

# Cambio climático en plantas de alta montaña: una perspectiva genética

A. García Fernández <sup>1</sup>

(2) Área de Biodiversidad y Conservación, Departamento de Biología y Geología, ESCET, Universidad Rey Juan Carlos, C/ Tulipán s/n, 28933 Móstoles, España.

➤ Recibido el 14 de noviembre de 2011, aceptado el 27 de noviembre de 2011.

García Fernández, A. (2011). Cambio climático en plantas de alta montaña: una perspectiva genética. *Ecosistemas* 20(2-3):129-132.

## Montañas como laboratorios naturales del cambio climático

A pesar de la poca extensión que ocupan en la superficie terrestre, las montañas son de vital importancia, tanto para el mantenimiento de la biodiversidad como por los servicios ecosistémicos que proporcionan, por lo que resultan esenciales para multitud de especies, entre ellas la humana (Körner 2007). Existe un gran consenso sobre el impacto que está teniendo el cambio climático en las regiones montañosas, que coloca a estos sistemas como uno de los más vulnerables, sujetos a consecuencias imprevisibles (Nogués-Bravo et al., 2007). Sin embargo, las montañas son a su vez excelentes laboratorios naturales para testar todo tipo de hipótesis a nivel evolutivo o adaptativo dentro del contexto del cambio global (Körner 2007). Esto es debido principalmente al efecto que suponen los gradientes en altitud que se crean en las montañas, que originan numerosas variaciones en las condiciones ambientales (temperatura, precipitación, comunidad vegetal, propiedades del suelo etc.). Hasta la fecha, las respuestas halladas por parte de los organismos debido a los cambios que se están produciendo en las montañas incluyen, desde movimientos altitudinales o latitudinales, a respuestas in situ (adaptación local, plasticidad fenotípica, etc.), principalmente por parte de especies que tienen limitada su capacidad de dispersión como son las plantas. Sin embargo, se desconoce qué consecuencias genéticas pueden tener estos cambios en los organismos, tanto de forma indirecta, sobre la estructura genética de las poblaciones, el flujo o la diversidad genética, como actuando como una fuerza que seleccione determinados genotipos frente a otros.

El objetivo principal de esta tesis doctoral fue evaluar las consecuencias genéticas que están produciéndose a raíz del cambio global y las respuestas que se están produciendo en las especies de plantas de alta montaña mediterránea. Tomamos como ejemplo las especies *Silene ciliata* y *Armeria caespitosa*, dos organismos representativos de los pastos psicroxerófilos de la comunidad de alta montaña mediterránea (Fig. 1), de las cuales se han obtenido evidencias de la existencia de adaptación local y se conocen numerosos aspectos de su demografía, distribución y éxito reproductivo (p.e. Giménez-Benavides et al., 2007, García-Camacho y Escudero, 2009). Para ello, nos planteamos utilizar varios tipos de técnicas moleculares y distintos enfoques, con el fin de abarcar el mayor número de respuestas y condiciones posibles.



**Figura 1.** Disposición típica, en bandas o guirnaldas, de un pastizal psicroxerófilo de alta montaña mediterránea. En la parte inferior derecha se detallan individuos de *Silene ciliata* (izquierda) y *Armeria caespitosa*. (derecha).

## Flujo y estructura genética en montaña

El empleo de distintos tipos de marcadores genéticos, como AFLP (Amplified Fragment Length Polymorphism), microsatélites SSR y microsatélites EST-SSR, nos permitió evaluar los niveles de flujo genético entre poblaciones de ambas especies. Los resultados indicaron la existencia de un importante movimiento de genes entre las poblaciones de ambas especies de alta montaña mediterránea, tanto entre poblaciones situadas en montañas próximas como entre poblaciones situadas a distinta altitud dentro de una misma montaña. Estos niveles de flujo resultaron sorprendentes, debido a las restricciones biológicas que se producen en la comunidad de alta montaña, donde la asincronía floral a lo largo del gradiente de altitud (Giménez-Benavides et al., 2011) o la escasa capacidad dispersiva de las propias especies podrían dificultar de forma significativa estos movimientos. Este resultado también puede estar reflejando movimientos pasados a lo largo de las montañas, relacionados con los procesos de expansión y retracción de las masas de hielo durante las sucesivas glaciaciones del Cuaternario. Los procesos de expansión de las masas de hielo habrían forzado a estas especies a colonizar zonas de inferior altitud, situadas en uno o varios refugios (Nieto-Feliner 2011), lo que supondría un origen común para las poblaciones actuales. La existencia de diversas respuestas (adaptación local, capacidad para colonizar distintos ambientes etc.) frente a las presiones motivadas por las variaciones ambientales, a pesar de la existencia de importantes niveles de flujo genético, refleja la potencia que deben de estar teniendo estos procesos, puesto que la llegada de genes de otras poblaciones tendería a disminuir el efecto de alelos pre-adaptados a las condiciones locales (Kawecki 2008). El efecto de unos elevados niveles de flujo genético también tiene su reflejo en la estructura genética de las poblaciones. En ambas especies estudiadas, las poblaciones tendieron a agruparse a lo largo del gradiente altitudinal, en vez de hacerlo con aquellas situadas a la misma altitud.

## Evidencias de adaptación local y selección

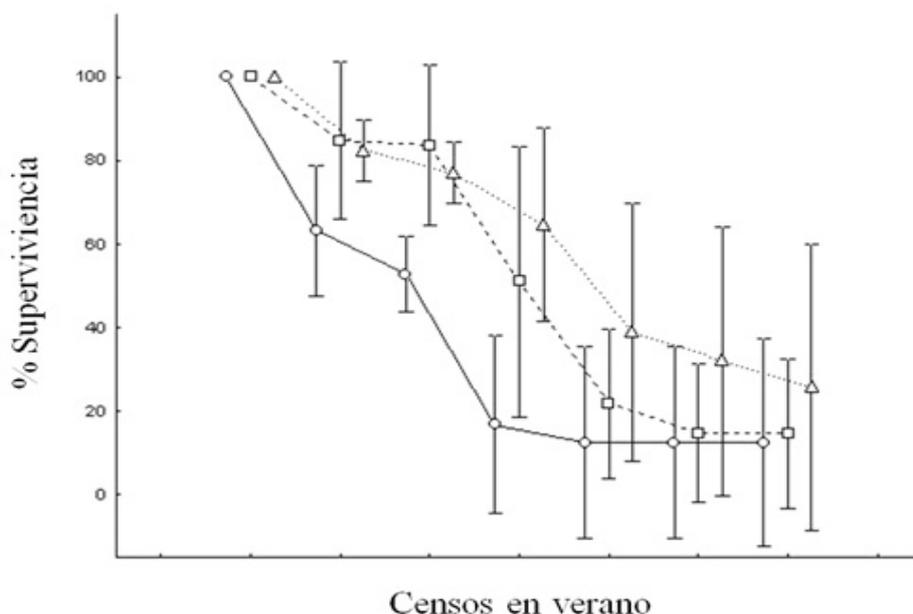
En *Silene ciliata* los procesos de adaptación local que se están produciendo en el gradiente de altitud no están relacionados con un distinto número de cromosomas en los individuos de las distintas poblaciones, a pesar de tratarse de una especie con alta variabilidad en el nivel de ploidía en otros sistemas montañosos europeos. Sin embargo, sí detectamos cambios en el

tamaño de los cromosomas de los individuos, en función de la altitud donde se sitúan las poblaciones. A pesar de tratarse de variaciones pequeñas, estas diferencias podrían estar, de alguna manera, relacionadas con los distintos grados de estrés a los que están sometidas cada una de las poblaciones. Estos niveles de estrés deberían actuar como procesos de selección sobre el genoma, actuando sobre regiones puntuales, aunque su identificación resulta complicada y su relación no siempre evidente. Mediante un tratamiento estadístico específico de detección de loci-outliers pudimos identificar un número reducido de marcadores que reflejan procesos de selección y estarían correlacionados de manera más evidente con las variables ambientales que el conjunto de los marcadores.

Esta adaptación local a las diversas condiciones ambientales generadas a lo largo del gradiente de altitud tiene reflejo en varios procesos y fases del desarrollo vital de las plantas (Giménez-Benavides et al 2007) pero hasta la fecha, no se habían encontrado evidencias en individuos que no fueran juveniles. El uso de organismos adultos suele descartarse, por la complejidad de encontrar una señal lo suficientemente potente como para desenmascarar los distintos factores que pueden actuar de forma combinada o contrapuesta. Mediante un experimento de restricción de agua en individuos genéticamente iguales, obtuvimos una respuesta diferenciada entre los organismos, siendo aquellos que provenían de una población de mayor estrés (menor altitud) los que mostraron una mayor resistencia a los daños que se producen en los fotosistemas como consecuencia del estrés hídrico. Sin embargo, esta respuesta no se vio reflejada en los patrones de proteínas expresadas ni en la síntesis de alguna proteína específica.

### Efectos de la depresión endogámica

Uno de los efectos principales del cambio climático sobre las especies de alta montaña es la disminución de la calidad y cantidad de hábitat disponible, ya de por sí limitado, lo que conlleva el aislamiento y la fragmentación de las poblaciones. Esto supone, entre otras consecuencias, un empobrecimiento genético de las poblaciones unido a la aparición de fenómenos de endogamia, pudiendo fijar alelos perniciosos con consecuencias fatales para la supervivencia de los individuos. Mediante semillas obtenidas a través de polinizaciones manuales, observamos que los individuos cuyos parentales provenían de distintas poblaciones presentaban mayores valores de germinación y supervivencia frente a los individuos cuyos parentales procedían de la misma población o aquellos procedentes de autocruzamientos (**Fig. 2**). Estos resultados se reprodujeron tanto en siembras in situ como en experimentos de germinación en cámara. En algunos parámetros de eficacia biológica estas diferencias fueron aun más marcadas en aquellas poblaciones con mayores niveles de estrés, como las situadas en la zona inferior del gradiente de altura.



**Figura 2.** Evolución del % de supervivencia de plántulas (Eje Y) en la población de menor altitud del gradiente (1980 metros de altitud), durante los meses de verano (Junio, Julio, Agosto y Septiembre, Eje X). Los triángulos (línea punteada) hacen referencia a los individuos procedentes de cruces entre parentales de distintas poblaciones (media  $\pm$  desviación estándar), los cuadrados (línea discontinua) a los individuos provenientes de cruces entre parentales de la misma población (media  $\pm$  desviación estándar) y los círculos (línea continua) a aquellos individuos procedentes de autocruzamientos (media  $\pm$  desviación estándar).

## Conclusiones

La principal conclusión de este trabajo nos lleva a afirmar que los estudios genéticos efectuados muestran una gran heterogeneidad en las respuestas de las plantas de alta montaña ante el cambio climático y la existencia de una multitud de factores que pueden actuar sobre estos mecanismos, de forma muy variable e impredecible. La altitud juega un papel destacado a la hora de explicar determinados procesos o consecuencias genéticas, como es el flujo o la estructura genética, mientras que hemos hallado nuevas evidencias de adaptación local y efecto diferencial de la depresión endogámica bajo diferentes condiciones ambientales.

## Agradecimientos

Esta tesis ha sido realizada gracias a una beca FPI-MEC (CGL2006-09431/BOS), dentro de los proyectos LÍMITES (CGL2009-07229), ISLAS (CGL2009-13190) y Remedial 2. Gracias al personal del Parque Natural de Cumbre, Circo y Lagunas de Peñalara y del Parque Regional de la Cuenca Alta del Manzanares por la ayuda prestada.

## Referencias

- García-Camacho, R., Escudero A. 2009. Reproduction of an early-flowering Mediterranean mountain narrow endemic (*Armeria caespitosa*) in a contracting mountain island. *Plant Biology* 11:515-524
- Gimenez-Benavides, L., Escudero, A., Iriondo, J.M. 2007. Local adaptation enhances seedling recruitment along an altitudinal gradient in a high mountain Mediterranean plant. *Annals of Botany* 99:723-734.
- Gimenez-Benavides, L., García-Camacho, R., Iriondo, J.M., Escudero, A. 2011. Selection on flowering time in Mediterranean high-mountain plants under global warming. *Evolutionary Ecology* 25:777-794.
- Kawecki, T.J. 2008. Adaptation to marginal habitats. *Annual Review of Ecology and Systematics* 39:321-342.
- Körner, C. 2007. The use of "altitude" in ecological research. *Trends in Ecology and Evolution* 22:569-574.
- Nieto-Feliner G. 2011. Southern European glacial refugia: a tale of tales. *Taxon* 60:365-372.
- Nogués-Bravo, D., Araujo, M.B., Errea, P., Martínez-Rica, J.P. 2007. Exposure of global mountain systems to climate warming during the 21<sup>st</sup> Century. *Global Environmental Change* 17:420-428

## ALFREDO GARCÍA FERNÁNDEZ

### Cambio climático en plantas de alta montaña: una perspectiva genética.

Tesis doctoral

Departamento de Biología y Ecología, Universidad Rey Juan Carlos

Julio 2011

Directores: José María Iriondo y Adrián Escudero.

#### Publicaciones resultantes de la tesis hasta la fecha

García-Fernández, A., Iriondo, J.M., Vallès, J. Orellana, J. y Escudero, A. 2011. Ploidy level and genome size of locally adapted populations of *Silene ciliata* across altitudinal gradient. *Plant Systematics and Evolution* 00:000-000. DOI 10.1007/s00606-011-0530-3.

García-Fernández, A., Widmer, A., Iriondo, J.M., Escudero, A., Moccia, M.D. 2010. Assessing previous evidence of local adaptation in a cryophilic pasture perennial using transferable EST-SSR markers. *Forest Ecosystems Genomics and Adaptation Conference, 9-11 June 2010. San Lorenzo del Escorial*, pp. 44, Madrid, España. Disponible en: <http://www.evoltree.eu/index.php/evoltree-final-conference>

García-Fernández, A., Iriondo J.M., Escudero, A, 2012. Inbreeding at the edge: Does inbreeding depression increase under more stressful conditions? *Oikos* 00:000-000.