



## Articolo / Article

### Ecologia e conservazione di una specie minacciata dai cambiamenti climatici: lo studio del fringuello alpino *Montifringilla nivalis* sulle Alpi trentine, italiane e nel resto d'Europa

Chiara Bettega<sup>1,2\*</sup>, Matteo Anderle<sup>3</sup>, Giuseppe Bogliani<sup>4</sup>, Maria Delgado<sup>5</sup>, Alessandro Franzoi<sup>1</sup>, Severino Vitulano<sup>6</sup>, Gianpiero Calvi<sup>6</sup>, Pietro Luciani<sup>1</sup>, Davide Scridel<sup>7</sup>, Francesco Ceresa<sup>8</sup>, Piergiovanni Partel<sup>9</sup>, Luca Pedrotti<sup>10</sup>, Gilberto Volcan<sup>9</sup>, Mattia Brambilla<sup>2,10</sup> Paolo Pedrini<sup>1,10</sup>

<sup>1</sup> MUSE – Museo delle Scienze, Ufficio ricerca e collezioni, Ambito Biologia della Conservazione, Corso del lavoro e della Scienza 3, 38122 Trento

<sup>2</sup> Dipartimento di Scienze e Politiche Ambientali, Università degli Studi di Milano, Milano

<sup>3</sup> Institute for Alpine Environment, Eurac Research, Drususallee/Viale Druso 1, I-39100 Bolzano/Bozen

<sup>4</sup> Dipartimento di Scienze della Terra e dell'Ambiente Università di Pavia, Università di Pavia – Via A. Ferrata 7, 27100 Pavia

<sup>5</sup> Biodiversity Research Institute (IMIB; CSIC – Oviedo University, Principality of Asturias), Campus Mieres, Mieres (Asturias), Spagna

<sup>6</sup> Studio Pteryx, Basiano MI

<sup>7</sup> DOPPS BirdLife Slovenia, Tržaška cesta 2, 1000 Ljubljana, Slovenia

<sup>8</sup> Museo di Scienze Naturali dell'Alto Adige, Via dei Bottai 1, 39100 Bolzano

<sup>9</sup> Ente Parco Naturale Paneveggio Pale di San Martino, Località Castelpietra, 2, 38054 San Martino di Castrozza (TN)

<sup>10</sup> Parco Nazionale dello Stelvio, Direzione Ersaf Lombardia, Via De Simoni, 32, 23032 Bormio (SO)

<sup>1,10</sup> MB e PP hanno contribuito in egual misura al presente lavoro

\* E-mail dell'Autore per la corrispondenza: chiara.bettega@gmail.com

#### Parole chiave

- Ecosistema alpino
- Avifauna alpina
- Cambio climatico
- Uso suolo
- Conservazione
- Alpi italiane

#### Riassunto

Gli ambienti d'alta quota di tutto il mondo stanno sperimentando in maniera considerevole gli effetti dell'interazione tra cambiamenti di uso del suolo da un lato e cambiamenti climatici dall'altro. In questo scenario, le specie che abitano tali ambienti, spesso caratterizzate da adattamenti specifici all'estrema variabilità e stocasticità ambientale, risultano particolarmente a rischio. Tra le specie ornitiche d'alta quota, il fringuello alpino *Montifringilla nivalis* può essere considerato una "specie bandiera" dell'ecosistema alpino. Dal 2016 il MUSE di Trento ha avviato, in collaborazione con altri enti di ricerca e aree protette, sia in Italia che all'estero (organizzatisi nella rete [www.snowfinch.eu](http://www.snowfinch.eu)), una serie di studi riguardanti l'ecologia, la biologia e la demografia del fringuello alpino, che sono illustrati nel presente lavoro. Si tratta di ricerche utili non solo per la conservazione diretta di questa specie, ma anche per comprendere gli effetti dei cambiamenti ambientali e climatici sull'ecosistema alpino e sulle specie che lo popolano.

#### Key words

- Alpine ecosystem
- Alpine birds
- Climate change
- Land use
- Conservation
- Italian Alps

#### Summary

High-altitude environments worldwide are significantly experiencing the effects of the interaction between land-use changes on one side and climate changes on the other. In this scenario, species inhabiting such environments—often characterized by specific adaptations to extreme environmental variability and stochasticity—are particularly at risk. Among high-altitude bird species, the alpine snowfinch (*Montifringilla nivalis*) can be considered a "flagship species" of the alpine ecosystem. Since 2016, the MUSE of Trento, in collaboration with other research institutions and protected areas both in Italy and abroad (and members of the network [www.snowfinch.eu](http://www.snowfinch.eu)), has carried out a series of studies on the ecology, biology, and demography of this species, which are illustrated in this work. These studies are useful not only for the direct conservation of the snowfinch, but also for understanding the effects of environmental and climate changes on the alpine ecosystem and the species that inhabit it.

Redazione: Valeria Lencioni e Marco Avanzini

pdf: [www.muse.it/it/Editoria-Muse/Studi-Trentini-Scienze-Naturali/Pagine/STSN/STSN\\_105\\_2024.aspx](https://www.muse.it/it/Editoria-Muse/Studi-Trentini-Scienze-Naturali/Pagine/STSN/STSN_105_2024.aspx)

## Introduzione

In tutto il mondo, gli ambienti d'alta quota stanno andando incontro a vistose trasformazioni. Da un lato, si assiste a marcati cambiamenti dovuti a variazioni nell'utilizzo di questi ambienti da parte dell'uomo, come l'aumento di attività ricreative e l'abbandono delle attività agro-pastorali (Brambilla et al. 2016; Gehrig-Fasel et al. 2007). Dall'altro, i cambiamenti climatici esercitano un effetto determinante su molti ecosistemi, con temperature che aumentano più velocemente rispetto alle pianure circostanti (Pepin et al. 2022) e che provocano eventi atmosferici estremi (Ombadi et al. 2023; Schmeller et al. 2022) e scioglimento anticipato della neve (Vorlauf et al. 2021), spesso però accompagnato da nevicate tardive (Martin et al. 2017). Le specie che abitano tali ambienti, spesso caratterizzate da adattamenti specifici all'estrema variabilità e stocasticità ambientale (Hille & Cooper, 2015; Martin, 2001), sono particolarmente a rischio in un contesto di forte e soprattutto rapido cambiamento. Gli Uccelli rappresentano in tal senso un modello biologico ideale per studiare le conseguenze di tali cambiamenti negli ecosistemi di alta quota, in quanto rispondono rapidamente alle alterazioni dell'habitat e alle modificazioni del clima (Hallman et al. 2022; Lantz & Karubian, 2017).

Tra le specie ornitiche d'alta quota, il fringuello alpino *Montifringilla nivalis* può essere considerato una "specie bandiera" dell'ecosistema alpino. Passeriforme specialista degli ambienti d'alta quota, nidifica oltre i 2000 m di quota in cavità su pareti rocciose, di edifici, e in strutture artificiali quali piloni degli impianti di risalita e cassette nido (Grangé, 2008; Heiniger, 1991a,b). L'habitat di foraggiamento durante la stagione riproduttiva è rappresentato dalla prateria alpina. Come poche altre specie, il fringuello alpino trascorre l'inverno nei contesti montani a quote alte o medio-alte (Bettega et al. 2020), dove compie spostamenti altitudinali verso quote inferiori a seconda della severità delle condizioni climatiche (Géroudet & Cousin, 1998), e flussi migratori parziali dalle Alpi ai Pirenei, rilevati recentemente attraverso tecniche isotopiche (Resano-Mayor et al. 2017, 2020). Con l'avanzare della stagione estiva e l'inizio di quella autunnale si assiste alla progressiva unione di diversi gruppi familiari, fino a formare stormi anche consistenti che si muovono in maniera erratica, seguendo la disponibilità di risorse, mostrando pertanto un marcato comportamento gregario stagionale (Delgado et al. 2021). Si tratta di una strategia piuttosto comune in diverse specie ornitiche, che permette a questa specie di trascorrere l'inverno in condizioni ambientali climaticamente proprie e con disponibilità di risorse frammentata ed effimera.

Le condizioni climatiche sembrano influenzare diversi aspetti dell'ecologia e biologia del fringuello alpino. Le temperature invernali e primaverili hanno effetti sulla fenologia del comportamento gregario e sulle dimensioni dei gruppi (Delgado et al. 2021), così come inverni rigidi sull'arco alpino possono innescare i movimenti migratori verso la penisola iberica (Resano-Mayor et al. 2020). Anche la neve è un fattore importante che influisce durante le diverse fasi del suo ciclo vitale. La scelta del sito di nidificazione è influenzata dalla copertura di neve (Niffenegger et al. 2023) e la presenza di chiazze nevose nelle praterie alpine è importante per il foraggiamento durante l'allevamento della prole (Brambilla et al. 2017a, 2018a; Bettega et al. 2025). In inverno, la neve può influenzare, insieme alla temperatura, i movimenti stagionali (Resano-Mayor et al. 2020) e il comportamento gregario (Delgado et al. 2021) della specie.

Sensibile ai cambiamenti climatici in atto, il suo areale di distribuzione e le dimensioni delle diverse popolazioni stanno diminuendo in buona parte d'Europa (Brambilla et al. 2020, 2022); tuttavia, la specie rimane classificata come LC ("minor preoccupazione") sia nella Lista Rossa IUCN europea che in quelle globale e italiana, mentre quelle spagnola e svizzera ne hanno recentemente modificato lo stato a "quasi minacciata" (Knaus et al. 2021; Laiolo et al. 2021). La sottostima del livello di rischio per questa specie, ritenuta tra quelle più minacciate dal cambiamento climatico in Europa (Brambilla et al. 2018a; Schano et al. 2021), è dovuta essenzial-

mente al suo areale estremamente ampio e al fatto che i trend delle popolazioni sono poco conosciuti (BirdLife International, 2024). Pertanto, comprendere come gli effetti delle alterazioni ambientali e i cambiamenti climatici possano influenzare questa specie, è importante per fare luce sulle reali minacce cui va incontro e per la sua conservazione diretta, così come per la salvaguardia degli ecosistemi alpini e della biodiversità più in generale.

Per tali ragioni, dal 2015 il MUSE ha avviato una serie di ricerche sull'ecologia, biologia e demografia del fringuello alpino, in collaborazione con Università degli Studi di Pavia, Università degli Studi di Milano, Università di Torino, Parco Nazionale dello Stelvio (PNS) e Parco Naturale Paneveggio-Pale di S. Martino (PPPSM), Museo di Scienze dell'Alto Adige, oltre che con altri enti a livello nazionale e internazionale. La maggior parte dei soggetti coinvolti nelle ricerche è riunita nello European Snowfinch Group ([www.snowfinch.eu](http://www.snowfinch.eu)) e le attività si sono svolte con il supporto di ISPRA e del Centro Nazionale di Inanellamento per quanto riguarda cattura, marcaggio e inanellamento.

Le ricerche sono nate con lo scopo di far luce sull'ecologia del fringuello alpino nel periodo della nidificazione e sulla sua biologia riproduttiva, avviando al contempo un programma di studio sul lungo periodo di alcune popolazioni nidificanti e svernanti. Nel corso del decennio di ricerche, sono stati approfonditi alcuni aspetti sull'impatto antropico e climatico, e si è portato avanti lo studio dell'ecologia di movimento, della variabilità genetica e della connettività tra popolazioni alpine ed europee. Nel presente lavoro, si descrivono le attività e i risultati più significativi raggiunti, numerosi dei quali oggetto di specifiche pubblicazioni di seguito citate.

## 2. Studi, ricerche e monitoraggi condotti

In questa sezione, vengono riassunte le principali linee di ricerca esplorate e i risultati più significativi ottenuti per ciascuna di esse. Ogni aspetto è presentato con un breve compendio dei metodi adottati, seguito da una descrizione delle conoscenze acquisite tramite gli studi svolti in quell'ambito.

### 2.1 Ecologia riproduttiva e selezione dell'habitat

Un primo importante 'blocco' di ricerche ha avuto come obiettivo quello di far luce sull'ecologia della specie nella stagione riproduttiva. In particolare, si sono indagati l'habitat di foraggiamento (Brambilla et al. 2017a, 2018a,b, 2019; Alessandrini et al. 2022), fattore chiave per la presenza e la sopravvivenza di una specie, e i fattori influenzanti la distribuzione riproduttiva del fringuello alpino a diverse scale spaziali (Brambilla et al. 2016, 2017b, 2020, 2022). Una volta compresi i meccanismi principali che regolano la selezione dell'habitat di foraggiamento nella specie, gli studi si sono via via concentrati su aspetti particolarmente rilevanti in senso ecológico o conservazionistico, indagando ambiti specifici (Scridel et al. 2024; Bettega et al. 2025).

Le indagini condotte sulle Alpi centro-orientali italiane e, in parte, svizzere, hanno rivelato una predilezione, da parte della specie, per ambienti di prateria alpina con erba bassa (Brambilla et al. 2018a) e chiazze nevose. Gran parte dell'attività di foraggiamento avviene entro 300 m dal nido (Brambilla et al. 2019). I fringuelli alpini adulti cercano prede per i pulli in prateria alpina, dove l'accessibilità agli invertebrati è garantita da uno strato erbaceo non troppo alto, e su chiazze di neve (dove è più facile individuare gli insetti, spesso depositati dal vento) e ai loro margini (dove sono più abbondanti alcune specie chiave, come le tipule allo stadio larvale). La disponibilità di prateria alpina limita la dipendenza dalla presenza di neve, modulando anche il possibile rischio di estinzione dovuto alla scomparsa di questa risorsa fortemente dipendente dal clima (Brambilla et al. 2018a). Inoltre, i fringuelli alpini tendono a evitare le aree con maggiore esposizione al sole man mano che la stagione avanza (Brambilla et al. 2017a) o che la temperatura aumenta (Alessandrini et al. 2022; Bettega et al. 2025), così come le aree trasformate dall'uomo (Brambilla et al. 2018b, Bettega et al. 2025).

Infine, come verosimile adattamento alle difficili condizioni in alta quota, sembrano in grado di modulare la selezione dell'habitat a scala fine a seconda dell'abbondanza relativa di invertebrati (Scridel et al. 2024).

Queste esigenze così specifiche rendono la specie potenzialmente vulnerabile ai cambiamenti climatici ma anche a tante altre alterazioni dell'habitat dovute all'azione umana. Nelle Alpi europee, l'abbandono delle tradizionali attività pastorali è stato spesso accompagnato dall'intensificazione delle attività umane all'aperto, in particolar modo quelle legate agli sport invernali, che rappresentano pertanto una delle principali minacce principali per la fauna di montagna (Arlettaz et al. 2015). Diversi studi hanno dimostrato l'effetto negativo dello sci (Rixen & Rolando, 2013), dovuto alla frammentazione e alterazione degli habitat, al degrado del suolo e allo sviluppo spesso incontrollato delle infrastrutture legate alla pratica di questo sport (Rolando et al. 2003). Le piste da sci sono generalmente associate a bassa ricchezza e abbondanza di specie di insetti e uccelli (Caprio et al. 2011; Rolando et al. 2007). Inoltre, le proiezioni future vedono un progressivo spostamento verso l'alto delle aree idonee alle piste per effetto dei cambiamenti climatici e la conseguente sovrapposizione con l'habitat idoneo alle specie d'alta quota (Brambilla et al. 2016; Roseo et al. 2025).

Considerato questo scenario, nel 2023 è stato condotto uno studio volto a comprendere l'effetto che le piste da sci possono avere sulla fase di foraggiamento per l'allevamento della prole. La ricerca si è svolta da maggio a inizio luglio 2023 presso Passo Pordoi (2.239 m slm) e Passo Sella (2.240 m slm), a cavallo rispettivamente delle province di Trento e Belluno e di Trento e Bolzano, dove diverse coppie nidificano nei piloni degli impianti di risalita (Fig. 1), la maggior parte dei quali in estate non sono in funzione. Sono stati identificati 15 nidi attivi, dei quali 12, con giovani nel nido, sono stati monitorati durante la stessa stagione riproduttiva. Per ogni nido sono stati seguiti gli spostamenti degli adulti dal nido alle zone di foraggiamento, registrando la posizione esatta del punto di foraggiamento fino ad un massimo di 20 punti. Successivamente, i siti di foraggiamento localizzati, insieme ad un uguale numero di plot di controllo (scelti casualmente nell'area di nidificazione), sono stati caratterizzati dal punto di vista delle seguenti variabili ambientali: copertura di suolo, altezza dell'erba, presenza di invertebrati, variabili meteorologiche e topografiche. I risultati, pubblicati in Bettega et al. (2025), mostrano come la selezione dell'habitat di foraggiamento della specie sia orientata in primis verso aree con copertura intermedia di neve e una bassa altezza dell'erba. È stata individuata anche una forte relazione tra radiazione solare e temperatura, per cui il fringuello alpino preferisce foraggiare in zone soleggiate quando le temperature sono basse, mentre predilige zone ombreggiate



**Fig. 1 –** Adulto nidificante in un pilone di una delle seggovie del Passo Pordoi. / **Fig. 1 –** Snowfinch adult nesting inside a ski pylon at Passo Pordoi.

con temperature più elevate. Significativi sono anche gli effetti di pendenza, presenza di emitteri, acqua, rocce e strutture antropiche. La presenza di queste ultime in particolare influenza negativamente sulla probabilità di foraggiamento. La presenza di piste da sci, di per sé, non ha alcun particolare effetto, e il foraggiamento presso piste o al di fuori di queste è in realtà legato alla presenza di condizioni idonee che possono trovarsi sia lungo i tracciati che fuori dagli stessi.

La ricerca ha quindi mostrato come i fringuelli alpini, spesso considerati una specie "antropofila", non siano avvantaggiati dalla presenza umana in ogni suo aspetto. Se da un lato i piloni offrono possibili siti di nidificazione, le strutture antropiche hanno invece un effetto negativo sulle possibilità di foraggiamento durante il periodo cruciale di allevamento dei nidiacei. Questo studio, analizzando i fattori che regolano l'uso dell'habitat in una fase critica del ciclo vitale della specie, indica alcune possibili strategie pratiche per rendere i tracciati delle piste da sci maggiormente idonei a questa e potenzialmente ad altre specie d'alta quota. Le informazioni ottenute possono essere infatti utilizzate per la conservazione e la gestione di questi ambienti in un periodo di rapidi cambiamenti climatici. Mantenere quindi ambienti di prateria può contribuire a mitigare gli effetti negativi del cambiamento climatico su questa e altre specie di alta quota (Brambilla et al. 2018a), in accordo con quanto emerso dalle altre ricerche sull'ecologia della specie (vedi sopra). Si tratta di un'importante indicazione che va presa in considerazione anche nel caso di nuove realizzazioni che, in un futuro non troppo lontano, vedranno una crescente sovrapposizione tra le zone di costruzione delle piste e gli habitat idonei alla sopravvivenza delle specie alpine (Brambilla et al. 2016; Roseo et al. 2025).

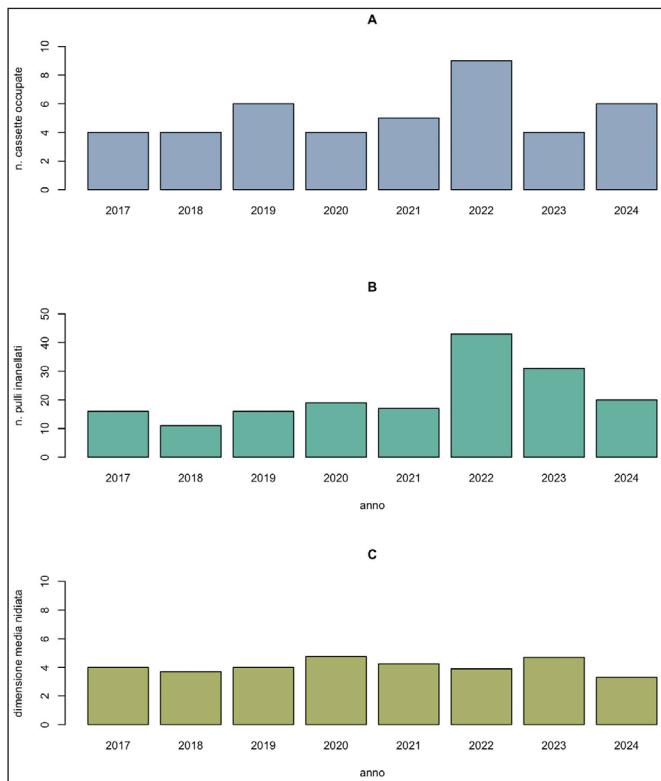
## 2.2 Biologia riproduttiva

Comprendere i fattori che regolano successo riproduttivo e sopravvivenza è cruciale per capire a fondo gli effetti dei cambiamenti in atto su una specie potenzialmente tanto sensibile. Per questa ragione abbiamo avviato, attraverso la collaborazione con altri enti e ricercatori da un lato e progetti sul campo con aree protette e altri interlocutori dall'altro, iniziative per studiare la biologia riproduttiva, il successo della nidificazione e le variazioni nella sopravvivenza/mortalità nel fringuello alpino. Relativamente a quest'ultimo punto, si rimanda al prossimo paragrafo (2.3).

Per raccogliere dati di biologia riproduttiva sulle Alpi italiane, dal 2016 abbiamo iniziato a installare cassette nido per il fringuello alpino, realizzate secondo il modello utilizzato nelle Alpi svizzere da Vogelwarte (in parte modificata), con l'obiettivo di consentire un monitoraggio ad hoc delle locali popolazioni nidificanti in questi siti artificiali più facilmente controllabili. Le cassette sono state installate inizialmente nel PNS presso Passo dello Stelvio (2.757-3000 m slm; BZ/SO), Passo Umbrail (2.503 m slm; SO/Bassa Engadina) e Passo Gavia (2.621 m slm; BS/SO), e nel PNPPSM nel Gruppo delle Pale di San Martino (TN). Successivamente, altre cassette nido sono state installate anche in nuovi siti in contesti prealpini ai margini dell'areale e in altre aree alpine, grazie al supporto da parte del CAI nazionale e del Comitato Scientifico in particolare. Al 2024, risultano installate 68 cassette, così ripartite (in ordine temporale di installazione): nel 2016 Passo Stelvio e Umbrail (n=25), Passo Gavia (n=9), Pale di San Martino (n=25); nel 2020 Val Cedech (PNS; n=4), Orobie bergamasche (n=2), Monte Rosa (n=1); nel 2021 nel Gruppo del Carega (n=1) e nel 2023 sul Monte Baldo (n=1).

Dalla loro installazione, ogni anno le cassette vengono monitorate secondo un protocollo che prevede da due a quattro controlli nel corso della stagione riproduttiva, a seconda che risultino o meno occupate. In caso di accertata nidificazione, più controlli possono servire per monitorare le schiuse e la crescita dei pulli, ed eventualmente procedere con l'inanellamento prima del loro volo. Marcare con anelli gli individui consente poi di seguirne le vicende, in modo da poter ricostruire spostamenti, sopravvivenza, etc.

Dall'inizio del progetto nel 2016, sono state utilizzate diverse cassette nido collocate nel PNS in tutte le zone di installazione. In



**Fig. 2** – Numero di cassette nido occupate (A), numero di pulli inanellati (B) e dimensione media delle nidiate (C) dal 2017 al 2024 all'interno del Parco Nazionale dello Stelvio (Passo dello Stelvio, Passo Umbrail e Passo Gavia). **Fig. 2** –Number of occupied nest-boxes (A), number of ringed nestlings (B) and mean brood sizes (C) from 2017 to 2024 at the Stelvio National Park (Passo dello Stelvio, Passo Umbrail and Passo Gavia).

media, sono state occupate 5 cassette all'anno (min=4; max=9; Fig. 2), con un tasso di occupazione medio, nel periodo compreso tra il 2017 e il 2024 e considerato il totale delle cassette nido installate, del 14,5% (min=10,5%; max=23,7%). La dimensione media delle nidiate negli otto anni di monitoraggio è di 4,1 nidiacei (min=2; max=6. In Fig. 2 vengono mostrati i valori medi per ciascun anno). Dal 2017 al 2024 sono stati inanellati complessivamente 173 pulli (media annuale=21,6; min=11; max=43; Fig. 2), di cui 101 al Passo Gavia, 70 al Passo dello Stelvio e Umbrail e 2 in Val Cedec.

Le cassette nido collocate nel PNPPSM (a quote comprese tra i 1940 e i 2700 m) contemporaneamente a quelle installate nel PNS, non sono mai state utilizzate. La ragione del mancato utilizzo si spiega probabilmente con l'elevata disponibilità in questo massiccio dolomitico di siti di nidificazione naturali disponibili sulle estese pareti rocciose e, potenzialmente, anche con le piccole dimensioni della popolazione riproduttrice presente sulle Pale di S. Martino e con la quota inferiore a cui sono state installate alcune cassette. Si sono registrate invece frequenti occupazioni da parte di codirosso spazzacamino (*Phoenicurus ochruros*) e la nidificazione di ballerina bianca (*Motacilla alba*) presso il rifugio Mulaz (2.571 m slm), a una quota elevata per quest'ultima specie in Trentino. Queste due specie hanno frequentemente occupato le cassette nido anche nel PNS (fino a oltre 2800 m il codirosso spazzacamino e oltre 2750 la ballerina bianca).

### 2.3. Inanellamento, dinamica di popolazione ed ecologia dello svernamento

Ricostruire la “storia” di ogni fringuello alpino a livello individuale è impossibile, ma poter contare su informazioni dettagliate circa movimenti, successo riproduttivo e sopravvivenza di un numero adeguato di esemplari consente importanti analisi dei fattori che

regolano comportamento, spostamenti e dinamica di popolazione ed è pertanto cruciale anche per la conservazione della specie. Marcare gli individui, rendendoli riconoscibili a livello “personale”, tramite anelli metallici e anelli colorati in PVC (con combinazioni alfanumeriche uniche e colorazione differente a seconda del paese e/o del progetto, in modo da evitare possibili confusioni), rappresenta uno strumento importante in questo senso.

Analizzare i fattori che determinano le traiettorie demografiche di una popolazione richiede lunghe serie di dati. Quelli da noi raccolti non sono ancora sufficienti per un'analisi dettagliata, ma è stato possibile studiare il legame tra andamento climatico e sopravvivenza in Abruzzo, grazie ai dati raccolti da Eliseo Strinella sul Gran Sasso. Il lavoro così condotto ha permesso di evidenziare un effetto negativo delle temperature estive sulla sopravvivenza delle femmine di fringuello alpino, fornendo prove degli impatti ‘diretti’ del cambiamento climatico sulla specie e, al contempo, un primo esempio di un effetto del cambiamento climatico che si manifesta diversamente tra i due sessi in una stessa specie (Strinella et al. 2020).

Prendendo esempio dall'esperienza di altri gruppi di ricerca (si veda [www.snowfinch.eu](http://www.snowfinch.eu)) attivi da anni sia nelle Alpi svizzere e austriache che in Appennino (vedi sopra) e nei massicci del nord della Spagna (Pirenei e Cordigliera Cantabrica), oltre all'inanellamento presso le cassette nido abbiamo avviato un programma specifico di inanellamento e marcaggio del fringuello alpino durante la stagione invernale nel PNPPSM, attraverso l'apposizione anche di anelli colorati che consentono di distinguere visivamente i soggetti avvistati. Attraverso le letture degli anelli colorati, si possono stimare e monitorare la popolazione invernale, ma anche raccogliere informazioni sulla composizione e struttura sociale dei gruppi, documentarne eventuali spostamenti, ed eventualmente ottenere anche informazioni sulla popolazione nidificante, nel caso in cui gli individui catturati in inverno vengano osservati durante la riproduzione.

Nell'inverno 2021-2022 sono state effettuate varie giornate di cattura per testare diverse condizioni meteorologiche e due siti, uno corrispondente al Rifugio Capanna Cervino (2.084 m slm) e uno posto sul versante meridionale di Punta Rolle (ca. 1950 m slm). Come già sperimentato nella Cordigliera Cantabrica spagnola (C. Bettega, oss. pers.), le condizioni ottimali per la cattura sono risultate essere quelle con perturbazioni a carattere nevoso, sia per la minor visibilità delle reti, sia perché i fringuelli alpini tendono a frequentare maggiormente eventuali rifugi aperti, in cerca di cibo. Conseguentemente, il sito di Capanna Cervino è risultato essere il migliore, proprio per la maggiore probabilità di concentrare gruppi di individui in uno spazio circoscritto.

Complessivamente sono state effettuate 19 giornate di inanellamento, così ripartite nelle tre stagioni invernali: dodici nel 2022, due nel 2023 e cinque nel 2024. Per le catture sono state utilizzate reti di tipo *mist-net* bianche. Gli individui catturati sono stati inanellati con anello metallico e anello colorato in PVC (Fig. 3), fotografati (ala, testa e corpo intero) e sono stati sottoposti al rilievo dei seguenti dati biometrici: lunghezza tarso (mm), lunghezza corda massima (mm), lunghezza 3° remigante (mm) e peso (g), misurati tramite calibro (accuratezza 0,02 mm) e bilancia elettronica da campo (Tab.1). Il sesso e l'età sono stati stimati, ove possibile, direttamente sul campo o successivamente dalle fotografie scattate a ciascun individuo, attraverso l'esame delle copritrici primarie unito alle misure biometriche, seguendo i metodi proposti da Strinella et al. 2011, 2013. È bene ricordare a tal proposito che il fringuello alpino non presenta un marcato dimorfismo sessuale: durante la stagione riproduttiva i maschi si possono generalmente distinguere dalle femmine – se pur con un certo grado di esperienza – per alcune caratteristiche del piumaggio, tendenzialmente caratterizzato da tonalità più scure nei primi; queste caratteristiche diventano meno pronunciate nei mesi invernali, per cui diviene essenziale un esame accurato del piumaggio dell'ala e delle misure biometriche (Strinella et al. 2011, 2013).

**Tab. 1** – Media e deviazione standard delle misure biometriche (lunghezza ala, p8, peso e tarso) suddivise per sesso e classi di età (adulti/giovani) / **Tab. 1** – Mean and standard deviation of biometric measurements (wing length, p8, weight and tarsus length) divided by sex and age classes (adults/juveniles).

	lunghezza ala		p8		peso		tarso	
	media ± sd	n	media ± sd	n	media ± sd	n	media ± sd	n
M giovani	120,6 ± 1,8	13	94,1 ± 1,9	13	39,4 ± 2,9	11	22,4 ± 0,6	13
M adulti	122,6 ± 2,3	33	97,1 ± 2,1	33	39,6 ± 2,8	31	21,9 ± 0,9	33
F giovani	115,9 ± 3,1	9	90,5 ± 2,8	9	40,2 ± 2,5	9	22,5 ± 0,4	9
F adulte	116,8 ± 1,8	14	91,2 ± 1,8	14	39,7 ± 3,0	14	22,5 ± 0,7	14

Al termine delle operazioni ciascun individuo è stato rilasciato nella stessa area di cattura.

Un'attività di monitoraggio visivo degli individui svernanti è stata avviata sempre nei pressi di Capanna Cervino (PNPPSM), a partire dal 2023, da inizio gennaio a fine marzo, ed è attualmente in corso per la stagione 2025. È stata effettuata un'uscita a settimana della durata di tre ore ciascuna con inizio all'alba, per un totale di 13 uscite nel 2023 e 9 uscite nel 2024. Le rilettture sono state effettuate utilizzando un binocolo Swarovski CL Companion 8x30, un binocolo Leica Ultravid 12x50 HD, un cannocchiale Zeiss Conquest Gavia 30-60x85 e una fotocamera digitale Nikon Coolpix P900.

Durante ciascuna sessione sono stati raccolti i seguenti dati:

- ora di inizio e termine della sessione;
- numero individui con anello e ora osservazione (in quanto all'interno della stessa sessione ci sono state più visite da parte di quantità diverse di individui, inanellati e non);
- codice anello PVC di ciascun individuo rilevato in ciascuna visita;
- numero individui non inanellati presenti in ciascuna visita, ove possibile;
- grado di presenza antropica (intesa come presenza di escursionisti/sciatori) ad ogni visita: assente/minima/media/alta;
- condizioni meteorologiche;
- copertura nevosa stimata nell'area (espressa in percentuale da 0 a 100).

Per ciascuna sessione sono stati scaricati i dati metereologici giornalieri relativi a temperatura media, minima e massima, velocità e direzione vento, pressione atmosferica e radiazione solare totale, nonché i dati sull'altezza della neve al suolo, registrati dalla stazione meteo di Passo Rolle e disponibili su [www.meteotrentino.it](http://www.meteotrentino.it).



L'obiettivo a medio termine è quello di stimare, attraverso metodi di CMR (Cattura-Marcatura-Ricattura (o rilettura, nel nostro caso)), la dimensione della popolazione invernale presente nell'area.

All'interno di tale monitoraggio sono state effettuate anche uscite tardo pomeridiane per localizzare possibili roost notturni (dormitori). Negli uccelli, la selezione di appropriati roost notturni invernali è fondamentale per la termoregolazione e il consumo metabolico associato (Shipley et al. 2019; Walsberg & King, 1980). In inverno il fringuello alpino utilizza a tale scopo pareti rocciose ad alta quota, dove trova cavità che offrono condizioni microclimatiche migliori rispetto a cavità poste in pareti più basse, che gli consentono di risparmiare fino al 36% di energia (Heiniger 1991a,b).

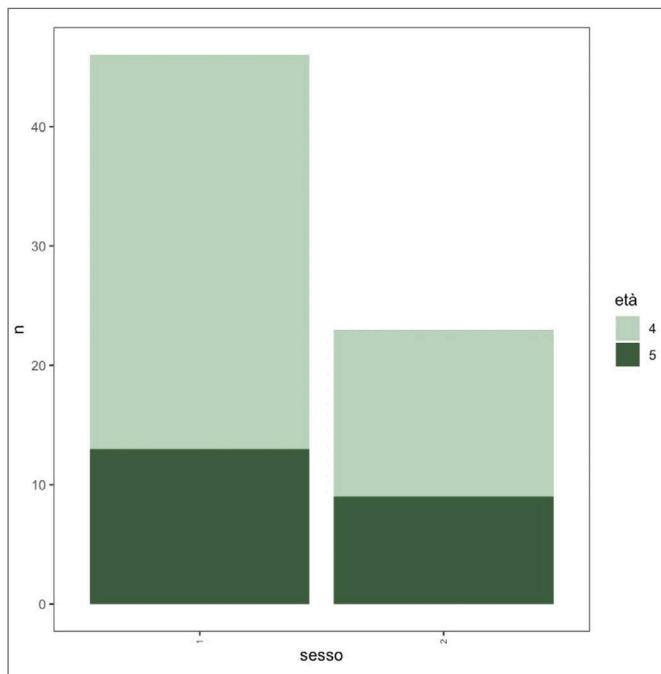
Complessivamente sono stati catturati 76 individui, di cui 47 nel 2022, 8 nel 2023 e 21 nel 2024. Si è potuto determinare il sesso di 69 individui, dei quali 46 maschi e 23 femmine (Fig. 4; Tab 1); di questi, 22 potrebbero essere animali nati nella stagione riproduttiva precedente, mentre i restanti 47 sono adulti (Fig. 4; Tab. 1). Nel 2023 sono stati ricatturati 8 individui inanellati nel 2022, mentre nel 2024 sono stati ricatturati due individui del 2022 e due del 2023.

Durante il monitoraggio visivo, per 18 dei 47 individui inanellati nel 2022 è stata effettuata almeno una rilettura nel corso del monitoraggio 2023 (pari al 38% del totale dei marcati 2021-2022); ad essi si aggiungono le riletture di cinque individui inanellati durante la prima sessione di catture del 2023, per un totale complessivo di 23 riletture.

Nel corso del monitoraggio 2024 sono state effettuate 8 riletture di individui del 2022 (pari al 19% del totale degli individui inanellati nel 2022) e tre di individui catturati nel 2023 (pari



**Fig. 3** – A sinistra, estrazione dalle reti di alcuni fringuelli alpini catturati nell'inverno 2021-2022 presso il rifugio Capanna Cervino (Passo Rolle); a destra, individuo inanellato: sulla zampa sinistra, ben riconoscibile, l'anello colorato in pvc. / **Fig. 3** – On the left, extraction of snowfinches captured in winter 2021-2022 at the Capanna Cervino refuge (Passo Rolle); on the right, ringed snowfinch: the pvc coloured ring is visible on the left leg.



**Fig. 4** – Classificazione per età e sesso degli individui inanellati presso Capanna Cervino tra il 2022 e il 2024. Sesso 1=maschio, sesso 2=femmina, età 4= adulto generico, età 5= individuo nato nella stagione riproduttiva precedente. / **Fig. 4** – Age and sex classification of the birds ringed at Capanna Cervino refuge between 2022 and 2024. Sex 1= male, sex 2= female, age 4= adult, age 5= bird born in the previous breeding season.

al 37,5% del totale degli individui inanellati nel 2023); a questi si aggiungono le riletture di 14 individui inanellati durante le sessioni di cattura del 2024 (esclusa l'ultima di fine marzo), per un totale di 34 riletture.

I dati raccolti nei primi due anni di monitoraggio sono stati utilizzati per una prima analisi sintetica relativa alla frequentazione del rifugio. Considerato infatti il carattere antropofilo della specie, per cui non è raro osservare individui nei pressi dei rifugi intenti ad alimentarsi dei resti del cibo lasciato dai visitatori (insieme ad esemplari di altre specie quali gracchio alpino *Pyrrhocorax graculus* e sordone *Prunella collaris*), si è voluto comprendere se tale comportamento si manifesti in qualsiasi condizione, e quindi la

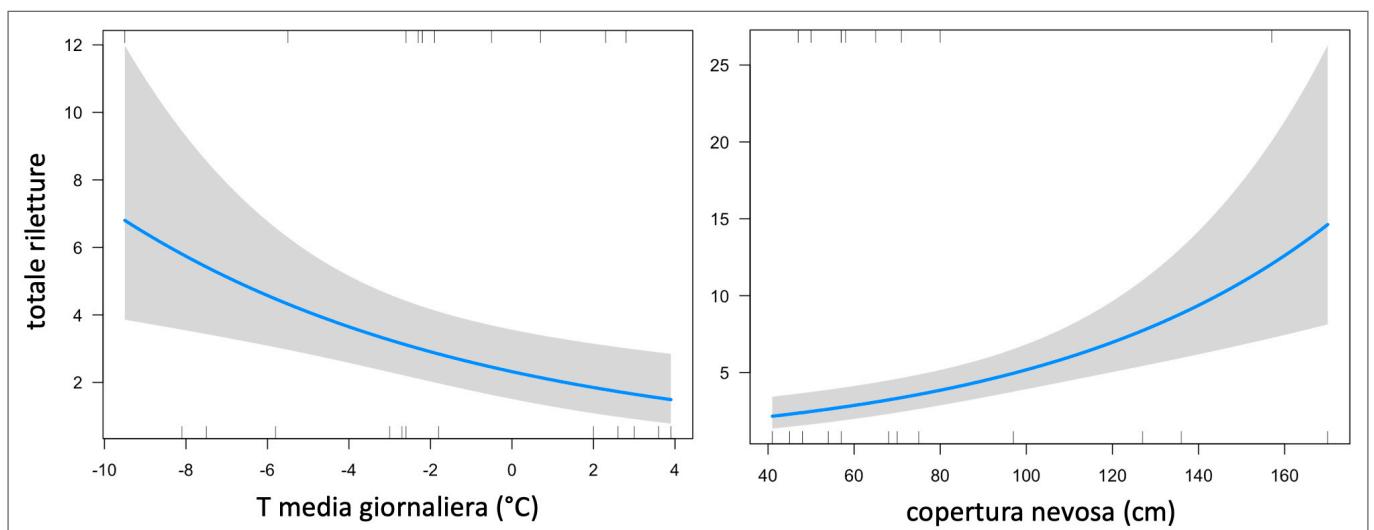
**Tab. 2** – AICc,  $\Delta$ AICc, weighted AICc del modello più competitivo relativo alla relazione del numero di riletture con le variabili ambientali (temperatura media, velocità vento, radiazione solare, pressione atmosferica e altezza neve), e coefficienti e livello di significatività delle variabili. / **Tab. 2** – AICc,  $\Delta$ AICc, weighted AICc of the most competitive model of the relationship between the number of ring resightings and the environmental variables (mean temperature, wind speed, solar radiation, atmospheric pressure and snow height), and the coefficients and the significance level of the variables.

Modelli competitivi	AICc	$\Delta$ AICc	Weighted AICc	
neve + t_media + vel_vento <sup>2</sup>	116.18	0.00	0.88	0.60
Variabile	stima	SE	Test z	P
altezza neve	0.59	0.13	4.12	<0.001
temperatura media	-0.53	0.16	3.12	0.002
velocità vento <sup>2</sup>	0.50	0.23	2.16	0.03
velocità vento	0.05	0.16	0.34	0.737
t_media*vel_vento	0.02	0.09	0.22	0.825

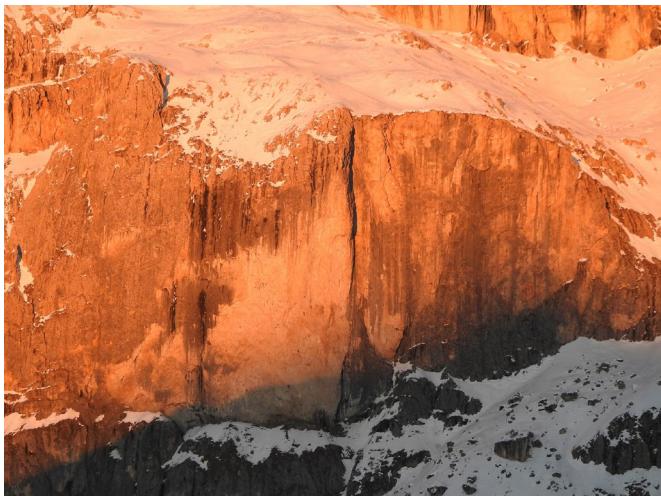
consuetudine ad utilizzare fonti di cibo di origine umana sia elevata, o sia invece un comportamento legato al verificarsi di particolari condizioni meteorologiche.

Mettendo in relazione il numero totale di riletture effettuate in ciascuna sessione, le variabili meteorologiche e ambientali principali (temperatura media giornaliera, velocità media vento, pressione atmosferica, radiazione solare e altezza neve), i risultati sembrano indicare una tendenza degli individui a frequentare i dintorni del rifugio con condizioni più sfavorevoli, in particolare con temperature basse ed estesa copertura nevosa (Fig. 5, Tab. 2).

Per quanto riguarda l'individuazione di roost notturni, nel 2023 sono state effettuate tre uscite di circa tre ore ciascuna (indicativamente dalle ore 16,00 alle ore 19,00) nei dintorni di Baita Segantini. È stato localizzato un dormitorio in parete alla base del Mulaz (Fig. 6), dove sono stati osservati diversi individui (ca. 15-20) in movimento e posati. Si tratta di un comportamento, già osservato in altre popolazioni (Cordigliera Cantabrica, Spagna; C. Bettega & M. Delgado, oss. pers.), di assembramento tardo pomeridiano, poco prima che il sole tramonti, durante il quale gli



**Fig. 5** – Relazione tra il numero di individui inanellati osservati in ciascuna sessione di monitoraggio e le variabili ambientali più significative (temperatura media, altezza neve). / **Fig. 5** – Relationship between the number of ringed birds recorded at each monitoring session and the most significant environmental variables (mean temperature, snow height).



**Fig. 6** – Parete alla base del Mùlaz (Pale di S. Martino, TN) in cui è stato localizzato un dormitorio invernale. / **Fig. 6** – Cliff at the bottom of M. Mùlaz (Pale di S. Martino, TN) where a winter roosting site has been found.

individui che utilizzano il dormitorio volano tra diversi punti della parete richiamandosi, per poi entrare via via nelle diverse cavità utilizzate per trascorrere la notte. Ulteriori due uscite nel corso dell'inverno successivo (2024) non hanno invece rilevato alcun movimento nei pressi della stessa parete, suggerendo la probabile esistenza di più dormitori e l'irregolare utilizzo dei roost notturni da parte della popolazione locale.

## 2.5 Ecologia di movimento

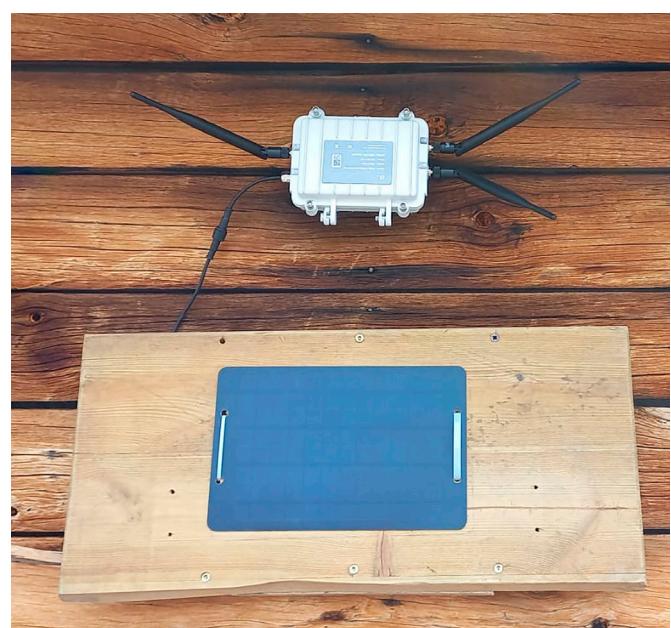
Il movimento è un processo che vincola gli organismi ai propri ecosistemi nello spazio e nel tempo (Nathan et al. 2008) e pertanto qualsiasi modifica può avere importanti conseguenze a livello dell'ecosistema (ad esempio interruzione della dispersione di semi o dell'impollinazione, diffusione di specie invasive, etc. Lundberg & Moberg, 2003). Le variazioni nei movimenti possono avvenire a diversi livelli: a) livello di comunità – specie animali diverse interagiscono tra loro in un sistema ecologico spazio-temporale continuo, condividendo elementi abiotici e biotici del paesaggio; b) livello di specie – una specie può essere mobile durante alcune tappe del suo ciclo di vita e più sedentaria in altri momenti; c) livello di popolazione – nel caso delle metapopolazioni, le popolazioni locali che vivono in habitat frammentati sono connesse da individui che si muovono tra *patches* in diversi periodi di vita (Delgado et al. 2010); d) livello individuale – alcuni organismi possono decidere di muoversi o meno, cambiando comportamento in funzione di fattori endogeni e/o fattori esogeni in diversi anni, stagioni o giorni (per esempio, migrazioni verticali giornaliere o stagionali; Afonso et al. 2014). La strategia di movimento di una specie ne influenza anche l'ecologia spaziale e in ultima analisi il grado di connettività tra popolazioni (Loreau et al. 2005), particolarmente rilevante per specie soggette a isolamento e frammentazione a causa dei cambiamenti climatici (vedi paragrafo successivo).

Per queste ragioni, nel 2019 è iniziata la partecipazione al progetto di studio dell'ecologia del movimento (e della struttura genetica delle popolazioni) di fringuello alpino dell'Europa occidentale guidato dall'Instituto Mixto de Investigación en Biodiversidad (CSIC/Universidad de Oviedo) in Spagna, per (i) studiare le strategie di movimento (migratoria, nomade, erratica) dei fringuelli alpini e comprendere se le strategie differiscono tra le diverse popolazioni presenti nei principali massicci montuosi dell'Europa occidentale; (ii) comprendere quale sia la divergenza genetica tra popolazioni a scala regionale, il grado di connettività tra esse e se esista o meno un sistema di metapopolazioni che include i diversi massicci europei; (iii) localizzare e caratterizzare le aree di svernamento dei fringuelli alpini. Lo studio dell'e-

cologia del movimento del fringuello alpino è iniziato nella Cordigliera Cantabrica già nel 2016, dove i primi dati raccolti dimostrano che gli individui effettuano migrazioni altitudinali in funzione delle condizioni climatiche, ma non sembrano spostarsi verso altre popolazioni, rimanendo nei dintorni dei territori di riproduzione.

La nostra partecipazione al progetto ha interessato la popolazione del PNS, quella per cui si ha la maggior occupazione di cassette nido e per cui è più facile catturare individui nidificanti. Nel primo biennio di collaborazione (2019-2020) sono stati raccolti i primi campioni di sangue da pulli nati nelle cassette nido del PNS che, insieme ai campioni raccolti in altre popolazioni europee, serviranno a comprendere la struttura genetica delle popolazioni. In seguito, a partire dal 2021 con l'avvio dello studio di ecologia del movimento nel PNS, sono stati raccolti ulteriori campioni provenienti da 28 adulti, catturati con reti di tipo *mist-net*. Alcuni degli individui catturati sono stati inoltre marcati tramite datalogger Pinpoint 10 (Lotek UK Ltd.), programmati per registrare una localizzazione ogni 10 giorni per un intero anno solare (da qui in avanti, "datalogger"). Il limite di questi apparecchi è dato dalla necessità di ricatturare gli animali marcati per poter scaricare i dati, ma si è trattato inizialmente dell'unica alternativa disponibile per animali di piccola taglia quali il fringuello alpino, il cui peso medio è di ca. 40 g. A partire dal 2023 si è iniziato ad utilizzare in via sperimentale un nuovo apparecchio gps, il GPS-Cellular-ACC alimentato da batteria solare, fabbricato da Interrex ([www.interrex-tracking.com](http://www.interrex-tracking.com); da qui in avanti, "GPS"). Il dispositivo registra le localizzazioni dell'individuo e i dati raccolti vengono scaricati ogni volta che l'animale entra nel raggio di captazione del segnale da parte di un'apposita antenna – circa 1 km – installata in posizione strategica presso il Passo dello Stelvio, la quale invia poi i dati all'operatore (Fig. 7).

Al 2024 sono stati marcati in totale 18 individui (13 maschi e 5 femmine), di cui 12 con datalogger e 6 con GPS (Tab. 3). Degli individui marcati con datalogger, due (un maschio marcato a Passo Gavia e a una femmina al Passo Umbrail) sono stati ricatturati nel 2022, mentre due sono stati ricatturati nel 2023, ma in questo caso il mancato funzionamento degli apparecchi ha impedito la registrazione delle localizzazioni. Per gli individui ricatturati nel 2022, i datalogger hanno registrato 19 localizzazioni per la femmina (dal 17 luglio 2021 al 13 gennaio 2022) e 31 localizzazioni per il maschio (dal 17 luglio 2021 al 23 maggio 2022) (Fig. 8). Entrambi gli individui



**Fig. 7** – Antenna installata presso il Passo dello Stelvio per rilevare i dati raccolti dai GPS-Cellular-ACC Interrex. / **Fig. 7** – Tracking hub installed at Passo dello Stelvio, to track data recorded by the GPS-Cellular-ACC Interrex.

**Tab. 3** – Tabella riassuntiva degli individui marcati con datalogger e gps nel Parco Nazionale dello Stelvio tra il 2021 e il 2023. / **Tab. 3** – Summary of the individuals marked with dataloggers and gps at the Stelvio National Park from 2021 to 2023.

Tecnologia	Anno	Sesso	Luogo di cattura	Ricattura (dataloggers)
datalogger	2021	F	Stelvio	
		M	Stelvio	
		M	Stelvio	
		M	Stelvio	
		F	Umbrail	2022
	2022	M	Gavia	2022
		M	Stelvio	
		M	Stelvio	
		M	Umbrail	2023
		M	Umbrail	2023
Gps	2023	F	Umbrail	
		M	Stelvio	
		M	Stelvio	
		M	Stelvio	
		F	Umbrail	
		F	Umbrail	

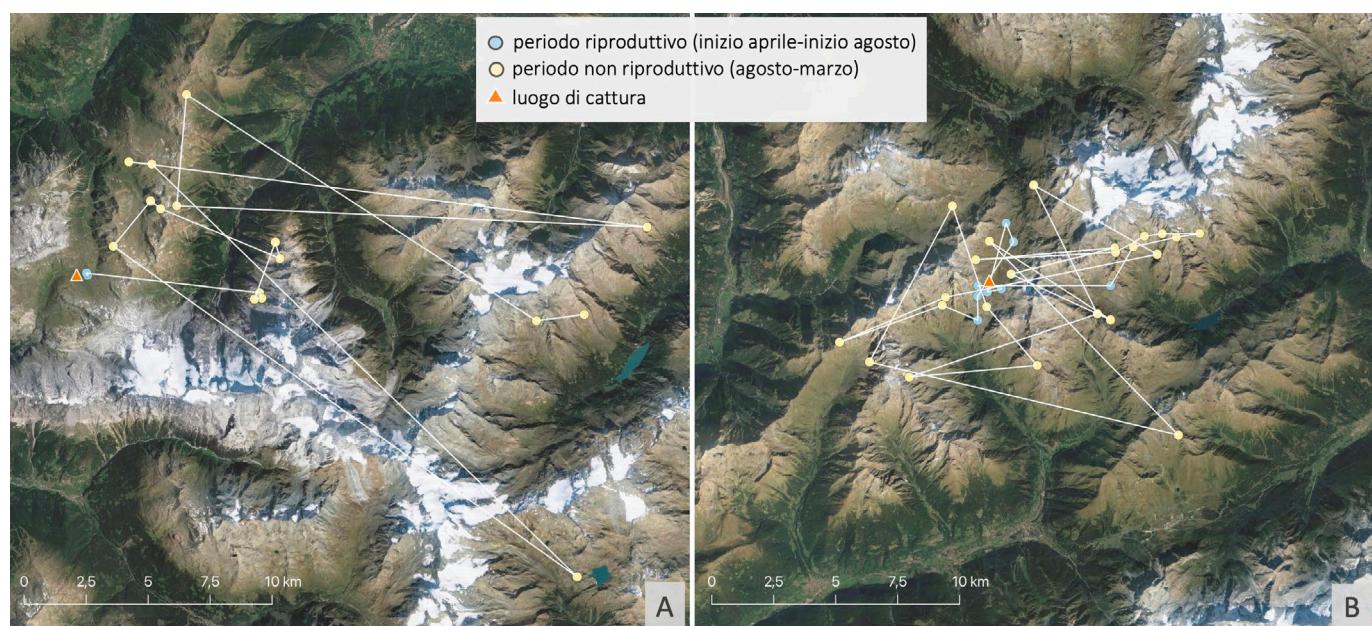
hanno frequentato le zone circostanti l'area di riproduzione durante tutto l'anno, senza compiere spostamenti di rilievo. Esistono alcune differenze tra il maschio e la femmina, come si può notare dal calcolo (effettuato tramite QGIS 3.32) del Minimo Poligono Convesso (MCP), dell'home range annuale (95% KDE; Kernel Density Estimation) e della core area (50% KDE). Questi tre metodi forniscono informazioni utili a stimare l'uso dello spazio. L'MPC è costituito da

un poligono i cui angoli sono le localizzazioni più esterne di un individuo e consente di individuare soprattutto le escursioni all'esterno dell'home-range principale. Il KDE permette invece una stima più accurata dell'home range annuale.

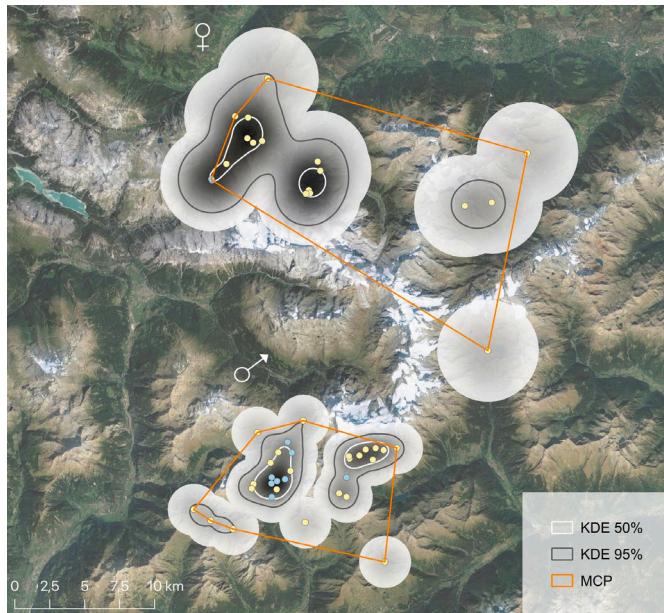
L'MCP della femmina è di 238 km<sup>2</sup>, mentre l'home range stimato attraverso KDE è pari a 95,8 km<sup>2</sup> e la core area a 9,9 km<sup>2</sup>, mentre per il maschio l'MCP è pari a 97,8 km<sup>2</sup>, l'home range è di 36,7 km<sup>2</sup> e la core area di 11 km<sup>2</sup> (Fig. 9). È bene precisare che le localizzazioni della femmina si riferiscono ad un periodo di sei mesi, contro i dieci mesi delle localizzazioni del maschio e, come conseguenza, le localizzazioni della femmina nella stagione riproduttiva (da aprile a inizio agosto) sono solamente tre (16% del totale), mentre quelle del maschio sono otto (26% del totale). Ciò nonostante, appare evidente come nella stagione non riproduttiva la femmina tenda a compiere spostamenti più ampi rispetto al maschio e ad avere perciò un home range più vasto. La distanza massima tra due localizzazioni consecutive della femmina è di 23,8 km, contro i 12,8 km del maschio.

Per quanto riguarda i sei adulti marcati con GPS, sono finora disponibili i dati della stagione riproduttiva e post-riproduttiva, fino ad inizio autunno, di tre maschi; della stagione riproduttiva, post-riproduttiva e di parte dell'inverno di un maschio e i dati annuali (riproduzione, post-riproduzione, inverno e seconda riproduzione) di due femmine. Tali dati saranno analizzati nel corso del 2025, ma testimoniano già il complesso scenario delle strategie di movimento della specie. Infatti, se da un lato vi sono individui stanziali, come il maschio e la femmina di cui accennato sopra, i GPS hanno permesso di confermare con dati oggettivi quanto rilevato dalle indagini isotopiche (Resano-Mayor et al. 2017, 2020), ovvero l'esistenza di flussi migratori da est ad ovest lungo l'arco alpino e oltre, con ritorno ai quartieri riproduttivi in primavera.

I dati finora raccolti, insieme a quelli dei prossimi anni, potrebbero quindi aiutare a comprendere le caratteristiche dei movimenti della specie e le possibili differenze rispetto al sesso e all'età, nonché i fenomeni di dispersione degli individui più giovani. Nel corso dell'inverno 2025 sono stati inoltre marcati con GPS i primi individui della popolazione svernante nell'area di Passo Rolle, nel PNPPSM. In tal modo si andranno ad aggiungere ulteriori informazioni sull'ecologia del movimento della specie, nonché sull'uso dell'habitat invernale e sui roost notturni.



**Fig. 8** – Localizzazioni registrate tramite datalogger relative a (A) una femmina catturata a Passo Umbrail (periodo luglio 2021-gennaio 2022) e (B) un maschio catturato a Passo Gavia (periodo luglio 2021-maggio 2022). / **Fig. 8** – Locations recorded by dataloggers of (A) a female captured at Passo Umbrail (time period from July 2021 to January 2022) and (B) a male captured at Passo Gavia (time period from July 2021 to May 2022).



**Fig. 9 –** Minimo Poligono Convesso (MCP), home range annuale (95% KDE, Stima Kernel di Densità) e core area (50% KDE) della femmina catturata a Passo Umbrail e del maschio catturato a Passo Gavia. / **Fig. 9 –** Minimum Convex Polygon (MCP), annual home range (95% KDE, Kernel Density Estimation) and core area (50% KDE) of the female of Passo Umbrail and the male of Passo Gavia.

## 2.6 Struttura di popolazione e connettività

Dal 2020 al 2023 il MUSE ha collaborato, insieme ad Eurac, all'Università degli Studi di Milano e all'Università di Oulu (Finlandia), ad un progetto di ricerca guidato dal Museo di Scienze Naturali dell'Alto Adige, con l'obiettivo di investigare la capacità di dispersione degli uccelli d'alta quota, in particolare dello spioncello *Anthus spinosus* e del fringuello alpino, combinando la genomica all'ecologia del paesaggio.

Per quanto riguarda il fringuello alpino le analisi genetiche, basate su un campione di 85 esemplari provenienti da sette aree riproduttive in Trentino-Alto Adige e Lombardia (incluse aree campione già indagate dai nostri studi, quali PNPPSM e PNS), hanno dimostrato che la dispersione di individui tra aree riproduttive risente della distanza tra di esse, a prescindere dalle caratteristiche del paesaggio che le separa, con una forte diminuzione già a partire da 20-30 chilometri (Ceresa et al. 2024a). Tale effetto della distanza è in parte probabilmente legato al comportamento filopatrico di molti individui, che cioè rimangono a riprodursi nell'area dove sono nati, limitando il flusso genico e la connettività di popolazione. Inoltre, sono stati osservati alti livelli di inincrocio: il 20% degli individui campionati è nato infatti da genitori imparentati tra loro almeno a livello di cugini di primo grado, se non addirittura più strettamente (Ceresa et al. 2024a). Questo indica che, nell'area indagata nelle Alpi centrali e comprendente Trentino-Alto Adige e rilievi circostanti, la dispersione è già insufficiente a garantire opportunità di accoppiamento con individui non imparentati, pur consentendo ancora un moderato flusso genico tra aree riproduttive. Si tratta complessivamente di risultati preoccupanti a livello di conservazione, perché alti livelli di inincrocio e una scarsa tendenza a disperdere possono aumentare la probabilità di estinzioni locali, in sinergia con la crescente frammentazione e degrado dell'habitat della specie.

I campionamenti effettuati per lo studio di connettività di popolazione hanno anche consentito la raccolta di dati biometrici di dettaglio nelle aree riproduttive considerate. Questo ha permesso di ottenere ulteriori informazioni sull'ecologia di movimento della specie, mettendo in relazione le caratteristiche delle aree riproduttive con tratti della morfologia alare legati all'efficienza e alla manovrabilità di volo. Ali più lunghe, appuntite e concave per esempio per-

mettono un volo più efficiente in termini di costo energetico, a scapito però della manovrabilità (Lockwood et al. 1998), e questi tratti variano tra individui della stessa specie in base a molteplici fattori tra cui sesso, età, abitudini migratorie e caratteristiche dell'habitat utilizzato (Alatalo et al. 1984; Ceresa et al. 2022; Székely et al. 2007). L'analisi dei dati ha dimostrato che i fringuelli alpini che dispongono di minori estensioni di habitat potenzialmente idoneo nelle vicinanze del sito di nidificazione hanno ali che permettono una maggiore efficienza di volo (più lunghe e concave), coerentemente con la necessità di spostamenti più lunghi durante la dispersione e durante la ricerca di aree di alimentazione nel periodo non riproduttivo; anche all'aumentare della quota la morfologia alare si mostra orientata verso una maggiore efficienza in termini energetici, probabilmente a causa del crescente rischio di ipossia (Ceresa et al. 2024b). Queste variazioni morfologiche tra aree riproduttive potrebbero essere dovute a plasticità fenotipica o ad adattamenti locali, facilitati dalla tendenza alla filopatia precedentemente descritta.

Considerato il quadro emerso a livello regionale, è opportuno ampliare la scala di indagine, per verificare il flusso genico tra le popolazioni delle catene montuose europee e determinare la possibile esistenza di una dinamica *sink-source* (Pulliam, 1988) tra le popolazioni centrali delle Alpi e quelle degli altri massicci montuosi, che potrebbe facilitare la persistenza di popolazioni più piccole (come ad esempio quelle della Cordigliera Cantabrica in Spagna o della Corsica in Francia). Questo lavoro auspicabilmente sarà possibile attraverso le collaborazioni internazionali in atto.

## 2.7 Living on the edge: i fringuelli alpini del Carega, la cima più meridionale del Trentino

In base a questi risultati che riportano un certo grado di isolamento e di *inbreeding*, collegato anche all'elevato rischio che le popolazioni più marginali corrono e correranno sempre più in seguito alle variazioni di distribuzione in atto e previste, i fringuelli alpini che abitano i massicci più isolati o meridionali all'interno dell'areale della specie sono potenzialmente più vulnerabili all'effetto combinato dei cambiamenti climatici e ambientali e del grado di isolamento rispetto alle principali popolazioni riproduttrici delle Alpi (Brambilla et al. 2020; Ceresa et al. 2024a). In questo senso, il Gruppo del Carega, massiccio appartenente alle Piccole Dolomiti, a cavallo tra le province di Trento, Vicenza e Verona e noto da alcuni anni quale sito stabile di presenza della specie (Pedrini et al. 2005; Sighèl et al. 2022) presenta un insieme di caratteristiche che lo rendono un'area di studio particolare. Si tratta infatti di un gruppo montuoso di piccole dimensioni (circa 60 km<sup>2</sup> complessivi, con una superficie al di sopra i 1.900 metri di quota inferiore ai 10 km<sup>2</sup>), la cui massima elevazione è raggiunta dall'omonima vetta, Cima Carega (2.259 m s.l.m), la più meridionale delle Alpi centrorientali. La piccola popolazione presente risulta quindi particolarmente a rischio e studiarla può consentire di avere uno sguardo sul possibile destino futuro di altre popolazioni. Lo studio dei fringuelli alpini in quest'area è iniziato nell'estate 2022, con l'installazione di una cassetta nido presso il Rifugio Fraccaroli (grazie alla collaborazione del Comitato Scientifico del CAI), alcune giornate di inanellamento della piccola popolazione nidificante e osservazioni visive. Tra l'estate 2022 e l'estate 2023 sono stati marcati, anche tramite anelli colorati, sette individui, di cui tre adulti, tre giovani e uno di età non classificabile. Dalle catture e letture degli anelli e osservazioni effettuate la popolazione del Carega è stimata in 4-5 coppie nidificanti.

Sei degli individui inanellati in periodo riproduttivo sono stati ripetutamente osservati nell'inverno 2022-2023 presso Bocca di Selva (VR), a circa 8 km in linea d'aria da Cima Carega, all'interno di stormi fino a oltre 50 individui, da osservatori vari (M. Azzolini, com. pers.). Quest'ultimo aspetto evidenzia anche il potenziale contributo di osservatori, fotografi e citizen scientists allo studio della specie. Considerata la dimensione stimata della popolazione nidificante del Carega, si ritiene che a Bocca di Selva convergano individui provenienti da gruppi montuosi più settentrionali o di altre regioni alpine.

### 3. Conclusioni

Nel contesto montano, gli habitat d'alta quota ospitano una biodiversità che, se pur minore in termini di ricchezza di specie rispetto a quelli forestali, è di grandissimo valore ecologico e conservazionistico per il livello di specializzazione e adattamento (Jarzyna et al. 2021; de Zwaan et al. 2023), nonché per la rappresentatività e gli areali spesso ridotti e/o frammentati. Al tempo, questi sono anche gli ambienti a maggior rischio per l'effetto combinato dei cambiamenti climatici e di uso del suolo, che stanno causando l'avanzamento della fascia arbustiva e arborea (Chamberlain et al. 2013) e ampie modifiche nei ritmi e nelle caratteristiche cui molte specie si sono adattate nel corso di periodi lunghissimi. Le specie associate a questi habitat sono inevitabilmente legate a tali dinamiche e gli uccelli, data la loro tendenza a reagire rapidamente ai cambiamenti, possono essere veri e propri "sorvegliati speciali" in grado di fornire indicazioni attendibili sul destino di altre specie ed ecosistemi. I modelli predittivi non sono confortanti in tal senso, con una contrazione dell'areale di distribuzione delle specie specialiste d'alta quota che varia tra il 17 e il 59% (Brambilla et al. 2022).

Tuttavia, per poter identificare l'esistenza di un cambiamento, studiarne le possibili cause e predisporre eventuali azioni di conservazione, è necessario avere serie temporali di dati il più possibile ampie. Per questo il programma di ricerca dedicato ad una specie emblematica dell'alta quota quale il fringuello alpino, che il MUSE sta svolgendo dal 2016 in Trentino e altrove grazie alla collaborazione scientifica dei tanti enti di ricerca nazionali ed internazionali coinvolti e all'European Snowfinch Group, è un importante tassello nel più vasto panorama degli studi in corso per comprendere gli effetti delle modificazioni che stanno interessando le Alpi e i loro ecosistemi e le montagne più in generale. Il valore ecologico di questi ambienti in una fase di forti cambiamenti dovuti alle rapide variazioni climatiche in corso, all'abbandono di pratiche tradizionali e allo sfruttamento turistico, motivano nel proseguire queste ricerche, estendendole anche ad altre specie ornitiche che occupano gli ambienti alpini e subalpini, quali spioncello, sordone, culbianco *Oenanthe oenanthe*, pernice bianca *Lagopus muta* e merlo dal collare *Turdus torquatus alpestris*. Con tali finalità si sta indirizzando, all'interno delle attività che il museo svolge di concerto con l'amministrazione provinciale, anche il nuovo programma di monitoraggi nelle ZPS della Rete Natura 2000.

Per quanto riguarda, nello specifico, il fringuello alpino, il lavoro non si ferma dopo questi primi dieci anni di ricerca. Gli sforzi nel prossimo futuro proseguiranno relativamente a genetica di popolazione a scala europea, selezione dell'habitat ed ecologia del movimento, con lo scopo di continuare ad approfondire le conoscenze sulla specie e sviluppare strategie di conservazione sempre più efficaci, combinando le indagini di dettaglio a scala locale con la ricerca a livello alpino ed europeo. L'esistenza di popolazioni studiate intensivamente sulle Alpi centrali e sulle Dolomiti, per le quali inizia a essere disponibile un'ampia mole di dati, rappresenta un punto di forza per lo studio della specie sulle Alpi italiane. Le collaborazioni di lunga data con ricercatori e istituzioni in altre aree italiane ed europee consentiranno altresì di indagare i fattori cruciali per l'ecologia e la struttura di popolazione a scale rilevanti a livello continentale e di poter evidenziare pattern comuni a tutte le popolazioni, così come eventuali specificità proprie di ciascuna porzione dell'areale europeo della specie.

### Ringraziamenti

Ringraziamo Endrich Silvestri, Enrico Dorigatti, Corrado Alessandrini, Alessandro Forti, Federico Capelli, Matteo Cortesi, Beatrice Sangalli, Marica Bazzanella, Giulia Masiero, Rafa Benjumea, Gigi Luraschi, Riccardo Del Togno e Silvana Lupatini per il prezioso aiuto fornito sul campo. Diego Rubolini e Dan Chamberlain hanno supportato diverse delle ricerche attraverso tutoraggio,

consigli e suggerimenti preziosi, così come Luigi Boitani, Stefano Leonardi e Luca Corlatti. Giuliano Sartori del MUSE, il personale tecnico del PNS e del PPPSM delle rispettive falegnamerie per la realizzazione delle cassette nido distribuite negli anni. Ringraziamo tutti i membri dello European Snowfinch Group per la collaborazione e i frequenti costruttivi scambi di opinioni e iniziative. Per il progetto di studio di genomica del paesaggio e connettività di popolazione ringraziamo Petra Kranebitter per il coordinamento e Laura Tornasi e Michele Pes per l'aiuto sul campo. Ringraziamo Eliseo Strinella per il prezioso aiuto nella determinazione dell'età e del sesso degli animali inanellati in periodo invernale. Siamo molto grati ai gestori dell'Albergo Folgore, in particolare Carlina Rizzi, e ai gestori del Rifugio Capanna Cervino e del Rifugio Fracaroli, per il grande aiuto logistico e di supporto forniti, nonché al personale ISPRA per il supporto alla ricerca e alle procedure autorizzative (Lorenzo Serra, Alberto Sorace, Jacopo Cecere e Piero Genovesi). Siamo molto grati a tutti gli enti che hanno collaborato, CAI – comitato scientifico centrale, Fondazione Lombardia per l'Ambiente, Università di Milano, Pavia, Oviedo, Torino, Berna e Vienna, Lipu, Vogelwarte, ISPRA.

Le ricerche sono state finanziate da: ERSAF – Parco Nazionale dello Stelvio, MUSE e Provincia Autonoma di Trento (PAT), Parco Paneveggio e Pale di San Martino, Rete di Riserve Val di Fassa PAT; lo studio di genomica del paesaggio e connettività di popolazione ("Population connectivity in high-elevation Alpine birds threatened by climate change") è stato finanziato dal fondo "Research Südtirol/Alto Adige" della Ripartizione Innovazione, Ricerca, Università e Musei della Provincia Autonoma di Bolzano/Bozen.

### Bibliografia

- Alatalo, R.V., Gustafsson, L. & Lundbkg, A., 1984 – Why do young passerine birds have shorter wings than older birds? *Ibis* 126: 410-415.
- Alessandrini, C., D. Scridel, L. Boitani, P. Pedrini, & M. Brambilla. 2022 – Remotely Sensed Variables Explain Microhabitat Selection and Reveal Buffering Behaviours Against Warming in a Climate-Sensitive Bird Species. *Remote Sensing in Ecology and Conservation* 8(5): 615-628.
- Afonso P., McGinty N., Graça G., Fontes J., Inácio M., Totland A. & Menezes G., 2014 – Vertical Migrations of a Deep-Sea Fish and Its Prey. *PLoS ONE* 9, e97884.
- Arlettaz R., Nusslé S., Baltic M., Vogel P., Palme R., Jenni-Eiermann S., Patthey P. & Genoud M., 2015 – Disturbance of wildlife by outdoor winter recreation: Allostatic stress response and altered activity-energy budgets. *Ecological Applications* 25, 1197-1212.
- Bettega C., Fernández-González Á., Ramón Obeso J. & Delgado M.D.M., 2020 – Circannual variation in habitat use of the White-winged Snowfinch *Montifringilla nivalis nivalis*. *Ibis* 162(4): 1251-1261.
- Bettega C., Luciani P., Roseo F., Pedrini P., Leonardi S. & Brambilla M., 2025 – Preserving short-sward natural grasslands may provide suitable foraging habitat for a climate-threatened alpine species along ski-pistes. *Animal Conservation* 10.1111/acv.70002
- BirdLife International, 2024 – *Montifringilla nivalis*. The IUCN Red List of Threatened Species 2024: e.T103819582A264557357. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2024-2.RLTS.T103819582A264557357.en>. Accessed on 18 February 2025.
- Brambilla M., Pedrini P., Rolando A. & Chamberlain D.E., 2016 – Climate change will increase the potential conflict between skiing and high-elevation bird species in the Alps. *Journal of Biogeography* 43: 2299-2309.
- Brambilla M., Cortesi M., Capelli F., Chamberlain D., Pedrini P. & Rubolini D., 2017a – Foraging habitat selection by Alpine White-winged Snowfinches *Montifringilla nivalis* during the nestling rearing period. *Journal of Ornithology* 158: 277-286.

- Brambilla M., Caprio E., Assandri G., Scridel D., Bassi E., Bionda R., Celada C., Falco R., Bogliani G., Pedrini P., Rolando A. & Chamberlain D., 2017b. – A spatially explicit definition of conservation priorities according to population resistance and resilience, species importance and level of threat in a changing climate. *Diversity and Distributions* 23, 727-738. <https://doi.org/10.1111/ddi.12572>
- Brambilla M., Capelli F., Anderle M., Forti A., Bazzanella M., Masiere G., Bogliani G., Partel P., Pedrini P., Pedrotti L. & Scridel D., 2018a. – Landscape-associated differences in fine-scale habitat selection modulate the potential impact of climate change on White-winged Snowfinch *Montifringilla nivalis*. *Bird Study* 65, 525-532. <https://doi.org/10.1080/00063657.2018.1561646>
- Brambilla M., Resano-Mayor J., Scridel D., Anderle M., Bogliani G., Braunisch V., Capelli F., Cortesi M., Horrenberger N., Pedrini P., Sangalli B., Chamberlain D., Arlettaz R. & Rubolini D., 2018b – Past and future impact of climate change on foraging habitat suitability in a high-alpine bird species: Management options to buffer against global warming effects. *Biological Conservation* 221: 209-218.
- Brambilla, M., Scridel, D., Sangalli, B., Capelli, F., Pedrini, P., Bogliani, G. & Rubolini, D., 2019 – Ecological factors affecting foraging behaviour during nestling rearing in a high-elevation species , the White-winged Snowfinch (*Montifringilla nivalis*). *Ornis Fennica* 96(3): 142-151.
- Brambilla M., Resano-Mayor J., Arlettaz R., Bettega C., Binggeli A., Bogliani G., Braunisch V., Celada C., Chamberlain D., Chiffard Carricaburu J., Delgado M.M., Fontanilles P., Kmecl P., Korner F., Lindner R., Pedrini P., Pöhacker J., Rubinic B., Schano C., Scridel D., Strinella E., Teufelbauer N. & De Gabriel Hernando M., 2020 – Potential distribution of a climate sensitive species, the White-winged Snowfinch *Montifringilla nivalis* in Europe. *Bird Conservation International* 30(4): 522-532.
- Brambilla, M., Rubolini, D., Appukuttan, O., Calvi, G., Karger, D.N., Kmecl, P., Mihellč, T., Sattler, T., Seaman, B., Teufelbauer, N., Wahl, J. & Celada, C., 2022 – Identifying climate refugia for high-elevation Alpine birds under current climate warming predictions. *Global Change Biology* 28: 4276-4291.
- Caprio, E., Chamberlain, D.E., Isaia, M. & Rolando, A., 2011 – Landscape changes caused by high altitude ski-pistes affect bird species richness and distribution in the Alps. *Biological Conservation* 144: 2958-2967.
- Ceresa, F., Vitulano, S., Pes, M., Tomasi, L., Brambilla, M., Kvist, L., Pedrini, P., Anderle, M., Hilpold, A. & Kranebitter, P., 2022 – Variation in wing morphology is related to breeding environment in a high-elevation specialist bird. *Journal of Avian Biology* 2022(11-12), e03007.
- Ceresa, F., Brambilla, M., Kvist, L., Vitulano, S., Pes, M., Tomasi, L., Pedrini, P., Bettega, C., Anderle, M., Hilpold, A. & Kranebitter, P., 2024a – Restricted dispersal and inbreeding in a high-elevation bird across the 'sky islands' of the European Alps. *Journal of Biogeography* 51(5): 853-868.
- Ceresa, F., Brambilla, M., Kvist, L., Vitulano, S., Pes, M., Tomasi, L., Pedrini, P., Bettega, C., Anderle, M., Hilpold, A., & Kranebitter, P., 2024b – Wing morphology changes with habitat availability and elevation in an alpine-specialist bird. *Global Ecology and Conservation* 56: p.e03276.
- Chamberlain, D.E., Negro, M., Caprio, E. & Rolando, A., 2013 – Assessing the sensitivity of alpine birds to potential future changes in habitat and climate to inform management strategies. *Biological Conservation* 167: 127-135.
- de Zwaan, D. R., A. G. Barras, T. A. Altamirano, A. Asefa, P. Gokhale, R. S. Kumar, S. Li, R.-S. Lin, C. S. Sevillano-Ríos, K. A. Weston, & D. Scridel, 2023 – Global Bird Communities of Alpine and Nival Habitats. pp 90-136 in D. Chamberlain, A., Lehikoinen, and K. Martin, editors. *Ecology and Conservation of Mountain Birds*. Cambridge University Press.
- Delgado, M.D.M., Penteriani, V., Revilla, E., Nams, V.O., 2010 – The effect of phenotypic traits and external cues on natal dispersal movements. *Journal of Animal Ecology* 79: 620-632.
- Delgado, M., Arlettaz, R., Bettega, C., Brambilla, M., De Gabriel Hernando, M., España, A., Fernández-González, Á., Fernández-Martín, Á., Gil, J.A., Hernández-Gómez, S., Laiolo, P., Resano-Mayor, J., Obeso, J.R., Pedrini, P., Roa-Álvarez, I., Schano, C., Scridel, D., Strinella, E., Toranzo, I. & Korner-Nievergelt, F., 2021 – Spatio-temporal variation in the wintering associations of an alpine bird. *Proceedings of the Royal Society B* 288: 20210690.
- Gehrig-Fasel, J., Guisan, A., Zimmermann, N.E., 2007 – Tree line shifts in the Swiss Alps: Climate change or land abandonment? *Journal of Vegetation Science* 18: 571-582.
- Géroudet, P. & Cousin, M., 1998 – Les passereaux d'Europe, vol. II; de la Bouscarle aux Bruants. Delachaux et Niestlé.
- Grangé, J.-L., 2008 – Biologie De Reproduction De La Niverolle Alpine *Montifringilla Nivalis* Dans Les Pyrénées Occidentales Françaises. Nos Oiseaux 55: 67-82.
- Hallman, T.A., Guélat, J., Antoniazza, S., Kéry, M. & Sattler, T., 2022 – Rapid elevational shifts of Switzerland's avifauna and associated species traits. *Ecosphere* 13(8): e4194.
- Heiniger, P. H., 1991a – Anpassungsstrategien des Schneefinken *Montifringilla nivalis* an die extremen Umweltbedingungen des Hochgebirges. *Der Ornithologische Beobachter* 88: 193-207.
- Heiniger, P.H., 1991b – Zur Ökologie des Schneefinken (*Montifringilla nivalis*): Raumnutzung im Winter und Sommer mit besonderer Berücksichtigung der Winterschlafplätze. *Revue Suisse Zoologie* 98: 897-924.
- Hille, S.M. & Cooper, C.B., 2015 – Elevational trends in life histories: revising the pace-of-life framework. *Biological Reviews* 90: 204-213.
- Jarzyna, M. A., I. Quintero & W. Jetz, 2021 – Global functional and phylogenetic structure of avian assemblages across elevation and latitude. *Ecology Letters* 24:196-207.
- Knaus, P., Antoniazza, S., Keller, V., Sattler, T., Schmid, H. & Strebel, N., 2021 – Rote Liste 2021 der Brutvögel.
- Laiolo, P., Delgado, M. M., López-Bao, J. V. & Obeso, J. R., 2021 – Gorrión alpino, *Montifringilla nivalis*, in: *Libro Rojo de Las Aves de España*. López-Jiménez, N. (ed.), pp. 819-820.
- Lantz, S.M. & Karubian, J., 2017 – Environmental disturbance increases social connectivity in a passerine bird. *PLOS ONE* 12: e0183144.
- Lockwood, R., Swaddle, J. P. & Rayner, J. M., 1998 – Avian wingtip shape reconsidered: wingtip shape indices and morphological adaptations to migration. *Journal of Avian Biology* 273-292.
- Loreau, M., Mouquet, N. & Holt, R.D., 2005 – From metacommunities to metaecosystems, in: *Metacommunities: Spatial Dynamics and Ecological Communities*. Holyoak, M., Leibold, M.A., Holt, R.D., Chicago.
- Lundberg, J. & Moberg, F., 2003 – Mobile Link Organisms and Ecosystem Functioning: Implications for Ecosystem Resilience and Management. *Ecosystems* 6: 0087-0098.
- Martin, K., 2001 – Wildlife in alpine and sub-alpine habitats, in: Johnson, D.H., O'Neil, T.A. (Eds.), *Wildlife-Habitat Relationships in Oregon and Washington*. Oregon State University Press., pp. 285-310.
- Martin, K., Wilson, S., MacDonald, E.C., Camfield, A.F., Martin, M. & Trefry, S.A., 2017 – Effects of severe weather on reproduction for sympatric songbirds in an alpine environment: Interactions of climate extremes influence nesting success. *The Auk* 134: 696-709.
- Nathan, R., Getz, W.M., Revilla, E., Holyoak, M., Kadmon, R., Saltz, D. & Smouse, P.E., 2008 – A movement ecology paradigm for unifying organismal movement research. *PNAS* 105(49): 19052-19059.

- Niffenegger, C. A., C. Schano, R. Arlettaz, & F. Körner-Nievergelt. 2023 – Nest Orientation and Proximity to Snow Patches Are Important for Nest Site Selection of a Cavity Breeder at High Elevation. *Journal of Avian Biology* 3(4): e03046.
- Ombadi, M., Risser, M.D., Rhoades, A.M. & Varadharajan, C., 2023 – A warming-induced reduction in snow fraction amplifies rainfall extremes. *Nature* 619: 305-310.
- Pedrini, P., Caldonazzi, M. & Zanghellini, S., 2005 – Atlante degli Uccelli nidificanti e svernanti in provincia di Trento. Museo Tridentino di Scienze Naturali, Trento:692 pp
- Pépin, N.C., Arnone, E., Gobiet, A., Haslinger, K., Kotlarski, S., Notarnicola, C., Palazzi, E., Seibert, P., Serafin, S., Schöner, W., Terzaghi, S., Thornton, J.M., Vuille, M. & Adler, C., 2022 – Climate Changes and Their Elevational Patterns in the Mountains of the World. *Reviews of Geophysics* 60(1): e2020RG000730.
- Pulliam, H.R., 1988 – Sources , Sinks , and Population Regulation. *American Naturalist* 5: 652-661.
- Resano-Mayor, J., Fernández-Martín, Á., Hernández-Gómez, S., Toranzo, I., España, A., Gil, J.A., de Gabriel, M., Roa-Álvarez, I., Strinella, E., Hobson, K.A., Heckel, G. & Arlettaz, R., 2017 – Integrating genetic and stable isotope analyses to infer the population structure of the White-winged Snowfinch *Montifringilla nivalis* in Western Europe. *Journal of Ornithology* 158: 395-405.
- Resano-Mayor, J., Bettega, C., Delgado, M. del M., Fernández-Martín, Á., Hernández-Gómez, S., Toranzo, I., España, A., de Gabriel, M., Roa-Álvarez, I., Gil, J.A., Strinella, E., Hobson, K.A. & Arlettaz, R., 2020 – Partial migration of White-winged snowfinches is correlated with winter weather conditions. *Global Ecology and Conservation* 24: e01346.
- Rixen, C. & Rolando, A. (Eds.), 2013 – The Impacts of Skiing and Related Winter Recreational Activities on Mountain Environments. BENTHAM SCIENCE PUBLISHERS.
- Rolando, A., Laiolo, P. & Carisio, L., 2003 – Urbanization and the flexibility of the foraging ecology of the Alpine Chough *Pyrrhocorax graculus* in winter. *Revue D'Écologie* 58: 337-352.
- Rolando, A., Caprio, E., Rinaldi, E. & Ellena, I., 2007 – The impact of high-altitude ski-runs on alpine grassland bird communities. *Journal of Applied Ecology* 44: 210-219.
- Roseo, F., Celada, C. & Brambilla, M., 2025 – Ski resorts threaten climate refugia for high-elevation biodiversity under current and future conditions in the Alps. *Biological Conservation* 301: 110890.
- Schano, C., Niffenegger, C., Jonas, T. & Körner-Nievergelt, F., 2021 – Hatching phenology is lagging behind an advancing snowmelt pattern in a high-alpine bird. *Scientific Reports* 11: 22191.
- Schmeller, D.S., Urbach, D., Bates, K., Catalan, J., Cogălniceanu, D., Fisher, M.C., Friesen, J., Füreder, L., Gaube, V., Haver, M., Jacobsen, D., Le Roux, G., Lin, Y.-P., Loyau, A., Machate, O., Mayer, A., Palomo, I., Plutzar, C., Sentenac, H., Sommaruga, R., Tiberti, R. & Ripple, W.J., 2022 – Scientists' warning of threats to mountains. *Science of the Total Environment* 853: 158611.
- Scridel D., Anderle M., Capelli F., Forti A., Bettega C., Alessandri ni C., del Mar Delgado M., Pedrotti L., Partel P., Bogliani G., Pedrini P. & Brambilla M., 2024 – Coping with unpredictable environments: fine-tune foraging microhabitat use in relation to prey availability in an alpine species. *Oecologia* 204:845-860.
- Shipley, A.A., Sheriff, M.J., Pauli, J.N. & Zuckerberg, B., 2019 – Snow roosting reduces temperature-associated stress in a wintering bird. *Oecologia* 190: 309-321.
- Sighele, M., Fanelli, V., Chiappisi, C., Dalla Libera, L., Gaetani, S., Izzo, C., Lerco, R., Parricelli P., Sighele, G. & Zanini, C. (a cura di), 2023 – Resoconto ornitologico della Lessinia. Anno 2022. Verona Birdwatching APS, pp. 48
- Strinella, E., Scridel, D., Brambilla, M., Schano, C. & Körner-Nievergelt, F. 2020 – Potential sex-dependent effects of weather on apparent survival of a high-elevation specialist. *Scientific Reports* 10, 8386.
- Szekely, T., Lisleland, T. & Figuerola, J., 2007. Sexual size dimorphism in birds. – In: Fairbairn, D. J., Blanckenhorn, W. U., & Székely, T. Sex, size and gender roles: evolutionary studies of sexual size dimorphism. Oxford University Press, pp. 27-37.
- Vorkauf, M., Marty, C., Kahmen, A. & Hiltbrunner, E., 2021 – Past and future snowmelt trends in the Swiss Alps: the role of temperature and snowpack. *Climatic Change* 165: 44. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03027-x>
- Walsberg, G.E. & King, J.R., 1980 – The Thermoregulatory Significance of the Winter Roost-Sites Selected by Robins in Eastern Washington. *The Wilson Bulletin* 92: 33-39.