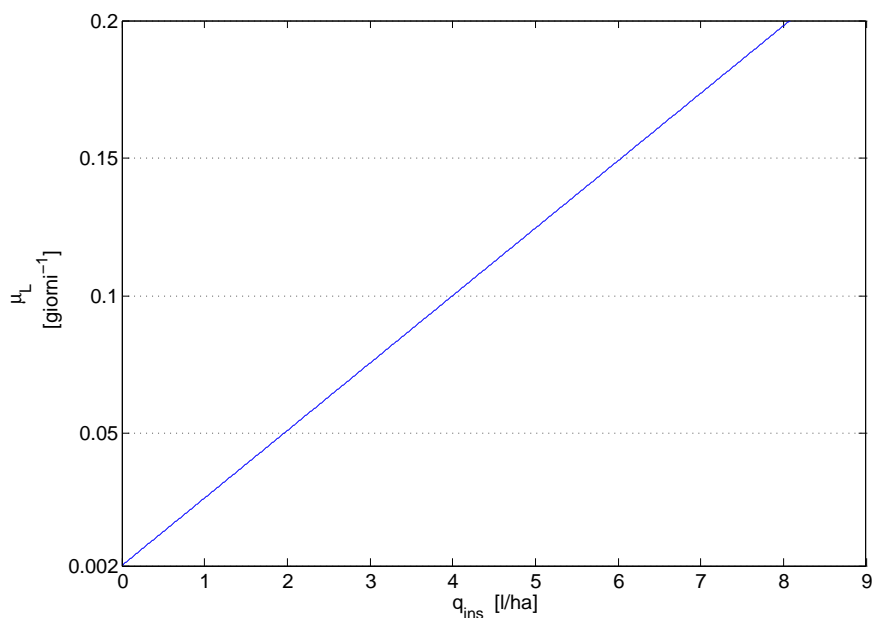


Figura 5.1: Relazione lineare tra bio-insetticida e mortalità indotta

Si assume inoltre che esista una relazione lineare tra quantità di bio-insetticida utilizzata e mortalità indotta sulle larve durante il periodo di applicazione. Questa relazione è rappresentata in *Fig.5.1* ed è stata stimata in base all'informazione sulla mortalità indotta dall'applicazione del bio-insetticida in Alto Adige [Minerbi et al., 2001]. Si è scelto di calcolare le funzioni di costo e beneficio come valori medi annui (unità di misura  $[\text{€}/(\text{anno} \cdot \text{ha})]$ ), riferendosi ad un orizzonte temporale  $H$  e ad un territorio di un ettaro.

### Costo dell'intervento con bio-insetticida

Il costo dell'intervento con bio-insetticida  $C_{int}$  è una funzione dipendente dalla quantità di prodotto  $q_{ins} [l/(\text{ha} \cdot \text{intervento})]$  utilizzata in ogni intervento e dal numero di interventi  $n_{int}$  necessari nell'orizzonte temporale  $H[\text{anni}]$  in esame. Esiste anche un costo fisso di applicazione dell'intervento  $c_f$ , misurato in  $[\text{€}/(\text{ha} \cdot \text{intervento})]$  comprendente il noleggio dei mezzi di spargimento del bio-insetticida e i costi della manodopera degli addetti. Dato un costo del prodotto  $c_{ins}$  misurato in  $[\text{€}/l]$ , si definisce la funzione di costo medio annuo di intervento  $C_{int} [\text{€}/(\text{anno} \cdot \text{ha})]$  come:

$$C_{int} = \frac{1}{H} [(c_f + c_{ins} \cdot q_{ins}) \cdot n_{int}] \quad (5.1)$$

dove  $H$  è l'orizzonte temporale espresso in anni.

Per l'analisi si utilizzano i seguenti valori dei parametri [Minerbi et al., 2001]:

$$\begin{aligned} c_f &= 150 \quad \text{€}/(\text{ha} \cdot \text{intervento}); \\ c_{ins} &= 25 \quad \text{€}/l; \\ \bar{L}_s &= 9 \quad \text{kg}/\text{ha} \end{aligned} \quad (5.2)$$

### Benefici per il taglio del legname

Si assume che il decisore abbia interesse nell'attività di taglio del legname, quindi abbia come beneficio il valore economico della biomassa legnosa totale  $b_{legna}$  presente nel bosco, a sua volta funzione della biomassa totale di aghi  $A(t) = G(t) + V(t)$ . Si ipotizza che esista una proporzione tra la biomassa di aghi e quella di legna presenti, rappresentata dall'equazione:

$$b_{legna}(t) = \alpha_b \cdot A(t)$$

Si è scelto di non ricercare la soluzione ad un problema di turno ottimo di rotazione, poiché essa dipende dall'inizializzazione delle variabili di stato del modello. Di conseguenza, si ipotizza di trovarsi in una condizione di regime, tale per cui la media di biomassa di aghi, calcolata su tutto l'orizzonte temporale, non varia al crescere dell'orizzonte stesso.

Si assume che il beneficio derivante dal taglio della legna sia il valore economico medio della legna presente a regime, calcolato lungo tutto l'orizzonte temporale. Dato un prezzo di mercato del legno  $p_{legna}$  misurato in €/ton, si esprime la funzione dei benefici medi annui derivanti dal taglio come:

$$B_{taglio} = \frac{1}{H} \sum_H^{i=1} B_i \quad (5.3)$$

dove  $H$  è l'orizzonte temporale misurato in anni e  $B_i$ , in riferimento all'anno  $i$ , è calcolato come:

$$B_i = \alpha_b \cdot p_{legna} \cdot \frac{1}{365} \int_{(i-1) \cdot 365}^{i \cdot 365} A(t) dt \quad i = 1, 2, \dots, H$$

Per l'analisi sono stati utilizzati i seguenti parametri:

$$\begin{aligned} \alpha_b &= 14 \quad \text{ton}(legna)/\text{ton}(aghi) \quad [\text{Liu and Westman, 2009}]; \\ p_{legna} &= 41.80 \quad \text{€/ton} \quad [\text{Osservatorio del Legno, 2014}]. \end{aligned} \quad (5.4)$$

### Benefici per l'uso turistico e ricreativo

La stima dei benefici per l'utilizzo del bosco a fini turistici e ricreativi è effettuata stimando la disponibilità a pagare dei visitatori, che cambia a seconda delle condizioni di quest'ultimo [Aimi et al., 2006].

Si ipotizza che esista una soglia di biomassa di larve  $\bar{L}_{vis}[kg/ha]$  che, quando superata, determina una minore di disponibilità a pagare da parte dei visitatori e, al tempo stesso, un minor numero di visitatori del bosco. Si ipotizza che le visite avvengano durante tutto l'anno e non solamente nei mesi turistici. Si definisce, inoltre,  $g_{inf}[giorni]$  il numero di giorni in cui si considera che l'infestazione sia grave e  $g_{non\_inf}[giorni]$  quelli in cui si considera che l'infestazione non sia grave. La gravità dell'infestazione è indicata dal superamento della soglia  $\bar{L}_{vis}$  definita in precedenza.

Secondo le ipotesi fatte, il beneficio ricreativo calcolato può assumere due valori  $B_{ric}^{inf}$  e  $B_{ric}^{non\_inf}$ , a seconda che la soglia di pericolosità  $\bar{L}_{vis}$  sia supera-

ta o meno. Entrambi i termini sono calcolati come prodotto tra disponibilità a pagare per visitare il bosco per un giorno  $p_{vis}^i$  [€/visitatore] e numero di visitatori medi giornalieri  $n_{vis}^i$  [visitatori/(giorno · ha)], che dipendono dall'eventuale superamento della soglia. L'apice  $i$  è sostituito da *inf* quando il parametro è riferito a giorni con infestazione superiore alla soglia e con *non\_inf* altrimenti. Si calcola il valore medio annuo del beneficio turistico e ricreativo totale  $B_{ric}$  [€/((anno · ha))] come:

$$B_{ric} = \frac{1}{h} (p_{vis}^{inf} \cdot n_{vis}^{inf} \cdot g_{inf} + p_{vis}^{non\_inf} \cdot n_{vis}^{non\_inf} \cdot g_{non\_inf}) \cdot 365 \quad (5.5)$$

dove  $h$  è l'orizzonte temporale espresso in giorni e il valore 365 è necessario per convertire una media giornaliera in una media annua.

I parametri utilizzati, ricavati se non indicato diversamente da uno studio effettuato nel caso della Val Venosta [Aimi et al., 2006], sono i seguenti:

$$\begin{aligned} \bar{L}_{vis} &= 9 \quad kg/ha \quad [\text{Minerbi et al., 2001}] \\ p_{vis}^{inf} &= 1.00 \quad €/visitatore \\ p_{vis}^{non\_inf} &= 1.50 \quad €/visitatore \\ n_{vis}^{inf} &= 329 \quad \text{visitatori}/(\text{giorno} \cdot \text{ha}) \\ n_{vis}^{non\_inf} &= 411 \quad \text{visitatori}/(\text{giorno} \cdot \text{ha}) \end{aligned} \quad (5.6)$$

### Funzioni di costo totale

L'Eq. 5.1 di costo medio annuo dell'applicazione dell'intervento e le due equazioni dei benefici Eq. 5.3 e Eq. 5.5, definite nei precedenti paragrafi, dipendono direttamente o indirettamente dalla quantità di bio-insetticida utilizzata. Essa infatti modifica la mortalità delle larve quando il prodotto è applicato e, di conseguenza, influenza il numero di volte in cui si applica l'intervento e gli andamenti delle variabili di stato nel tempo, da cui dipendono i costi e i benefici medesimi.

Si definisce la funzione di costo totale come differenza tra i costi di intervento e i benefici che derivano dall'attuazione dello stesso. I costi totali ([€/((anno · ha))]), per ipotesi, variano a seconda del decisore. Si ha quindi:

$$C_{taglio}^{tot}(q_{ins}) = C_{int} - B_{taglio} \quad (5.7)$$

se il decisore ha come obiettivo il taglio del legname;

$$C_{ric}^{tot}(q_{ins}) = C_{int} - B_{ric} \quad (5.8)$$

se il decisore ha come obiettivo l'utilizzo turistico e ricreativo.

Un costo totale negativo andrà interpretato come un beneficio netto positivo ottenuto applicando l'intervento.

L'obiettivo dell'analisi è trovare la quantità di bio-insetticida che minimizzi la funzione dei costi totali (e, quindi, che massimizzi il beneficio netto).

Il problema da risolvere è trovare  $q_{ins}^*$  tale che:

$$q_{ins}^* = \min_{q_{ins}} [C_{tot}(q_{ins})] \quad (5.9)$$

### Analisi e risultati

Utilizzando i parametri definiti nei paragrafi precedenti, variando progressivamente la quantità di bio-insetticida e, conseguentemente, la mortalità larvale secondo la relazione in *Fig.5.1*, si calcolano le funzioni dei costi totali utilizzando le *Eq.5.7* e *5.8*, per ogni valore di quantità di bio-insetticida, utilizzando un orizzonte temporale di 150 anni.

I risultati di questo procedimento sono visualizzati in *Fig.5.2* e *Fig.5.3*. In *Fig.5.2* si osserva che la funzione dei costi totali per il taglio della legna assume valori decrescenti al crescere della quantità di bio-insetticida. Per valori di bio-insetticida superiori al valore di circa  $4 \text{ l}/(\text{ha} \cdot \text{intervento})$ , un ulteriore aumento della quantità di prodotto utilizzata non comporta una diminuzione apprezzabile della funzione di costo totale.

Nella *Fig.5.3* si nota che, per l'utilizzo a scopo ricreativo, esiste un valore di bio-insetticida che minimizza la funzione dei costi totali; questo valore è compreso fra 4 e  $5 \text{ l}/(\text{ha} \cdot \text{intervento})$ .



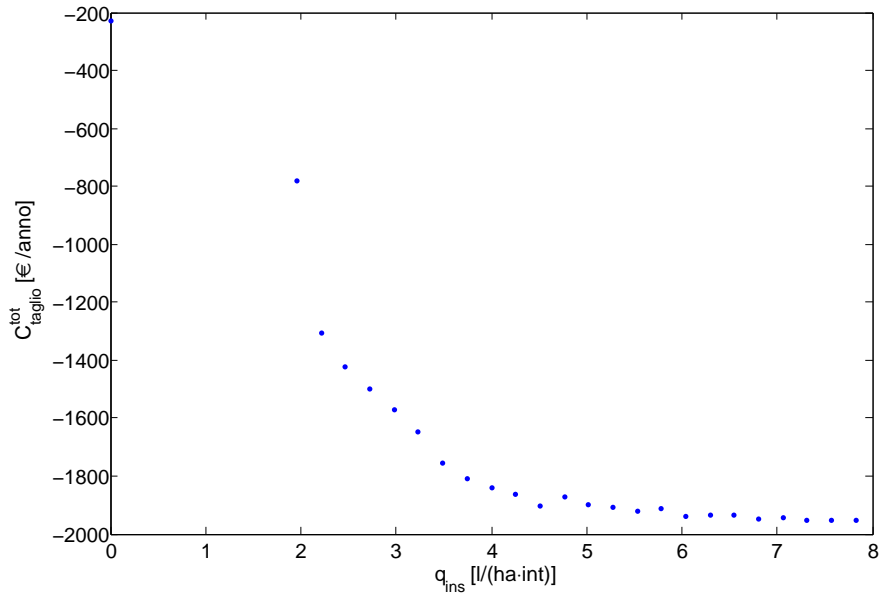


Figura 5.2: Valori dei costi totali per il taglio della legna al variare della quantità di bio-insetticida

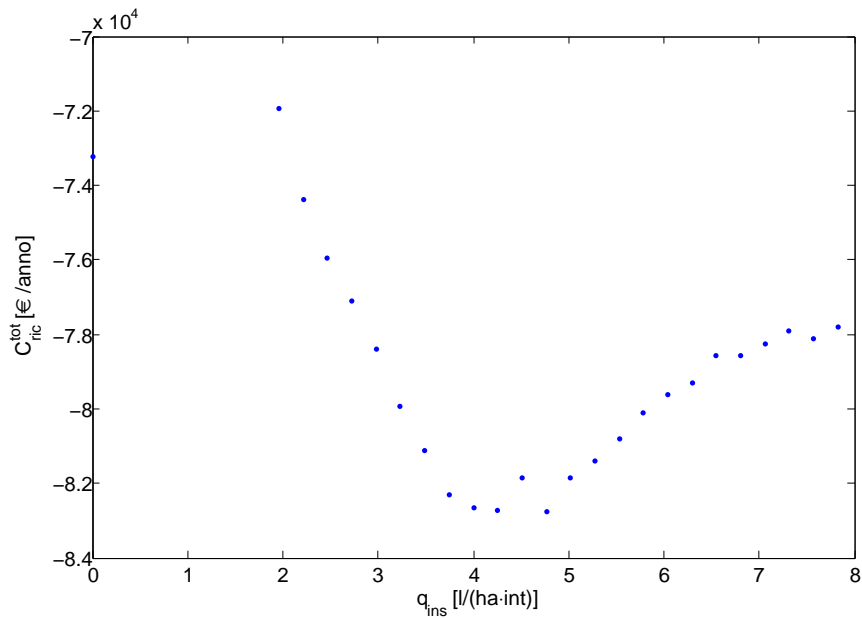


Figura 5.3: Valori dei costi totali per l'utilizzo ricreativo al variare della quantità di bio-insetticida

## 5.2 Analisi multi-obiettivo e frontiera di Pareto

Nella pianificazione di un intervento su un sistema naturale come quello che si sta analizzando, è possibile che il decisore, incaricato di operare una scelta, possa porsi più obiettivi da perseguire; è possibile, inoltre, che esistano più decisori che agiscono sul medesimo sistema e che sia necessario trovare una modalità di intervento che sia il risultato di un compromesso tra le diverse parti in gioco.

In questo caso, il problema è riconducibile ad una coesistenza dei due obiettivi da minimizzare: il costo totale di taglio della legna (*Eq.5.7*) e il costo totale per l'utilizzo ricreativo (*Eq.5.8*). Di conseguenza, l'obiettivo sarebbe trovare la quantità di bio-insetticida che minimizzi contemporaneamente entrambe le funzioni di costo totale. Questo problema non è sempre risolvibile, poiché spesso, data un'alternativa di intervento che minimizza una delle due funzioni di costo, esiste almeno una diversa alternativa che minimizza l'altra funzione, ma non le minimizza entrambe.

Nel nostro caso, la situazione è quella nella *Fig.5.4*, in cui ogni punto ha come coordinate i valori assunti dalle due funzioni di costi totali e la quantità di bio-insetticida utilizzata è indicata dal colore del punto.

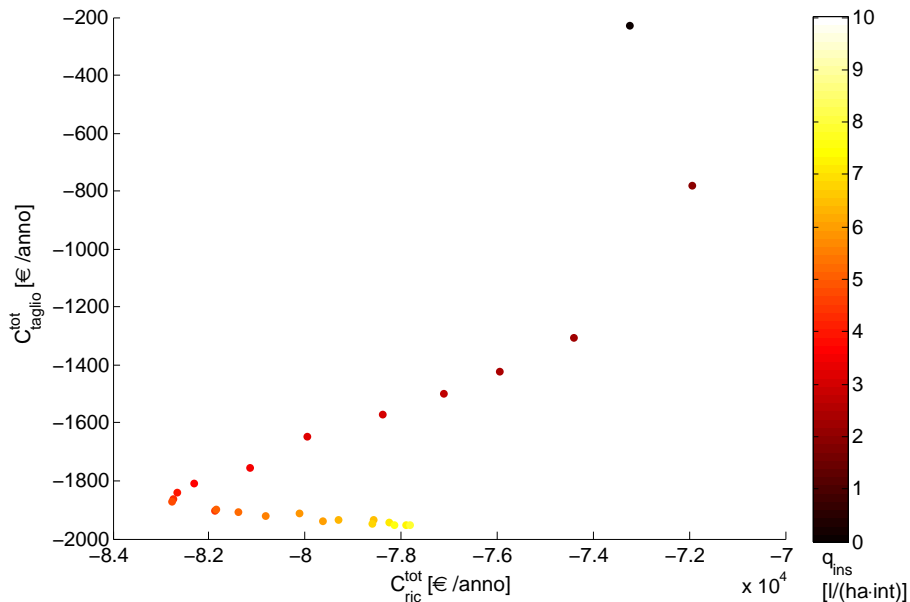


Figura 5.4: Visualizzazione delle alternative di intervento nello spazio degli obiettivi

Il piano visualizzato è anche chiamato piano degli obiettivi, infatti i costi totali sono obiettivi da minimizzare per entrambi i decisori. Da questa condizione si deduce che non esiste alcun punto che sia minimo per entrambi gli indicatori; tuttavia, esistono alternative di intervento che risultano peggiori di tutte le altre per entrambi i valori degli indicatori, cioè tali per cui si riesce a trovare almeno un'alternativa che risulta migliore da tutti i punti di vista considerati. Queste alternative possono essere escluse dalla decisione e le rimanenti sono chiamate alternative *Pareto-ottime* ed appartengono ad un insieme detto *frontiera di Pareto*.

In *Fig. 5.5* sono rappresentati i valori assunti dagli indicatori di costo totale, corrispondenti alle alternative appartenenti alla frontiera di Pareto. Come si può notare, presa un'alternativa non ne esiste un'altra che sia migliore di questa per entrambi i valori degli obiettivi.

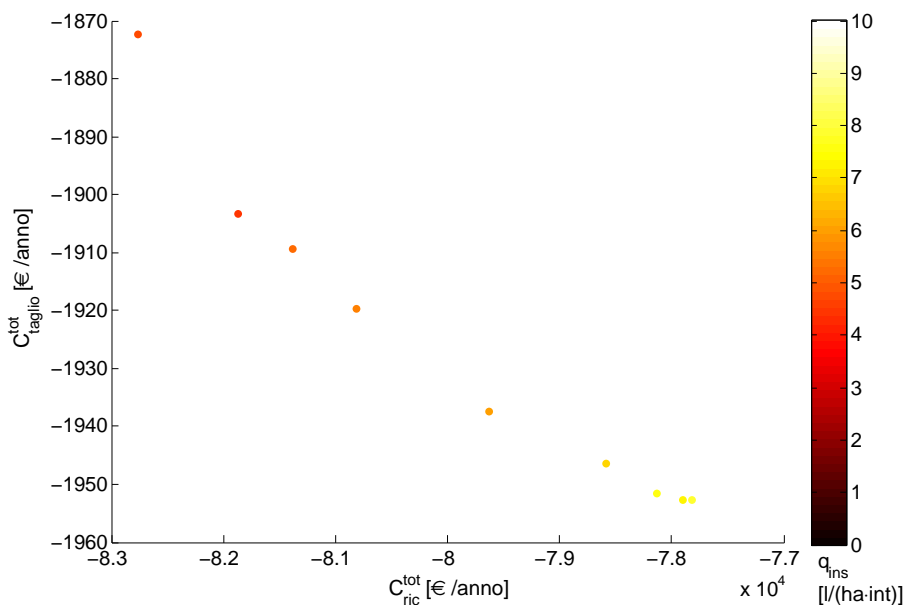


Figura 5.5: Frontiera di Pareto nello spazio degli obiettivi

La frontiera di Pareto è utile come strumento di decisione: tra le alternative in studio appartenenti a questo insieme si può cercare un'alternativa che corrisponda ad un compromesso tra i due interessi. Nel caso che i decisori siano più di uno o che il decisore unico abbia intenzione di coinvolgere nella decisione più parti, portatrici ciascuna di un suo interesse, è fondamentale che sia attivato un processo di partecipazione delle diverse parti affinché si

possa trovare la soluzione di compromesso.

A titolo di esempio, nel caso in esame il decisore potrebbe essere un Ente Parco, che opera le sue decisioni su una foresta utilizzata sia a scopo turistico sia come fonte di approvvigionamento di legna per la popolazione locale. In tal caso, se fosse attivo un processo di partecipazione, ad esso prenderebbero parte due portatori di interesse: un responsabile dell'attività di taglio della legna e un responsabile della gestione del bosco a fini turistici. Attraverso la frontiera di Pareto, si potrebbe decidere quale peso dare ad un beneficio rispetto ad un altro e quindi comprendere quale alternativa sia la migliore per entrambi gli interessi.

### 5.3 Analisi dell'applicazione di più interventi

Gli strumenti di analisi visti finora potrebbero essere utilizzati per valutare non solo il beneficio dell'applicazione di un solo intervento, ma anche quello dell'azione di più controlli sull'ecosistema. Si potrebbe ipotizzare che il decisore abbia la possibilità di utilizzare due tipi di intervento: l'applicazione di bio-insetticida, di breve termine e da applicare in presenza di infestazione, e la lotta biologica, di lungo termine, applicata solo al momento della decisione di ricorrere ad essa per il controllo delle infestazioni. Si userà la stessa procedura dell'analisi costi benefici, calcolando per ogni alternativa di intervento la funzione dei costi totali associata a due diversi decisori: uno interessato all'attività di taglio della biomassa legnosa e l'altro che si pone come obiettivo l'utilizzo del bosco a fini turistici e ricreativi. Le funzioni dei costi totali hanno le formulazioni viste in precedenza in *Eq. 5.7* e *Eq. 5.5*. Si ipotizza inoltre che il costo dell'intervento biologico sia trascurabile e, di conseguenza, non si terrà conto di esso nel conteggio dei costi totali.

I risultati delle analisi saranno espressi come variazioni percentuali rispetto a quanto ottenuto nel caso che non sia fatto alcun intervento, calcolati secondo l'*Eq. 4.1*; i valori di costo totale sono cambiati di segno in modo che rappresentino dei benefici totali, per rendere più semplice l'interpretazione dei risultati. I valori dei parametri in assenza di intervento sono:

$$\begin{aligned} Z &= 1.2 \quad kg/ha \\ q_{ins} &= 0 \quad l/ha \end{aligned}$$

CAPITOLO 5. ANALISI COSTI BENEFICI E ANALISI  
MULTI-OBIETTIVO

---

che producono dei valori dei benefici pari a :

$$\begin{aligned} B_{taglio}^{tot} &= -C_{taglio}^{tot} = 230.51 \text{ €/anno} \\ B_{ric}^{tot} &= -C_{ric}^{tot} = 73237 \text{ €/anno} \end{aligned} \quad (5.10)$$

L'alternativa che sarà considerata migliore sarà quella che minimizza la funzione dei costi totali e, cioè, che massimizza il beneficio totale.

In *Tab.5.1* sono riportate le variazioni percentuali del beneficio totale rispetto a quello ottenuto nell'alternativa di non intervento nel caso del taglio della legna. L'alternativa migliore risulta quella indicata in grassetto, che rappresenta il massimo aumento percentuale del beneficio ottenuto dal taglio della legna. Questa alternativa corrisponde ad un utilizzo di una quantità di insetticida pari a  $4 \text{ l}/(\text{ha} \cdot \text{int})$  e ad un intervento biologico di alta intensità. Nonostante questo, si nota come l'aumento del beneficio sia evidente anche in caso di valori elevati di bio-insetticida, con la presenza congiunta di una densità di predatori elevata ( $1.6 \text{ kg/ha}$ ).

		$B_{taglio}^{tot} \text{ [%]}$					
$Z \text{ [kg/ha]}$	$q_{ins} \text{ [l/ha]}$	0.00	1.96	2.98	4.00	5.02	6.04
	1.2	0.00	238.32	593.52	698.53	723.70	743.64
	1.4	160.79	381.29	649.32	720.70	724.45	745.19
	1.6	431.16	572.70	694.84	<b>754.34</b>	747.37	752.08

Tabella 5.1: Valori di aumento percentuale dei benefici totali per il taglio della legna rispetto all'alternativa di non intervento (*Eq.5.10*)

		$B_{ric}^{tot} \text{ [%]}$					
$Z \text{ [kg/ha]}$	$q_{ins} \text{ [l/ha]}$	0.00	1.96	2.98	4.00	5.02	6.04
	1.2	0.00	-1.78	7.63	<b>12.85</b>	11.76	8.62
	1.4	0.81	0.02	8.76	9.86	10.15	6.94
	1.6	0.90	5.57	7.93	7.25	6.59	4.87

Tabella 5.2: Valori di aumento percentuale dei benefici totali per l'uso ricreativo rispetto all'alternativa di non intervento (*Eq.5.10*)

Nel caso che l'interesse sia l'uso ricreativo (*Tab.5.2*), il beneficio maggiore si è ottenuto nel caso di un'assenza di controllo biologico, con un valore di bio-insetticida intermedio, vicino a quello ottenuto nell'analisi costi benefici effettuata precedentemente. Il risultato è dovuto al fatto che il beneficio per

l'utilizzo ricreativo dipende dal numero di larve presenti e, come si è visto nella trattazione del controllo con bio-insetticida, questo aiuta a mantenere le larve sempre sotto alla soglia di pericolosità, nonostante questo comporti una maggior frequenza delle infestazioni.

L'analisi mostra che anche nel caso di più interventi si presenta un problema di compromesso, poiché sono state ottenute diverse alternative ottime per i due decisori. Al decisore che si pone come obiettivo il ricavo economico dal taglio della legna conviene tendere verso un controllo severo delle esplosioni dell'insetto; una presenza molto ridotta di larve assicura una presenza di biomassa legnosa elevata, essendo gli alberi in buone condizioni di salute e di crescita. Per l'uso turistico e ricreativo, come si è appena dimostrato, è sufficiente mantenere le larve sotto la soglia di allarme e, di conseguenza, l'utilizzo di un valore elevato di bio-insetticida produce un beneficio molto minore rispetto ad un suo utilizzo intermedio e non conviene effettuare un controllo biologico.

## Capitolo 6

# Conclusioni

Le analisi proposte sono state effettuate con l'obiettivo di comprendere gli eventi di infestazione delle foreste da parte della processionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa*) e di studiare possibili politiche di controllo della presenza dell'insetto fitofago, identificando gli effetti degli interventi sul sistema biologico e analizzando la loro applicabilità in base a diversi criteri.

Lo studio degli andamenti del modello matematico proposto ha evidenziato come il fenomeno delle esplosioni demografiche, caratteristico della processionaria del pino, sia descritto in modo corretto per quanto riguarda alcuni aspetti come il tempo di ritorno e la durata delle infestazioni. In aggiunta, le dinamiche simulate sono qualitativamente simili a ciò che ci si aspetterebbe in una situazione reale. Inoltre, è stato evidenziato che l'introduzione dell'influenza della temperatura sui parametri del modello produce un comportamento caotico delle variabili di stato, caratteristico di un sistema ambientale come quello analizzato.

Dall'analisi degli effetti degli interventi sui valori degli indicatori, i cui risultati sono riassunti in *Tab.6.1* e *Tab.6.2*, rappresentando con diversi colori gli effetti delle politiche su ogni singolo indicatore, si è visto che solamente l'utilizzo del bio-insetticida e, in misura minore, la lotta silvicola portano ad una diminuzione del valor medio dei picchi di infestazione, mentre gli altri interventi non producono una variazione importante del valore di questo indicatore, fatta eccezione per l'effetto negativo della distruzione dei nidi invernali, che porta ad un suo aumento. Per quanto riguarda l'effetto sulla media dei tempi di ritorno tra i picchi, esso è positivo per gli interventi

indiretti (lotta biologica e lotta silvicola) e per la distruzione meccanica dei nidi, mentre il bio-insetticida deve essere usato in quantità elevate affinché i tempi di ritorno aumentino rispetto al caso dell'assenza di intervento. Nel caso delle trappole a feromoni, i tempi di ritorno non subiscono variazioni significative. Si è notato che quasi tutti gli interventi forniscono buone prestazioni per quanto riguarda sia la biomassa larvale media presente sia la media delle durate delle infestazioni; entrambe diminuiscono significativamente per tutte le politiche, ma in misura minore nel caso delle trappole a feromoni; inoltre, nel caso del bio-insetticida, la biomassa media di insetti ha valori molto elevati per controlli di intensità bassa. L'intensità delle infestazioni, che tiene conto sia della quantità di insetti presente sia della durata dell'evento di infestazione, subisce miglioramenti con l'applicazione delle politiche dirette, mentre per quelle indirette non subisce significative variazioni rispetto al valore iniziale.

I risultati riguardanti le variazioni degli indicatori della biomassa di aghi non presentano situazioni in cui la condizione della foresta sia peggiore rispetto al caso di assenza di intervento. Si è visto che il risultato migliore per quanto riguarda la quantità minima di biomassa presente durante gli eventi di infestazione si ha applicando gli interventi diretti di distruzione dei nidi invernali e di utilizzo del bio-insetticida, mentre il tempo di ritorno tra minimi di biomassa fogliare aumenta sia con gli interventi di lotta biologica e silvicola sia con la distruzione meccanica dei nidi. Tuttavia, è necessario specificare che la leggera diminuzione della biomassa fogliare dei pini riscontrata nel caso dell'intervento di lotta silvicola è da imputare solamente alla sostituzione di quest'ultima con biomassa relativa ad altre tipologie arboree. In questo caso, quindi, la diminuzione dell'indicatore non è significativa di un peggioramento delle condizioni della foresta.

Analizzando la *Tab.6.1* e la *Tab.6.2*, si può affermare che non esiste una politica che fornisca dei risultati positivi su ogni aspetto considerato; l'utilizzo di una determinata politica è legato al tipo di ecosistema forestale che si sta gestendo ed agli obiettivi che si intendono perseguire, nonché a vantaggi e svantaggi che l'intervento può comportare.



CAPITOLO 6. CONCLUSIONI

		<i>Politiche Indirette</i>	
		Lotta Biologica	Lotta silvicola
<i>INDICATORI</i> <i>Larve</i>	Media Picchi	↔	↓
	Media Tempi ritorno	↑	↑
	Media durata infestazione	↓	↓
	Media insetti	↓	↓
	Media picchi / Media tempi ritorno	↓	↓
	Media intensità	↔	↔
<i>INDICATORI</i> <i>Aghi</i>	Media minimi aghi	↔	↓
	Tempi ritorno minimi	↑	↑
	Media aree minimi	↑	↑

Tabella 6.1: Effetto delle politiche indirette sugli indicatori, in base al criterio stabilito. La freccia indica la variazione dell'indicatore all'aumentare dell'intensità dell'intervento; in verde è indicato un effetto positivo, in rosso un effetto negativo, in blu un effetto incerto.

		<i>Politiche Dirette</i>		
		Distruzione Meccanica	Trappole Feromoni	Bio-insetticida
<i>INDICATORI</i> <i>Larve</i>	Media Picchi	↑	↔	↓
	Media Tempi ritorno	↑	↓	↔
	Media durata infestazione	↓	↓	↓
	Media insetti	↓	↓	↔
	Media picchi / Media tempi ritorno	↔	↑	↔
	Media intensità	↓	↓	↓
<i>INDICATORI</i> <i>Aghi</i>	Media minimi aghi	↑	↑	↑
	Tempi ritorno minimi	↑	↑	↑
	Media aree minimi	↑	↑	↑

Tabella 6.2: Effetto delle politiche dirette sugli indicatori, in base al criterio stabilito. La freccia indica la variazione dell'indicatore all'aumentare dell'intensità dell'intervento; in verde è indicato un effetto positivo, in rosso un effetto negativo, in blu un effetto incerto.

Questi aspetti sono evidenziati anche dai risultati delle analisi costi-benefici e multi-obiettivo. Infatti, dovendo stabilire la quantità di bio-insetticida da utilizzare per controllare le infestazioni, si è ottenuto che, nel caso che l'obiettivo sia il taglio della legna, il beneficio netto dell'uso del prodotto continua ad aumentare utilizzandone una sempre maggiore quantità; al contrario, se l'obiettivo è l'attività turistica e ricreativa, esiste una quantità di insetticida ottima oltre la quale l'utilizzo di un intervento più intenso non porta ad un aumento dei benefici netti.

La contrapposizione tra i due obiettivi è ancora più evidente nel caso dell'analisi dell'utilizzo contemporaneo di lotta biologica e di controllo con

bio-insetticida; infatti, avendo come obiettivo il taglio del legname, l'uso congiunto dei due interventi porta ad un beneficio più alto nei casi in cui gli interventi risultano più intensi, mentre nel caso dell'uso ricreativo rimane migliore l'alternativa dell'utilizzo dell'insetticida al valore intermedio ottenuto nell'analisi del singolo intervento effettuata in precedenza, mentre non è necessario un controllo biologico.

Le linee guida per l'approfondimento dell'analisi, per una migliore comprensione delle relazioni sussistenti tra le variabili ambientali e per ricercare una maggiore aderenza alla realtà del modello proposto sono molteplici. In primo luogo, sarebbe necessario disporre di serie di dati su un orizzonte temporale sufficientemente ampio, riguardanti sia andamenti delle popolazioni sia le loro interazioni. Attraverso queste, si potrebbe raffinare il processo di stima dei parametri. Una volta ottenuti parametri migliori, il passo successivo dovrebbe essere valutare la prestazione del modello su un caso reale, per capire quanto questo possa essere efficace nella previsione di fenomeni di infestazione futuri.

Dal punto di vista della costruzione del modello, esso potrebbe essere raffinato tenendo in considerazione altre variabili ambientali come ad esempio l'esposizione solare delle foreste e le precipitazioni. Infatti queste variabili, oltre alla temperatura, sono responsabili della presenza o meno dell'insetto all'interno di una foresta, regolano la sua dinamica e quindi anche le sue possibili esplosioni demografiche. Inoltre, si potrebbe definire una variabile di stato per ogni stadio evolutivo della processionaria, cercando così di descrivere meglio i fenomeni che interessano gli stadi diversi da quello larvale. Così sarebbe possibile descrivere separatamente alcune politiche che sono state trattate nello stesso modo nel lavoro svolto.

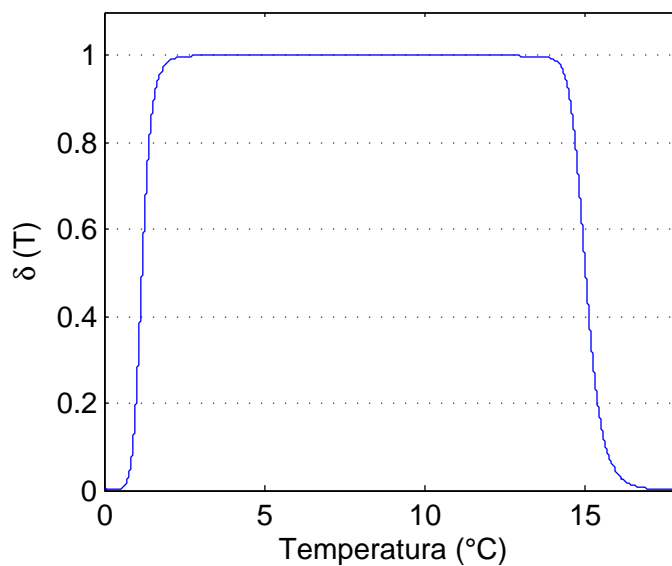
Infine, potrebbe risultare interessante descrivere contestualmente alla dinamica temporale anche la dinamica spaziale della popolazione dell'insetto, comprendendo come sia i parametri che le politiche possano influenzare non solo l'intensità delle infestazioni, ma anche le variazioni dell'area colpita da questi eventi.

## Appendice A

# Formulazione matematica delle funzioni del modello

In quest'appendice vengono presentate le equazioni matematiche delle funzioni che sono state utilizzate nel modello.

**Funzione  $\delta(T)$**



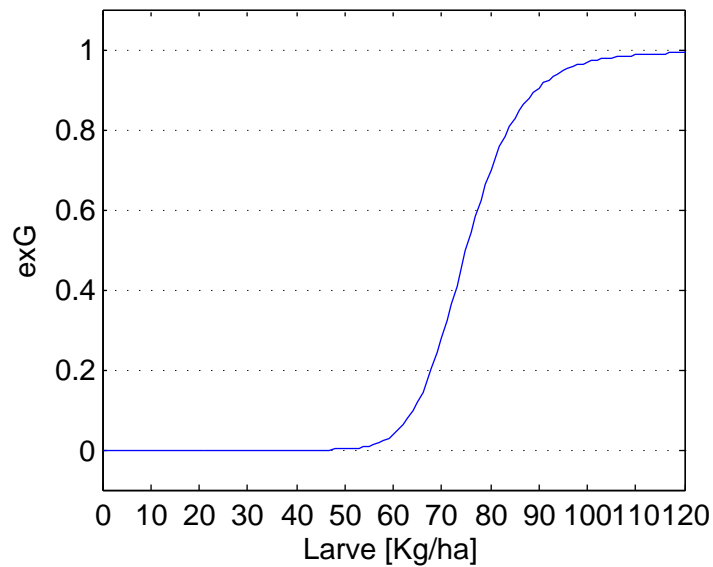
Andamento della funzione  $\delta(T)$  al variare della temperatura

$$\delta(T) = \frac{T^8}{\left(\frac{k1}{2}\right)^8 + T^8} \cdot \frac{1}{2} \cdot (\text{sign}(T) - \text{sign}(T - k2)) +$$

$$+ \frac{(k3 - k2)^8}{(k3 - k2)^8 + (T - k2)^8} \cdot \frac{10^8}{5^8 + 10^8} \cdot \frac{1}{2} \cdot (\text{sign}(T - k2) - 1)$$

con  $k1 = 4$ ,  $k2 = 12$  e  $k3 = 15$

**Funzione**  $ex_G$ ,  $ex_V$

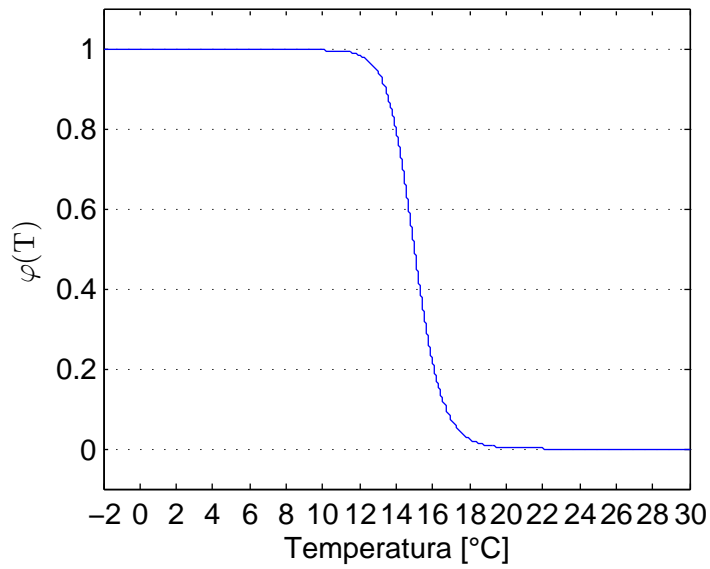


Andamento della funzione  $ex_G$  al variare della densità di larve  $L$

$$ex_G = \frac{1}{2} \cdot (\text{sign}(L - L_{bar}) + 1) \cdot \frac{(L - L_{bar})^2}{k^2 + (L - L_{bar})^2} \cdot 16;$$

con  $k = 80$  e  $L_{bar} = 50$ . La funzione  $ex_V$  ha la stessa equazione.

**Funzione  $\varphi(T)$**

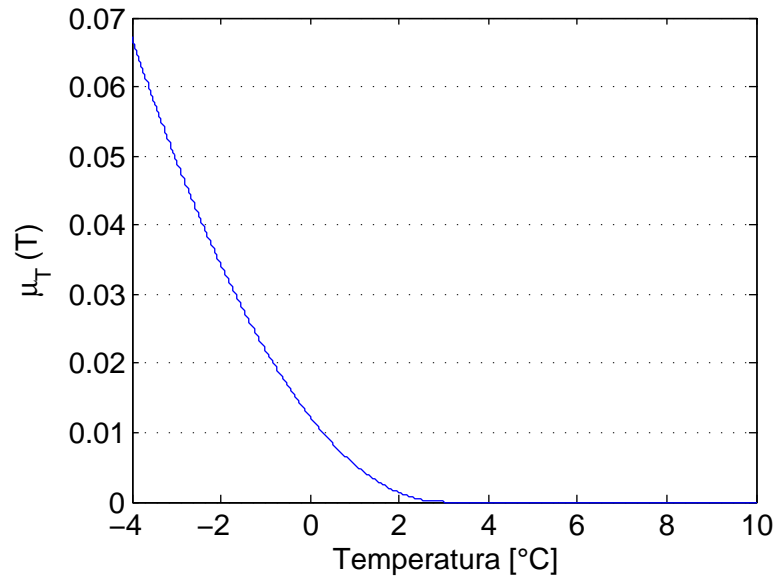


Andamento della funzione  $\varphi(T)$  al variare della temperatura

$$\varphi(T) = 1 - \frac{T^{20}}{\bar{T}^{20} + T^{20}}$$

con  $\bar{T} = 15$

**Funzione  $\mu_T$**

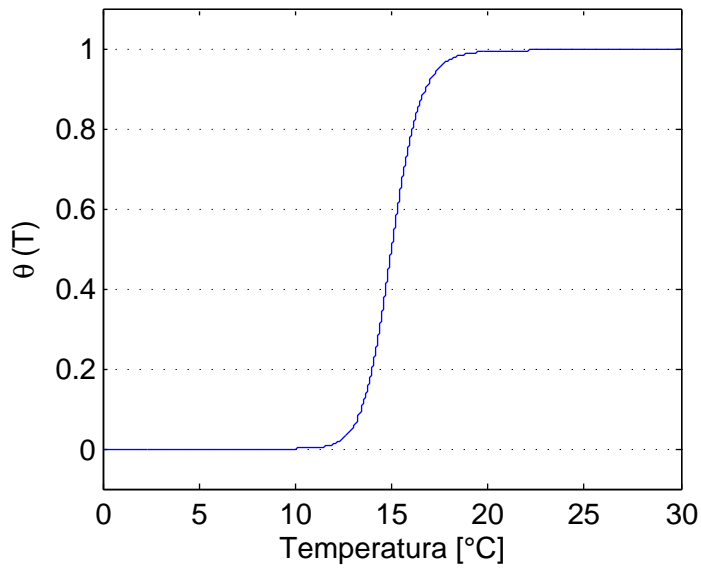


Andamento della funzione  $\mu_T(T)$  al variare della temperatura

$$\mu_T = \frac{1}{k_m^6} \cdot (T - k_m)^2 \cdot \left( \frac{1 - \text{sign}(T - k_m)}{2} \right)$$

con  $k_m = 3$

**Funzione  $\theta(T)$**



Andamento della funzione  $\theta(T)$  al variare della temperatura

$$\theta(T) = \frac{T^{20}}{\bar{T}^{20} + T^{20}}$$

con  $\bar{T} = 15$





## Appendice B

# Definizione matematica degli indicatori

In questa appendice è riportata la definizione matematica degli indicatori usati.

### Indicatori di infestazione larvale

#### Media dei picchi di infestazione

$$Media_{picchi} = \frac{1}{N_P} \sum_{i=1}^{N_P} P_i(t_i) \quad (B.1)$$

dove:

$$P_i(t_i) = \{ \forall L_i(t_i) \text{ t.c.: } L_i \geq S_P \quad \wedge \quad \left. \frac{dL}{dt} \right|_{t_i} = 0 \}$$

e

$$P_i(t_i) = \max[P_i(t_i), P_{i+1}(t_{i+1})] \quad \text{se } (t_{i+1} - t_i) \leq 365$$

con  $N_P$  numerosità dell'insieme dei  $P_i$ .

#### Media dei tempi di ritorno

$$Media_{T_R} = \frac{1}{N_{T_R}} \sum_{i=1}^{N_{T_R}} T_{R_i}$$

dove:

$$T_{R_i} = \frac{1}{365} [t(P_i) - t(P_{i-1})]$$

con  $P_i$  calcolato come nella (B.1) e  $N_{T_R}$  è la numerosità dell'insieme dei  $T_{R_i}$ .

### Media delle durate di infestazione

$$Media_{durate} = \frac{1}{N_D} \sum_{i=1}^{N_D} D_i \quad (B.2)$$

dove:

$$D_i = t_i^F - t_i^I$$

con:

$$t_i^I = \forall t_i \text{ t.c.: } L(t_i) = s_{inf} \quad \wedge \quad \left. \frac{dL}{dt} \right|_{t_i} > 0$$

$$t_i^F = \forall t_i \text{ t.c.: } t_i^I \leq t_i \leq t_{i+1}^I \quad \wedge \quad L(t_i) = s_{inf} \quad \wedge \quad \left. \frac{dL}{dt} \right|_{t_i} > 0$$

e con la condizione:

$\exists P_i(t_i)$  t.c.  $t_i^I \leq t_i \leq t_i^F$ , cioè ci sia almeno un picco di infestazione all'interno dell'evento.

$N_D$  è la numerosità dell'insieme delle durate  $D_i$ .

### Valore medio di insetti

$$Media_{insetti} = \frac{1}{H} \int_{t_0}^H L(t) dt$$

dove  $t_0$  è l'istante iniziale di simulazione e  $H$  è l'orizzonte temporale di simulazione, sufficientemente elevato, in modo che il valore dell'indicatore rimanga pressoché costante al crescere ulteriore di  $H$ .

### Rapporto tra picchi e tempo di ritorno

$$Rapporto_{picchi\_T_R} = \frac{Media_{picchi}}{Media_{T_R}}$$

### Media delle intensità di infestazione

$$Media_{int\_inf} = \sum_{i=1}^{N_{Int}} Int_i$$

dove:

$$Int_i = \frac{1}{365} \int_{t_i^I}^{t_i^F} L(t) dt$$

con  $t_i^I$  e  $t_i^F$  calcolati come nella (B.2).

$N_{Int}$  è la numerosità dell'insieme delle  $Int_i$ .

## Indicatori della condizione della biomassa fogliare

### Media dei minimi di biomassa di aghi

$$Media_{min\_biomassa} = \frac{1}{N_M} \sum_{i=1}^{N_M} M_i(t_i) \quad (B.3)$$

dove:

$$M_i(t_i) = \{\forall A(t_i) \text{ t.c.: } A_i \leq S_{min} \quad \wedge \quad \left. \frac{dA}{dt} \right|_{t_i} = 0 \quad \wedge \quad (t_{i+1} - t_i) \geq 365\}$$

con  $N_M$  numerosità dell'insieme dei  $P_i$ .

### Media dei tempi di ritorno dei minimi

$$Media_{T_{Rm}} = \frac{1}{N_{T_{Rm}}} \sum_{i=1}^{N_{T_{Rm}}} T_{Rm_i} \quad (B.4)$$

dove:

$$T_{Rm_i} = \frac{1}{365} [t(M_{i+1}) - t(M_i)]$$

con  $M_i$  calcolato come nella B.3 e  $N_{T_{Rm}}$  è la numerosità dell'insieme dei  $T_{Rm_i}$ .

### Media delle aree tra minimi successivi

$$Media_{aree\_min} = \frac{1}{N_A} \sum_{i=1}^{N_A} A_i$$

dove:

$$A_i = \frac{1}{365} \int_{t_1}^{t_2} A(t) dt$$

con

$$t_1 = t(M_i)$$

$t_2 = t(M_{i+1})$  ( $M_i$  e  $M_{i+1}$  calcolati come nella (B.4) e  $N_A$  numerosità dell'insieme delle  $A_i$ ).



# Bibliografia

- [Aimi et al., 2006] Aimi, A., Zocca, A., Minerbi, S., Hellrigl, K., Gatto, P., and Battisti, A. (2006). The outbreak of the pine processionary moth in venosta/vinschgau: ecological and economic aspects. *Forest Observer*, 2(3):69–80.
- [Avtzis, 1998] Avtzis, N. D. (1998). The use of bacillus thuringiensis against thaumetopoea pityocampa schiff.(lepidoptera: Thaumetopoeidae) in greece. *USDA Forest Service General Technical Report, NE*, 247.
- [Barbaro and Battisti, 2011] Barbaro, L. and Battisti, A. (2011). Birds as predators of the pine processionary moth (lepidoptera: Notodontidae). *Biological Control*, 56(2):107–114.
- [Battisti, 1989] Battisti, A. (1989). Field studies on the behaviour of two egg parasitoids of the pine processionary moththaumetopoea pityocampa. *Entomophaga*, 34(1):29–38.
- [Battisti et al., 2000] Battisti, A., Bernardi, M., and Ghirardo, C. (2000). Predation by the hoopoe (upupa epops) on pupae of thaumetopoea pityocampa and the likelyinfluence on other natural enemies. *Biocontrol*, 45(3):311–323.
- [Battisti et al., 1998] Battisti, A., Longo, S., Tiberi, R., and Triggiani, O. (1998). Results and perspectives in the use ofbacillus thuringiensis berl. var. kurstaki and other pathogens againstthaumetopoea pityocampa (den. et schiff.) in italy (lep., thaumetopoeidae). *Anzeiger für Schädlingskunde, Pflanzenschutz, Umweltschutz*, 71(4):72–76.
- [Battisti et al., 2005] Battisti, A., Stastny, M., Netherer, S., Robinet, C., Schopf, A., Roques, A., and Larsson, S. (2005). Expansion of geogra-

- phic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecological applications*, 15(6):2084–2096.
- [Biliotti, 1958] Biliotti, E. (1958). Les parasites et prédateurs de thaumetopoea pityocampa schiff.(lepidoptera). *BioControl*, 3(1):23–34.
- [Branco et al., 2008] Branco, M., Santos, M., Calvão, T., Telfer, G., and PAIVA, M.-R. (2008). Arthropod diversity sheltered in thaumetopoea pityocampa (lepidoptera: Notodontidae) larval nests. *Insect Conservation and Diversity*, 1(4):215–221.
- [Buffo et al., 2007] Buffo, E., Battisti, A., Stastny, M., and Larsson, S. (2007). Temperature as a predictor of survival of the pine processionary moth in the italian alps. *Agricultural and Forest Entomology*, 9(1):65–72.
- [Cayuela et al., 2011] Cayuela, L., Hódar, J. A., and Zamora, R. (2011). Is insecticide spraying a viable and cost-efficient management practice to control pine processionary moth in mediterranean woodlands? *Forest Ecology and Management*, 261(11):1732–1737.
- [Cebeci et al., 2010] Cebeci, H. H., Oymen, R. T., and Acer, S. (2010). Control of pine processionary moth, thaumetopoea pityocampa with bacillus thuringiensis in antalya, turkey. *Journal of Environmental Biology*, 31(3).
- [Grisson, 1970] Grison, P. (1970). La lutte biologique en forêt. *Revue Forestière Française, 1970, S, fascicule thématique La lutte biologique en forêt*.
- [Hoch et al., 2009] Hoch, G., Toffolo, E. P., Netherer, S., Battisti, A., and Schopf, A. (2009). Survival at low temperature of larvae of the pine processionary moth thaumetopoea pityocampa from an area of range expansion. *Agricultural and forest entomology*, 11(3):313–320.
- [Hódar et al., 2002] Hódar, J. A., Zamora, R., and Castro, J. (2002). Host utilisation by moth and larval survival of pine processionary caterpillar thaumetopoea pityocampa in relation to food quality in three pinus species. *Ecological Entomology*, 27(3):292–301.
- [Hódar et al., 2004] Hódar, J. A., Zamora, R., Castro, J., and Baraza, E. (2004). Feast and famine: previous defoliation limiting survival of pine

- processionary caterpillar *thaumetopoea pityocampa* in scots pine *pinus sylvestris*. *Acta oecologica*, 26(3):203–210.
- [Jacquet et al., 2013] Jacquet, J.-S., Bosc, A., O’Grady, A. P., and Jactel, H. (2013). Pine growth response to processionary moth defoliation across a 40-year chronosequence. *Forest Ecology and Management*, 293:29–38.
- [Kanat and Mol, 2008] Kanat, M. and Mol, T. (2008). The effect of *calosoma sycophanta* l. (coleoptera: Carabidae) feeding on the pine processionary moth, *thaumetopoea pityocampa* (denis & schifferrmüller) (lepidoptera: Thaumetopoeidae), in the laboratory. *Turk J Zool*, 32:367–372.
- [La Fuente et al., 1999] La Fuente, D. et al. (1999). Allergy to the pine processionary caterpillar (*thaumetopoea pityocampa*). *Clinical & Experimental Allergy*, 29(10):1418–1423.
- [Leblond et al., 2010] Leblond, A., Martin, J., Provendier, D., Gutleben, C., Robinet, C., and Napoleone, C. (2010). Inventaire et évaluation des méthodes de lutte contre la processionnaire du pin. enquête nationale – guide technique.
- [Lehtonen, 2005] Lehtonen, A. (2005). Estimating foliage biomass in scots pine (*pinus sylvestris*) and norway spruce (*picea abies*) plots. *Tree physiology*, 25(7):803–811.
- [Liu and Westman, 2009] Liu, C. and Westman, C. J. (2009). Biomass in a norway spruce-scots pine forest: a comparison of estimation methods. *Boreal environment research*, 14(5).
- [Minerbi et al., 2001] Minerbi, S., Hellrigl, K., and Battisti, A. (2001). Aspetti pratici nella lotta autunnale ed invernale alla processionaria del pino *thaumetopoea pityocampa* (den. et schiff.) con *bacillus thuringiensis*. primi risultati sperimentali in alto adige. *Sherwood*, 68:27–32.
- [OEPP/EPPO, 2004] OEPP/EPPO (2004). *Diagnostic protocols for regulated pests, Protocoles de diagnostic pour les organismes réglementés*.
- [Osservatorio del Legno, 2014] Osservatorio del Legno (2014). Andamento dei mercati di legname tondo in trentino. Technical report, Camera di Commercio I.A.A. di Trento.

- [Pimentel et al., 2006] Pimentel, C., Calvao, T., Santos, M., Ferreira, C., Neves, M., and Nilsson, J.-Å. (2006). Establishment and expansion of a *thaumetopoea pityocampa*(den. & schiff.)(lep. notodontidae) population with a shifted life cycle in a production pine forest, central-coastal portugal. *Forest ecology and management*, 233(1):108–115.
- [Pollini, 1998] Pollini, A. (1998). *Manuale di Entomologia Applicata*.
- [Robinet et al., 2007] Robinet, C., Baier, P., Pennerstorfer, J., Schopf, A., and Roques, A. (2007). Modelling the effects of climate change on the potential feeding activity of *thaumetopoea pityocampa* (den. & schiff.)(lep., notodontidae) in france. *Global Ecology and Biogeography*, 16(4):460–471.
- [Robinet et al., 2006] Robinet, C., Rousolet, J., Goussard, F., and Roques, A. (2006). Modelling the range expansion of an urticating moth with global warming: a case study from france. *Atlas of Biodiversity*.
- [Ronnås et al., 2010] Ronnås, C., Larsson, S., Pitacco, A., and Battisti, A. (2010). Effects of colony size on larval performance in a processionary moth. *Ecological entomology*, 35(4):436–445.
- [Roversi, 1997] Roversi, P. (1997). Problematiche connesse con attacchi in aree urbanizzate di lepidotteri defogliatori provvisti di peli urticanti. *Nota Tecnica*, (3).
- [Stastny et al., 2006] Stastny, M., Battisti, A., Petrucco-Toffolo, E., Schlyter, F., and Larsson, S. (2006). Host-plant use in the range expansion of the pine processionary moth, *thaumetopoea pityocampa*. *Ecological Entomology*, 31(5):481–490.
- [Tiberi and Panzavolta, 2001] Tiberi, R. and Panzavolta, T. (2001). Verifica dell’efficacia di *bacillus thuringiensis* e diflubenzuron nei confronti delle larve di processionaria del pino.