

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Corso di laurea in
Tecnologie Forestali e Ambientali

Studio della mortalità invernale del bostrico tipografo
(*Ips typographus*) nelle Alpi italiane centro-orientali

Study on the winter mortality of the spruce bark beetle
(*Ips typographus*) in the Italian Central-Eastern Alps

Relatore

Prof. Massimo Faccoli

Correlatore

Dott. Luca Deganutti

Laureanda

Marta Lanzi

Matricola n. 2000050

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

Sommario

Riassunto	4
Abstract	5
1. Introduzione	6
1.1 I coleotteri scolitidi	6
1.2 <i>Ips typographus</i> : morfologia e ciclo biologico.....	8
1.2.1 Effetti del cambiamento climatico su fenologia e voltinismo di <i>I.</i> <i>typographus</i>	10
1.3 Infestazioni, pullulazioni e dannosità	12
1.3.1 La tempesta Vaia	14
1.4 Monitoraggio e possibilità di controllo.....	15
1.5 Obiettivi del presente studio.....	16
2. Materiali e metodi	17
2.1 Inquadramento e scelta dei siti di studio.....	17
2.2 Prelievo dei campioni.....	18
2.3 Analisi di laboratorio	20
2.4 Dati climatici	21
2.5 Analisi dei dati	21
3. Risultati	24
3.1 Stadio di sviluppo prevalente	24
3.2 Numerosità degli adulti sotto corteccia.....	24
3.3 Sopravvivenza.....	26
3.4 Sex ratio.....	26
3.5 Dati meteorologici	27
4. Discussione	30
4.1 Stadio di sviluppo prevalente	30
4.2 Numerosità degli adulti sotto corteccia.....	31
4.3 Sopravvivenza invernale di <i>Ips typographus</i>	32
4.4 Sex ratio.....	36
4.5 Considerazioni finali.....	36
Ringraziamenti	38
Bibliografia	39
Sitografia	42

Riassunto

Il bostrico tipografo (*Ips typographus* L.) è un coleottero scolitide, parassita dell'abete rosso (*Picea abies* (L.) H.Karst.), che in genere attacca piante sofferenti o appena morte. Le popolazioni dell'insetto hanno provocato forti pullulazioni in tutta l'Europa negli ultimi anni. L'ultima grossa pullulazione, ancora in corso, si è sviluppata a seguito della tempesta Vaia dell'ottobre 2018 e interessa le Alpi italiane centro-orientali.

Lo scolitide compie una diapausa invernale, durante la quale una parte della popolazione soccombe. La mortalità in questo periodo dipende da diverse variabili e influenza l'entità delle infestazioni degli anni successivi. Alcuni dei fattori più rilevanti sono lo stadio di svernamento, la densità di colonizzazione della corteccia e l'andamento climatico invernale.

Gli effetti del cambiamento climatico stanno condizionando la durata dello sviluppo, il voltinismo e l'avvio dell'attività primaverile del bostrico tipografo. Hanno inoltre un'importante influenza sulla disponibilità di ospiti suscettibili le temperature elevate, ma ancor più la siccità, che indeboliscono l'abete rosso soprattutto in Europa meridionale. In aggiunta, l'aumento della frequenza di eventi estremi rende disponibili grandi quantità di legname colonizzabile.

Il presente studio ha analizzato la sopravvivenza invernale della popolazione di *Ips typographus* nelle Alpi sud-orientali. Prima (novembre 2022) e dopo l'inverno (marzo-aprile 2023) sono stati effettuati dei campionamenti di cortecce infestate in 11 aree e 33 siti differenti, andando a coinvolgere quattro regioni e sei province diverse.

I dati raccolti hanno riportato una discreta mortalità dello scolitide (35%), associata ad un'alta numerosità degli adulti sotto corteccia. È immaginabile che l'elevata competizione intraspecifica abbia rallentato lo sviluppo degli individui e consentito un minore accumulo di sostanze di riserva. I coleotteri immaturi trovati a novembre sono probabilmente morti nel corso dell'inverno, perché meno resistenti alla stagione difficile. Inoltre l'elevato numero di insetti sotto corteccia, associato a temperature elevate, può aver favorito la proliferazione di infezioni batteriche e fungine. Un'ulteriore analisi relativa al rapporto percentuale fra individui maschi e femmine ha evidenziato una diminuzione degli individui di sesso maschile a seguito dello svernamento.

Nonostante la riduzione nella popolazione di *Ips typographus* osservata nel corso dell'inverno, la numerosità dei coleotteri è rimasta elevata. Si teme perciò un proseguimento della pullulazione nei prossimi anni.

Abstract

The spruce bark beetle, *Ips typographus* L. (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae), is considered the most destructive pest in coniferous forests, and it generally attacks weakened or recently dead Norway spruce (*Picea abies* (L.) H.Karst.) trees. Populations of this insect have caused significant outbreaks across Europe in recent years. The latest major outbreak, still ongoing, started following the Vaia storm occurred in October 2018 in the Central-Eastern Italian Alps.

The spruce bark beetle overwinters in the phloem of the attacked trees. During diapause part of the population dies depending on several variables. Winter survival affects the extent of infestations in the following year. Some of the most important factors are development stage of overwintering beetles, colonization densities and weather.

Climate change is modifying development time, voltinism, and the beginning of spring activity of the spruce bark beetle. They also have a significant influence on the availability of susceptible hosts: high temperatures and drought weaken Norway spruce trees, especially in Southern Europe. Moreover, the increasing frequency of extreme events such as windstorms can produce large amounts windthrown trees extremely suitable for colonization.

In this study, we analyzed winter survival of *Ips typographus* overwintering populations in the South-Eastern Alps between November 2022 and March/April 2023. Sampling was conducted in 11 areas and 33 sites, involving four regions and six different provinces.

The collected data show a spruce bark beetle mortality rate of 35%, associated with a high number of adults under tree bark.

Intraspecific competition may have slowed the development of individuals and lowered the amount of fat reserves. The immature beetles found in November probably died during the winter, as they are less resistant to winter conditions. Furthermore, the elevated number of insects under tree barks, in association with elevated temperatures, may have favored the proliferation of bacterial and fungal infections. A further analysis regarding the sex ratio have shown a decrease in male individuals after overwintering.

Despite the reduction in the *Ips typographus* population observed during the winter, the number of beetles remained quite high. Therefore, we expect important outbreaks also in the following year.

1. Introduzione

1.1 I coleotteri scolitidi

Gli scolitidi (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) sono una sottofamiglia della famiglia Curculionidae. Comprende un gran numero di specie; Wood (1992) ha catalogato 280 generi e circa 6.500 specie. Prevalentemente forestali, gli scolitidi sono in gran parte compresi nelle foreste equatoriali pluviali, mentre tra Europa e Nord Africa sono presenti solamente 350 specie, di cui oltre 150 presenti in Italia (Faccoli, 2015).

Gli scolitidi ricoprono una importante funzione negli ecosistemi forestali in quanto effettuano una selezione nei popolamenti, favorendo i genomi più adatti alle condizioni locali. Individuano e attaccano in prevalenza piante in condizione di stress o deperienti. La morte delle piante attaccate fornisce un substrato di sviluppo per innumerevoli animali saproxilici, avvia il processo di degradazione del legno e rimette in circolo le sostanze in esso stoccate, contribuendo ad aumentare la biodiversità del bosco. Nella maggior parte dei casi le popolazioni di coleotteri scolitidi sono in equilibrio con l'ecosistema di cui fanno parte e ciclicamente provocano pullulazioni che rientrano naturalmente in alcuni anni. In questo caso si parla di popolazioni in stato endemico. Può capitare però che questo delicato equilibrio si rompa a causa del cambiamento delle condizioni climatiche e stagionali o del verificarsi di eventi favorevoli allo scolitide e avversi per la pianta ospite. Ne sono esempio schianti da vento o da neve, eccezionali periodi siccitosi o prolungati periodi con temperature elevate. Popolazioni in fase epidemica possono dare origine a pullulazioni di grande entità che portano alla distruzione di intere foreste. La morte di numerose piante può causare gravi perdite a livello economico, ecologico in termini di biodiversità, di stabilità del terreno e dei versanti, e paesaggistico.

Dal punto di vista economico, le implicazioni degli attacchi sono molteplici, non solo dovute alla perdita materiale delle piante morte, ma anche per il deprezzamento del legname che provocano; gli scolitidi possono causare danni diretti come la presenza di gallerie xilematriche, o indiretti come alterazioni cromatiche quali l'"azzurramento" dell'alburno provocato dai funghi simbiotici.

A livello morfologico, i coleotteri scolitidi sono tra loro molto simili. Gli adulti sono di piccole dimensioni, con lunghezza sempre inferiore al centimetro e presentano un corpo di forma allungata di colore scuro. Sono difficilmente osservabili al di fuori dell'ospite perché l'intero sviluppo avviene al suo interno ed escono solamente per colonizzare nuove piante. Le larve hanno piccole dimensioni, sono apode e spesso assumono la caratteristica forma a C. Osservando solamente la larva risulta complicato risalire alla specie. L'identificazione è spesso possibile analizzando specie ospite, forma

e direzione delle gallerie materne e larvali. Il ciclo vitale degli scolitidi ha durata breve, di pochi mesi e ha luogo principalmente all'interno dell'ospite.

Si possono suddividere i coleotteri scolitidi europei in due grandi categorie: corticicoli o floematici e xilomicetofagi. In entrambi i casi gli insetti attaccano la pianta andando a scavare una serie di gallerie detta "sistema riproduttivo" che è utile e spesso indispensabile all'identificazione della specie.

I coleotteri corticicoli o floematici sono dei parassiti altamente specifici che attaccano piante già in sofferenza per altri fattori oppure piante appena abbattute con floema ancora fresco. Gli adulti di queste specie praticano un foro nella corteccia e scavano una "camera nuziale" o "vestibolo" all'interno del quale avviene l'accoppiamento. Si distinguono specie monogame e poligame; nelle prime la femmina è pioniera e va a colonizzare la nuova pianta, mentre per le specie poligame è il maschio ad arrivare per primo e a richiamare le femmine grazie al rilascio di feromoni. A seguito dell'accoppiamento le femmine scavano all'interno del floema una galleria "materna", con diametro costante e libera da rosura, lungo la quale depongono le uova. Le larve si nutrono del floema scavando gallerie perpendicolari a quella materna, con sezione crescente e ingombre di escrementi e rosura. Terminato di nutrirsi, le larve scavano la cella pupale nella quale compiono la metamorfosi, si trasformano in pupe e quindi in adulti. I giovani adulti presentano esoscheletro molle e colorazioni chiare e per raggiungere la maturità sessuale hanno bisogno di alimentarsi; gli adulti delle specie poligame compiono una maturazione prima di sfarfallare, andando a consumare il floema rimasto, mentre le specie monogame presentano una maturazione post-sfarfallamento a carico di germogli di piante vigorose. Raggiunta la maturità, gli adulti sfarfallano e vanno alla ricerca di una nuova pianta da colonizzare.

Il ciclo vitale delle specie xilomicetofaghe avviene più in profondità nel legno, dove sono presenti poche sostanze nutritive. Per questo le femmine adulte portano sul loro esoscheletro spore di funghi simbionti che rilasciano scavando profonde gallerie dove depongono le uova. Alcune specie presentano i micangi, strutture apposite per il contenimento delle spore. Le larve si nutrono esclusivamente del micelio fungino, non scavano gallerie e al termine dello sviluppo sfarfallano come adulti ripercorrendo a ritroso le gallerie materne.

La simbiosi con i funghi è rilevante nel ciclo biologico degli scolitidi e diversa per le specie floematiche e xilomicetofaghe. Nelle specie floematiche i funghi simbionti appartengono principalmente ai generi *Ophiostoma* e *Leptographium*, che inibiscono le difese della pianta e ne accelerano il deperimento, consentendo il successo della colonizzazione. Questi funghi non sono importanti per l'alimentazione delle larve, in quanto esse si nutrono principalmente del floema, ricco di sostanze nutritive. La simbiosi è invece primaria per le larve di specie xilomicetofaghe, che si nutrono

esclusivamente del micelio fungino di simbionti appartenenti ai generi *Ambrosia* e *Ambrosiella*, caratterizzati da bassa patogenicità (Battisti *et al.*, 2013).

1.2 *Ips typographus*: morfologia e ciclo biologico

Il bostrico tipografo (*Ips typographus* L.) è uno scolitide corticicolo di dimensioni comprese tra i 4 e i 5,5 mm che attacca l'abete rosso (*Picea abies* (L.) H.Karst.).

È un parassita di debolezza, ovvero colonizza le piante mature o stramature indebolite o stressate, riconoscendole attraverso le sostanze terpeniche volatili che queste emanano. L'attacco del bostrico interessa l'intero fusto ad eccezione dei primi due-tre metri della parte basale e del cimale, dove la corteccia è troppo spessa rendendo difficile la penetrazione da parte del patogeno oppure troppo sottile limitando lo sviluppo delle larve. In alcuni casi la seconda generazione può andare ad attaccare anche la parte basale della pianta. La specie può compiere una, due o tre generazioni all'anno in base alla quota e alla latitudine: ad esempio in nord Italia, sopra i 1.400-1.500 m di quota è monovoltina, tra questa quota e i 1.000 m bivoltina e sotto i 1.000 m in stagioni favorevoli può avviare una terza generazione.

La specie è caratterizzata da poligamia, con un numero di due o tre femmine per maschio. Faccoli & Buffo (2004) hanno osservato che alla nascita la percentuale di maschi è pari a quella di femmine, ma i primi muoiono in maggiore quantità nel tentativo di colonizzare nuove piante e di scavare la camera nuziale, arrivando ad una proporzione di circa 1:3 tra maschi e femmine. Infatti, secondo i monitoraggi effettuati tramite le catture con trappole a feromoni, i maschi costituiscono il 30% della popolazione, mentre attraverso l'analisi degli sfarfallati dai tronchi esca, la percentuale riscontrata di maschi è del 50% (Faccoli & Buffo, 2004). È possibile distinguere gli individui adulti maschi dalle femmine grazie ad alcune caratteristiche morfologiche distinte definite da Schlyter & Cederholm (1981), osservandoli allo stereoscopio. La maggiore differenza tra i sessi è individuabile grazie ad una densità superiore di setole sul pronoto (parte anteriore) della femmina. Le altre caratteristiche utili sono il tubercolo frontale più grande e la terza spina elitrale più lunga e larga nel maschio. È abbastanza semplice categorizzare le setole come dense o scarse, mentre è difficile separare i tubercoli, a meno che non siano molto piccoli o molto grandi. La diversa morfologia delle setole ha anche un risvolto pratico: un corpo con meno setole ha meno probabilità di rimanere bloccato nella resina e il maschio, che è il sesso pioniere, ha più probabilità di entrare in contatto con la resina rispetto alla femmina.

L'individuo pioniere è dunque il maschio che, scavata la camera nuziale all'interno del floema, richiama altri individui della specie di entrambi i sessi tramite il rilascio di feromoni di aggregazione. Ciascuna femmina a seguito della fecondazione scava una galleria longitudinale lunga fino a 15 cm sgombra da rosura, perché mentre scava la galleria la ripercorre a ritroso ripulendola. La rosura che fuoriesce dal foro di entrata è

il primo sintomo osservabile dell'attacco. Il sistema riproduttivo del bostrico tipografo è di tipo longitudinale (cioè parallelo all'asse del fusto) doppio o triplo, a seconda del numero di femmine. Un sistema riproduttivo triplo assume la caratteristica forma a "Y". L'ovideposizione avviene all'interno di nicchie ovigere, circa 100 per femmina, scavate su entrambi i lati delle gallerie materne. Alla schiusa delle uova si sviluppano le gallerie larvali, ingombre di rosura, lunghe 5-6 cm e di diametro crescente. Al termine della galleria, la larva compie la metamorfosi come pupa all'interno della cella pupale. Il processo di sviluppo di *Ips typographus* dura mediamente 7-8 settimane, ma può variare in base alla temperatura, alle condizioni climatiche e all'altitudine (Wermelinger *et al.*, 1998).

Il sistema riproduttivo del bostrico tipografo si sviluppa nel floema, ma al distacco della corteccia è possibile intuirne le tracce anche sull'alburno. Le gallerie non si incontrano mai fra loro, perché avanzando nel floema gli individui percepiscono le vibrazioni di altre femmine o larve che scavano e cambiano quindi direzione. Perciò, se sotto corteccia c'è un'alta densità di colonizzazione e quindi una scarsa disponibilità di nutrimento, alcune femmine già fecondate interrompono l'ovideposizione, escono dalla corteccia e vanno a colonizzare un'altra pianta, scavando una singola galleria materna lungo la quale completano l'ovideposizione. Questo fenomeno è chiamato riemersione, avviene solitamente dopo tre-quattro settimane dai voli della generazione principale e la prole che ne deriva è detta generazione sorella (Battisti *et al.*, 2013). Sulle Alpi tale fenomeno può essere osservato sia per la prima che per la seconda generazione.

In *Ips typographus* l'ingresso in diapausa invernale è determinato dal fotoperiodo e dalla temperatura (Doležal *et al.*, 2007). All'abbassarsi delle temperature il metabolismo del coleottero rallenta ed esso continua a nutrirsi e a svilupparsi a ritmo ridotto fino a quando il fotoperiodo non risulta inferiore a 16 ore, soglia oltre alla quale il coleottero entra in diapausa. Quando la temperatura scende sotto i 5°C l'insetto cessa di consumare floema e la sua attività metabolica rallenta. Al di sotto di 0°C smette di muoversi (Annala, 1969) ed entra in quiescenza, in cui attende l'arrivo della primavera, quando riprenderà l'attività con temperature medie di circa 18°C (Doležal *et al.*, 2007). Sulla base della latitudine e delle condizioni climatiche invernali, le popolazioni di bostrico tipografo sfruttano diversi siti per lo svernamento: in Europa meridionale gli adulti rimangono sotto la corteccia e si dirigono verso il sughero che risulta più asciutto del floema e fornisce isolamento termico. Le popolazioni del nord Europa si spostano attivamente dalle piante ospiti verso la lettiera dove la copertura nevosa mantiene le temperature costanti ed inferiori a quelle atmosferiche.

La sopravvivenza invernale è un fattore importante per determinare l'intensità delle pullulazioni che avranno origine la primavera successiva. La fase di sviluppo in cui il bostrico affronta la diapausa è fondamentale nella sopravvivenza poiché stadi

preimmaginali (larvale e pupale) risultano meno resistenti alle basse temperature rispetto agli adulti. Ciò è determinato dalla fenologia e dai tempi di sviluppo. Anche la densità di colonizzazione può avere un ruolo in quanto determina la fitness della generazione svernante. A basse densità, infatti, tutti gli individui possono svilupparsi nelle condizioni migliori, acquisendo più riserve, mentre a densità elevate si ha competizione per la risorsa trofica. Ad alte densità gli individui che raggiungono la maturità avranno peso e accumulo di riserve inferiori: siccome durante la diapausa invernale viene perso il 40-50% del peso corporeo (Botterweg, 1982), la probabilità di questi individui di superare l'inverno è minore rispetto a quella di loro simili sviluppati in substrati poco densamente colonizzati (Faccoli, 2002).

1.2.1 Effetti del cambiamento climatico su fenologia e voltinismo di *I. typographus*

L'avvento dei cambiamenti climatici sta concorrendo a modificare il ciclo biologico del bostrico tipografo. Faccoli (2009) ha osservato che la temperatura è il principale fattore che influenza la velocità di sviluppo del bostrico tipografo e l'avvio dell'attività primaverile, mentre l'avvio della diapausa è maggiormente influenzato dal fotoperiodo. Uno studio su un periodo decennale (1996-2005) condotto da Faccoli (2009) ha evidenziato come l'effetto del cambiamento climatico, con primavere ed estati più calde, anticipi l'avvio dell'attività primaverile e la riduzione dei tempi di sviluppo delle popolazioni dell'insetto nelle Alpi sud-orientali. Le stesse evidenze erano già state osservate per popolazioni monovoltine delle foreste sub-boreali da Lange *et al.* (2006) e Jönsson *et al.* (2007).

Lo studio che ha riguardato l'area delle Alpi sud-orientali ha rilevato che il volo primaverile della generazione parentale tra il 1996 e il 2005 è variato da inizio giugno a inizio maggio. La stessa tendenza è stata osservata per lo sfarfallamento della prima generazione, che si è spostato da metà luglio al 20 giugno.

In generale, l'epoca di avvio della seconda generazione (nelle aree in cui avviene) è determinante ai fini dello svernamento: se lo sviluppo si conclude entro la fine dell'estate lo scolitide sverna allo stadio adulto, tuttavia può interrompersi agli stadi preimmaginali, meno resistenti alle condizioni invernali. Nello studio condotto in area alpina tra il 1996 e il 2005, nonostante la tendenza a iniziare in anticipo la prima e la seconda generazione, *I. typographus* è rimasto bivoltino per tutti gli anni di osservazione e non è stata notata la comparsa di una terza generazione (Faccoli, 2009). In Svizzera Wermelinger *et al.* (2012) hanno osservato il verificarsi di una terza generazione a seguito dell'annata eccezionalmente calda del 2003. In generale, il costante aumento delle temperature globali prospetta una modificazione nel voltinismo delle popolazioni di scolitide che porteranno a un aumento molto rapido delle loro densità.

Lo sviluppo di *I. typographus* rallenta notevolmente con l'avvio della diapausa invernale, che è determinato prevalentemente dal fotoperiodo, mentre la temperatura riveste un ruolo marginale. Finché le condizioni climatiche lo consentono, gli adulti si nutrono del floema per accumulare energie necessarie a superare l'inverno.

La diapausa del bostrico tipografo nell'area centro-europea inizia quando il fotoperiodo scende sotto le 16 ore giornaliere. Sia in centro Europa che nell'area alpina, l'attività trofica si interrompe al raggiungimento dei 5°C, e l'insetto entra in una fase di quiescenza in cui attende la primavera (Doležal, 2007). L'epoca di sfarfallamento degli adulti svernanti varia con la latitudine e con la quota. Sulle Alpi meridionali, tra gli 800 e i 1.200 m s.l.m., lo sfarfallamento avviene tra fine maggio e giugno (Faccoli & Stergulc, 2004), ma a causa dell'innalzamento delle temperature, recentemente lo sfarfallamento è anticipato.

Il cambiamento delle condizioni climatiche, oltre a favorire il bostrico tipografo prolungando il periodo di attività e riducendo i tempi di sviluppo, ha un effetto anche sulle piante ospiti. Temperature più elevate, periodi siccitosi e forti eventi meteorici possono indebolire le piante rendendole ancora più suscettibili agli attacchi. Uno studio condotto da Marini *et al.* (2012) al limite meridionale delle Alpi, ha messo in luce come in quest'area la presenza di estati secche aumenti sia l'entità che la distribuzione altitudinale delle aree colpite. È stato evidenziato che la siccità è il fattore maggiormente influente nello spostamento verso quote superiori degli attacchi e che la temperatura può concorrere ad aggravare gli effetti negativi della scarsità di precipitazioni. Lo studio ha indicato che le perdite più elevate di legname a causa delle infestazioni del coleottero sono localizzate nei siti dove l'abete rosso è stato piantato al di fuori del suo range climatico naturale, suggerendo che queste piante saranno particolarmente vulnerabili alle variazioni climatiche.

1.3 Sintomi

I sintomi provocati dall'aggressione del bostrico tipografo dipendono dallo stato di salute dell'ospite, dal momento e dall'entità dell'attacco. Piante sane reagiscono con l'emissione di resina nel tentativo di confinare il danno, mentre piante sofferenti non sono spesso in grado di opporre resistenza (Franceschi *et al.*, 2000). La presenza di rosura rossastra in prossimità dei fori di ingresso o accumulata alla base della pianta costituisce il primo sintomo di un attacco. La colonizzazione avviene sul fusto a partire da due-tre metri dalla base della pianta, perciò i fori di entrata difficilmente sono visibili da terra. Inoltre, vento e pioggia possono rapidamente disperdere la rosura rendendo l'individuazione di questo sintomo piuttosto difficile. Le infestazioni primaverili causate dalla prima generazione provocano ingiallimento e poi arrossamento della chioma in poche settimane, e in molti casi si può osservare la caduta di aghi verdi. Gli alberi attaccati dalla seconda e dalla terza generazione in

luglio-agosto, invece, mantengono la chioma verde per tutto l'inverno, perché la pianta si prepara al riposo vegetativo riducendo i flussi linfatici. Con alte densità di colonizzazione si può osservare la perdita di ampie porzioni di corteccia anche con la chioma ancora perfettamente verde.

Oltre ai sintomi provocati direttamente dallo scolitide, su tronchi in catasta è possibile osservare l'"azzurramento" del legno, sintomo secondario causato dai funghi che vivono in simbiosi con *I. typographus*.

1.3 Infestazioni, pullulazioni e dannosità

Il bostrico tipografo è il principale agente di danno alle peccete europee. I focolai di infestazione, che possono avere diverse origini, in molti casi si estinguono in modo naturale in tre-quattro anni, perché le piante vulnerabili sono in genere in numero ridotto all'interno di un popolamento di alberi vigorosi. Se però la condizione di stress dell'abete rosso è diffusa ad ampie aree, possono innescarsi delle pullulazioni che interessano intere foreste e portano anche alla colonizzazione delle piante sane, che non riescono ad opporre resistenza all'attacco di un numero elevatissimo di coleotteri. In questi casi si rompe l'equilibrio ecosistemico e le popolazioni di *I. typographus* da endemiche diventano epidemiche. Il coleottero aggredisce esclusivamente l'abete rosso, con il quale condivide l'areale naturale di diffusione, ed è presente ovunque vi sia l'ospite, dai popolamenti naturali, a quelli artificiali azonali e alle aree urbane.

Fra i principali fattori che predispongono lo sviluppo delle infestazioni di bostrico tipografo ci sono gli schianti da vento o da neve che, se estesi a grandi superfici, possono dare origine ad importanti pullulazioni. La presenza di grandi quantità di legname fresco abbattuto senza capacità di difesa garantisce infatti un substrato privilegiato per la crescita esponenziale delle popolazioni di *I. typographus* che, degradato il floema delle piante a terra, sono abbastanza numerose per colonizzare anche quelle sane. Un'altra causa che può originare infestazioni è la permanenza per lunghi periodi di cataste e tronchi non scortecciati in bosco o nelle vicinanze, fortemente attrattivi per lo scolitide. Di crescente importanza sono i fenomeni di stress idrico e termico, sempre più frequenti in popolamenti di abete rosso a bassa quota. La severità di un attacco di bostrico è legata anche alla tipologia di popolamento presente nell'area: foreste caratterizzate da una bassa diversità specifica, come piantagioni e riforestazioni monospecifiche, sono quelle che riportano i danni più ingenti a seguito di attacchi di bostrico tipografo (Faccoli & Bernardinelli, 2014). La dinamica delle popolazioni di *I. typographus* è difficile da prevedere; questa incertezza è dovuta a diversi fattori, tra i quali l'avvento di eventi climatici estremi, che sono la causa di innesco delle più importanti pullulazioni. La durata delle epidemie varia tipicamente dai tre ai sei anni e presenta anch'essa grande incertezza, legata a fattori come

l'efficacia degli interventi fitosanitari, la dinamica delle popolazioni di nemici naturali e il variare delle condizioni climatiche (Wermelinger, 2004).

Storicamente un'importante pullulazione di *I. typographus* ha coinvolto tutta l'Europa centrale (Christiansen & Bakke, 1988), a seguito della prima guerra mondiale: il conflitto ha danneggiato gravemente i boschi, rendendoli più vulnerabili all'attacco dei parassiti.

Durante l'Impero austro-ungarico, di cui faceva parte anche il nord-est Italia, sono stati piantati estesi boschi monospecifici di abete rosso, scelto per il suo accrescimento veloce e il suo ampio utilizzo come legname da opera (De Groot *et al.*, 2019). Questa scelta selvicolturale ha però portato ad avere boschi estremamente fragili in quanto coetanei e monospecifici. Inoltre, l'abete rosso ha apparato radicale superficiale, il che rende questi popolamenti estremamente vulnerabili ai danni da vento. In molte zone è stato diffuso anche a bassa quota, al di fuori del range climatico in cui cresce naturalmente (Marini *et al.*, 2012). I boschi piantati in quegli anni hanno ormai raggiunto la maturità e gli alberi sono quindi dei potenziali ospiti del bostrico tipografo. Inoltre negli ultimi decenni la gestione delle foreste alpine è notevolmente diminuita, provocando l'aumento della densità delle piante e l'invecchiamento dei popolamenti, e quindi una maggiore competizione per l'acqua (Faccoli, 2009). In aggiunta a questo aspetto è importante evidenziare che le Alpi italiane sono il limite inferiore dell'areale di diffusione naturale dell'abete rosso e che in quest'area esso è più suscettibile all'aumento delle temperature e ai periodi siccitosi. Per questi motivi dagli anni '90 si sono verificate numerose pullulazioni di bostrico tipografo in seguito a schianti da vento in tutta Europa e in particolare in Germania e Svizzera. Ad esempio, in Svizzera, la tempesta Vivian nel 1990 ha abbattuto 4,9 milioni di m³ di legname, e la tempesta Lothar nel 1999 ha causato lo schianto di alberi per volume di 8,4 milioni m³ (Confederazione Svizzera, 1999).

In Italia una grossa pullulazione, probabilmente originata dalla calda e siccitosa estate del 2003, ha interessato ampie aree in Trentino e Friuli Venezia Giulia (Faccoli, 2009).

Oltre ai fattori sopraelencati, la gravità e l'entità degli attacchi sono state implementate dagli effetti del cambiamento climatico. Esso ha provocato l'aumento delle temperature e la modificazione dei regimi pluviometrici, che hanno sfavorito l'abete rosso, specie criofila già al limite del suo areale sulle Alpi italiane. Una delle maggiori cause che inducono sofferenza all'abete rosso e influenzano le infestazioni di bostrico tipografo è la siccità, come evidenziato da uno studio condotto nelle Alpi sud-orientali da Faccoli (2009) e già osservato in precedenza da Marchisio (1994) nel caso della *Cephalcia arvensis*. Un lungo periodo siccitoso, come ve ne sono tanti negli ultimi anni, provoca l'aumento della dannosità degli attacchi da *I. typographus* l'anno successivo. Per questi motivi i popolamenti di abete rosso, soprattutto quelli situati a bassa quota, stanno diventando sempre più vulnerabili all'attacco di parassiti, che

invece spesso si dimostrano favoriti dal cambiamento delle condizioni climatiche. Le popolazioni di bostrico hanno modificato il voltinismo, anticipato il momento dello sfarfallamento e velocizzato il ciclo vitale, andando ad aumentare la pressione delle infestazioni (Faccoli, 2009; Marini *et al.*, 2012, 2013; Faccoli & Bernardinelli, 2014).

1.3.1 La tempesta Vaia

Tra il 27 e il 30 ottobre del 2018, il nord-est Italia è stato interessato da una forte depressione denominata “Vaia” che ha determinato notevoli raffiche di vento provocando lo schianto di un grandissimo numero di alberi, in prevalenza abeti rossi. I danni ammontano a più di 16,5 milioni di metri cubi di legname e il coinvolgimento di 38.216 ettari di bosco, che sono stati distrutti o fortemente danneggiati. Le regioni maggiormente colpite dalla tempesta vaia sono state il Trentino Alto Adige e il Veneto, seguiti da Lombardia, Friuli Venezia Giulia e marginalmente Valle d’Aosta e Piemonte. (MASAF, 2019)

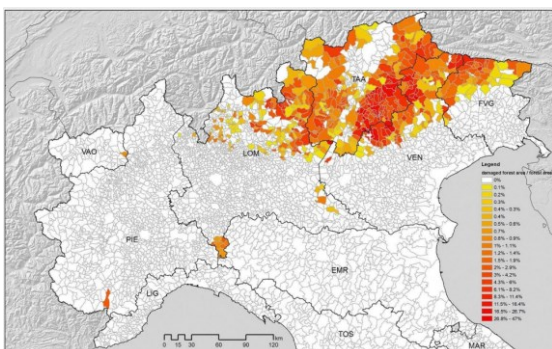


Figura 1: percentuale di superficie forestale distrutta dalla tempesta Vaia (Chirici *et al.*, 2019)

La grande quantità di materiale schiantato, che non è stato possibile rimuovere in tempi brevi e che è in parte ancora in loco, ha favorito l’insorgenza di numerosi nuclei di infestazione di bostrico tipografo. La popolazione dello scolitide ha colonizzato dapprima le piante a terra andando ad aumentare considerevolmente in termini di numero e di aggressività, per poi attaccare le piante in piedi, in parte già indebolite dalle conseguenze della tempesta.

Le pullulazioni sono continuate negli anni successivi, con un aumento esponenziale della popolazione favorito da lunghi periodi caldi e siccitosi (Salvadori *et al.*, 2021). Favorite dall’aumento globale delle temperature che sottopone l’abete rosso ad una condizione prolungata di stress, le pullulazioni di bostrico sono ad oggi la più grande minaccia per le peccete italiane.

1.4 Monitoraggio e possibilità di controllo

La strategia di monitoraggio di *I. typographus* che si è dimostrata più efficace sino ad ora è l'impiego delle trappole a feromoni. Con un controllo frequente (in genere settimanale) è possibile individuare le curve di volo e la densità delle popolazioni sulla base delle catture. Si osservano generalmente due picchi principali che corrispondono agli sfarfallamenti degli adulti svernanti e degli adulti di prima generazione e talvolta si osservano due picchi secondari relativi alle generazioni sorelle. Inoltre dalle catture viene calcolata la numerosità delle popolazioni del coleottero. Faccoli & Stergulc (2004) hanno determinato una cosiddetta "soglia di cattura" di 8.000 individui per trappola che indica il massimo danno accettabile oltre al quale l'infestazione aumenta esponenzialmente e l'entità del danno è incontrollata. Questi dati non consentono però di prevedere e prevenire le pullulazioni. In questo senso, di fondamentale importanza è il valore della cattura primaverile, che è fortemente correlata alla cattura totale dell'anno e all'entità del danno provocato dalla pullulazione. Perciò è stata determinata una soglia di cattura primaverile di 5.000 individui per trappola, che in caso di superamento permette di disporre di circa due mesi per pianificare delle misure di contenimento della pullulazione prima dello sfarfallamento della prima generazione.

In un altro studio, Faccoli & Stergulc (2006) hanno realizzato un modello per predire l'entità della popolazione dell'anno successivo, legato al successo riproduttivo della popolazione. Il modello è stato realizzato grazie ai dati ottenuti da nove anni di monitoraggio tramite trappole a feromoni delle popolazioni di *I. typographus* del nord-est Italia. Dal rapporto tra catture estive (corrispondenti alla prima generazione) e primaverili (corrispondenti agli adulti svernanti) è stato ottenuto un valore di soglia pari a 0,62: valori inferiori indicano un decremento per l'anno successivo e valori superiori sono indice di una popolazione in crescita.

In condizioni normali le popolazioni di bostrico tipografo si mantengono in stato di latenza grazie a fattori naturali in grado di controllare ed estinguere piccoli focolai di infestazione. In questi casi non sono necessari interventi gestionali.

I. typographus ha numerosi nemici naturali tra predatori e parassiti, che agiscono in diverse fasi del suo sviluppo e contribuiscono a dimensionare le sue popolazioni. Alcuni esempi sono gli imenotteri *Roptrocerus xylophagorum* (Hymenoptera: Torymidae) e *Coleoides bostrychorum* (Hymenoptera: Braconidae) che sono ecto-parassiti delle larve dello scolitide (Faccoli, 2002). Gli individui adulti vengono invece attaccati da imenotteri come *Tomicobia seitneri* (Hymenoptera: Pteromalidae) e *Ropalophorus clavicornis* (Hymenoptera: Braconidae) (Wegensteiner *et al.*, 2017). Altri predatori del bostrico sono i ditteri del genere *Medetera* (Diptera: Dolichopodidae) (Kasumović *et al.*, 2018) e il coleottero cleridae *Thanasimus formicarius*. Anche se non è stato dimostrato, si ipotizza che gli inverni più caldi previsti per i prossimi anni possano

umentare la mortalità dello scolitide a causa di predazione, parassitismo o malattie fungine e quindi limitare le infestazioni dell'anno successivo (Wermelinger *et al.*, 2012).

In caso di focolai estesi o di pullulazioni i fattori naturali non riescono a contrastare l'infestazione e si rendono necessarie delle misure attive. La più efficace misura di contenimento delle infestazioni da bostrico tipografo è l'individuazione precoce degli alberi infestati e il loro immediato abbattimento, seguito da esbosco o scortecciatura. Perché l'intervento fitosanitario sia efficace, è indispensabile che avvenga prima che i nuovi adulti escano dalla pianta. Non è facile individuare il focolaio nelle prime fasi della colonizzazione, soprattutto se si tratta di un attacco autunnale, e in seguito all'individuazione del focolaio serve ulteriore tempo per organizzare l'intervento fitosanitario; è quindi arduo intervenire tempestivamente e le operazioni sono prevalentemente successive, quando ormai la nuova generazione è sfarfallata.

Le intense pullulazioni degli ultimi anni e la possibile comparsa di una terza generazione rendono sempre più difficile attuare misure di lotta e contenimento. Rimane comunque importante adottare delle accortezze che limitino la pullulazione, come scortecciare i tronchi in catasta e rimuovere in breve tempo il materiale legnoso a seguito di schianti. La rimozione di piante morte in seguito all'attacco del bostrico tipografo, dalle quali l'insetto è già sfarfallato, è invece inutile perché non limita le popolazioni di bostrico e può avere effetti negativi sugli antagonisti dello scolitide, i quali possono ancora essere presenti all'interno della pianta attaccata (Salvadori *et al.*, 2021).

1.5 Obiettivi del presente studio

L'obiettivo di questo studio era quello di determinare il tasso di sopravvivenza invernale di *Ips typographus* nell'inverno 2022-2023, in relazione all'esposizione alla radiazione solare sui fusti e alla fase di sviluppo dell'insetto. Sono state analizzate la numerosità degli adulti sotto corteccia e la sopravvivenza dello scolitide sulla stessa pianta sulla porzione esposta a nord e quella a sud, nell'ipotesi che la quantità di radiazione ricevuta dalla corteccia influenzi lo sviluppo e la sopravvivenza del coleottero. Ci si aspettava che la numerosità sotto corteccia fosse superiore a nord visti gli inferiori sbalzi di temperatura quotidiani, e che la sopravvivenza fosse maggiore a sud perché durante l'anno una maggiore esposizione alla radiazione solare contribuisce a scaldare la corteccia, mantenendo una temperatura media più alta rispetto alla corteccia esposta a nord. Il lavoro ha analizzato anche lo stadio di sviluppo prevalente tra i coleotteri presenti nei campioni e la proporzione tra individui maschi e femmine nei due momenti in cui sono stati effettuati i prelievi.

2. Materiali e metodi

2.1 Inquadramento e scelta dei siti di studio

Il presente studio si è svolto un'area molto vasta che copre una buona porzione dell'arco alpino orientale coinvolgendo le regioni Lombardia, Trentino-Alto Adige, Veneto e Friuli Venezia Giulia.

Questa zona viene suddivisa in tre aree, in funzione del gradiente climatico e geografico: le zone strettamente alpine o endalpiche comprendono le aree a quote più alte. Le zone prealpine comprendono le aree mesalpine o mesoterme (prevalentemente montane) e esalpine o macroterme (perlopiù collinari con quote in genere inferiori ai 1.000 m s.l.m.). A livello litologico, le alpi nord-orientali possono avere composizione acidofila, prevalentemente basaltica, o basofila, generalmente dolomitica, fattore che condiziona sia la pedologia che le categorie vegetazionali che si insediano nell'area. Rispetto al tipo di vegetazione, nelle zone endalpine prevalgono conifere boreali come larice (*Larix decidua*), pino cembro (*Pinus cembra*) e pino mugo (*Pinus mugo*), mentre la sola latifolia che presenta una notevole diffusione è l'ontano verde (*Alnus viridis*). Le zone mesalpine sono dominate da abete rosso (*Picea abies*), abete bianco (*Abies alba*) e faggio (*Fagus sylvatica*), che si ritrova spesso in formazioni miste alle quote più alte e domina anche in faggete pure alle altitudini inferiori. Su substrati carbonatici con grandi pendenze e poco sviluppati, dove la disponibilità idrica è molto scarsa, si ritrovano pinete di pino silvestre (*Pinus sylvestris*). Le zone esalpine presentano vegetazioni molto varie in cui predominano latifoglie termofile come il faggio, il carpino nero (*Ostrya carpinifolia*) e l'orniello (*Fraxinus ornus*). Queste zone determinano anche il limite inferiore dell'areale dell'abete rosso, che è largamente diffuso in peccete coetaneiformi di impianto antropico.

Le zone che sono state analizzate in questo studio, distribuite nella vasta area delle Alpi centro-orientali, sono comprese fra le quote di 600 e 1.600 m s.l.m. e presentano peccete quasi sempre pure e coetaneiformi.

I campionamenti sono stati svolti in 11 differenti aree che comprendono 4 regioni e 6 province diverse. Per ogni area sono stati individuati 3 siti a tre diverse quote crescenti comprese tra 600 e 1.600 s.l.m. per un totale di 33 siti (**Figura 2**).

Per ogni sito, sono state rilevate la posizione GPS e la quota ed è stato disposto un data logger per il rilievo termometrico. È stato inoltre valutato il colore prevalente delle chiome, che per attacchi estivi determinati dalla seconda generazione dovrebbe essere verde o rosso.

Le aree di studio sono state scelte selezionando zone fortemente colpite da recenti attacchi di bostrico. Con l'aiuto dei servizi forestali locali e di esperti del settore sono stati individuati i siti, in modo che per ogni area facessero parte dello stesso bosco e

contenessero la stessa popolazione di bostrico. In particolare sono stati cercati alberi infestati dalla generazione svernante, che nella maggior parte dei casi è la seconda generazione di bostrico tipografo, ma a quote elevate poteva trattarsi della prima. L'identificazione di questi nuclei di infestazione ha comportato la ricerca di gruppi di alberi con chioma ancora verde ma trasparente oppure arrossata, sintomi caratteristico degli attacchi estivi della seconda generazione.

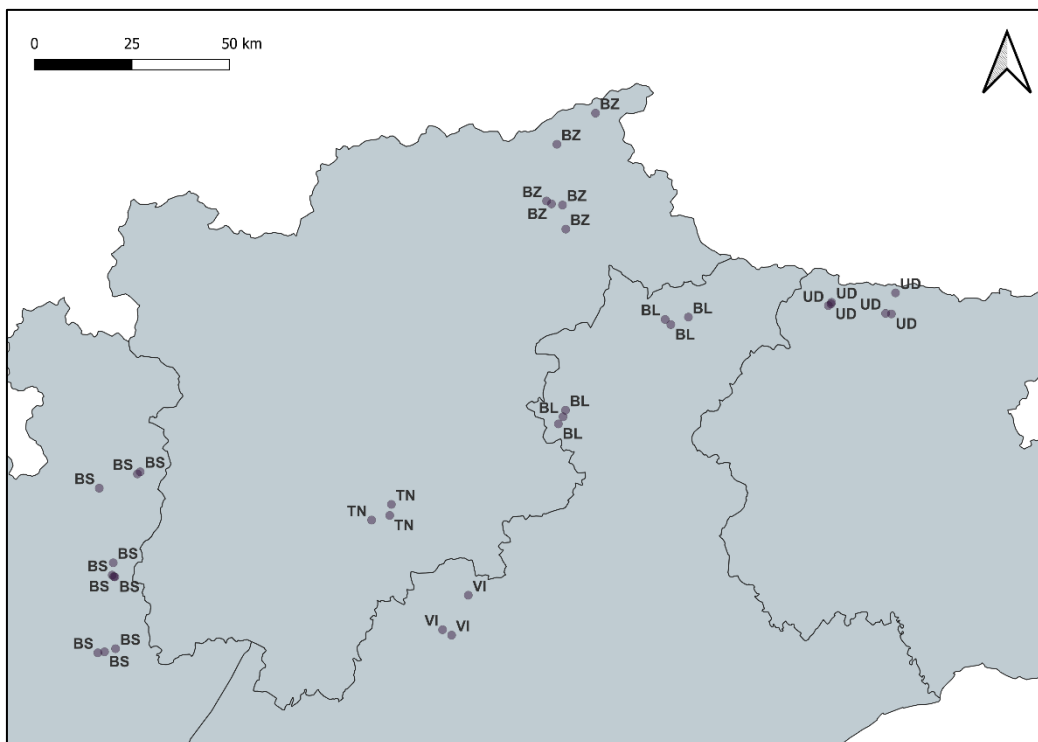


Figura 2: Localizzazione dei siti di campionamento

2.2 Prelievo dei campioni

I campionamenti sono stati svolti in due periodi distinti, a novembre 2022 e tra marzo e aprile 2023 (Figura 3). Ciò ha consentito di raccogliere dati relativi alle generazioni svernanti di bostrico tipografo sia prima che dopo l'inverno.

misurazione temperatura							
campionamento	analisi campioni	analisi dati preliminari	campionamento	analisi campioni	analisi dati		
nov-22	dic-22	gen-23	feb-23	mar-23	apr-23	mag-23	giu-23

Figura 3: Timeline del lavoro

Individuata la pianta bostricata di interesse, è stato necessario capire a che altezza prelevare il campione. L'attacco primario del bostrico avviene nella porzione centrale del fusto, ma è possibile che le seconde generazioni o le femmine riemergenti attacchino anche la parte basale del fusto. In alcuni casi è stato abbattuto l'albero da

campionare, ma i prelievi sono avvenuti nella maggior parte dei casi sugli alberi in piedi, da terra o con l'utilizzo di una scala. L'operazione è stata possibile in presenza di uno stadio avanzato dell'attacco e con la parte bassa del fusto colonizzata da *I. typographus*. Questa scelta ha consentito di snellire le tempistiche del campionamento, non ha richiesto la presenza di autorizzazioni e operai specializzati all'abbattimento ed è risultata ugualmente rappresentativa dell'entità dell'attacco.

I campioni sono stati prelevati grazie all'utilizzo di un estrattore in acciaio appositamente realizzato, provvisto di un manico e una parte cilindrica di diametro 13 cm fissata su di esso con un'asse trasversale. Lo strumento, che consente di asportare una porzione di corteccia di 1,77 dm², è affilato alla base e presenta una leggera curvatura della "lama" che ne consente una migliore adesione al tronco. L'estrattore viene impugnato dall'operatore mentre con un martello si colpisce il bordo del cilindro al fine di far penetrare l'attrezzo nella corteccia (**Figura 4**). L'operazione è facilitata se il floema in quel punto è già stato degradato dal parassita; in questo modo il distacco della corteccia avviene senza difficoltà.



Figura 4: Utilizzo dell'estrattore per il prelievo dei campioni

Il campione così prelevato è stato riposto in piastre Petri ventilate di diametro 15 cm, ovvero con un foro di diametro 5 cm al centro del coperchio chiuso con una rete metallica fine, in modo da permettere il passaggio di aria. La piastra è stata quindi sigillata con del nastro adesivo in modo da evitare la fuoriuscita dei coleotteri o il rovesciamento dei campioni durante il trasporto (**Figura 5**).

Per ogni sito sono state individuate tre piante e per ogni pianta sono stati estratti due campioni di corteccia, uno con esposizione nord e uno con esposizione sud, per un

totale di 6 campioni per sito, 18 per area e 198 complessivi. Lo stesso numero di campioni è stato prelevato nei due diversi periodi di campionamento. Durante il secondo campionamento i prelievi sono stati effettuati sulle stesse piante campionate a novembre.



Figura 5: Campione di corteccia (sinistra) e conservazione dei campioni in laboratorio (destra).

2.3 Analisi di laboratorio

I campioni così raccolti in campo sono stati trasferiti rapidamente in laboratorio per le successive analisi. Il laboratorio presenta temperatura controllata di circa 20°C, superiore alla soglia termica degli sfarfallamenti di 18°C. In tali condizioni gli insetti hanno completato il ciclo di sviluppo, quando necessario, e gli adulti hanno abbandonato la corteccia accumulandosi nello spazio libero della piastra Petri. La raccolta dei dati ha consistito nel controllo quotidiano dei campioni per una decina di giorni successivi al prelievo, nel conteggio degli adulti che spontaneamente sono fuoriusciti dal sito di svernamento e in seguito alla dissezione della corteccia per verificare l'eventuale presenza di esemplari morti.

Prima di dissezionare la corteccia sono stati contati i fori presenti sul campione; dovrebbe trattarsi esclusivamente di fori d'ingresso. Il numero di fori potrebbe essere una proxy della densità di colonizzazione, cioè del numero di gallerie sotto corteccia, non valutato in questo studio.

L'analisi distruttiva dei campioni è stata effettuata rompendo manualmente in piccoli pezzi il disco di corteccia per poter estrarre e contare i coleotteri vivi e morti, larve e pupae e possibili antagonisti di *I. typographus* presenti nel campione. La mortalità è stata valutata visivamente come esposto da Faccoli (2002): gli insetti sono stati considerati morti in caso di assenza di movimento, deformazioni o evidenze di infezioni fungine o batteriche. Lo stadio di sviluppo e di maturità per lo stadio adulto di *I. typographus* è stato osservato e annotato per ciascun campione. La maturità degli

adulti è stata valutata visivamente sulla base della colorazione del corpo: adulti immaturi hanno colorazioni chiare mentre adulti maturi presentano colore marrone scuro. Nel dissezionare la corteccia, è stata anche annotata la presenza di nemici naturali e di individui morti di bostrico tipografo parassitizzati, cioè con micelio fungino bianco che usciva dall'esoscheletro.

Al fine di determinare la sex-ratio, sono stati analizzati allo stereoscopio gli individui vivi presenti nei campioni in cui sono stati trovati almeno 6 adulti vivi, andando a determinarne il sesso secondo le caratteristiche distintive descritte da Schlyter & Cederholm (1981) e presentate al paragrafo 1.2.

2.4 Dati climatici

I dati climatici per i siti sperimentali sono stati acquisiti dagli archivi dati delle Agenzie Regionali per la Prevenzione e Protezione Ambientale e della Provincia autonoma di Bolzano, ottenendo i valori di temperatura minima, media e massima giornaliera e di precipitazione giornaliera. È stata scelta una stazione meteorologica per regione rappresentativa dei siti di studio. In particolare:

- Veneto: Agordo (BL), 611 m s.l.m. (ARPAV, Servizio Meteorologico)
- Lombardia: Edolo (BS), 720 m s.l.m. (ARPA Lombardia, Meteo e clima)
- Friuli Venezia Giulia: Sappada (UD), 1.250 m s.l.m. (ARPAV, Servizio Meteorologico)
- Trentino-Alto Adige: Brunico (BZ), 838 m s.l.m. (Provincia autonoma di Bolzano, Meteo Alto Adige).

2.5 Analisi dei dati

I dati rilevati dai campionamenti pre-svernamento e post-svernamento sono stati raccolti in due fogli di calcolo Excel. Sono stati rimossi dal dataset i campioni non colonizzati: non sono stati utilizzati perché non sono di interesse per le analisi e derivano da un errore di campionamento.

Sono stati innanzitutto messi a confronto i diversi stadi di sviluppo, per ottenere la percentuale degli adulti che hanno raggiunto la maturità prima e dopo l'inverno.

In seguito, il numero di individui vivi e morti trovati in ciascun campione è stato diviso per la superficie del campione (raggio 1,3 dm = 1,767 dm²) ottenendo il numero per unità di superficie al dm², che chiameremo successivamente "numerosità degli adulti sotto corteccia".

Per garantire un'adeguata analisi della sopravvivenza invernale della popolazione di bostrico tipografo è preferibile, per quanto possibile, limitare l'influenza di una mortalità pregressa al momento del campionamento; perciò si è scelto di considerare solo la totalità degli individui della popolazione pre-invernale e i vivi di quella post-

invernale. Quindi i dati riportati relativi alla numerosità degli adulti sotto corteccia saranno totali per il campionamento pre-svernamento e relativi agli individui vivi post-svernamento.

Sono state calcolate la numerosità medie degli adulti sotto corteccia pre e post-svernamento relative a provincia, esposizione e totali. È stata inoltre calcolata la densità media di fori/dm² per provincia e totale considerando l'insieme dei dati raccolti, visto che si presume che il numero di fori non si modifichi nel corso dell'inverno.

La sopravvivenza percentuale è stata calcolata in relazione a provincia ed esposizione secondo la seguente formula (**Formula 1**):

$$\text{sopravvivenza} = \frac{n^{\circ} \text{ adulti vivi post}}{n^{\circ} \text{ tot adulti pre}} * 100$$

Formula 1

per differenza si è ottenuta la mortalità invernale ed è stata infine determinata la “sex ratio” espressa come valore percentuale di individui maschi sul totale degli individui sessati, prima e dopo l'inverno.

Un'eventuale differenza nelle medie dei dati di numerosità pre e post-inverno è stata valutata con il test di Kruskal-Wallis, che è l'alternativa non parametrica del test di analisi della varianza ANOVA.

Al fine di una possibile diversità nei risultati ottenuti sulla diversa esposizione (N e S) dei campioni sono stati applicati i test di analisi della varianza ANOVA per i dati con distribuzione normale e Kruskal-Wallis per i dati che non è stato possibile normalizzare. Per testare la normalità della distribuzione dei gruppi di dati, è stato utilizzato il test di Shapiro-Wilk tramite il programma “RStudio”. Un'assunzione preliminare di entrambe le analisi è l'omogeneità delle varianze o omoschedasticità, che è stata verificata attraverso il test F.

I dataset sottoposti all'analisi della varianza rispetto all'esposizione sono stati:

- Numerosità degli adulti sotto corteccia pre e post-svernamento;
- Sopravvivenza percentuale;
- Sex-ratio pre e post-svernamento.

I test relativi all'analisi della varianza e delle medie sono stati effettuati utilizzando il programma “RStudio”. Il dataset della numerosità totale pre-svernamento è stato normalizzato mediante la **Formula 2** ed è stata quindi eseguita l'analisi della varianza a una via (One Way ANOVA) confrontando esposizione a nord e a sud per l'intero dataset e in relazione ad ogni provincia.

$$y = \sqrt{x}$$

Formula 2

I dati relativi alla numerosità degli adulti sotto corteccia post-svernamento sono stati portati verso una distribuzione normale applicando la **Formula 2**, ma si è dovuto comunque applicare il test non parametrico di Kruskal-Wallis.

Il test non parametrico di Kruskal-Wallis è stato applicato anche ai dataset di sopravvivenza invernale pre e post-svernamento, senza ulteriori correzioni statistiche. Per ogni test si è considerato un livello di significatività pari a $p = 0,05$.

Per i dati termo-pluviometrici per ogni mese e stazione meteorologica sono state determinate le temperature minime, medie e massime e l'escursione termica giornaliera massima. Allo scopo di effettuare delle considerazioni sulla fenologia di *I. typographus*, per ogni stazione è stato calcolato il numero di giorni in cui la temperatura media è scesa sotto 0°C, quelli in cui ha assunto valori tra 0 e 5 °C e ha superato i 5°C. È stata inoltre presa nota dei periodi superiori a cinque giorni nei quali la temperatura media giornaliera è rimasta all'interno di uno di questi range.

3. Risultati

3.1 Stadio di sviluppo prevalente

Dai risultati circa la fase di sviluppo si evince che nella grande maggioranza dei campioni (97%) il bostrico tipografo ha raggiunto lo stadio adulto prima della diapausa invernale e di questi l'82,2% ha raggiunto maturità (**Tabella 1**). Dopo lo svernamento quasi la totalità degli individui (99%) è costituito da adulti maturi.

	Pre-svernamento	Post-svernamento
larve	3,1	0,0
pupe	0,0	0,0
adulti immaturi	12,4	1,2
adulti maturi	82,2	98,8
adulti parentali	2,3	0,0
totale	100,0%	100,0%

*Tabella 1: Fasi di sviluppo prevalenti di *I. typographus* (%) pre e post-svernamento*

Per quanto riguarda la colorazione della chioma degli alberi campionati, sia prima che dopo l'inverno il 53% dei siti presentava alberi con chiome verdi, il 43% rosse e il 3% grigie. I risultati sono identici per i due momenti di campionamento, in quanto le piante a novembre sono già in riposo vegetativo e i sintomi non cambiano fino alla primavera successiva.

3.2 Numerosità degli adulti sotto corteccia

Una differenza significativa è stata rilevata tra le numerosità relative ai due periodi di campionamento (Kruskal-Wallis: $\chi^2_{31}=62,253$, $p<0,001$): i valori medi per l'intero studio sono stati di 9,6 adulti/dm² prima dell'inverno e di 6,2 adulti/dm² dopo l'inverno.

Si osservano alcune differenze fra province: valori minimi a Trento e Bolzano con numerosità da 5,5 (pre) a 4,0 (post) adulti/dm² per Trento e da 6,4 (pre) a 2,5 (post) adulti/dm² per Bolzano. Si ritrovano i massimi a Udine con valori da 14,0 (pre) a 7,9 (post) adulti/dm² (**Figura 6**).

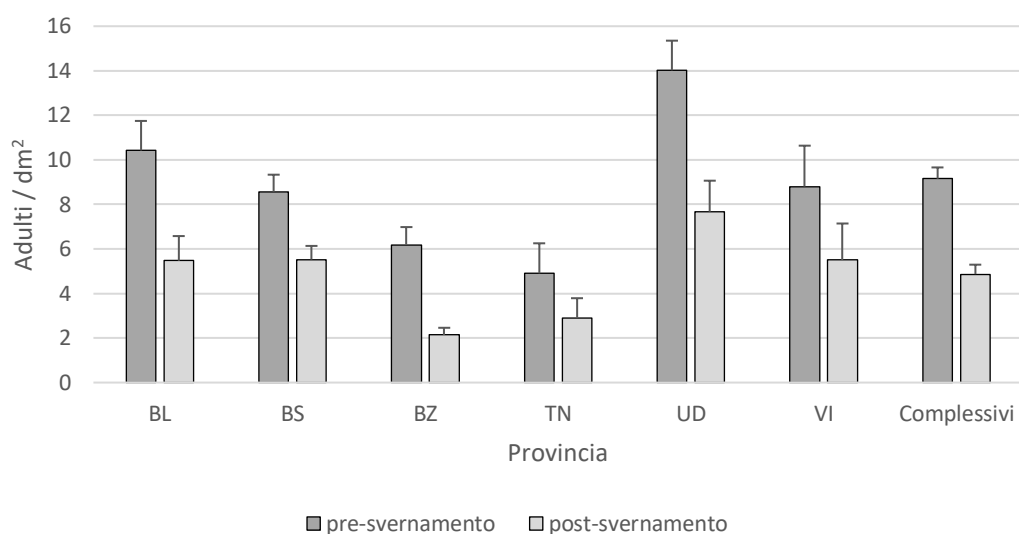


Figura 6: Numero di adulti per dm² di corteccia per provincia pre (totali) e post-svernamento (vivi)

Per quanto riguarda l'esposizione della corteccia a nord e a sud, a novembre la media è stata di 10,4 adulti/dm² a nord e 8,7 adulti/dm² a sud (**Figura 7**), con differenze medie non significative (ANOVA: $F_{1,181}=2,932$, $p=0,089$), tranne nella provincia di Udine (ANOVA: $F_{1,171}=2,321$, $p=0,022$) dove il numero di adulti risulta significativamente maggiore a nord con valori di 17,1 adulti/dm² e 11,0 adulti/dm² a sud. Per il campionamento di marzo/aprile le numerosità degli adulti sotto corteccia sono pari a 5,6 adulti/dm² a nord e 5,8 adulti/dm² a sud (**Figura 7**) e anche in questo caso non si riscontra una diversità fra esposizioni (Kruskal-Wallis: $\chi^2_1=0,025$, $p=0,873$).

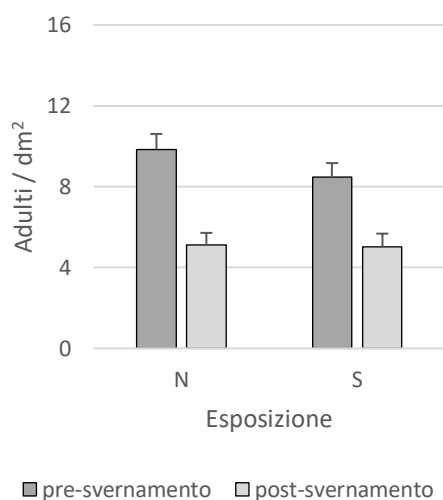


Figura 7: numero di adulti per dm² di corteccia in relazione all'esposizione del fusto pre e post-svernamento.

Nella **Tabella 2** vengono riportati i risultati relativi alla densità di fori per unità di superficie (dm²) presenti sulle cortecce in relazione alla provincia. I fori osservati sui campioni possono essere indice della densità di colonizzazione delle cortecce in quanto

costituiscono i siti di ingresso degli adulti che hanno avviato la seconda generazione. La densità media totale è di 3,6 fori/dm².

Provincia	fori / dm ²
BL	3,2
BS	2,9
BZ	5,7
TN	2,9
UD	2,9
VI	3,6
Totale	3,6

Tabella 2: Densità di fori per provincia e totali

3.3 Sopravvivenza

La sopravvivenza invernale media riscontrata nell'intera area di studio, calcolata sui dati di 170 campioni, risulta essere 65,5%, con valore massimo di 80,4% nella provincia di Vicenza e valore minimo di 46,3% nella provincia di Bolzano (**Figura 8**).

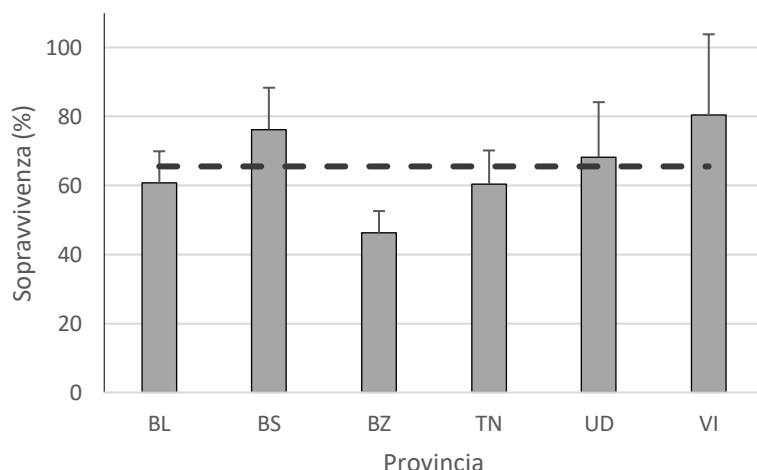


Figura 8: Sopravvivenza percentuale nelle diverse province. La linea tratteggiata rappresenta il valore medio dell'intera area di studio.

I campioni di corteccia con esposizione nord presentano una sopravvivenza invernale media di 59,1%, mentre quelli con esposizione sud del 73,8%. Non è stata riscontrata una differenza significativa nella sopravvivenza tra i campioni con diversa esposizione (Kruskal-Wallis: $\chi^2_1=1,095$, $p=0,295$).

3.4 Sex ratio

La determinazione del sesso è stata effettuata solo per i campioni contenenti un numero di adulti vivi superiore a 6, ovvero 103 sul totale di 198 per il campionamento di novembre e 74 su un totale di 198 per il campionamento di marzo/aprile. La "sex

ratio”, ovvero il rapporto tra maschi e femmine, è di 44,1% prima dell’inverno e di 31,7% dopo l’inverno. Per quanto riguarda i dati riscontrati a livello provinciale, il valore percentuale massimo di maschi si ritrova nella provincia di Bolzano con un valore di 52% pre-svernamento e 42% post-svernamento, mentre il minimo corrisponde ad un 32% a Belluno pre-svernamento e ad un 24% a Trento post-svernamento (**Tabella 3**). Per quanto riguarda l’esposizione, a nord si ha un valore del 42% pre e 33% post-svernamento, mentre a sud 47% pre e 30% post-svernamento. Si nota che la sex ratio rilevata diminuisce nel corso dell’inverno; significa che sul totale abbiamo meno maschi in primavera rispetto all’autunno.

Provincia	Pre-svernamento	Post-svernamento
BL	31,9	27,1
BS	50,6	37,4
BZ	52,3	42,1
TN	37,9	23,8
UD	43,8	31,0
VI	40,7	24,2
Totale	44,1	31,7

Tabella 3: Sex ratio in relazione alla provincia e valore medio per l’intera area di studio.

3.5 Dati meteorologici

Le temperature medie delle stazioni a novembre variano tra i -2 e i 5 °C, a dicembre tra i -2 e gli 8°C, a gennaio tra i -2 e i 6°C, a febbraio e a marzo tra -1 e i 7 °C (**Tabella 4**). Nel corso del periodo considerato, ad Agordo la temperatura massima registrata è di 19°C il giorno 22 marzo e la minima di -9°C il giorno 10 febbraio. La stazione di Edolo ha registrato la temperatura massima di 22°C il giorno 22 marzo e la minima di -6 il giorno 10 febbraio. A Sappada la temperatura massima registrata è di 14°C il giorno 14 febbraio e la minima di -15°C il giorno 9 febbraio. La stazione di Brunico ha registrato la temperatura massima di 19°C il giorno 22 marzo e la minima di -16 il giorno 13 dicembre.

Mese	T media (°C)			
	Agordo (BL)	Edolo (BS)	Sappada (UD)	Brunico (BZ)
nov-22	5,1	3,3	2,0	-2,3
dic-22	0,4	8,4	-2,2	0,7
gen-23	1,2	5,9	-2,1	5,5
feb-23	2,6	7,0	-0,8	3,0
mar-23	7,1	3,9	2,5	-1,9
Totale	3,3	5,6	-0,1	1,0

Tabella 4: Temperature medie mensili e dell’intero periodo delle quattro stazioni meteorologiche

Analizzando i dati di temperatura, si evince che i periodi più freddi sono a metà dicembre (dall’11 al 15), tra il 25 e il 31 gennaio e tra il 6 e il 12 febbraio. Le

temperature più calde si sono invece registrate nei primi giorni di novembre (dall'1 al 4), tra il 21 e il 25 febbraio e sono aumentate a marzo, soprattutto tra il 9 e il 13 e il 21 e il 25. Le escursioni termiche giornaliere massime si rilevano a metà febbraio, e proseguono con valori elevati fino alla fine del mese (**Figura 9**).

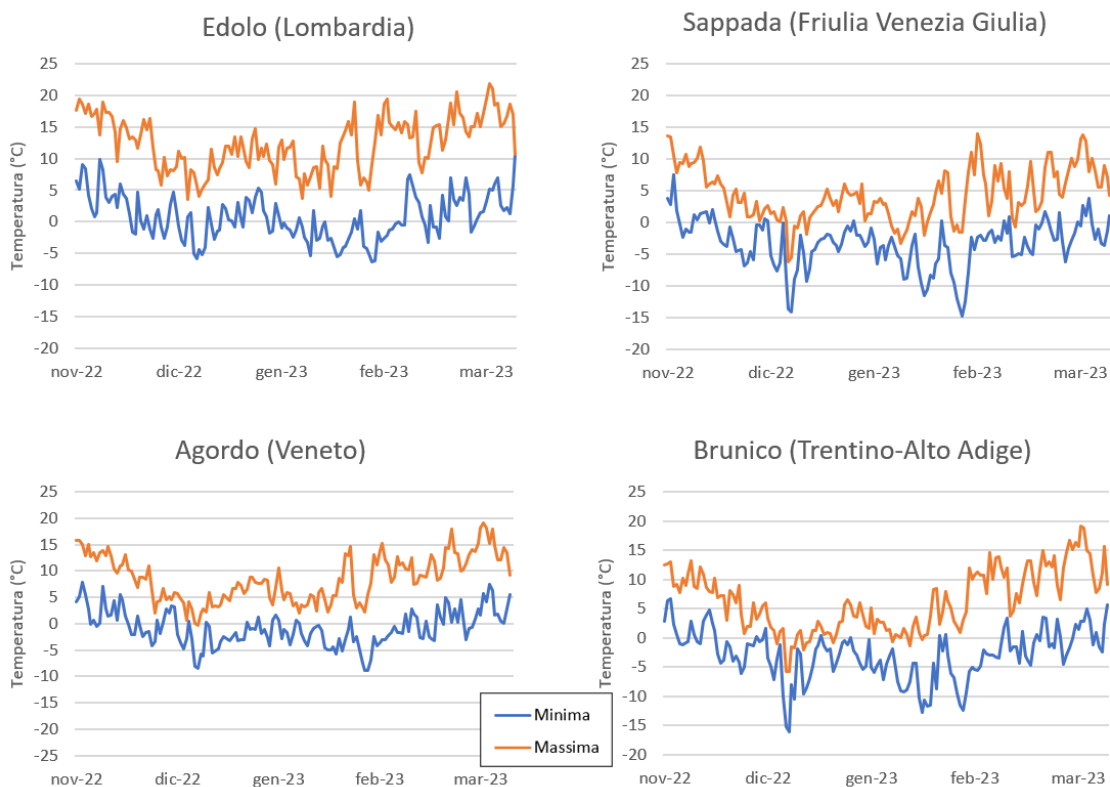


Figura 9: Andamento delle temperature medie, massime e minime giornaliere 01/11/2022-31/03/2023 nelle stazioni di Agordo (BL), Edolo (BS), Sappada (UD) e Brunico (BZ)

Nella **Tabella 5** viene riportato il numero di giorni totali, in cui la temperatura media è scesa sotto 0°C, quelli in cui ha assunto valori tra 0 e 5 °C e ha superato i 5°C.

	Totali	<0	0<T<5	>5
Agordo (BL)	151	31	74	47
Edolo (BS)	151	5	65	81
Sappada (UD)	151	73	66	12
Brunico (BZ)	151	59	65	27

Tabella 5: Numero di giorni totali fra i 2 campionamenti e numero di giorni con temperature medie inferiori a 0°C, tra 0 e 5°C e superiori a 5°C. I dati sono relativi alle quattro stazioni prese in analisi.

Le precipitazioni piovose e nevose (**Tabella 6**) cumulate hanno valori molto diversi per le quattro stazioni considerate, sono massime a Edolo dove sono stati rilevati dei valori cumulati di precipitazione di 1.060 mm nell'intero periodo, quattro volte superiori rispetto alle altre stazioni (Agordo 257 mm, Sappada 260 mm, Brunico 125 mm). Il 14

marzo 2023 a Edolo è anche stato registrato un grosso evento piovoso di 244 mm. Ad Agordo e Sappada la precipitazione cumulata è assimilabile a quella del regime pluviometrico alpino ed è stata più consistente nei mesi di novembre e dicembre. La stazione di Brunico ha registrato valori di precipitazione molto scarsi in tutto il corso del periodo.

Mese	Agordo (BL)	Edolo (BS)	Sappada (UD)	Brunico (BZ)
nov-22	77	108	76	17
dic-22	107	166	85	4
gen-23	38	140	46	34
feb-23	0	180	3	43
mar-23	34	466	49	27
Totale	257	1060	260	125

Tabella 6: Precipitazioni cumulate (mm) mensili e totali del periodo considerato per le quattro stazioni prese in analisi

4. Discussione

4.1 Stadio di sviluppo prevalente

Alcuni studi condotti in Scandinavia dimostrano come l'aumento delle temperature provocato dal cambiamento climatico stia modificando le dinamiche delle popolazioni di *I. typographus* (Lange *et al.*, 2006; Jönsson *et al.*, 2007). Due studi distinti, uno condotto nel sud della Svezia da Jönsson *et al.* (2007) e l'altro in Norvegia da Lange *et al.* (2006), hanno dimostrato come un anticipo del volo primaverile e uno sviluppo più veloce incrementano la probabilità di completare la seconda generazione in popolazioni un tempo monovoltine. Sulle Alpi orientali è stata dimostrata la stessa tendenza (Faccoli, 2009).

Faccoli (2002) osserva che la mortalità invernale degli stadi preimmaginali è molto alta, perciò il raggiungimento della maturità della seconda generazione prima dell'inverno può ridurre la mortalità durante la stagione invernale. Questo aspetto ha un grosso impatto sull'intensità delle infestazioni attese per l'anno successivo. Dove le generazioni sono solo due, il completo sviluppo della seconda generazione prima dell'inverno riduce la mortalità invernale. Nelle regioni più calde dell'Europa meridionale, e a basse quote, il cambiamento climatico stimola la comparsa di una terza generazione tardo-estiva (Faccoli, 2009; Wermelinger *et al.*, 2012), che non raggiungerà la maturità prima dell'inverno con probabile maggiore mortalità invernale. Rispetto ai campionamenti condotti in questo studio, si attendeva di trovare una seconda generazione in parte costituita da stadi preimmaginali e in parte da adulti immaturi e maturi. Viste le quote di campionamento non sono stati trovati segnali dell'avvio di una terza generazione. I risultati ottenuti dai campioni estratti a novembre evidenziano tuttavia una massiccia presenza di adulti maturi, una parte di immaturi e una limitata presenza di larve, attorno al 3%. Dopo l'inverno quasi la totalità degli individui sopravvissuti era costituita da adulti maturi. Si presume quindi che la maturazione degli adulti sia continuata durante la diapausa invernale, cosa improbabile visto le basse temperature, oppure che gli adulti immaturi siano morti nel corso dell'inverno, come osservato anche in precedenti studi (Faccoli, 2002). Non sono invece stati trovati stadi di sviluppo preimmaginali di *I. typographus* nel campionamento di marzo/aprile, in quanto presumibilmente morti durante l'inverno e rapidamente degradati.

Gli attacchi della seconda generazione di bostrico tipografo sono difficilmente individuabili nelle prime settimane dall'inizio della colonizzazione e spesso non si osservano sintomi evidenti fino a primavera, perché la chioma si mantiene verde. Questo avviene perché verso la fine dell'estate termina la stagione vegetativa dell'abete rosso alle medie latitudini, con formazione del legno di chiusura e riduzione dei flussi linfatici, e spesso gli attacchi della seconda o della terza generazione sono

successivi o concomitanti a questo evento. Nel presente studio, la scelta delle piante da campionare ha rispecchiato la sintomatologia di un attacco di seconda generazione, talvolta con chiome già arrossate e talvolta con chiome ancora verdi in relazione all'attività fisiologica della pianta ospite. Più della metà delle piante campionate presentava chioma verde e la rimanente parte denotava una colorazione rossa. L'arrossamento della chioma può essere indice di un attacco della generazione sorella relativa alla prima generazione o ad un attacco della seconda generazione precedente all'inizio del riposo vegetativo. Peraltro l'andamento particolarmente caldo e siccitoso dell'estate 2022 ha accelerato la comparsa dei sintomi di infestazione indotti dagli attacchi della seconda generazione.

4.2 Numerosità degli adulti sotto corteccia

Per chiarire le scelte dei dati riportati, sono necessarie alcune considerazioni. La diapausa invernale per il bostrico tipografo può cominciare già da agosto e ha probabilmente influenzato la mortalità del coleottero tra agosto e novembre. Perciò la mortalità osservata a novembre è verosimilmente dovuta sia a fattori esterni come attacchi fungini che agli effetti della diapausa già iniziata.

Il numero di coleotteri per unità di superficie presenti sotto corteccia assume un ruolo importante nello sviluppo dei singoli individui, perché può condizionare le risorse disponibili e quindi l'accumulo di riserve necessarie per il volo, la riproduzione e lo svernamento. Numerosità elevate possono inoltre indurre la comparsa di una generazione sorella, ovvero la riemergenza di femmine che andranno a cercare un'altra pianta da colonizzare entro la quale completare la deposizione delle uova ancora disponibili. La numerosità di coleotteri per unità di superficie dipende fortemente dal numero di possibili ospiti, cioè dalla presenza di piante stressate, e dalle dimensioni della popolazione di *I. typographus* (Anderbrant *et al.*, 1985; Faccoli, 2009). In seguito a schianti da vento o neve che interessano ampie aree, oppure se la condizione di stress dell'abete rosso è diffusa in territori molto vasti e per lunghi periodi, possono innescarsi forti pullulazioni che portano anche alla colonizzazione delle piante sane e aumentano la densità media di colonizzazione delle cortecce.

Le temperature nelle cortecce, sito di sviluppo del bostrico tipografo, non corrispondono alla temperatura dell'aria. Come riportato da Harding & Rvan (1985), la temperatura del floema è fortemente condizionata dalla luce del sole diretta oltre che dalla temperatura dell'aria. Cortecce esposte a sud hanno dunque temperature più alte rispetto a quelle atmosferiche nel periodo diurno (Faccoli, 2009). Il raggiungimento di temperature più elevate delle cortecce esposte a sud durante il giorno lascia presupporre che nel corso della notte la temperatura dell'intero floema diventi omogenea, e che quindi il lato della pianta con esposizione sud subisca un'escursione termica superiore. Ci si aspettava che la numerosità degli adulti sotto

corteccia fosse superiore a nord visti gli inferiori sbalzi di temperatura quotidiani che durante l'estate possono creare condizioni meno favorevoli allo sviluppo di *I. typographus*. Durante l'inverno l'incidenza della radiazione solare può invece mitigare le temperature rigide consentendo una sopravvivenza maggiore. Tali ipotesi sono state confermate nei campioni analizzati, in quanto la sopravvivenza riscontrata a nord, pari a 59,1%, risulta essere inferiore rispetto a sud (73,8%), benché con differenze non significative. Un'analisi sull'esposizione era già effettuata da Faccoli (2002), ma anche in quel caso non si erano notate differenze significative nel numero di adulti.

I risultati ottenuti dallo studio evidenziano numerosità degli adulti sotto corteccia molto alte, che in alcuni siti sono superiori ai 15 adulti/dm². I valori sono mediamente più alti prima dell'inverno rispetto al secondo campionamento: oltre alla mortalità, si può ipotizzare che alcuni coleotteri siano migrati in substrati meno densamente colonizzati prima dello svernamento (Faccoli, 2002). Questo spostamento potrebbe essere spiegato dal consumo quasi completo del floema della pianta abbandonata, la cui corteccia fortemente danneggiata non è più in grado di garantire isolamento termico e fornire un adeguato sito per lo svernamento (Faccoli, 2002). Un'altra esigenza che spinge il coleottero a spostarsi prima dell'inverno è la ricerca di floema fresco da consumare prima della diapausa, in modo da accumulare energie per affrontare i periodi più rigidi (Doležal *et al.*, 2007). Durante i campionamenti, per alcuni campioni prelevati da piante in piedi nella parte inferiore del fusto, si sono potute osservare numerose gallerie di svernamento irregolari. Da questa osservazione si può supporre che la colonizzazione dell'area di corteccia prelevata fosse dovuta alle migrazioni avvenute alla fine dell'estate piuttosto che da esemplari sviluppatasi nel floema, e che gli individui si siano spostati da un substrato densamente colonizzato più in alto nel fusto verso la parte basale della stessa pianta.

I fori osservati sui campioni di corteccia sono in gran parte di ingresso, ma è possibile che ce ne siano anche di sfarfallamento. Si ipotizza che alcuni adulti maturi possano essere sfarfallati dalle cortecce in autunno, prima dell'inizio della diapausa, per cercare una più idonea sede di svernamento. Questa eventualità è un caso marginale che può essersi verificata in alcuni substrati densamente colonizzati. I soli fori di ingresso potrebbero essere un indice della densità di colonizzazione, cioè del numero di gallerie sotto corteccia.

4.3 Sopravvivenza invernale di *Ips typographus*

Faccoli (2002), in uno studio condotto nell'inverno del 1997/98 relativo alla mortalità invernale del bostrico tipografo, ha riportato una diminuzione del 49% della popolazione sottocorticale di *I. typographus* tra novembre e aprile dell'anno successivo. La mortalità media osservata in questo studio (35%) è inferiore a tale valore. La sopravvivenza della popolazione può essere stata influenzata dalla scarsa

presenza di stadi preimmaginali. Lo stadio di sviluppo nel quale l'individuo di *I. typographus* affronta l'inverno è determinante in merito alla sua probabilità di sopravvivere, in quanto gli stadi preimmaginali presentano mortalità molto alte. A novembre 2022 gran parte degli adulti di seconda generazione hanno raggiunto la maturità prima della diapausa (82,2%). Gli adulti maturi sono lo stadio più resistente e quello che ha maggiori possibilità di superare l'inverno.

Oltre allo stadio di sviluppo, un importante fattore che incide sulla mortalità del bostrico durante l'inverno è il contenuto di lipidi accumulati prima della diapausa, che fornisce le riserve energetiche necessarie ai coleotteri per superare l'inverno e resistere alle basse temperature (Faccoli, 2002). La mortalità non è solo legata ai fattori abiotici, ma è causata anche dalla competizione larvale intraspecifica intervenuta prima che lo sviluppo si interrompesse con l'irrigidirsi delle condizioni climatiche (Lawson, 1993). Uno studio condotto da Faccoli (2002) individua la mortalità più alta nei campioni più densamente colonizzati. Gli scolitidi che si sviluppano ad alte densità di colonizzazione soffrono la competizione, che estende il tempo di sviluppo e condiziona il peso e la quantità di grasso contenuto nei giovani adulti, e quindi la loro resistenza e longevità (Anderbrant *et al.*, 1985). Di conseguenza, i coleotteri sono costretti a passare l'inverno come larve o giovani adulti; oppure gli adulti maturi possiedono meno riserve lipidiche, e siccome durante la diapausa invernale viene perso circa il 40-50% del peso corporeo (Botterweg, 1982), la probabilità di questi individui di superare l'inverno è minore rispetto a quella dei loro simili sviluppatisi in substrati poco densamente colonizzati (Faccoli, 2002). In questo senso, la competizione può diminuire la probabilità del bostrico tipografo di superare l'inverno, accelerando il declino delle popolazioni epidemiche; è probabile che questo fattore di mortalità sia stato rilevante anche nell'ambito del nostro studio.

Un'alta numerosità di adulti sotto corteccia potrebbe aver favorito la proliferazione di infezioni batteriche e fungine. All'interno dei campioni sono stati trovati molti individui morti con micelio bianco che usciva dall'esoscheletro; potrebbe trattarsi di *Beauveria bassiana*, un fungo endofita appartenente al phylum degli ascomiceti che attacca acari e insetti e provoca questo sintomo. Sono state anche osservate numerose pupe parassitizzate in fondo alla galleria larvale, svuotate da un endoparassitoide che ne era già uscito. In aggiunta sono stati ritrovati in diversi campioni individui di *Tomicobia seitneri* (Hymenoptera: Pteromalidae), anche se non sono stati quantificati. La presenza di questo imenottero parassitoide di *I. typographus* potrebbe avere un ruolo nella sopravvivenza del coleottero. Un importante fattore che influenza la sopravvivenza invernale di *I. typographus* è la dinamica di popolazione dei suoi nemici naturali. Inverni più caldi possano aumentare la mortalità dello scolitide a causa di predazione, parassitismo o malattie fungine e quindi limitare le infestazioni dell'anno successivo (Wermelinger *et al.*, 2012).

Le temperature molto rigide possono essere letali per le popolazioni di bostrico tipografo. Nei paesi del nord Europa, dove l'inverno è generalmente più lungo e freddo, la maggior parte dei coleotteri sverna nella lettiera spesso coperta dalla neve, che è un buon isolante termico (Christiansen & Bakke, 1988). In Italia, la maggior parte dei coleotteri maturi e tutti quelli giovani, oltre alle fasi preimmaginali, svernano sotto la corteccia di alberi in piedi. Le temperature, anche se meno rigide di quelle del nord Europa, possono avere effetti più devastanti sulla popolazione dell'insetto, soprattutto per quanto riguarda gli stadi più giovani, perché la corteccia non garantisce un isolamento termico pari a quello della neve (Faccoli, 2002). Come molti altri insetti, il bostrico tipografo ha sviluppato delle strategie come la sopraffusione o "supercooling" per evitare il congelamento e la cristallizzazione dei suoi liquidi corporei durante la stagione fredda. La sopraffusione è un fenomeno fisico che si verifica quando un fluido allo stato puro rimane allo stato liquido anche al di sotto della sua temperatura di solidificazione, grazie all'assenza di nuclei di aggregazione. L'organismo di *I. typographus* limita la presenza di centri di nucleazione dell'acqua tramite l'accumulo stagionale di una miscela di zuccheri e poli-oli che diminuiscono la concentrazione di molecole di acqua pura e aumentano la viscosità dei fluidi corporei (Košťál *et al.*, 2011). Secondo uno studio di Košťál *et al.* (2011), le popolazioni di bostrico del sud della Boemia diminuiscono la loro soglia di sopraffusione dal periodo di inizio della loro diapausa riproduttiva, nel corso di agosto e settembre, fino all'avvento dell'inverno. I valori rilevati passano da una soglia di -12°C a $-20/-22^{\circ}\text{C}$. La temperatura di sopraffusione minima è stata invece registrata da Annala (1969) in Finlandia nel corso di dicembre ed è pari a -32°C . Queste temperature vengono raramente raggiunte e mantenute per lunghi periodi alle medie latitudini. Ulteriori studi hanno notato che lo sviluppo e l'accumulo di ferite da freddo possono essere causa di mortalità a temperature molto superiori alla soglia di sopraffusione (Salt, 1961; Renault *et al.*, 2002). Pertanto le basse temperature possono provocare ferite da freddo in *I. typographus* e in tal modo ne influenzano la sopravvivenza invernale.

Nel presente studio le temperature minime dell'aria sono state di $-16,1^{\circ}\text{C}$, sebbene mantenute per periodi relativamente brevi. La corteccia funge da isolante, perciò le temperature minime percepite dagli insetti sotto corteccia sono state sicuramente più calde di quelle registrate e difficilmente è stata raggiunta la soglia di sopraffusione. Probabilmente la mortalità del bostrico tipografo calcolata ha avuto scarsa dipendenza dalla rigidità delle temperature, ma può essere stata in parte condizionata dallo sviluppo di ferite da freddo. In generale, nel corso della stagione invernale analizzata le temperature sono state elevate e questo aspetto ha probabilmente garantito una sopravvivenza più alta di *I. typographus* rispetto a quanto osservato da Faccoli (2002).

La temperatura minima che permette lo sviluppo dell'insetto è un'altra importante soglia da considerare tra i fattori che determinano la sopravvivenza invernale delle

popolazioni di bostrico tipografo. La temperatura di 5°C è stata definita da Annala (1969) come la soglia più bassa per l'attività sotto corteccia dell'insetto per le popolazioni scandinave, mentre in centro Europa sono stati riscontrati da Doležal *et al.* (2007) dei valori tra i 7 e i 12°C. All'abbassarsi delle temperature, nel corso dell'autunno, il metabolismo e i movimenti del coleottero rallentano ed esso continua a nutrirsi. Durante il periodo più freddo dell'inverno l'attività metabolica rallenta ulteriormente e l'insetto entra in diapausa, per poi riprendere a consumare floema tra febbraio e marzo, ben prima dell'inizio del volo primaverile (Doležal *et al.*, 2007). Uno studio compiuto in laboratorio nel sud della Boemia (Repubblica Ceca) da Košťál *et al.* (2011) ha analizzato la fenologia del bostrico tipografo durante il periodo invernale. È stato notato che sopra i 5°C i coleotteri consumano floema, se disponibile, nel sito di svernamento; tra gli 0 e i 5°C non si nutrono ma presentano ancora attività metabolica, mentre a temperature inferiori allo zero il metabolismo degli individui rallenta drasticamente. Alle temperature comprese tra gli 0 e i 5°C, *I. typographus* consuma rapidamente le riserve energetiche e non è in grado di nutrirsi. Se le temperature rimangono a lungo in questo range, le possibilità di sopravvivenza si riducono. Lo studio di Košťál *et al.* (2011) ha dimostrato che senza nutrirsi gli individui adulti di bostrico possono sopravvivere circa 5 settimane con alti consumi metabolici a 5°C.

Lo studio di Košťál *et al.* (2011) si basa sull'osservazione di temperature reali, mentre le nostre considerazioni sono condotte su temperature medie giornaliere: si è ritenuto possibile paragonare i due studi, in quanto non sono disponibili analisi degli effetti dell'escursione termica quotidiana su *I. typographus* e questa non dovrebbe avere un impatto rilevante sull'attività metabolica del coleottero. Dai dati termometrici analizzati in questo studio, risultano esserci numerosi periodi prolungati (superiori ai 5 giorni) nei quali le temperature medie rimangono tra gli 0 e i 5°C. Si ipotizza che questi periodi possano aver inciso sulla mortalità degli individui nel corso dell'inverno, soprattutto quelli sviluppatasi in cortecce densamente popolate.

Inoltre le temperature medie hanno assunto valori tra gli 0 e i 5°C per lunghi periodi, in particolare nel mese di febbraio. Questi lunghi periodi miti possono aver determinato una maggiore mortalità del coleottero, dovuta non al freddo bensì al consumo delle sostanze di riserva senza capacità di reintegrarle attraverso attività trofica.

L'ipotesi che la sopravvivenza fosse maggiore per le cortecce esposte a sud non è stata verificata dai dati raccolti in quanto non si sono osservate differenze significative fra i campioni con diversa esposizione. Probabilmente temperature più elevate hanno ridotto le differenze nelle condizioni microstazionali dei siti di svernamento, mitigando le differenze di mortalità rispetto alle diverse esposizioni della corteccia. Inoltre in condizioni di bosco denso anche le cortecce esposte a sud sono quasi sempre in condizioni di ombreggiamento, per cui paragonabili con quelle esposte a nord.

4.4 Sex ratio

Faccoli & Buffo (2004) hanno osservato che allo sfarfallamento la percentuale di maschi è pari a quella di femmine, ma i primi – essendo pionieri – muoiono in maggiore quantità nel tentativo di individuare nuovi ospiti e dare avvio alla fase di colonizzazione preparando la camera nuziale per l'arrivo delle femmine. Gli individui catturati con trappole a feromoni mostrano infatti una riduzione del rapporto fra maschi e femmine fino a 1:3. Nel presente studio, la sex ratio della generazione svernante è pari a 44,1% pre-svernamento, rispecchiando grossomodo il rapporto 1:1, e al 31,7% post-svernamento. Il rapporto fra maschi e femmine diminuisce durante l'inverno, significa che il numero di maschi è ridimensionato dopo l'inverno. La mortalità sembra dunque maggiore per gli individui di sesso maschile: infatti, i maschi sono notoriamente meno longevi delle femmine e muoiono poco dopo l'accoppiamento e la fine dello scavo del sistema riproduttivo (Annala, 1969).

4.5 Considerazioni finali

L'impatto del coleottero scolitide *Ips typographus* sulle peccete europee è in preoccupante crescita (Faccoli, 2009; Marini *et al.*, 2012). Gli effetti delle pullulazioni da esso provocate stanno causando gravi danni a livello economico, paesaggistico e di stabilità dei versanti. Numerosi studi hanno dimostrato come il ciclo vitale e il voltinismo delle popolazioni dell'insetto stiano cambiando rapidamente nel corso degli ultimi decenni, e come gli effetti del cambiamento climatico abbiano un ruolo fondamentale in queste variazioni (Faccoli, 2009; Marini *et al.*, 2012). Le infestazioni legate a schianti da vento, in particolare quando coinvolgono estese superfici forestali, sono la principale causa di innesco delle pullulazioni (Wermelinger, 2004); in conseguenza all'instabilità climatica si stanno verificando con una crescente frequenza eventi estremi che provocano l'abbattimento di grandi quantità di legname, come la tempesta Vaia verificatasi nel 2018. In merito alla modificazione del voltinismo del bostrico tipografo, nei paesi nord-europei l'impatto dello scolitide è aggravato dall'avvio della seconda generazione (Lange *et al.*, 2006; Jönsson *et al.*, 2007), mentre in Europa meridionale è sempre più diffuso l'avvento della terza generazione (Faccoli, 2009; Wermelinger *et al.*, 2012). L'entità delle infestazioni di *Ips typographus* è aggravata, soprattutto in sud Europa, dagli effetti del cambiamento climatico. Faccoli (2009) e in precedenza Marchisio *et al.* (1994) su *Cephalcia arvensis* hanno notato che la siccità è il fattore maggiormente influente nello spostamento verso quote superiori degli attacchi e che la temperatura può concorrere ad aggravare gli effetti negativi della scarsità di precipitazioni. La sofferenza diffusa dell'abete rosso, soprattutto in Europa meridionale, è associata ad un adattamento veloce di *Ips typographus* al variare delle condizioni ambientali, favorito da un'alta temperatura ottimale di

sviluppo, pari a 30,4°C (Faccoli, 2009). A questo aspetto si aggiunge il fatto che in area alpina l'abete rosso è stato diffuso in molte zone anche di bassa quota, al di fuori del range climatico in cui cresce naturalmente (Marini *et al.*, 2012).

Uno degli aspetti che controlla la densità e l'andamento delle pullulazioni di *Ips typographus* è la sopravvivenza invernale, che è regolata da innumerevoli fattori. Tra i più importanti finora osservati ci sono l'andamento climatico, la competizione intraspecifica provocata dalle alte densità di colonizzazione delle cortecce, lo stadio di sviluppo nel quale il coleottero affronta l'inverno, il sito di svernamento e la mortalità provocata dai nemici naturali dello scolitide. In questo studio la mortalità è risultata relativamente bassa: l'inverno caldo trascorso ha limitato la mortalità da freddo, mentre è probabile che la sopravvivenza sia stata limitata dalla competizione intraspecifica, che ha ridotto le risorse disponibili allo sviluppo del singolo individuo e potrebbe aver favorito la proliferazione di infezioni batteriche e fungine. Nonostante la riduzione nella popolazione di *Ips typographus* determinata dalla mortalità invernale, la numerosità media sotto corteccia dei coleotteri è rimasta elevata. Si sospetta che la pullulazione prosegua nei prossimi anni, soprattutto se si verificheranno estati calde e siccitose che sottoporranno l'abete rosso a una continua e rinnovata condizione di sofferenza.

Sono stati costruiti alcuni modelli per predire l'intensità delle infestazioni degli anni a venire (Wermelinger *et al.*, 1998; Faccoli & Stergulc, 2006), ma nel presente studio non sono stati verificati perché queste dipendono da un gran numero di variabili. La difficoltà nel prevedere dinamiche di popolazione che cambiano così velocemente rende necessari ulteriori studi sul lungo periodo. Sarà dunque importante condurre ulteriori ricerche che consentano di comprendere l'andamento delle infestazioni, in modo da sviluppare gestioni forestali che permettano di prevenire e contrastare le pullulazioni.

Ringraziamenti

L'autrice è riconoscente all'Agenzia Regionale per lo Sviluppo Rurale (ERSA) della regione Friuli Venezia Giulia, al Corpo Forestale Regionale della regione Friuli Venezia Giulia, a Veneto Agricoltura, all'Ufficio Pianificazione Forestale della provincia autonoma di Bolzano, al Servizio Agricoltura della provincia autonoma di Trento, alle Comunità Montane di Valle Camonica e Valle Trompia e al Servizio Fitosanitario Regionale della regione Lombardia per la gentile collaborazione prestata alla realizzazione del presente lavoro.

Bibliografia

- Anderbrant, O., Schlyter, F., & Birgersson, G. (1985). Intraspecific competition affecting parents and offspring in the bark beetle *Ips typographus*. *Oikos*, 89-98.
- Annala, E. (1969, January). Influence of temperature upon the development and voltinism of *Ips typographus* L. (Coleoptera, Scolytidae). *Annales Zoologici Fennici Societas Biologica Fennica Vanamo*, 161-208.
- Battisti, A., De Battisti, R., Faccoli, M., Masutti, L., Paolucci, P., & Stergulc, F. (2013). Lineamenti di Zoologia forestale, 236, 254-261
- Botterweg, P. F. (1982). Dispersal and flight behaviour of the spruce bark beetle *Ips typographus* in relation to sex, size and fat content. *Zeitschrift für angewandte Entomologie*, 94, 466-489.
- Chirici, G., Giannetti, F., Travaglini, D., Nocentini, S., Francini, S., D'Amico, G., Calvo, E; Fasolini, D; Broll, M; Maistrelli, F; Tonner, J; Pietrogiovanna, M; Oberlechner, K; Andriolo, A; Comino, R; Faidiga, A; Pasutto, I; Carraro, G; Zen, S; Contarin, F; Alfonsi, L; Wolynski, A; Zanin, M; Gagliano, C; Tonolli, S; Zoanetti, R; Tonetti, R; Cavalli, R; Lingua, E; Pirotti, F; Grigolato, S; Bellingeri, D; Zini, E; Gianelle, D; Dalponte, M; Pompei, E; Stefani, A; Motta, R; Morresi, D; Garbarino, M; Alberti, G; Valdevit, F; Tomelleri, E; Torresani, M; Tonon, G; Marchi, M; Corona, P; & Marchetti, M. (2019). Stima dei danni della tempesta "Vaia" alle foreste in Italia. *Forest@*, 16, 3-9.
- Christiansen, E., & Bakke, A. (1988). The spruce bark beetle of Eurasia. In *Dynamics of forest insect populations: patterns, causes, implications*, 479-503. Boston, MA: Springer US.
- De Groot, M., Diaci, J., & Ogris, N. (2019). Forest management history is an important factor in bark beetle outbreaks: Lessons for the future. *Forest Ecology and Management*, 433, 467-474.
- Del Favero, R., Poldini, L., & Bortoli, P. L. (1998). La vegetazione forestale e la selvicoltura nella regione Friuli-Venezia Giulia. Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, Direzione Regionale delle Foreste servizio della selvicoltura.
- Doležal, P., & Sehnal, F. (2007). Effects of photoperiod and temperature on the development and diapause of the bark beetle *Ips typographus*. *Journal of Applied Entomology*, 131, 165-173.
- Faccoli, M. (2002). Winter mortality in sub-corticolous populations of *Ips typographus* (Coleoptera, Scolytidae) and its parasitoids in the south-eastern Alps. *Journal of pest science*, 75, 62-68.
- Faccoli, M. (2009). Effect of weather on *Ips typographus* (Coleoptera Curculionidae) phenology, voltinism, and associated spruce mortality in the southeastern Alps. *Environmental entomology*, 38, 307-316.

- Faccoli, M. (2015). Scolitidi d'Europa: tipi, caratteristiche e riconoscimento dei sistemi riproduttivi. European bark and ambrosia beetles: types, characteristics and identification of mating systems. WBA Handbooks, Verona.
- Faccoli, M., & Bernardinelli, I. (2014). Composition and elevation of spruce forests affect susceptibility to bark beetle attacks: Implications for forest management. *Forests*, 5, 88-102.
- Faccoli, M., & Buffo, E. (2004). Seasonal variability of sex-ratio in *Ips typographus* (L.) pheromone traps in a multivoltine population in the Southern Alps. In *Journal of Pest Science*, 77, 123-129.
- Faccoli, M., & Stergulc, F. (2004). *Ips typographus* (L.) pheromone trapping in south Alps: spring catches determine damage thresholds. *Journal of Applied Entomology*, 128, 307-311.
- Faccoli, M., & Stergulc, F. (2006). A practical method for predicting the short-time trend of bivoltine populations of *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytidae). *Journal of Applied Entomology*, 130, 61-66.
- Franceschi, V. R., Krokene, P., Krekling, T., & Christiansen, E. (2000). Phloem parenchyma cells are involved in local and distant defense responses to fungal inoculation or bark-beetle attack in Norway spruce (Pinaceae). *American Journal of Botany*, 87, 314-326.
- Harding, S., & Ravn, H. P. (1985). Seasonal activity of *Ips typographus* L. (Col., Scolytidae) in Denmark 1. *Zeitschrift für angewandte Entomologie*, 99, 123-131.
- Jönsson, A. M., Harding, S., Barring, L., & Ravn, H. P. (2007). Impact of climate change on the population dynamics of *Ips typographus* in southern Sweden. *Agricultural and Forest Meteorology*, 146, 70-81.
- Kasumović, L., Lindelöw, A., & Hrašovec, B. (2018). Influence of predator abundance and winter mortality on reproduction of bivoltine populations of *Ips typographus* L. (Coleoptera: Curculionidae). *Šumarski list*, 142, 473-478.
- Košťál, V., Doležal, P., Rozsypal, J., Moravcová, M., Zahradníčková, H., & Šimek, P. (2011). Physiological and biochemical analysis of overwintering and cold tolerance in two Central European populations of the spruce bark beetle, *Ips typographus*. *Journal of Insect Physiology*, 57, 1136-1146.
- Lange, H., Økland, B., & Krokene, P. (2006). Thresholds in the life cycle of the spruce bark beetle under climate change. *Interjournal for Complex Systems*, 1648, 1-10.
- Lawson, S. A. (1993). Overwintering mortality of *Ips grandicollis* Eichh. (Col., Scolytidae) and its parasitoid, *Roptrocercus xylophagorum* Ratz. (Hym., Pteromalidae), in South Australia. *Journal of Applied Entomology*, 115, 240-245.
- Marchisio, C., Cescatti, A., & Battisti, A. (1994). Climate, soils and *Cephalcia arvensis* outbreaks on *Picea abies* in the Italian Alps. *Forest ecology and management*, 68, 375-384.

- Marini, L., Ayres, M. P., Battisti, A., & Faccoli, M. (2012). Climate affects severity and altitudinal distribution of outbreaks in an eruptive bark beetle. *Climatic Change*, 115, 327-341.
- Marini, L., Lindelöw, Å., Jönsson, A. M., Wulff, S., & Schroeder, L. M. (2013). Population dynamics of the spruce bark beetle: a long-term study. *Oikos*, 122, 1768-1776.
- Ministero dell'agricoltura, della sovranità alimentare e delle foreste MASAF (2019). Mappatura delle superfici forestali danneggiate dalla tempesta Vaia, Report del lavoro di armonizzazione delle banche dati geografiche relative ai danni prodotti nelle Regioni e Province Autonome del nord Italia, "Fondo per le foreste italiane" annualità 2019, Art. 2 - Monitoraggio aree colpite dalla tempesta Vaia. Comitato tecnico.
- Odasso, M., Miori, M., & Gandolfo, C. (2018). I tipi forestali del Trentino: descrizione e aspetti dinamici. Provincia autonoma di Trento. Servizio foreste e fauna, Trento.
- Renault, D., Salin, C., Vannier, G., & Vernon, P. (2002). Survival at low temperatures in insects: what is the ecological significance of the supercooling point?. *CryoLetters*, 23, 217-228.
- Salt, R. W. (1961). Principles of insect cold-hardiness. *Annual review of entomology*, 6, 55-74.
- Salvadori, C., Tolotti, G., & Confalonieri, M. (2021). Danni da bostrico tipografo: una delle pesanti conseguenze della tempesta Vaia. *AGRICOLTURA TRENTINA*, 40(3), 14-15.
- Schlyter, F., & Cederholm, I. (1981). Separation of the sexes of living spruce bark beetles, *Ips typographus* (L.), (Coleoptera: Scolytidae) 1. *Zeitschrift für angewandte Entomologie*, 92, 42-47.
- Wegensteiner, R., Tkaczuk, C., Kenis, M., & Papierok, B. (2017). Occurrence of *Tomicobia seitneri* (Hymenoptera: Pteromalidae) and *Ropalophorus clavicornis* (Hymenoptera: Braconidae) in *Ips typographus* adults (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) from Austria, Poland and France. *Biologia*, 72, 807-813.
- Wermelinger, B. (2004). Ecology and management of the spruce bark beetle *Ips typographus*—a review of recent research. *Forest ecology and management*, 202, 67-82.
- Wermelinger, B., & Seifert, M. (1998). Analysis of the temperature dependent development of the spruce bark beetle *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytidae). *Journal of Applied Entomology*, 122, 185-191.
- Wermelinger, B., Epper, C., Kenis, M., Ghosh, S., & Holdenrieder, O. (2012). Emergence patterns of univoltine and bivoltine *Ips typographus* (L.) populations and associated natural enemies. *Journal of Applied Entomology*, 136, 212-224.
- Wood, S. L. (1992). A catalog of Scolytidae and Platypodidae (Coleoptera). part 2: taxonomic index. *Great Basin Nat. Mem.*, 13, 1-1553.

Sitografia

<https://meteo.provincia.bz.it/download-dati.asp>

<https://www.arpalombardia.it/dati-e-indicatori/meteo-e-clima/>

<https://www.ambienteveneto.it>

<https://www.admin.ch/gov/it/pagina-iniziale/documentazione/comunicati-stampa.msg-id-2657.html>