



Cambio global y montañas

Susana Rodríguez-Echeverría^{1,*}

(1) Centre for Functional Ecology, Department of Life Sciences, University of Coimbra, 3000-456, Coimbra, Portugal.

* Corresponding author: S. Rodríguez-Echeverría [susanare@ci.uc.pt]

> Recibido el 26 de abril de 2021 - Aceptado el 29 de abril de 2021

Cómo citar: Rodríguez-Echeverría, S. 2021. Cambio global y montañas. *Ecosistemas* 30(1): 2218. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2218>

El concepto de cambio global se utiliza para denominar un conjunto de transformaciones a escala planetaria derivadas de la actividad humana, que afectan a procesos y condiciones esenciales para el funcionamiento de los ecosistemas. El cambio global incluye no solo el cambio climático sino también la modificación del uso del suelo, la sobre-explotación de recursos naturales, los efectos de especies invasoras, la pérdida de hábitat, y la alteración de los ciclos biogeoquímicos. Dada la magnitud de estas transformaciones no es de extrañar que exista un importante esfuerzo investigador para entender, y tratar de mitigar, las consecuencias de estos cambios para la conservación de la biodiversidad y de ecosistemas funcionales.

Los ecosistemas de montaña, y especialmente los ecosistemas alpinos o de alta montaña, aquellos que ocurren por encima del límite de crecimiento de los árboles, son particularmente vulnerables al cambio climático porque su estructura y dinámica están fuertemente determinados por las condiciones abióticas (Körner 2003; Thuiller et al. 2005). Además, el aumento de temperatura está siendo más rápido en zonas montañosas que en otras áreas, por lo que las transformaciones en los ecosistemas de montaña ocurren a un ritmo mayor (Nogués-Bravo et al. 2007; Martín-Esquível et al. 2021). Las montañas ocupan un 25% de la superficie emergida, albergan una cuarta parte de la diversidad terrestre, gran número de especies endémicas, y proveen servicios ecosistémicos vitales como el suministro de hasta el 80% del agua potable a nivel global (Körner 2003; Körner y Oshawa 2005). Las alteraciones provocadas por el cambio global en las montañas pueden, por lo tanto, conllevar la extinción de un número relevante de especies y grandes perjuicios socio-económicos.

Por otro lado, las montañas constituyen laboratorios naturales ideales para estudiar el efecto del cambio global, y particularmente, el del cambio climático, debido al gradiente de temperatura asociado al gradiente altitudinal. El Observatorio de Cambio Global de Sierra Nevada (<https://obsnev.es/>) con su programa de seguimiento a largo plazo iniciado en 2007 es un magnífico ejemplo de la importancia de recopilar datos abióticos y biológicos no solo a largo plazo sino también a pequeña escala espacial (Pérez-Luque et al. 2016; Zamora et al. 2021). Dentro de este proyecto se ha podido constatar el aumento general de temperatura en Sierra Nevada en los últimos 50 años, así como un descenso generalizado de la precipitación que explican la reducción de la duración de la nieve (Pérez-Luque et al. 2021). Los trabajos realizados dentro del Observatorio de Cambio Global muestran que estos cambios provocan alteraciones en la dinámica y productividad de distintas especies y

ecosistemas de Sierra Nevada (Pérez-Luque et al. 2021), y permiten dar directrices a los gestores de este espacio protegido para promover la adaptación al cambio global.

Los gradientes altitudinales han sido también ampliamente utilizados para estudiar el efecto de la temperatura en los ciclos de vida y probar hipótesis sobre la distribución espacial de ciclos de vida lentos y rápidos (Obeso y Laiolo 2021). En el contexto actual de calentamiento global estos estudios se tornan especialmente importantes ya que el cambio climático afecta no solo a la fenología y distribución de las especies sino también a las características de sus ciclos de vida. Obeso y Laiolo (2021) presentan una extensa e interesante revisión de trabajos sobre las diferentes características de los ciclos de vida lentos y rápidos y lo que se conoce sobre los factores que determinan su distribución altitudinal. La capacidad de adaptación del ciclo de vida a nivel poblaciones a las nuevas condiciones climáticas depende de la plasticidad fenotípica y de la velocidad del calentamiento (Obeso y Laiolo 2021), y es fundamental para la supervivencia de estas especies.

No obstante, la compleja orografía de las montañas genera un mosaico de condiciones ambientales que debe ser tenido en cuenta para entender y predecir el futuro de las especies en un escenario de cambio global (Scherrer y Körner 2011; Zamora et al. 2021). Además, las estaciones meteorológicas de referencia para áreas montañosas generalmente están situadas a cotas bastante bajas y, por tanto, no reflejan las condiciones reales en altitud. Por ello, es imprescindible tener una buena red de monitorización tanto de las condiciones abióticas como bióticas a pequeña escala y en todos los ecosistemas de referencia de las cadenas montañosas. Este es el objetivo del extenso sistema de estaciones de monitoreo intensivo implementado en Sierra Nevada dentro del marco del Observatorio de Cambio Global (Zamora et al. 2021). También se han instalado microestaciones a nivel de micro-hábitat dentro de cada ecosistema que permiten afinar aún más cómo varían las condiciones abióticas dependiendo de la cobertura vegetal o la topografía, por ejemplo, y permiten comparar estos datos con los obtenidos en las estaciones principales (Zamora et al. 2021). Con esta aproximación se obtiene una gran cantidad de datos climáticos y ecológicos en la misma ubicación lo que permite establecer asociaciones robustas entre las condiciones abióticas a la escala que se desarrollan los seres vivos y la dinámica de los ecosistemas.

La inmensa cantidad de información generada en el Observatorio de Cambio Global de Sierra Nevada ha hecho necesaria la optimización del almacenamiento y gestión de estos datos, recogidos en la base de datos ClimaNevada que permite la integración

de la información climática obtenido por todas las estaciones meteorológicas (Pérez-Luque et al. 2021). Esta información además está en acceso abierto, con el fin de permitir su uso y reutilización en distintos estudios contribuyendo a una ciencia más robusta.

La influencia del relieve y la disposición geográfica en la temperatura de las zonas montañosas es muy clara en el Parque Nacional del Teide. Aquí también se verifica un mayor calentamiento en las zonas a mayor elevación con una media de 1.7 ± 0.6 décimas de grado por década en las cumbres frente a valores de 1.4 en zonas más bajas (Martín-Esquivel et al. 2021). Además, los 3715 m del Teide dividen el Parque en un sector más frío al NE y otro más cálido al SW, en los que se verifican diferencias de 2 grados en la temperatura media anual, y una velocidad de calentamiento mucho mayor en el sector SW (ver el material suplementario de Martín-Esquivel et al. 2021). Además, en el Parque Natural del Teide confluyen dos factores de cambio global, calentamiento y especies de herbívoros invasores, que están provocando el reemplazamiento de especies vegetales y la consecuente transformación de los ecosistemas, si bien a ritmo diferente en los dos sectores (Martín-Esquivel et al. 2021).

Gran parte de la investigación realizada sobre el efecto del cambio global en las montañas se ha centrado en la distribución y ecología de especies vegetales. Este interés se deriva de la alta vulnerabilidad de las plantas confinadas en la alta montaña ante el calentamiento climático (Escudero et al. 2012; Cavieres et al. 2021). El aumento de temperatura provoca un ascenso en altura de especies llevando a un aumento, transitorio, de la riqueza vegetal en zonas alpinas de montañas de clima templado (Pauli et al. 2021). Sin embargo, en las montañas con una estación seca coincidente con la estación de crecimiento, como el clima mediterráneo, la doble presión impuesta por el aumento de la temperatura y la disminución de la precipitación acentúa el riesgo de extinción (Thuiller et al. 2012). Esto se confirma al estudiar el reclutamiento y la fotosíntesis en los Andes de Chile central, donde se ha visto que el aumento de temperatura es más negativo para las especies que viven a cotas bajas (Cavieres et al. 2021). El aumento de temperatura sólo sería positivo para el reclutamiento o la fotosíntesis en estas especies si hubiera un aumento de la precipitación en la estación de crecimiento. El aumento de temperatura sí favorece estos procesos a mayor altitud, donde la sequía es menor y el mayor estrés para las plantas está impuesto por la baja temperatura, pero parece disminuir la tolerancia a la congelación de estas especies lo que podría poner en riesgo su supervivencia. No obstante, la alta resistencia y resiliencia de muchas especies de alta montaña hace difícil predecir su comportamiento a largo plazo y las hace aún más importantes desde el punto de la conservación (Cavieres et al. 2021).

La conservación de especies de alta montaña debe pasar por enfoques multidisciplinares que evalúen su diversidad genética, plasticidad fenotípica y capacidad de adaptación. Estos factores deben ser usados para tomar decisiones sobre los hábitats y poblaciones prioritarios para garantizar la supervivencia de especies amenazadas. En este sentido, las poblaciones marginales pueden ser tan importantes como las poblaciones óptimas (Morente et al. 2021), ya que pueden ser una importante fuente de adaptación evolutiva. Estos autores han identificado un importante flujo genético entre poblaciones de *Silene ciliata* en el Sistema Central Ibérico, así como procesos de diferenciación genética y adaptación en las fases de reproducción y establecimiento para poblaciones marginales de esta especie.

El efecto del cambio global en la diversidad y estructura de las comunidades vegetales, y como consecuencia en los restantes grupos tróficos, está además mediado por las interacciones planta-planta, y especialmente por la facilitación que proporcionan las plantas nodrizas (Pugnaire et al. 2021). En ambientes de alta montaña las plantas nodriza cojín desempeñan un papel fundamental en la organización de las comunidades vegetales, y podrían ser clave en su respuesta al cambio global. Pugnaire et al. (2021) revisan artículos recientes sobre las variaciones fisiológicas y morfo-

lógicas de estas plantas almohadilladas en respuesta a factores abióticos que sirven como modelo para predecir el efecto del cambio climático en las mismas. Además, Pugnaire et al (2021) muestran cómo las plantas cojín nodriza aumentan la diversidad filogenética de la comunidad vegetal y afectan a otras interacciones bióticas, mitigando los impactos negativos del calentamiento sobre muchas especies.

La conservación de las interacciones entre especies es esencial para mantener ecosistemas funcionales. En este sentido, Santamaría y Méndez (2021) muestran que la heterogeneidad espacial es muy relevante para mantener la diversidad de interacciones planta-polinizador. La abundancia de plantas medida en escalas desde centímetros hasta decenas de metros es un factor determinante para la diversidad de estas interacciones, y esta abundancia está determinada por las características del hábitat. En los ecosistemas estudiados en Picos de Europa y Sierra Nevada, la existencia de interacciones no depende solo de que existan las especies sino también del hábitat donde están (Santamaría y Méndez 2021). El efecto homogeneizador del cambio global puede, por lo tanto, conducir a la pérdida de diversidad de interacciones cruciales para el funcionamiento de los ecosistemas.

El cambio global, y particularmente el cambio climático, en general provoca una expansión de las especies hacia zonas más elevadas y una retracción del límite más bajo de distribución, aunque ambos procesos pueden ser independientes (Gutiérrez 2021). Se observa también un descenso generalizado de la abundancia de la fauna con poblaciones animales en declive en muchas zonas de montaña (Gutiérrez 2021). No obstante, se verifica una alta variabilidad en las respuestas observadas, que podría deberse a los distintos protocolos utilizados en su estudio por lo que es necesario mejorar y homogeneizar las metodologías actuales de muestreo y monitorización (Gutiérrez 2021).

En este sentido, los programas de ciencia ciudadana pueden ser muy útiles para monitorizar la abundancia de especies a escala regional. Esta aproximación ha sido utilizada para detectar cambios en la abundancia de especies de mariposas mediante el Catalan Butterfly Monitoring Scheme. En general existe un declive de la abundancia y número de especies de mariposas (Ubach et al. 2021). En ambientes de alta montaña las regresiones no son tan severas como en zonas bajas áridas, pero sí se detectan cambios significativos en las comunidades de mariposas, debidos principalmente al abandono del pastoreo y a la subida en altitud de especies termófilas (Ubach et al. 2021).

El pastoreo es también un factor determinante en la dinámica poblacional de la rata topera en el Pirineo Occidental (Villanúa et al. 2021). Esta especie es de gran interés tanto por su papel ecológico como presa de muchos depredadores como por los daños que puede provocar en la agricultura. Este estudio pionero para poblaciones de rata topera en el sur del Pirineo destaca el pastoreo y la pluviometría como factores significativos en la abundancia de esta especie, resultado de gran interés para la gestión de estas zonas.

Desde el punto de vista de la conservación de la fauna es esencial conocer los factores ambientales que provocan un elevado nivel de estrés fisiológico a especies amenazadas (Martínez-Padilla y Estrada 2021). Niveles altos de estrés provocan un aumento de la mortalidad individual y, por tanto, un incremento de la probabilidad de extinción. En este sentido, las poblaciones naturales de urogallo en la Cordillera Cantábrica parecen estar sometidas a un mayor estrés que las poblaciones en cautividad, resultado debido a cambios en el uso del suelo y a la destrucción de hábitat (Martínez-Padilla y Estrada 2021).

Otro de los impulsores de cambio global más importante en ecosistemas oligotróficos, como los existentes en muchas zonas de alta montaña, es la deposición atmosférica de nutrientes. En España esta deposición es debida principalmente a la entrada de polvo sahariano que ha aumentado sustancialmente en los últimos años (Prospero y Lamb 2003; Querol et al. 2019). El aumento de

la concentración de nitrógeno y fósforo en el suelo como resultado de esta deposición tiene un claro efecto en las comunidades de nematodos y redes tróficas edáficas (Sánchez-Moreno et al. 2021), que podrían afectar a servicios ecosistémicos como el secuestro de carbono. La respuesta de la microbiota y las comunidades de nematodos edáficas a la deposición seca de nutrientes fue estudiada en cuatro Parques Nacionales de España, verificándose un efecto diferente de nitrógeno y fósforo y un efecto negativo de la aridez sobre la abundancia de ambos grupos (Sánchez-Moreno et al. 2021).

Para finalizar, la conservación de los ecosistemas de montaña necesita incorporar también la dinámica de las poblaciones humanas ya que estas definen los usos de suelo y la presión antrópica sobre los ecosistemas. La despoblación rural de finales del siglo XX provocó cambios ecológicos relevantes con la expansión de bosques y matorrales en las montañas (Palacio 2021). Asistimos ahora a una repoblación de estos núcleos rurales de montaña, que debe asentarse en el conocimiento ecológico para contribuir a la diversidad, conservación y resiliencia de las montañas.

Agradecimientos

Agradezco a todos los autores su contribución a este monográfico. La diversidad de temas tratados es una muestra del interés que despiertan las montañas en muchos ecólogos y de la cuantiosa investigación de calidad realizada sobre el efecto del cambio global en los ecosistemas de montaña. Esperamos que este monográfico sea interesante para investigadores, estudiantes y gestores, y que contribuya para la protección y conservación de estos magníficos espacios naturales.

Referencias

- Cavieres, L.A., Valencia, G., Hernández, C. 2021. Calentamiento global y sus efectos en plantas de alta-montaña en Chile central: una revisión. *Ecosistemas* 30(1): 2179. <https://doi.org/10.7818/ECOS.217>
- Escudero, A., García-Camacho, R., García-Fernández, A., Gavilán, R.G., Giménez-Benavides, L., Iriondo, J.M., et al. 2012. Vulnerabilidad al cambio global en la alta montaña mediterránea. *Ecosistemas* 21(3): 63-72. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2012.21-3.08>
- Gutiérrez, D. 2021. Efectos del cambio global sobre la dinámica poblacional de la fauna de montaña. *Ecosistemas* 30(1): 2177. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2177>
- Körner, C. 2003. *Alpine Plant Life: Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems*. Second edition. Springer, Berlín, Alemania. 344 pp.
- Körner, C., Ohsawa, M. 2005. Mountain systems. En: Hassan, R., Scholes, R., Ash, N. (eds.). *Ecosystems and human well-being: current state and trends*, pp. 681-716. Island Press. Washington, DC, Estados Unidos.
- Martín-Esquível, J.L., Marrero-Gómez, M.V., González Mancebo, J.M. 2021. Efectos del cambio climático en la vegetación de la alta montaña de Tenerife. *Ecosistemas* 30(1): 2189. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2189>
- Martínez-Padilla, J., Estrada, A. 2021. Estrés fisiológico en urogallos cantábricos (*Tetrao urogallus cantabricus*) silvestres y en cautividad: variaciones temporales e implicaciones metodológicas. *Ecosistemas* 30(1): 2161. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2161>
- Morente-López, J., Lara-Romero, C., García-Fernández, A., Rubio Teso, M.L., Prieto-Benítez, S., Iriondo, J.M. 2021. Áreas marginales en ecosistemas alpinos: definición y valor evolutivo en un contexto de cambio climático. *Ecosistemas* 30(1): 2178. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2178>
- Nogués-Bravo, D., Araújo, M.B., Erread, M.P., Martínez-Rica, J.P. 2007. Exposure of global mountain systems to climate warming during the 21st Century. *Global Environmental Change* 17: 420-428.
- Obeso, J.R., Laiolo, P. 2021. Cambio climático y variación de los ciclos vitales con la altitud. *Ecosistemas* 30(1): 2145. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2145>
- Palacio, S. 2021. De la despoblación a la repoblación rural de las montañas. *Ecosistemas* 30(1): 2164. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2164>
- Pauli, H., Gottfried, M., Dullinger, S., Abdaladze, O., Akhalkatsi, M., Alonso, J.L.B., et al. 2012. Recent Plant Diversity Changes on Europe's Mountain Summits. *Science* 336: 353-355
- Pérez-Luque, J.A., Bonet, F.J., Zamora, R., Bara-Azcón, J.M., Aspizua, R., Sánchez-Gutiérrez, F.J. 2016. Señales del cambio global en el sitio LTER-Sierra Nevada. *Ecosistemas* 25(1): 65-71. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2016.25-1.08>
- Pérez-Luque, A.J., Peinó-Calero, E., Rodríguez-Brito, A., Esteban-Parra, M.J., Merino-Ceballos, M., Guerrero-Alonso, P.D., et al. 2021. Clima Nevada: Base de datos climática del observatorio de Cambio Global de Sierra Nevada. *Ecosistemas* 30(1): 2155. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2155>
- Prospero, J.M., Lamb, P.J. 2003. African droughts and dust transport to the Caribbean: climate change implications. *Science* 302(5647): 1024-1027.
- Pugnaire, F.I., Losapio, G., Schöb, C. 2021. Species interactions involving cushion plants in high-elevation environments under a changing climate. *Ecosistemas* 30(1): 2186. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2186>
- Querol, X., Pérez, N., Reche, C., Ealo, M., Ripoll, A., Tur, J., Pandolfi, M. Et al. 2019. African dust and air quality over Spain: is it only dust that matters? *The Science of Total Environment* 686: 737-752.
- Sánchez-Moreno, S., Iglesias, M., Usero, F.M., Kindler, C., Armas, C. 2021. Efecto de la deposición de N y P atmosférico en la microfauna edáfica de sistemas de alta montaña de la red de Parques Nacionales. *Ecosistemas* 30(1): 2142. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2142>
- Santamaría, S., Méndez, M. 2021. Heterogeneidad espacial a pequeña escala y diversidad de interacciones planta-visitante floral en alta montaña. *Ecosistemas* 30(1): 2131. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2131>
- Scherrer, D., Körner, C. 2011. Topographically controlled thermal-habitat differentiation buffers alpine plant diversity against climate warming. *Journal of Biogeography* 38: 406-416.
- Thuiller, W., Lavorel, S., Araujo, M.B., Sykes, M.T., Prentice, I.C. 2005. Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 102: 8245-8250.
- Ubach, A. Páramo, F., Stefanescu, C. 2021. Heterogeneidad en las respuestas demográficas asociadas al gradiente altitudinal: el caso de las mariposas en el noreste ibérico. *Ecosistemas* 30(1): 2148. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2148>
- Villanúa, D., Díez-Huget, P., Leránoz, I., Mateo-Moriones, A., Alzaga, V., Markina, J., Astrain, C., Martínez-Padilla, J. 2021. Influencia de la gestión agroganadera y las variables climáticas y topográficas en los cambios de abundancia de la rata topera (*Arvicola scherman*) en el Oeste del Pirineo. *Ecosistemas* 30(1): 2135. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2135>
- Zamora, R., Pérez-Luque, A.J., Guerrero-Alonso, P.D., Moreno-LLorca, R., Merino-Ceballos, M., Ros-Candeira, A. 2021. Uniendo macro y microclima en paisajes de montaña: una aproximación conceptual e instrumental. *Ecosistemas* 30(1): 2166. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2166>