

## 4. Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático de la biodiversidad aragonesa. Estudio del efecto de los cambios de temperatura y precipitación en la dinámica poblacional y condición individual de un micromamífero de alta montaña junto a su diversidad de patógenos<sup>2</sup>.

---

Responsable:

Jesús Martínez-Padilla <j.mart@ipe.csic.es>

### 4.1 Introducción

El cambio climático y de usos del suelo son las mayores amenazas para la pérdida de biodiversidad, especialmente en los hábitats de alta montaña ya que son más susceptibles y menos resilientes a perturbaciones. La monitorización de especies que nos puedan indicar estos cambios es fundamental para prevenir y mejorar los efectos de las alteraciones del hábitat, ya sea por cambios climáticos o de usos del suelo. Para ello, es necesario un monitoreo de las poblaciones repetidos temporalmente para cuantificar las fluctuaciones de abundancia que pueden existir, así como los factores que las pueden determinar.

Las fluctuaciones ambientales pueden ser explicadas por una multitud de variables bióticas o abióticas. Dentro de las variables abióticas, es destacable aquellas que están relacionadas con el cambio climático, que tienen un efecto notable sobre la dinámica de poblaciones (Guzmán *et al.*, 2009) o dinámica evolutiva de diferentes caracteres comportamentales o morfológicos (Husby *et al.*, 2011; Evans and Gustafsson, 2017). Por tanto, la influencia de las variaciones ambientales puede tener un impacto sobre las persistencias de las poblaciones y las adaptaciones locales que ocurren en cada población. No obstante, la cuantificación de la influencia de las variables ambientales en cualquier aspecto en una especie animal silvestre no es sencillo por múltiples razones.

---

2 Todas las figuras mostradas en este informe pueden descargarse en este enlace: <https://bit.ly/3mXBNMw>

De un modo simplista, se pueden considerar variaciones temporales y geográficas en el efecto de las fluctuaciones ambientales en las dinámicas poblacionales. Por un lado, temporales ya que los cambios de temperaturas o regímenes de precipitación, no son constantes de un año a otro, si no que pueden fluctuar y variar en intensidad (Vicente-Serrano *et al.*, 2017). Por otro lado, la fluctuación temporal no tiene que ser coincidente geográficamente en el área de distribución de la especie que se considere. En este sentido, una mayor comprensión, y quizá más fiable predicción, de los efectos de los cambios climáticos en una especie requiere el seguimiento temporal replicado en múltiples poblaciones dentro del área de distribución de la especie.

Sin embargo, las fluctuaciones de abundancia no tienen que ser necesariamente un reflejo de variaciones a nivel individual. Esta caracterización individual permite hacer predicciones más precisas de potenciales amenazas para las poblaciones y, por tanto, mejorar las medidas que eventualmente se tendrían que ejecutar para la conservación y gestión de la especie objeto. Un conocimiento detallado de la dinámica poblacional requiere de una información detallada de los individuos que la conforman. Sólo de este modo, se puede establecer la conexión entre las características individuales (fenotipo) con su relación con la eficacia biológica y establecer los rasgos que determinan una mayor contribución al crecimiento poblacional. Por ejemplo, existen rasgos íntimamente relacionados con la eficacia biológica de los individuos, medida como supervivencia o reproducción, que pueden ser buenos indicadores de calidad individual. Es decir, la expresión de determinados rasgos morfológicos o de condición, pueden ser indicadores de una mayor eficacia biológica (Vergara *et al.*, 2009; Vergara *et al.*, 2012). Por ejemplo, la condición física entendida como la relación entre peso y tamaño es un valor utilizado en múltiples especies como indicador de calidad individual (Green, 2001). Por tanto, en este seguimiento se ha planteado también determinar cómo las condiciones ambientales en este rasgo explicarían su contribución al crecimiento poblacional y por tanto a la viabilidad de la población. De este modo, se podría usar la medición de un rasgo como potencial indicador de viabilidad poblacional.

Haciendo uso de los datos recopilados en los últimos 11 años, incluyendo la información recolectada en 2021, se describe el patrón de variación temporal y altitudinal de las abundancias poblacionales e individuales del topillo nival (*Chionomys nivalis*) en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. Las variables ambientales se han recopilado para cada una de las poblaciones que han sido monitoreadas y se componen de variables de temperatura, precipitación e insolación. Sabiendo que las condiciones climáticas

extremas ejercen una alta presión selectiva en poblaciones animales (Le Vaillant *et al.*, 2021; Siepielski *et al.*, 2017), las variables consideradas incluyen máximos y mínimos en diferentes períodos considerados. Específicamente, se estudia la variación en la abundancia poblacional en relación al tiempo y la altitud, así como con variables climatológicas. Además, se aborda la variación temporal y altitudinal en caracteres morfológicos del topillo nival, así como la posible influencia de las variables climáticas en la expresión de estos caracteres.

## 4.2 Material y Métodos

### *Especie de estudio y monitorización*



Fig. 11: Captura de topillo nival (a) en gleras (b) con trampas Sherman (c, d).

El topillo nival (*Chionomys nivalis*) habita en las zonas montañosas de toda Europa, incluidas las españolas (Piñeiro, 2017; Luque-Larena and J. Gosálbez, 2002). Sus poblaciones se localizan en zonas pedregosas (*gleras*) en un rango altitudinal mínimo de unos 1500msnm hasta los 3000 en zonas de montaña (Fig. 11). Es una especie fácilmente detectable sin ninguna protección ni a nivel estatal ni autonómico.

Este trabajo es el resultado de la conjunción de un seguimiento realizado a largo plazo desde 2011 a 2021 en 29 localidades donde habita el topillo nival en el PNOMP distribuidas en un gradiente altitudinal desde los 1400m hasta los 2400m (Fig. 12), siempre durante el mes de septiembre.

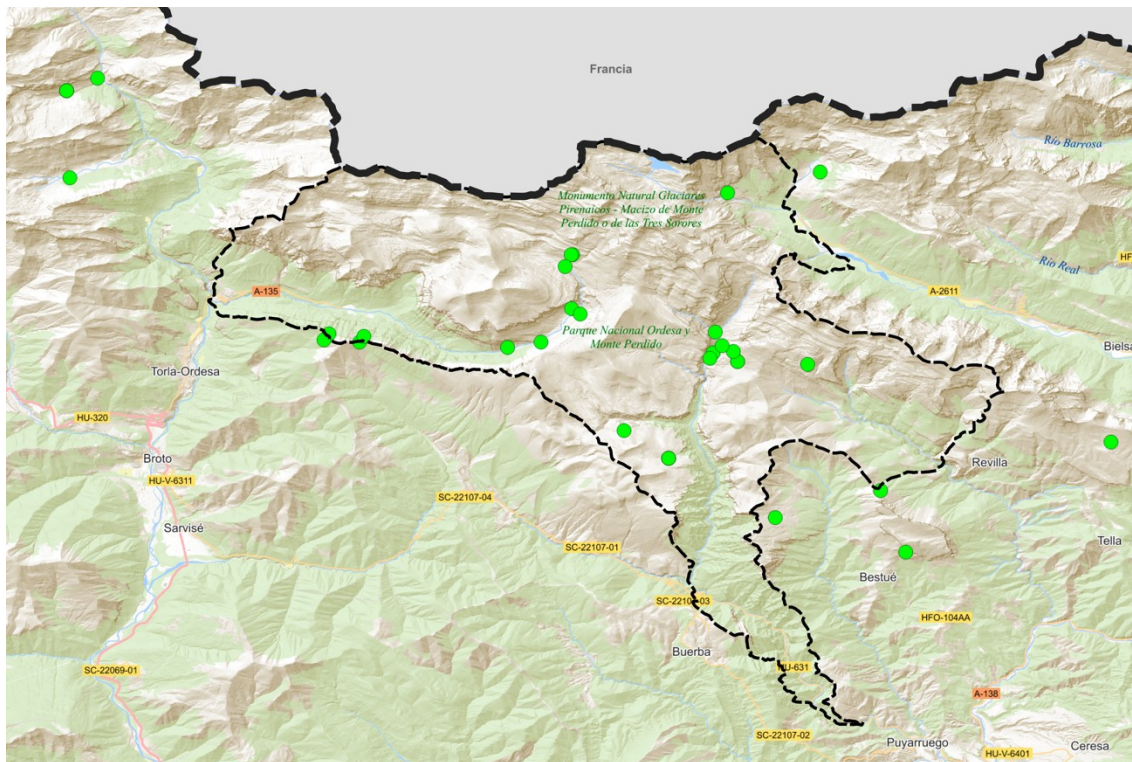


Fig. 12: Localización de las áreas de captura (punto verde) dentro del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido (línea fina discontinua) y alrededores.

El seguimiento durante 2011 a 2019 se ha realizado exclusivamente por SARGA en el Parque Nacional de Ordesa y Monteperdido, y reflejado en las memorias del Programa de Inventariado y Monitorización de los Recursos Naturales. En 2020 y 2021 el IPE y el autor de esta memoria ha estado activamente involucrado en el trampeo iniciando una toma de datos específica detallada en el párrafo siguiente.



Durante los años 2011 a 2021, se colocaron por la mañana un total de 20 trampas Sherman. En cada una de las trampas Sherman se depositó una porción de algodón hidrófobo y un trozo de manzana. Además, cada trampa tuvo bien un trozo de pan untado con una mezcla de alpiste y mantequilla de cacahuete, o una porción de una mezcla de harina, aceite y atún. Estas dos mezclas (mantequilla de cacahuete o harina) se usaron en los años 2020 y 2021, pero no se detectaron diferencias significativas en las tasas de captura. Todas las trampas Sherman se revisaron al amanecer del día siguiente a su colocación. En el caso de que fueran capturados individuos de topillo nival, se retiraron las trampas. Si no se capturó ningún individuo, las trampas Sherman se dejaron hasta la mañana siguiente y recogieron se hubieran capturado individuos o no. Este método se ha calificado como fiable para detectar la presencia de la especie en las áreas seleccionadas (Antor *et al.*, 2012).

Tanto en 2020 como en 2021, se ha realizado un monitoreo más intenso con remarcaje individual para poder establecer tasas de recaptura individuales. El objetivo de este marcaje de captura-recaptura individualizado es poder evaluar si las capturas obtenidas en la primera revisión recogidas durante los últimos 10 años, son un índice fiable abundancia poblacional. Para ello se siguió el método anteriormente descrito, pero con una revisión al atardecer y al amanecer hasta un total de 5 ocasiones independientemente de las capturas exitosas o no de individuos de topillo nival. Cada individuo se marcó con un corte de pelo individualizado para cada individuo capturado en diferentes partes del cuerpo para poder identificarlo. Sin embargo, debido a las bajas tasas de capturas y, consecuentemente, recapturas, obtenidas en los dos años, no se ha podido establecer esta equiparación por falta de poder estadístico. Además, en 2021 se han obtenido muestras de parásitos (pulgas y garrapatas). No obstante, la prevalencia de estos parásitos en la especie ha sido muy baja ( $n=5$ ) y no permite hacer inferencias estadísticas o numéricas debido a la falta de tamaño muestral. Independientemente, se caracterizarán genéticamente las muestras tanto las especies de parásitos como de los patógenos que pueden transmitir tanto las recogidas este año como las que se puedan recoger en el futuro.

Todos los individuos capturados se procesaron de igual modo, independientemente de que se capturaran en la primera o en la segunda revisión. Para cada individuo capturado, se estimó el peso con una pesola (con precisión de 1 g), el tamaño (distancia meato-ano con una precisión del 0.1mm) y se estimó el sexo y edad cuando fue posible. En cada captura, además de las medidas descritas anteriormente, se obtuvieron muestras de

ectoparásitos (pulgas, garrapatas y ácaros) y de sangre para evaluar la carga patogénica y variables hematológicas. El método de captura no fue exclusivo de topillo nival, sino que fueron capturadas otras especies como el lirón careto (*Eliomys quercinus*), el ratón de campo (*Apodemus sylvaticus*), la musaraña común (*Crocidura russula*) o el topillo rojo (*Myodes glareolus*). Todos los individuos fueron medidos y pesados tal como se describe para el topillo nival, desde el año 2020.

### 4.3 Variables climáticas

Debido a que no existe una monitorización climática de cada una de las gleras monitoreadas durante todo el período de seguimiento, se obtuvieron de del resultado de modelizaciones en España a escala 1x1Km (Vicente-Serrano et al., 2017; Vicente-Serrano et al., 2020) En estas modelizaciones se infirió que la variación climática de la glera fue la promediada en la cuadrícula 1x1Km en la que se localizó la población. Esta modelización ofreció datos derivados de temperatura y precipitación quincenales desde 1960 hasta el año 2020, lo que permitió obtener los valores asociados a cada glera y año de muestreo. Se obtuvieron un total de 18 variables climáticas (Tabla 5).

Tabla 5: Descripción de las variables climáticas empleadas y el período de aplicación, así como su código identificativo correspondiente.

	Variable	Componente	Período	Código
<i>Temperatura</i>	Temperatura máxima	Mínima	Invierno	t.max.min.i
	Temperatura máxima	Media	Invierno	t.max.mean.i
	Temperatura máxima	Máxima	Invierno	t.max.max.i
	Temperatura máxima	Mínima	Verano	t.max.min.v
	Temperatura máxima	Media	Verano	t.max.mean.v
	Temperatura máxima	Máxima	Verano	t.max.max.v
	Temperatura mínima	Mínima	Invierno	t.min.min.i
	Temperatura mínima	Media	Invierno	t.min.mean.i
	Temperatura mínima	Máxima	Invierno	t.min.max.i
<i>Precipitación</i>	Precipitación	Mínima	Invierno	p.min.i
	Precipitación	Media	Invierno	p.mean.i
	Precipitación	Máxima	Invierno	p.max.i
	Precipitación	Mínima	Primavera	p.min.p

	Variable	Componente	Período	Código
<i>Insolación</i>	Precipitación	Media	Primavera	p.mean.p
	Precipitación	Máxima	Primavera	p.max.p
	Insolación	Mínima	Invierno	ins.min.i
	Insolación	Media	Invierno	ins.mean.i
	Insolación	Máxima	Invierno	ins.max.i

## 4.4 Análisis estadísticos

Todos los análisis estadísticos se realizaron usando el software libre R (Team, 2017), en la versión 3.5.3, en su consola RStudio (Team, 2020). En todas las ocasiones se realizaron modelos lineales mixtos (LMMs en sus siglas en inglés) usando el paquete lme4 (Bates et al., 2015). En relación a los modelos poblacionales, se usó como variable dependiente la tasa de captura, como el coeficiente entre el número de capturas dividido por el esfuerzo de muestreo multiplicado por 100 para cada año y localización. El esfuerzo de muestreo se consideró como el número de trampas por cada revisión para cada año y localización. Por tanto, la tasa de captura de individuos se ha considerado como un indicador de abundancia poblacional. Las variables fijas explicativas fueron el año y la altitud, así como su interacción para poder explorar la tendencia temporal, altitudinal, además de sus términos cuadráticos para explorar relaciones no lineales, y su efecto interactivo en las tasas de captura. Además, se emplearon las variables climáticas arriba indicadas. Como variables aleatorias, se incluyó el año y la localidad para evitar problemas de pseudoreplicación.

Para estudiar la tendencia temporal, altitudinal o climática de las variables morfológicas, se utilizaron LMMs en el que las variables dependientes fueron el peso o el tamaño (distancia meato-año – ver arriba). En algunos análisis, se dividieron las altitudes en dos categorías (por encima y por debajo de los 2000msnm) para poder estudiar de un modo categorizado las diferencias altitudinales en las variables estudiadas y resaltar las condiciones más adversas en altitudes más elevadas. Para estudiar la condición física, se consideró igualmente el peso del individuo, pero usando el tamaño como variable explicativa. De este modo, se corrige el efecto del peso por el del tamaño. En el análisis de la condición física, se explora si el peso que tiene es mayor o menor al esperado por el tamaño que tiene cada individuo. Para cada modelo en el que se explora la variación de las variables dependientes indicadas, se consideraron el año y la altitud en su forma simple y cuadrática para explorar las tendencias temporales, altitudinales y su efecto

interactivo en su forma lineal o cuadrática. Además, se incluyeron las variables ambientales como variables explicativas. Finalmente, se incluyó la edad del individuo como factor corrector en los modelos (joven o adulto). En el caso de las variables aleatorias, se incluyeron el año y la localidad en todos los modelos. Sin embargo, en el caso de la condición física, se permitió que el intercepto, la pendiente y la covariación entre ambas de la relación entre el peso y el tamaño pudiese diferir de forma lineal dentro de las poblaciones y entre años.

Tanto en los modelos poblacionales e individuales, se incluyeron las variables climáticas además de las variables temporales (año) y altitudinales. Se exploraron los modelos desde el más saturado (con todas las variables ambientales y el resto de variables fijas explicativas), extrayendo de los modelos por pasos secuenciales las variables que tenían un nivel de significación menor. Las variables ambientales no estuvieron correlacionadas entre sí (máxima correlación 0.6), por lo que se descartaron problemas de colinearidad.

## 4.5 Resultados y discusión

### *Capturas*

La altitud media en la que se realizaron todos los muestreos fue de 1767m.s.n.m, con un rango altitudinal entre los 1421 y los 2400m.s.n.m (Fig. 13).

Durante los 10 años de estudio se han capturado un total de 319 individuos. La zona que más capturas aglutinó durante el periodo de estudio fue en los alrededores de las gradas de Soaso. Sin embargo, no fue la que mayor éxito de capturabilidad presentó, sino que las zonas de cascadas del cinco, Otal y Sestrales fueron aquellas con mayor tasa de capturabilidad (Fig. 14).



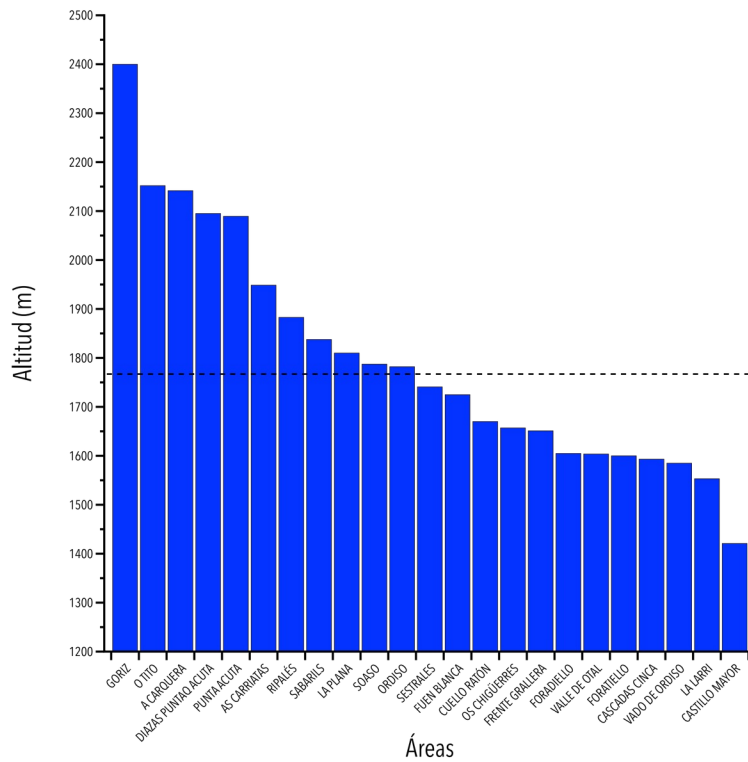


Fig. 13: Distribución altitudinal de las áreas de trampeo de topillo nival monitoreadas en el período comprendido entre 2011 y 2021 en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido, y alrededores. La línea discontinua indica la altitud media de los trampeos.

El peso medio de los individuos capturados fue de  $8.61 \pm 0.17g$  y una longitud media entre el meato y el ano de  $35.80 \pm 0.53mm$  (Tabla 6) A pesar de que existen referencias que indican dimorfismo sexual, no detectamos dimorfismo sexual entre machos y hembras ni en tamaño ( $t=-1.98$ ,  $p=0.06$ ) ni en peso ( $t=-1.021$ ,  $p=0.316$ ). Es probable que los análisis no detecten el dimorfismo sexual en tamaño porque el número de individuos correctamente asignados como macho o hembra es reducido ( $n=30$ ). Si que se encontró un efecto significativo de la edad tanto en el tamaño ( $t=10.728$ ,  $p<0.001$ ) como en el peso ( $t=16.80$ ,  $p<0.001$ ). Como cabría esperar, los individuos jóvenes son más pequeños y pesan menos que los individuos adultos.

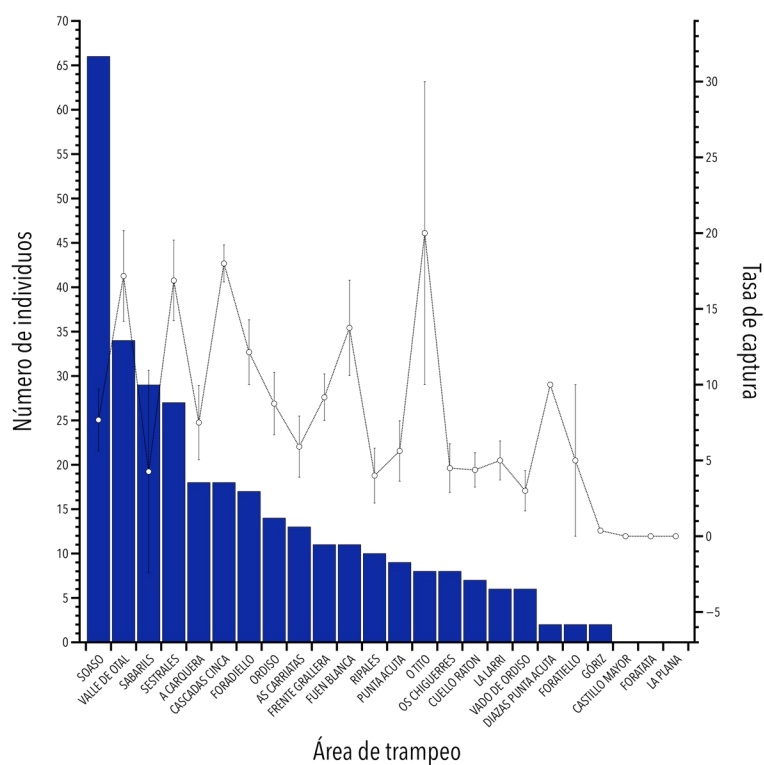


Fig. 14: Número de capturas totales y tasa de capturas por 100 trampas ( $\pm$  error estándar) medias en las zonas de estudio.

Tabla 6: Peso y tamaño medio de todos los individuos capturados en el período de estudio de los que se pudieron categorizar como jóvenes o adultos

	Tamaño			Peso		
	Tamaño muestral	Media [rango]	Error estándar	Tamaño muestral	Media [rango]	Error estándar
<b>Joven</b>	154	7.574 [3.17 – 12.57]	0.143	173	31.434 [13 - 55]	0.453
<b>Adulto</b>	83	10.504 [2.91 – 17.00]	0.327	90	44.205 [25 - 64]	0.662
<b>Total</b>	237	8.608 [2.91 – 17.00]	0.173	263	35.804 [13-64]	0.529

### *Variación temporal y altitudinal de las poblaciones de topillo nival*

No se detectaron relaciones estadísticamente significativas ni lineales ( $t=0.212$ ,  $p=0.833$ ) ni cuadráticas ( $t=-1.419$ ,  $p=0.162$ ) entre la altitud y el índice de abundancia de topillo nival considerado en este estudio. Sin embargo, se detectó una relación cuadrática, no lineal, en el índice de abundancia considerado (estimador:  $-1.488 \pm 0.715$ ,  $t=-2.081$ ,  $p=0.039$ ). Esto indica que no ha habido un incremento o decrecimiento a lo largo de los años, si no que la variación de la abundancia no ha sido constante. De este modo, lo que se observa es que la abundancia poblacional se ha incrementado hacia la mitad del período de estudio y decrecido desde entonces (Fig. 15).

A pesar de que este estudio ha cubierto un considerable número de años (11) y poblaciones diferentes a lo largo de los años (29), es insuficiente para poder caracterizar con certeza las variaciones poblacionales de la especie. Es muy común en múltiples especies de roedores arvicólidos los picos de abundancia (Fargallo et al., 2009) que pueden ser incluso cíclicos (Lambin et al., 1998; Bjornstad et al., 1999; Lambin et al., 2000; Lambin et al., 2006). Es muy aventurado en este momento poder establecer si este patrón obedece a un ciclo en esta especie. Además, estos ciclos poblacionales no son comunes en esta especie y, de hecho, sus dinámicas se prevén estables debido a la cierta homogeneidad y estabilidad de los ecosistemas pedregosos en los que habita (Yoccoz and Ims, 1999). No obstante, no se pudo descartar esta hipótesis que podría ser testada con futuros estudios. Alternativamente, tampoco podemos descartar que estos patrones se deban a razones diferentes a los ciclos poblacionales y, por tanto, que el declive detectado se consolide en los próximos años. En este caso, sería necesario explorar el efecto que otras variables ambientales podrían tener en la dinámica de poblaciones de la especie, especialmente detectar si alguna variable climática no estudiada en esta memoria ha tenido un patrón temporal similar al detectado con la abundancia poblacional, hecho que no parece ser probable en este caso. En este sentido, el estudio de la dinámica de fusión nival o de cubierta de días de nieve sería fundamental para poder estudiar este patrón, ya que los ciclos vitales de esta especie están íntimamente ligadas al manto nivoso (Yoccoz and Ims, 1999). No se puede descartar que otros factores no abióticos, como la predación, la disponibilidad de alimento, los parásitos o la competencia intraespecífica puedan explicar estos patrones de variación de abundancia temporal. De hecho, tanto la abundancia de parásitos como la competencia intraespecífica han sido factores que han sido sugeridos para explicar las variaciones

temporales, cíclicas en este caso, de otras especies actuando sobre la reproducción o supervivencia de los individuos respectivamente (Martinez-Padilla et al., 2014), así como la calidad del alimento (Massey et al., 2008; Reynolds et al., 2012). Dados los resultados descritos, es absolutamente necesario la monitorización a largo plazo de la especie para conocer la tendencia temporal de sus poblaciones ya que no podemos separar si el descenso poblacional se debe a un ciclo propio de la especie, poco esperable en el topillo nival, o se debe a cambios ambientales en los últimos años. Por tanto, es importante continuar con este estudio anual, ya que un monitoreo de las poblaciones de esta especie en un período espaciado de tiempo por años, podría no detectar estos patrones de variación. En este caso, si la monitorización se hubiera ceñido únicamente a los años iniciales y finales, no se habría observado esta tendencia ni se podría saber si la tendencia hubiera sido estable o decreciente.

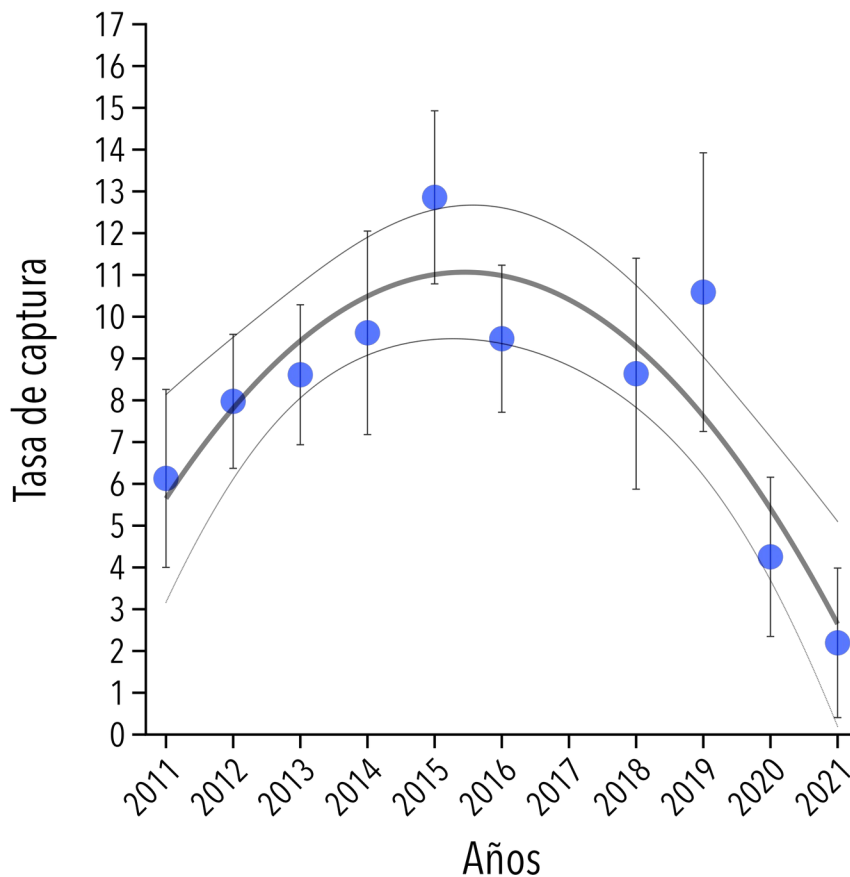


Fig. 15: Tendencia temporal cuadrática negativa estadísticamente significativa de la tasa de captura de topillo nival entre 2011 y 2021.

No se ha detectado un efecto interactivo entre el año y la altitud (estimador = 0.527,  $t = 0.859 \pm 0.613$ ,  $p = 0.392$ ). Esto indica que las tendencias poblacionales han sido similares en los rangos de altitud muestreados.

## 4.6 Variaciones climáticas e influencia del clima en las tendencias poblacionales de topillo nival.

Durante el período de estudio no se detectaron variaciones temporales en ninguna de las variables climáticas consideradas (Tabla 7).

Tabla 7: Análisis de tendencias temporales de todas las variables climáticas consideradas promediadas para cada una de las zonas de estudio de topillo nival en el Parque Nacional de Ordesa.

<b>Variable</b>	<b>Componente</b>	<b>Período</b>	<b>Estimador</b>	<b>t</b>	<b>p</b>
<i>Temperatura máxima</i>	Mínima	Invierno	0.487 ± 0.318	1.530	0.170
<i>Temperatura máxima</i>	Media	Invierno	0.153 ± 0.159	0.958	0.370
<i>Temperatura máxima</i>	Máxima	Invierno	0.010 ± 0.252	0.043	0.967
<i>Temperatura máxima</i>	Mínima	Verano	0.036 ± 0.256	0.142	0.891
<i>Temperatura máxima</i>	Media	Verano	0.114 ± 0.087	1.302	0.234
<i>Temperatura máxima</i>	Máxima	Verano	0.024 ± 0.216	0.113	0.914
<i>Temperatura mínima</i>	Mínima	Invierno	0.433 ± 0.266	1.625	0.148
<i>Temperatura mínima</i>	Media	Invierno	0.082 ± 0.117	0.705	0.504
<i>Temperatura mínima</i>	Máxima	Invierno	0.028 ± 0.117	0.248	0.812
<i>Precipitación</i>	Mínima	Invierno	0.637 ± 0.645	0.988	0.356
<i>Precipitación</i>	Media	Invierno	0.212 ± 2.098	0.101	0.922
<i>Precipitación</i>	Máxima	Invierno	6.691 ± 3.544	1.888	0.101
<i>Precipitación</i>	Mínima	Primavera	0.285 ± 0.266	1.071	0.320
<i>Precipitación</i>	Media	Primavera	1.718 ± 1.425	1.206	0.267
<i>Precipitación</i>	Máxima	Primavera	4.597 ± 3.336	1.378	0.211
<i>Insolación</i>	Mínima	Invierno	0.005 ± 0.068	0.077	0.941
<i>Insolación</i>	Media	Invierno	0.033 ± 0.128	0.263	0.800
<i>Insolación</i>	Máxima	Invierno	-0.036 ± 0.1868	-0.193	0.852

Aunque el estudio ha considerado 18 variables climáticas, no se ha podido estudiar la tendencia temporal de otras variables climáticas que pueden tener una influencia clave



en la dinámica poblacional del topillo nival, como pueden ser todas aquellas relacionadas con la cobertura y fusión nival. Estas variables relacionadas con la dinámica nival no se han podido estudiar hasta el momento, pero se han establecido colaboraciones multidisciplinares y interdepartamentales en el Instituto Pirenaico de Ecología, donde a través de modelizaciones de imágenes satélites, se pueden inferir mediante estimaciones, parámetros básicos de dinámica nival. Además, se está estudiando la posibilidad de establecer un monitoreo constante en una de las zonas donde el grupo de Hidrología Ambiental e Interacciones Clima y Actividad Humana del Instituto Pirenaico de Ecología que tiene establecido una monitorización detallada de la dinámica nival mediante una estación meteorológica.

### *Variaciones fenotípicas y variables ambientales*

No se detectaron variaciones temporales o altitudinales en la morfología o peso de los individuos (todas las  $p > 0.175$ ). Si que existió una tendencia positiva a un mayor tamaño de los individuos con el tiempo (estimador =  $0.912 \pm 0.263$ ,  $t = 3.471$ ,  $p = 0.008$ ), pero esta relación desapareció al incluir en los modelos la edad de los individuos (edad, estimador =  $3.048 \pm 0.288$ ,  $t = 10.585$ ,  $p < 0.001$ ; año: estimador =  $0.659 \pm 0.371$ ,  $t = 1.775$ ,  $p = 0.106$ ). Esto puede indicar que la relación entre individuos adultos y jóvenes se ha ido alterando con el tiempo. No obstante, los datos recogidos no permiten determinar esta influencia de la ratio joven/adulto cuantitativamente. Sólo se puede especular que quizá la ratio de edades esté alterándose a lo largo del tiempo bien por una mayor presencia de adultos o escasez de juveniles con el paso de los años.

En relación a las condiciones ambientales, parece que las precipitaciones mínimas en invierno tuvieron una influencia positiva tanto en el peso como en el tamaño de los individuos, cuando se considera una categorización de las altitudes en dos categorías por encima y por debajo de 2000m.s.n.m. (peso: interacción altitud \* precipitación mínima, estimador =  $0.998 \pm 0.311$ ,  $t = 3.203$ ,  $p = 0.001$ ; tamaño: interacción altitud \* precipitación mínima, estimador =  $0.329 \pm 0.109$ ,  $t = 3.017$ ,  $p = 0.003$ ). Estos resultados indican que unos mínimos de precipitación son positivos especialmente en las zonas altas (por encima de 2000m.s.n.m.) y que favorecerían individuos más pesados y más grandes (Fig. 16). Estos patrones no parecen estar mediados por la edad de los individuos en el caso del peso (interacción altitud \* precipitación mínima \* edad, estimador =  $3.007 \pm 3.106$ ,  $t = 0.968$ ,  $p = 0.333$ ) o el tamaño (interacción altitud \* precipitación mínima \* edad, estimador =  $0.180 \pm 1.148$ ,  $t = 0.157$ ,  $p = 0.875$ ).

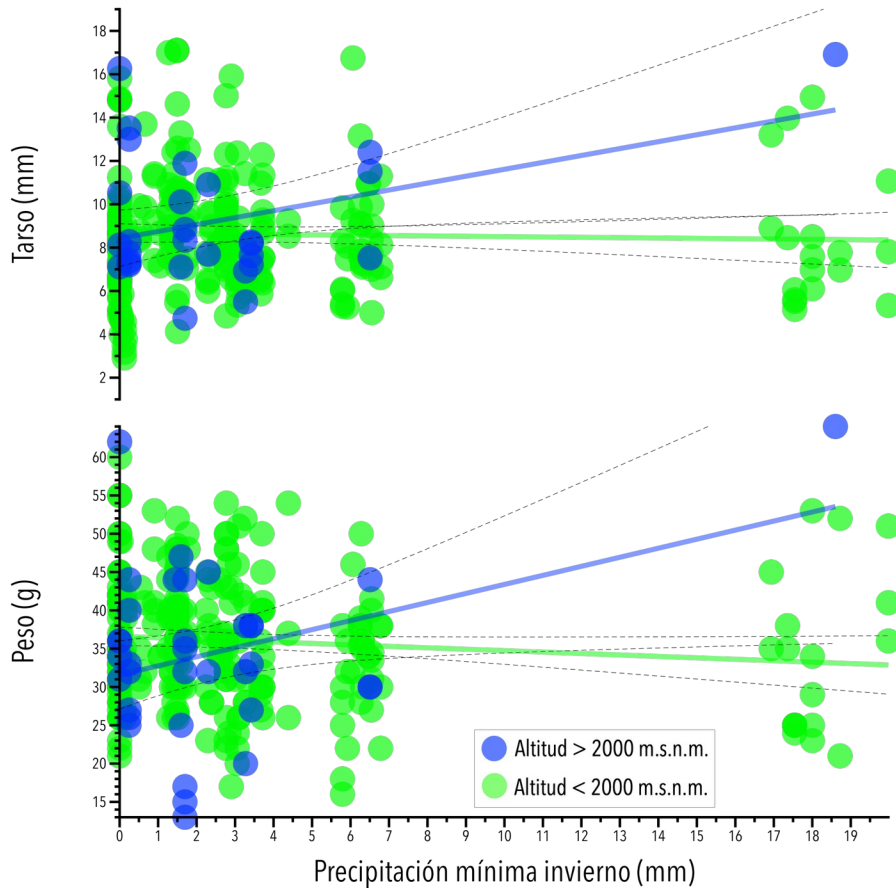


Fig. 16: Relación entre el tamaño (arriba) y el peso (abajo) de topillo nival capturados en septiembre durante el período 2011-2020 y la precipitación mínima estimada en las zonas de estudio.

Los resultados anteriores ponen de manifiesto el efecto positivo que puede tener la precipitación en invierno tanto en el tamaño como en el peso de los topillos nivales en las localidades muestreadas. Sin embargo, el efecto positivo de la precipitación estuvo mediado por la altitud. En este caso, una categorización de la altitud en dos clases (por encima y por debajo de los 2000m.s.n.m. – Fig. 16), sugiere que la precipitación en invierno tuvo un efecto positivo en el peso y tamaño de los individuos sólo en las áreas muestreadas por encima de los 2000m.s.n.m. Las razones que explican este patrón pueden ser múltiples y sólo se puede especular. Asumiendo un razonamiento especulativo, puede que unas precipitaciones mínimas abundantes en invierno en cotas altas sean en forma de nieve, lo que sugeriría una mayor cobertura de nieve y quizá una mayor abundancia de alimento en la primavera y verano, lo que permitiría un mejor crecimiento y ganancia de peso. La razón por la que este patrón sea diferente entre las zonas altas y bajas, puede ser por que las precipitaciones mínimas tienden a ser mayores

en las zonas bajas considerando sólo las áreas muestreadas (estimador =  $-0.152 \pm 0.100$ ,  $t = -1.515$ ,  $p = 0.135$ ). Es decir, que las precipitaciones mínimas en invierno pueden ser un factor limitante en cotas altas y unas mayores precipitaciones mínimas pueden eliminar esa limitación. Considerando estos patrones, se podría indicar que, si durante los años se produjera un incremento de las precipitaciones mínimas en invierno constante en el tiempo, favorecería un dimorfismo en tamaño entre poblaciones a alta o baja altitud. Este hecho no parece que haya ocurrido en los últimos 10 años (Tabla 7) y, por tanto, no hay diferencias estadísticamente significativas ni en el peso (estimador =  $0.532 \pm 1.592$ ,  $t = 0.335$ ,  $p = 0.740$ ) ni en el tamaño (estimador =  $0.581 \pm 0.446$ ,  $t = 1.304$ ,  $p = 0.202$ ) de los topillos entre zonas de alta y baja altitud.

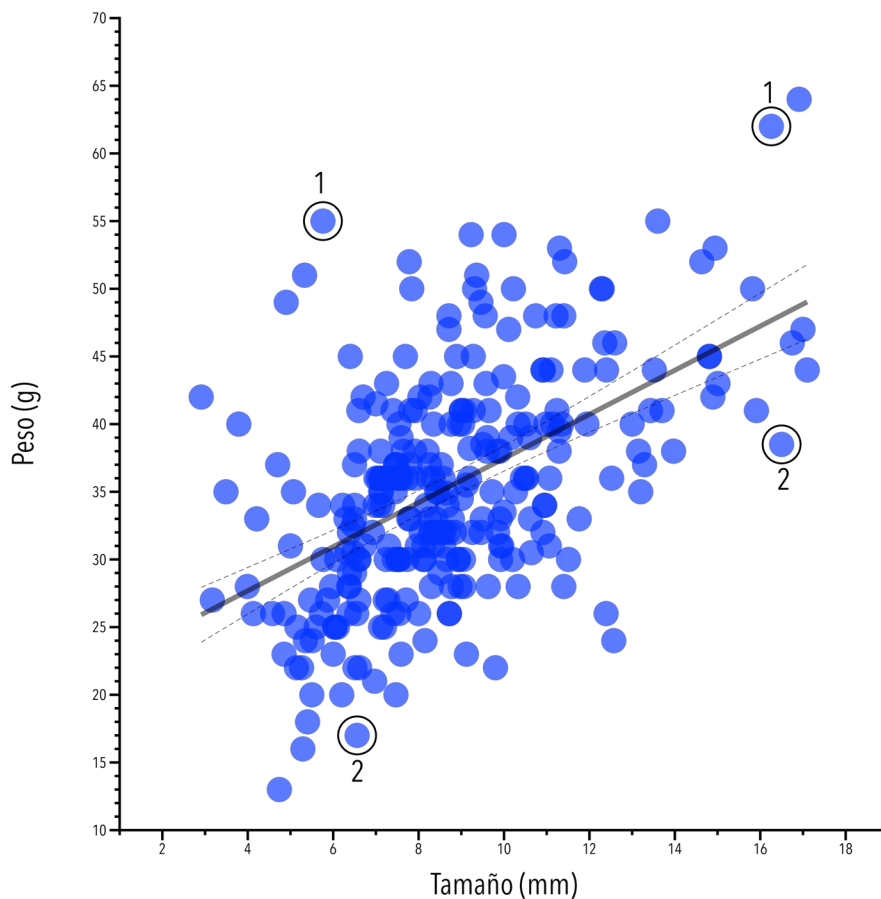


Fig. 17: Relación lineal positiva entre el peso y el tamaño (medido como la longitud entre el meato urinario y el ano) en el topillo nival durante 10 años de estudio. Los puntos 1 representan aquellos individuos con un tamaño mayor al que se esperaría por su tamaño, mejor condición física, y los puntos "2" indican los individuos con un tamaño menor al que se esperaría por su tamaño, de menor condición física.

No obstante, la significación estadística de estas relaciones debe tomarse con cautela porque vienen explicadas por años de excesiva precipitación anual en invierno. Como se observa en la Fig. 16, existe un grupo de precipitaciones mínimas en invierno mayores de 16mm, que pertenecen todas al año 2018. Excluyendo los datos de precipitación inferida del año 2018, las tendencias descritas arriba desaparecen (Peso: interacción altitud \* precipitación mínima, estimador =  $0.029 \pm 0.569$ ,  $t = 0.569$ ,  $p = 0.958$ ; tamaño: interacción altitud \* precipitación mínima, estimador =  $0.162 \pm 0.396$ ,  $t = 0.396$ ,  $p = 0.682$ ). No obstante, en este informe se han considerado como válidas ya que los eventos climáticos extremos (altas precipitaciones mínimas en un año) pueden tener una importancia clave en la dinámica poblacional y características individuales en poblaciones animales naturales.

El resto de variables climáticas consideradas (Tabla 5, p.39) no ha mostrado una relación estadísticamente significativa con el peso o el tamaño. Esto indica que las condiciones ambientales consideradas no explican mucha varianza de las variables morfológicas en el topillo nival en las zonas de muestreo. No obstante, no podemos descartar que otras variables no estudiadas, como las ya referidas a la fusión nival, sean determinantes en la morfología anual de los individuos capturados.

En relación a la condición física entendida como la relación entre el peso y el tamaño, se observó una relación positiva entre estas dos variables morfológicas (estimador =  $0.662 \pm 0.176$ ,  $t = 3.763$ ,  $p < 0.001$  – Fig. 17). Es decir, los individuos que eran más grandes, pesaban más.

La relación peso-tamaño, referido aquí como condición física, puede ser entendida como el exceso o deficiencia de peso para un individuo para un tamaño dado. Es decir, en un individuo que está por encima que la recta de regresión (Fig. 17 – punto 1) indicaría que tiene un peso que está por encima del esperado para su tamaño. Por el contrario, un individuo que está por debajo de la recta de regresión, indicaría que tendría un peso menor al esperado por su tamaño (Fig. 17 – punto 2). Aquellos individuos que están por debajo de la recta de regresión estarían en baja condición física e indicaría una menor capacidad para responder a condiciones ambientales adversas. Es importante, no obstante, atender a la pendiente de la recta de regresión entre el peso y el tamaño. Una recta de regresión horizontal indicaría que el peso de un individuo sería independiente de su tamaño mientras que una pendiente claramente positiva, como es en este caso (Fig. 17), indica que hay un ajuste del peso al tamaño.

Sin embargo, la condición corporal parece tender a estar mediada no sólo por el paso del tiempo, sino también por la altitud (interacción tamaño \* altitud \* año, estimador = 0.366,  $t = 1.851$ ,  $p = 0.067$ ). En este caso, para comprender las relaciones entre la condición y el tiempo y la altitud, se ha dividido la tendencia temporal en función de los parámetros de cambio demográfico, con una categoría entre el momento de máxima abundancia y los momentos de crecimiento o decrecimiento (Fig. 15, p.45). Además, se ha categorizado la altitud en dos categorías en función de si las poblaciones estaban a más o menos de 2000m.s.n.m. Considerando esta categorización, la relación anterior resulta estadísticamente muy significativa (estimador = -2.516,  $t = -3.155$ ,  $p = 0.001$  – Fig. 18).

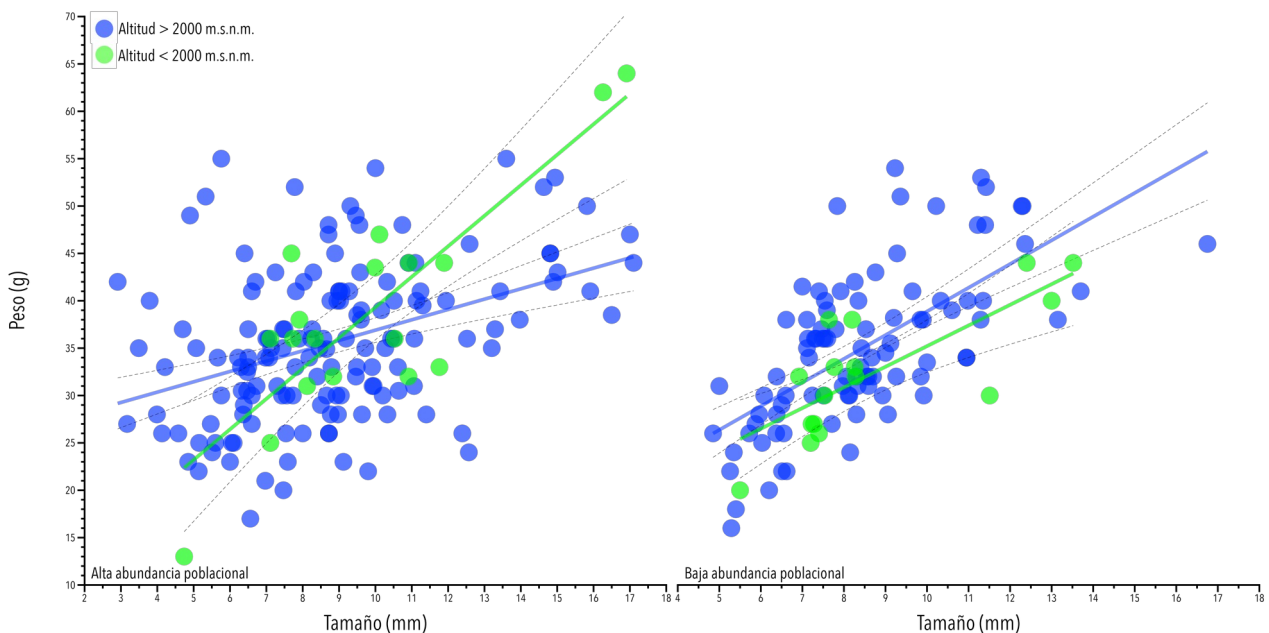


Fig. 18: Relación entre el tamaño y el peso en áreas por encima (azul) y por debajo (verde) de los 2000m.s.n.m y en momentos de alta abundancia poblacional (izquierda) o baja abundancia poblacional de topillo nival en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido y alrededores.

Estas aparentemente complejas interacciones indican que la condición física de los individuos capturados está condicionada tanto a la altitud en la que viven como en el momento de la dinámica poblacional en la que se capturaron. Por partes, en momentos de alta abundancia poblacional, los resultados indican que la relación entre el tamaño y el peso es mucho más pronunciada en zonas altas que en zonas bajas (Fig. 18, izquierda). Así, en momentos de baja densidad poblacional, los resultados indican que, aunque el peso y el tamaño están relacionados, su asociación no depende de la altitud en la que fueron muestreados (Fig. 18, derecha). Por tanto, los resultados sugieren que la relación



entre el peso y el tamaño es más acentuada (más pendiente) en los individuos capturados en momentos de mayor densidad de población y además en mayores altitudes. Una relación más intensa entre el peso y el tamaño indicaría que los individuos tienen un mayor ajuste de peso al tamaño que tienen, de modo que los individuos no se desvían demasiado del peso respecto a su tamaño. En un opuesto hipotético, una ausencia de relación entre el peso y el tamaño indicaría que los individuos podrían tener cualquier tamaño para un peso dado, de tal manera que individuos de un peso, digamos medio, pueden ser muy grandes o muy pequeños, lo que les haría ser muy delgados o con sobrepeso respectivamente. Biológicamente estos resultados tienen una importancia vital porque suele suceder que cuando las condiciones ambientales son adversas, los individuos más o menos pesados para su tamaño suelen estar desfavorecidos con respecto a otros individuos en la población que tienen un ajuste mejor de su peso al tamaño corporal. Por tanto, se podría inferir de estas relaciones que cuando las condiciones ambientales son más adversas es en el momento de máxima abundancia poblacional y especialmente a mayores altitudes.

El mecanismo detrás de unas condiciones ambientales adversas en altitudes mayores, pueden ser múltiples. Por un lado, pueden ser de origen climático. Así, puede que las condiciones de temperatura o precipitación sean más exigentes en zonas altas. Puede que la permanencia del manto nival en las poblaciones a mayor altitud pueda estar determinando estas variaciones, ya que ésta determina en gran medida el ciclo vital de la especie (Bonnet et al., 2017). Por otro lado, no podemos descartar que existan otros factores bióticos que expliquen esta variación, como puede ser una mayor abundancia de predadores, parásitos o patógenos, menor disponibilidad de alimento o mayor competencia por el espacio con otras especies de roedores. De hecho, una mayor carga de parásitos en la población o una mayor competencia hacen que estos ajustes sean mucho más acusados (Vergara et al., 2011; Vergara et al., 2012). No obstante, se ha detectado que la relación tamaño y peso no sólo está mediada por la altitud, sino también por la densidad poblacional. Esto indica que hay un efecto interactivo entre la densidad poblacional y la altitud. Los efectos de la densidad poblacional en la variación de las abundancias poblaciones han sido ampliamente estudiados (Mougeot et al., 2003), y podría ser que tanto la carga de parásitos (Redpath et al., 2006; Hudson, 1986; Hudson et al., 1998), como un factor externo, o la competencia inter o intraespecífica (Martinez-Padilla et al., 2014; Mougeot et al., 2009; Seiwright et al., 2005) derivados de una mayor densidad, puedan ser factores determinantes en la condición física de los individuos.

## 4.7 Conclusiones

1. Durante el período comprendido entre 2011 y 2021 se han capturado un total de 319 individuos en 29 localidades diferentes, en un rango altitudinal entre 1421 y 2400m.s.n.m dentro y en los alrededores del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. Se siguió un método estandarizado de captura en vivo por medio de trampas Sherman que permite establecer tanto comparaciones interanuales, como entre diferentes altitudes dentro del mismo año.
2. Durante los años 2020 y 2021 se ha intentado poder establecer una equivalencia entre el número de capturas realizadas en la primera visita del monitoreo y la abundancia poblacional empleando métodos de captura recaptura individualizados. La baja tasa de capturas de los dos últimos años y, consecuentemente, de recapturas han impedido poder establecer esta relación. Por tanto, en este trabajo se asume que el número de individuos capturados en la primera revisión, o segunda si la primera no fue exitosa, como un estimador de abundancia poblacional. Sería necesario poder hacer una estimación de la abundancia con métodos de captura-recaptura para conocer la incertidumbre asociada a las estimas de abundancia poblacional utilizadas en este informe.
3. Asumiendo la tasa de captura como un índice válido de abundancia poblacional, observamos que las abundancias poblacionales son algo menores en el último año con respecto al primero. Sin embargo, el seguimiento anual de la especie en múltiples localidades ha sido suficiente para poder detectar que ha habido un incremento de la abundancia poblacional hasta alcanzar un pico en 2015, seguido de un continuo decrecimiento hasta el año 2021 llegando a niveles inferiores del primer año.
4. Según los resultados de los datos analizados, el topillo nival ha sufrido un decrecimiento poblacional en estos últimos 10 años que no ha sido lineal, sino que las abundancias poblacionales han decrecido desde el año 2015. Sin embargo, este decrecimiento poblacional no se asoció a ninguna de las 18 variables climáticas consideradas. Las razones por las que se ha producido esta variación poblacional son desconocidas. Variables abióticas no consideradas en este estudio (dinámica de la nieve en las zonas de estudio) o bióticos como la carga parasitaria, comunidad de predadores, la calidad del alimento o la competencia intraespecífica son posibles mecanismos que pueden explicar los patrones de variación de

- abundancia poblacional. Continuar con el seguimiento interanual para poder por un lado estudiar si este patrón de decrecimiento poblacional se mantiene y dilucidar las causas de la variación de las abundancias es fundamental para esta especie centinela del cambio climático en zonas de alta montaña.
5. Una baja densidad poblacional puede llevar a la extinción local de la especie por una baja diversidad genética de los individuos, por lo que sería necesario poder cuantificar, a pequeña escala, la diversidad genética de las poblaciones estudiadas en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. Además, determinar el potencial flujo genético que pudiera haber entre las poblaciones sería fundamental para poder cuantificar el potencial genético de respuesta en las poblaciones frente a perturbaciones ambientales (García-Navas et al., 2015). En este sentido, ya se están realizando la extracción de ADN y análisis preliminares para poder estimar diversidad genética dentro del PNOMP y su relación con otras poblaciones a nivel Europeo con investigadores del Laboratory of Paleogenetics and Conservation Genetics de la University of Wrocław (Polonia).
  6. No se detectaron variaciones temporales de dos caracteres morfológicos como el peso y el tamaño en el topillo nival durante el período 2011 a 2021. Sin embargo, las precipitaciones mínimas en invierno si tuvieron un efecto positivo tanto en el peso como en el tamaño de los topillos nivales. Sin embargo, el efecto de las precipitaciones en invierno en el peso y tamaño sólo fueron detectadas en áreas de elevada altitud (mayores a 2000m.s.n.m.). Es posible que unos mínimos de precipitación en invierno sean necesarios para incrementar la abundancia de alimento en las zonas de mayor altitud y así favorecer el crecimiento en peso y tamaño de los individuos. No se detectaron tendencias temporales de las precipitaciones mínimas en invierno en los últimos 10 años, pudiendo ser la razón de que no existan diferencias de peso o tamaño entre las áreas de alta o baja altitud.
  7. La relación entre el peso y el tamaño fue positiva, pero la intensidad de esa asociación estuvo mediada por la altitud y por la abundancia poblacional. Sabiendo que la tendencia poblacional no difirió entre áreas de alta y baja altitud, se observó que la asociación más estrecha entre el peso y el tamaño se detectó en zonas de elevada altitud (mayores a 2000m.s.n.m.) y cuando la abundancia poblacional fue máxima. Una asociación más intensa entre el peso y el tamaño, es decir, la condición física, suele ir asociada a situaciones ambientales más adversas.

Por tanto, los resultados apuntan a que cuando la densidad poblacional es mayor en áreas más elevadas, las condiciones ambientales son más adversas. Se sugiere que la interacción de factores climáticos y densodependientes pueden explicar esta variación en la condición física de los individuos.

## 4.8 Agradecimientos

Este trabajo no habría sido posible sin la colaboración en la captura desde 2011 por Fernando Carmena y Nacho (SARGA), ni sin la ayuda en 2020 de Julia Cosín, Guillermo Coronas, Dani y Meme y María Jarne (SARGA) en 2021. Carlos Camacho y Jaime Muriel han participado activamente en los trampeos de 2020 y 2021, con los que, sin su ayuda, no habría sido posible realizar el trabajo de campo necesario para la elaboración de esta memoria. Agradecemos enormemente el apoyo del PNOMP para la realización y tramitación de los permisos para poder desarrollar este trabajo.

## 4.9 Referencias

- Antor, R., Gómez, I., Carmena, F. & Villagrasa, E. 2012. Seguimiento de las poblaciones de baja altitud de topillo nival. . Gobierno de Aragón.
- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B. & Walker, S. 2015. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67: 1-48.
- Bjornstad, O. N., Ims, R. A. & Lambin, X. 1999. Spatial population dynamics: analyzing patterns and processes of population synchrony. *Trend Ecol Evol*, 14: 427-432.
- Bonnet, T., Wandeler, P., Camenisch, G. & Postma, E. 2017. Bigger Is Fitter? Quantitative Genetic Decomposition of Selection Reveals an Adaptive Evolutionary Decline of Body Mass in a Wild Rodent Population. *PLoS Biol*, 15: e1002592.
- Evans, S. R. & Gustafsson, L. 2017. Climate change upends selection on ornamentation in a wild bird. *Nat Ecol Evol*, 1: 39-39.
- Fargallo, J. A., Martínez-Padilla, J., Vinuela, J., Blanco, G., Torre, I., Vergara, P. & De Neve, L. 2009. Kestrel-Prey Dynamic in a Mediterranean Region: The Effect of Generalist Predation and Climatic Factors. *Plos One*, 4.
- García-Navas, V., Bonnet, T., Waldvogel, D., Wandeler, P., Camenisch, G. & Postma, E. 2015. Gene flow counteracts the effect of drift in a Swiss population of snow voles fluctuating in size. *Biological Conservation*, 191: 168-177.

- Green, A. 2001. Mass/length residuals: measures of body condition or generators of spurious results? *Ecology*, 82: 1473-1483.
- Guzmán, J. M., Martine, G., McGranahan, G., Schensul, D. & Tacoli, C. (2009) *Population dynamics and climate change*: UNFPA New York.
- Hudson, P. J. 1986. The effect of a parasitic nematode on the breeding production of red grouse. *J Anim Ecol*, 55: 85-92.
- Hudson, P. J., Dobson, A. P. & Newborn, D. 1998. Prevention of population cycles by parasite removal. *Science*, 282: 1-4.
- Husby, A., Visser, M. E. & Kruuk, L. E. B. 2011. Speeding up microevolution: The effects of increasing temperature on selection and genetic variance in a wild bird population. *PLoS Biology*, 9.
- Lambin, X., Bretagnolle, V. & Yoccoz, N. G. 2006. Vole population cycles in northern and southern Europe: is there a need for different explanations for single pattern? *J Anim Ecol*, 75: 340-349.
- Lambin, X., Elston, D. A., Petty, S. J. & MacKinnon, J. L. 1998. Spatial asynchrony and periodic travelling waves in cyclic populations of field voles. *Proc Royal Soc London B*, 265: 1491-1496.
- Lambin, X., Petty, S. J. & Mackinnon, J. L. 2000. Cyclic dynamics in field vole populations and generalist predation. *J Anim Ecol*, 69: 106-118.
- Le Vaillant, J., Potti, J., Camacho, C., Canal, D. & Martínez-Padilla, J. 2021. Fluctuating selection driven by global and local climatic conditions leads to stasis in breeding time in a migratory bird. *J Evol Biol*, 34: 1541-1553.
- Luque-Larena, J. J. & J. Gosálbez, J. 2002. *Chionomys nivalis* (Martins, 1842). In *Atlas de los Mamíferos terrestres de España*. . (eds. L. J. Palomo & J. Gisbert), pp. 366-369. Madrid: Dirección General de Conservación de la Naturaleza-SECEM-SECEMU.
- Martinez-Padilla, J., Redpath, S. M., Zeineddine, M. & Mougeot, F. 2014. Insights into population ecology from long-term studies of red grouse *Lagopus lagopus scoticus*. *J Anim Ecol*, 83: 85-98.
- Massey, F. P., Smith, M. J., Lambin, X. & Hartley, S. E. 2008. Are silica defences in grasses driving vole population cycles? *Biology letters*, 4: 419-422.



- Mougeot, F., Martinez-Padilla, J., Webster, L. M. I., Blount, J. D., Perez-Rodriguez, L. & Pierny, S. B. 2009. Honest sexual signalling mediated by parasite and testosterone effects on oxidative balance. *Proc Royal Soc London B*, 276: 1093-1100.
- Mougeot, F., Redpath, S. M., Leckie, F. & Hudson, P. J. 2003. The effect of aggressiveness on the population dynamics of a territorial bird. *Nature*, 421: 737-739.
- Piñeiro, A. 2017. Topillo nival – *Chionomys nivalis*. En: (Eds.). . In *Enciclopedia Virtual de los Vertebrados Españoles*. . (eds. A. Salvador & I. Barja). Madrid: Museo Nacional de Ciencias Naturales.
- Redpath, S. M., Mougeot, F., Leckie, F. M., Elston, D. A. & Hudson, P. J. 2006. Testing the role of parasites in driving the cyclic population dynamics of a gamebird. *Ecol Lett*, 9: 410-418.
- Reynolds, J. J., Lambin, X., Massey, F. P., Reidinger, S., Sherratt, J. A., Smith, M. J., White, A. & Hartley, S. E. 2012. Delayed induced silica defences in grasses and their potential for destabilising herbivore population dynamics. *Oecologia*, 170: 445-456.
- Seiwright, L. J., Redpath, S. M., Mougeot, F., Leckie, F. & Hudson, P. J. 2005. Interactions between intrinsic and extrinsic mechanisms in a cyclic species: testosterone increases parasite infection in red grouse. *Proc Royal Soc London B*, 272: 2299-2304.
- Siepielski, A. M., Morrissey, M. B., Buoro, M., Carlson, S. M., Caruso, C. M., Clegg, S. M., Coulson, T., DiBattista, J., Gotanda, K. M., Francis, C. D., Hereford, J., Kingsolver, J. G., Augustine, K. E., Kruuk, L. E., Martin, R. A., Sheldon, B. C., Sletvold, N., Svensson, E. I., Wade, M. J. & MacColl, A. D. 2017. Precipitation drives global variation in natural selection. *Science*, 355: 959-962.
- Team, R. 2020. RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA
- Team, R. C. 2017. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Vergara, P., Fargallo, J. A., Martinez-Padilla, J. & Lemus, J. A. 2009. Inter-annual variation and information content of melanin-based coloration in female Eurasian kestrels. *Biol J Linn Soc*, 97: 781-790.
- Vergara, P., Martinez-Padilla, J., Redpath, S. M. & Mougeot, F. 2011. The ornament-condition relationship varies with parasite abundance at population level in a female bird. *Naturwissenschaften*, 98: 897-902.

Vergara, P., Mougeot, F., Martínez-Padilla, J., Leckie, F. & Redpath, S. M. 2012. The condition dependence of a secondary sexual trait is stronger under high parasite infection level. *Beh Ecol*, 23: 502-511.

Vicente-Serrano, S. M., Martín-Hernández, N., Reig, F., Azorin-Molina, C., Zabalza, J., Beguería, S., Domínguez-Castro, F., El Kenawy, A., Peña-Gallardo, M., Noguera, I. & García, M. 2020. Vegetation greening in Spain detected from long term data (1981–2015). *International Journal of Remote Sensing*, 41: 1709-1740.

Vicente-Serrano, S. M., Tomas-Burguera, M., Beguería, S., Reig, F., Latorre, B., Peña-Gallardo, M., Luna, M. Y., Morata, A. & González-Hidalgo, J. C. 2017. A High Resolution Dataset of Drought Indices for Spain. *Data*, 2: 22.

Yoccoz, N. G. & Ims, R. A. 1999. Demography of small mammals in cold regions: the importance of environmental variability. *Ecological Bulletins*: 137-144.