

LOS PIRINEOS EN EL CONTEXTO DE LAS MONTAÑAS DEL MUNDO: RASGOS GENERALES Y PECULIARIDADES

F. COMÍN
J. P. MARTÍNEZ RICA

*Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC, Campus de Aula Dei,
Apdo. 202, Zaragoza 50080, España
c-e: jpmr@ipe.csic.es*

1. Introducción

Este trabajo introductorio intenta presentar la cordillera de los Pirineos, y especialmente sus características naturales dominantes, señalando en particular aquellas que comparte con otras cordilleras del globo, y aquellas que son peculiares de esta cadena, o compartidas con pocos sistemas montañosos similares. Veamos pues, en primer lugar, algunos rasgos generales de la mayor parte de las cordilleras.

2. ¿Qué es una montaña?

La idea de montaña es intuitiva y de uso común, y se refiere a una elevación considerable del terreno. Cuando se trata de precisar esta definición empiezan a encontrarse las dificultades inherentes a la mayoría de las definiciones precisas. El grado de aislamiento, la magnitud de la elevación y el concepto de terreno son elementos poco definidos que inciden en la exactitud de la definición conseguida. En particular suele utilizarse la altura como criterio fundamental para calificar una elevación del terreno como montaña. Así, usualmente se considera tal si sobrepasa los 500 m sobre el nivel del mar,

reservándose el nombre de colina para elevaciones menores, pero esta cifra varía de acuerdo con las condiciones geográficas, ambientales y sociales, principalmente de la latitud. Por ejemplo, en latitudes elevadas, donde incluso pequeñas lomas exhiben formaciones alpinas, o en países carentes de altas montañas el criterio de elevación se establece en valores más bajos.

Así pues, una montaña es una elevación de terreno suficiente según los criterios locales, vinculada o no a otras montañas próximas, que presenta unos rasgos morfológicos y ambientales que la diferencian de las regiones vecinas de menor elevación. A menudo se ha invocado el rasgo de la estratificación ecológica en pisos de vegetación como criterio distintivo, pero este signo es equívoco, pues no es aplicable a regiones elevadas y homogéneas, como pueden ser determinadas mesetas o altiplanos que, sin ser propiamente montañas, exhiben los rasgos del territorio montañoso.

Los Pirineos forman una cadena de montañas cuyos elementos cumplen sin duda los requisitos para ser considerados como tales. De hecho se trata de la cordillera europea que alcanza mayor elevación después de los Alpes (3404 m), pues aunque existen montañas más altas en Europa, o bien se trata de cimas aisladas o bien se integran en conjuntos de menor dimensión, que se califican cuando más como sierras, pero no como cordilleras. Frontera norte de la Península Ibérica, a la que separan y unen a la vez con el resto de Europa, se extienden a lo largo de más de 400 km de oeste a este, entre el Mar Cantábrico y el Mar Mediterráneo y alcanzan su mayor altitud en el Pico de Aneto (3404 m), más o menos hacia la mitad de ese largo recorrido. Alineaciones menores, aproximadamente paralelas a la cadena principal, flanquean a ésta, especialmente en su lado sur.

3. Consideraciones planetarias

A pesar de sus colosales dimensiones para la escala humana, las montañas son imperceptibles arrugas en la superficie de la Tierra, y probablemente también en los demás planetas. Incluso en Marte, un planeta mucho más pequeño que la Tierra y que cuenta con la mayor montaña del Sistema Solar, es difícil percibir ésta en un borde que parece perfectamente circular. Esa montaña, el Olympus Mons, es un gigantesco volcán extinto de 25 km de altura, un ejemplo manifiesto de uno de los mecanismos de génesis de las montañas, no sólo en la Tierra y Marte, sino también en Venus. No se sabe si los volcanes activos en otros cuerpos del Sistema solar (p. ej. en Io, uno de los satélites de Júpiter) pueden o no dar lugar a montañas, pero en nuestro planeta el volcanismo genera enormes montañas, entre las que se cuentan la más alta de España

(Teide, 3710 m), la más alta de Europa (Elbrus, 5642 m) y si no la más alta del mundo, al menos sí la mayor montaña aislada (Mauna Loa, con un volumen total de unos 75000 km³.y una altura de 9100 m si se cuenta desde su base en el fondo marino). En la Península ibérica no existen volcanes activos, pero sí los hay extintos, algunos funcionales en épocas geológicas recientes.

Un segundo mecanismo de génesis de montañas tiene relación con la tectónica de placas, un movimiento de las placas que integran la corteza del planeta y que son arrastradas por los movimientos convectivos del manto subyacente. La tectónica de placas se manifiesta de manera palmaria sólo en la Tierra, pero con menor desarrollo o diferente mecanismo, también en Marte (por lo menos en el pasado), en Venus y en Ganímedes, uno de los satélites de Júpiter. La tectónica de placas origina cadenas montañosas por plegamiento o por subducción en las zonas de colisión entre dos placas corticales, pero también por elevación tectónica (horsts) o por aporte directo de magma desde la astenosfera (dorsales oceánicas). En realidad el volcanismo y la tectónica de placas no son mecanismos independientes, sino que están íntimamente relacionados. En efecto, los volcanes aparecen normalmente en las zonas de colisión o subducción de placas, o en los puntos calientes sobre los cuales las placas litosféricas se deslizan. En consecuencia, es fácil encontrar en muchas cordilleras edificios volcánicos asociados a montañas tectónicas, originadas por plegamiento.

Los Pirineos forman básicamente una cadena de origen tectónico, formada inicialmente en el Paleozoico y rejuvenecida posteriormente en el Cenozoico por la orogenia alpina, concretamente por la presión de la placa africana sobre la placa eurasiática. La mayor parte de sus montañas se formaron por elevación de las rocas plutónicas o sedimentarias preexistentes, y no conservan vestigios de actividad volcánica. Pero el volcanismo no estuvo totalmente ausente de la cordillera, y participó también en su génesis, al igual que sucede en la mayoría de las demás cordilleras. Existen todavía restos importantes de antiguos edificios volcánicos en el Pirineo Central, de los cuales el más conocido es el pico Midi d'Ossau, un pico de 2880 m formado por duras andesitas de edad carbonífera o pérmica, que han resistido la erosión en mayor grado que los terrenos circundantes y se levantan como un mogote en el centro de la cadena (OLIVIER, 1948). El volcanismo pirenaico se reactivó durante el Mioceno y todavía en el Plioceno y el Pleistoceno ha dejado manifestaciones marcadas en la periferia pirenaica, como lo son los conos volcánicos y las coladas basálticas de las cercanías de Olot, demasiado modestos para ser calificados como montañas, pero sin duda asociados a la actividad orogénica terminal de la cordillera. Concretamente, la actividad volcánica de esa zona se relaciona directamente con la tectónica de placas, pues deriva de

la formación abortada de un "rift" o fosa tectónica sudpirenaica en tiempos miocenos y pliocenos, a causa de la distensión del Pirineo Oriental por basculación de la Península Ibérica (MALLARACH, 1998).

En relación con este punto es necesario destacar la abundancia de manifestaciones hidrotermales en la cadena de los Pirineos y en su vecindad. Una gran cantidad de topónimos pirenaicos refleja esta circunstancia: Caldes de Boí, Banys de Tredós, Les Escaldes, Baños de Benasque, Baños de Panticosa, Tiermas, Bagnères, Eaux Chaudes, Eaux Bonnes, etc. Los correspondientes lugares y sus manantiales cálidos dan fe del papel del volcanismo residual en el modelado de la cadena.

El tercer mecanismo de génesis de montañas está ligado a la extensión de la criosfera. De algún modo pueden considerarse enormes montañas las acumulaciones de hielo que se elevan hasta 3700 m en Groenlandia y a 3950 m en la Antártida. En cualquier caso el peso de estas acumulaciones heladas deprime el zócalo continental en que se apoyan, como lo hizo antaño el casquete glacial que cubría gran parte del norte de Eurasia y de Norteamérica. La retirada de los hielos glaciares dio lugar por isostasia a una elevación compensatoria de las costas escandinavas que levantó, si no montañas, por lo menos impresionantes acantilados. Naturalmente este mecanismo sólo opera, de entre los cuerpos celestes conocidos, en el planeta Tierra. Existe también un mecanismo isostático que no implica intervención del hielo. En algunos puntos la superficie terrestre se eleva o deprime por las presiones internas procedentes de la astenosfera o por la liberación de tales presiones. Se trata en estos casos de puntos calientes extensos, que pueden ampliarse y convertirse en un rift, con la formación de las consiguientes fosas tectónicas, o incluso llegar a iniciar una nueva dorsal de separación entre placas, pero que pueden abortar y provocar simples depresiones en la corteza, a veces acompañadas de un volcanismo limitado. En lo que se refiere a la compensación isostática por deshielo los Pirineos no parecen haber sido afectados intensamente por este fenómeno, aunque los glaciares pirenaicos alcanzaron en el pasado gran espesor y desarrollo.

El último mecanismo de formación de las montañas es el impacto asteroidal. Cuando un cuerpo de tamaño suficiente choca con la Tierra crea en la superficie un cráter cuyos bordes pueden elevarse formando montañas. En la Tierra los impactos asteroidales son ahora muy escasos, pero eran frecuentes durante los primeros tiempos de la formación del planeta, cuando todavía abundaban los cuerpos de gran tamaño en el Sistema Solar interno. Las huellas de aquellos impactos han sido casi borradas por la erosión a lo largo de millones de años, de manera que los restos de cráteres meteóricos existentes en nuestro planeta son tan solo algunas docenas (concretamente 175 sobre tie-

rra firme cuando se escriben estas líneas), la mayoría de ellos descubiertos recientemente desde el espacio. Pero no sucede lo mismo en otros astros carentes de atmósfera o con atmósfera tenue, donde la erosión no actúa. En muchos planetas y satélites de nuestro sistema solar los cráteres de impacto dominan la superficie, y en casos extremos un solo cráter (por ejemplo, en el caso de Mimas, un satélite de Saturno) presenta bordes cuya elevación es una parte sustancial del diámetro del astro. No se han hallado restos de impactos de este tipo en la vecindad de los Pirineos. El cráter más cercano, de edad triásica, se encuentra en Francia, unos 400 km al norte de la cordillera. (CARPORZEN & GILDER, 2006)

4. Distribución de las montañas en el mundo

Conocidos los mecanismos de formación de montañas parece claro que éstas aparecerán en los siguientes lugares:

1) Bordes de placas tectónicas en colisión, tanto si dichas placas permanecen emergidas (caso del Himalaya) como si una de ellas es subducida bajo la otra (caso de los Andes).

2) Puntos calientes situados en el interior de una placa tectónica, en los que la astenosfera o incluso el manto se aproxima a la superficie terrestre y crea una cadena de volcanes a medida que la placa se va desplazando (caso de las Islas Hawaii).

3) Zonas que fueron antaño líneas de colisión entre dos placas tectónicas que acabaron fusionándose en una placa única. Las cadenas de plegamiento formadas entonces permanecen como testigos erosionados de la antigua sutura en el interior de la placa resultante (caso de los Montes Urales, y en cierto modo, también de los Pirineos).

4) Bordes de fosas tectónicas nacientes entre dos placas que comienzan a separarse, en donde se elevan por vulcanismo o por liberación de la presión sobre el magma algunas montañas, con mayor altura sobre el fondo de la depresión (caso de las montañas del Rift africano).

5) Costas en latitudes elevadas, donde aparecen pendientes escarpadas, producidas por elevación isostática de borde de la placa continental una vez liberado del peso del hielo suprayacente (caso de las costas de Noruega).

Prácticamente todas las montañas de la tierra aparecen en zonas como las enumeradas. Las principales alineaciones terrestres se hallan a lo largo de las zonas de subducción del Pacífico, donde las placas de este océano se introducen bajo las placas americanas y asiáticas dando lugar a la formación del

llamado “cinturón de fuego del Pacífico”, y a lo largo del antiguo Mar de Tethys, donde las placas africana e índica se unen a la placa eurasiática produciendo un conjunto de grandes cadenas montañosas que se extiende desde los Montes Cantábricos a las Islas de la Sonda, y en el que se incluye la Cordillera Pirenaica.

Por fuera de estas alineaciones gigantes y de sus ramificaciones se encuentran algunas cordilleras de origen dispar, como las antes mencionadas de los Urales y del Rift africano, o las de Nueva Guinea, Madagascar, Hawaii y otras islas volcánicas, los tepuis del escudo de las Guayanas o las de la Antártida.

Los Pirineos se integran en la gran alineación montañosa de los Alpes-Cáucaso-Himalaya, creada por la orogenia alpina. En la misma zona que hoy ocupa la cadena Pirenaica se irguió mucho antes una cordillera de edad carbonífera, producida por la orogenia hercínica, desmantelada por erosión durante el Pérmico y sumergida durante toda la era Mesozoica. La expansión del suelo oceánico a partir de la Dorsal Atlántica desplazó la placa ibérica hacia el este, y la aproximación de la placa africana hacia la eurasiática empujó el bloque ibérico hacia el norte, y vació el mar que lo separaba del resto de Europa, proceso que se inicia a finales del Cretácico y culmina a finales del Eoceno. Durante el Oligoceno la cadena es nuevamente erosionada, pero su elevación y rejuvenecimiento se reactivan durante el Mioceno. Parece ser que es a partir de este último periodo cuando los Pirineos se conforman como una barrera zoogeográfica relativamente impermeable. Aunque la orogenia puede considerarse terminada a finales del Mioceno, las manifestaciones de actividad postorogénica continuaron después, y se perciben todavía en la forma de una sismicidad algo mayor que la de las regiones circundantes (TEIXELL, 2000).

5. Consecuencias de la gravedad

El rasgo dominante de todas las montañas es la elevación. Y es dominante no sólo en el sentido de que se percibe inmediatamente y antes que cualquier otra característica, sino en especial porque predomina sobre los demás, que normalmente no son sino efectos secundarios de la elevación. La primera consecuencia de la elevación es la disminución de la presión atmosférica con la altitud, inherente a cualquier atmósfera compresible y afectada por fuerzas gravitatorias. Esta disminución se utilizaba de hecho para medir la altitud mediante los altímetros barométricos, y continúa utilizándose todavía en estos tiempos en que los satélites artificiales proporcionan medidas más precisas. Desde los experimentos hechos por Pascal a mediados del siglo XVII se sabe que en las capas bajas de la troposfera el descenso medio de la presión

con la altitud es de unos 100 hectopascals por km de ascenso (DAVIDSON, 1983). Este valor cambia con la altitud, pues la ecuación que relaciona altitud y presión es exponencial. Así, la presión en atmósfera standard desciende 131 hPa (o milibares) entre 0 y 1000 m, 109 entre 1000 y 2000 y 89 entre 2000 y 3000. En la cumbre de la montaña más alta del mundo la presión teórica es de solo 315 hPa.

A su vez el gradiente de presión atmosférica determina el enfriamiento adiabático, que conlleva una disminución de la temperatura media del aire al ascender. Este enfriamiento es también variable, dependiendo sobre todo del contenido en vapor de agua del aire. En la atmósfera standard, carente de vapor de agua, llega a alcanzar los 9.8 °C por km de ascenso, pero en aire muy caliente y húmedo puede descender hasta 3 °C por km. En las condiciones habituales de la baja troposfera, junto a las montañas, varía entre 4.5 y 6 °C/km, con un valor medio de 5.1 °C/km. Esto significa que sólo por esta causa la temperatura desciende en casi 50 °C en la cumbre del Everest con relación a las zonas de su misma latitud próximas al mar, y unos 19 °C en el punto más alto de los Pirineos (LUTGENS & TARKUCK, 1995).

La disminución de la temperatura con la altitud presenta numerosas excepciones derivadas de las características topográficas de la zona, o de los rasgos climáticos del momento. Sin embargo es indiscutiblemente un rasgo general de todas las montañas del mundo. De esta disminución térmica depende otro rasgo general, la zonación altitudinal. La zonación en pisos o cinturones de vegetación, integrados por plantas adaptadas a la altitud y al frío correspondientes a cada nivel, y que dan al mismo su fisionomía particular, fue inicial y detalladamente descrita por Humboldt en los Andes. Aunque se trata de un rasgo general de todas las cordilleras, las características y disposición de los pisos de vegetación difieren de unas a otras. Las montañas de estructura más sencilla son las de la Antártida o las del Ártico, que poseen sólo el piso superior o nival, si bien en su falda puede aparecer el piso alpino representado por una tundra extensa, homóloga de éste. En los trópicos las montañas más bajas comprenden sólo el piso inferior, ocupado por la selva tropical si el régimen es húmedo, o por el desierto si es seco, con todas las formaciones intermedias en otros casos. Para las montañas tropicales más altas la zonación altitudinal es pronunciada, existiendo en algunos casos hasta nueve pisos de vegetación. En las montañas de latitudes templadas la situación es menos compleja, pero suelen existir también varios pisos de vegetación, generalmente cuatro o cinco. (FRANZ, 1979) Concretamente en los Pirineos existen dos zonaciones paralelas, que cubren las vertientes norte (húmeda) y sur (seca) (RIVAS MARTÍNEZ, 1987). Así, en la vertiente norte se cuentan los pisos colino, montano, subalpino, alpino y nival, mientras que en

la meridional los pisos son el mesomediterráneo, supramediterráneo, oromediterráneo, crioromediterráneo y nival.

Es la zonación en altitud el principal factor responsable de la diversidad ambiental y ecológica de los territorios montañosos, pero, como se acaba de comentar, a ella se superponen otros factores de diversificación, como es el contraste entre vertientes que se da, no sólo como en los Pirineos entre las vertientes solanas y umbrías (en el hemisferio sur, al contrario que en el nuestro las primeras miran al norte y las segundas al sur), sino también entre las vertientes orientadas a barlovento y las que lo están a sotavento de los vientos dominantes (caso de los Andes o de la Sierra Nevada de California), o entre las distintas latitudes de una misma cadena cuando ésta se orienta de norte a sur (los casos precedentes o el de los Montes Urales). El tema de la elevada heterogeneidad ambiental en los ambientes montañosos será retomado más adelante.

Si bien los pisos de vegetación difieren en cuanto a número y amplitud, así como en su composición específica, obviamente incluyen especies termófilas en los niveles inferiores, mesófilas en los intermedios y criófilas o resistentes al frío en los superiores. La estructura y composición de los pisos nivales y subnivales es muy parecida en todas las montañas debido a la acción uniformizadora del frío. El piso alpino presenta diferencias de unas montañas a otras, pasando a ser afroalpino en África, puna en Sudamérica, crioromediterráneo en las montañas próximas al Mar Mediterráneo, etc. Los pisos inferiores presentan mayor variación, estando generalmente ocupados por bosques esclerófilos, formaciones esteparias o desiertos en los climas áridos o hiperáridos, por pluvisilvas en muchas regiones tropicales y por bosques de coníferas o de latifolios en las latitudes templadas.

Otra característica general de las montañas o de cualquier terreno elevado es la pendiente, o inclinación necesaria para pasar de la base a la cumbre. En los volcanes activos o de origen reciente esta pendiente viene determinada por el tipo de material arrojado por el volcán. Los volcanes que emiten lava muy fluída, (tipo hawaiano) presentan pendientes bajas, ya que la lava es capaz de recorrer largas distancias antes de solidificarse, y no se acumula junto al cráter. Los volcanes activos que arrojan principalmente cenizas y lapilli tienen pendientes determinadas por las fuerzas mecánicas de fricción entre los fragmentos expulsados. Por último los volcanes productores de lava espesa (tipo peleano) presentan pendientes muy abruptas cerca del cráter. En los demás casos, es decir, en las montañas no volcánicas, en los volcanes inactivos y en los volcanes activos a suficiente distancia del cráter, la pendiente viene determinada por las influencias relativas de la acumulación y de la ero-

sión. En general se acepta que las montañas con pendientes abruptas son jóvenes y no han sido todavía denudadas por la erosión, mientras que las de pendientes más suaves las tienen porque su material se ha ido perdiendo. Sin embargo en la pendiente influye también principalmente el tipo de sustrato. Algunos sustratos duros tienden a fragmentarse mediante grandes diaclasas, lo que da lugar a perfiles verticales muy escarpados. Ciertas coladas basálticas o andesíticas muy antiguas pueden presentar una erosión de este tipo y forman grandes acantilados verticales a pesar de su edad (caso de los Montes Drakensberg en Sudáfrica) (PARTRIDGE & MAUD, 1987). Otras veces es la erosión fluvial (Cañón del Colorado) la que corta verticalmente el terreno elevado produciendo abruptos acantilados, o es la erosión glacial (fiordos noruegos) la que lleva al mismo resultado.

En los Pirineos han operado casi todos los factores comentados para determinar la estructura de la cadena y su modelado actual. El conjunto de la cordillera ha sido erigido por última vez por la orogenia alpina, rejuvenecido por la actividad postorogénica miocénica y modelado después por la actividad glacial y periglacial (esta última todavía operativa), y por la erosión fluvial. Combinado todo ello con la gran diversidad de sustratos rocosos el resultado ha sido una cadena con una gran variedad de morfologías y paisajes. En general la pendiente está directamente relacionada con la altitud. Los picos más altos están sometidos a una gelifracción particularmente intensa y ello da como resultado paredes abruptas. Los sustratos silíceos, muy duros, como las andesitas del Midi d'Ossau, o las sienitas y granitos de Los Encantats, dan lugar a pitones de fuerte pendiente. También son fuertes las pendientes en los valles glaciares excavados en materiales relativamente blandos como las calizas que flanquean algunos valles del Pirineo Central (Ordesa, Añisclo, Pineta) o las que integran los macizos occidentales del mismo (Larra, Alanos, etc). Y por supuesto, cuando se trata de materiales particularmente blandos, como las margas, yesos y conglomerados que afloran en muchos puntos del Prepirineo español, pueden formarse altas paredes prácticamente verticales (mallos, hoces y cañones), en buena parte debidos a una erosión fluvial intensa y persistente. En el conjunto de la cordillera la acción erosiva de los glaciares en el pasado, y de los ríos antes y ahora, ha sido mucho más intensa en la parte francesa que en la española, y esta es una de las razones, pero no la única, de que la pendiente media sea superior en la vertiente septentrional del Pirineo respecto a la meridional. Precisando un poco más, las zonas pirenaicas de mayor pendiente media se hallan en la porción nororiental de la provincia de Huesca y en las regiones adyacentes de las provincias de Lérida y Hautes Pyrénées. Justamente son estas las zonas donde se hallan los picos de mayor altitud (BEAUMONT *et al.*, 2000).

6. La erosión

La forma dominante de explotación natural de la montaña es la erosión entendida como exportación o pérdida de recursos. A menudo se hace la distinción entre recursos renovables y no renovables, queriendo significar que la de los primeros tiene menor relevancia porque pueden reponerse. En realidad todos los recursos de la montaña son renovables, diferenciándose únicamente por sus tasas de renovación, que son máximas en el caso del aire o del agua y mínimas en el de la elevación. Para la mayoría de los recursos la tasa de exportación es superior a la de regeneración, por lo que a todos los efectos aparecen como recursos no renovables. En consecuencia, la mayoría de los recursos naturales de la montaña son susceptibles de erosión, y aunque normalmente se circunscribe el significado de esta palabra a la pérdida del suelo, es cierto que deben considerarse también como erosión cualesquiera otras exportaciones netas o pérdidas de recursos, desde la desaparición gradual de los glaciares a causa del calentamiento global, hasta la pérdida de las culturas tradicionales de los pueblos de montaña a causa del despoblamiento y la globalización. Estas pérdidas se dan en todas las montañas del planeta, y al menos la erosión en sentido tradicional, también en otros planetas.

La erosión que fragmenta las rocas, reduce las montañas y transporta su suelo se lleva a cabo mediante la acción directa del aire, concretamente de sus cambios de temperatura, pero sobre todo por el agua, ya en forma líquida ya en forma sólida. Los bruscos descensos de temperatura propios de la transición del día a la noche son más patentes en la alta montaña, donde es fácil pasar de temperaturas próximas a los 50 °C en rocas oscuras y muy soleadas, a menos de 20 °C bajo cero en el transcurso de media hora. Una caída de 60 °C, incluso si no es repentina, acarrea la contracción de la roca, induciendo en su superficie tensiones que la acaban agrietando o fragmentando (BARRY, 1992). Este proceso simple de meteorización se amplifica notablemente por la gelifracción, es decir, por la expansión del agua infiltrada en las grietas al congelarse. La influencia de estos procesos es manifiesta, pues ellos son responsables de las formas agudas y abruptas de las montañas jóvenes, cuyas cumbres se ven permanentemente afiladas por la acción del frío y el hielo. La exportación de fragmentos desprendidos se traduce en acumulaciones de derrubios, llamadas gleras o canchales, que se sitúan al pie de las paredes afectadas y que dan a la alta montaña una fisonomía característica.

El agua líquida es también un agente erosivo de primera magnitud, ya que, ayudada por la fuerte pendiente, discurre en las montañas ladera abajo a gran velocidad, arañando los lechos de los torrentes mediante los fragmentos rocosos que arrastra. Es en zonas montañosas donde se hallan los cañones más extensos y profundos, cavados por torrentes y arroyos, y entre montañas

discurrir los valles abiertos por los ríos. También es de las montañas de donde procede el sedimento que los ríos transportan o que los torrentes acumulan en sus conos de deyección. Todas las montañas del mundo presentan estos rasgos, más acusados en climas templados y húmedos, en montañas jóvenes y en sustratos litológicos duros.

Pero la acción erosiva del agua se manifiesta especialmente en los fenómenos ligados a la actividad glacial y periglacial. Además de la gelifracción el papel principal de los glaciares en la modelación del terreno se ejerce a través de su acción abrasiva. Durante las épocas frías del pasado los glaciares han ensanchado y vaciado los valles previamente excavados por los ríos, y en la actualidad continúan haciéndolo los glaciares subsistentes. Como buena parte de estos se hallan ligados a las montañas, no es de extrañar que en ellas sea máxima la erosión glacial. A esta erosión hay que sumar otros procesos periglaciares que en último término desembocan también en la pérdida de sustrato rocoso, de suelo y de nutrientes (GIRAUDI, 2005).

Al igual que los ecosistemas que los forman, los biomas son sistemas con una compleja estructura funcional. El bioma oréal o de montaña también tiene un funcionamiento con rasgos característicos. El principal de estos rasgos funcionales deriva de la interacción entre temperatura y pendiente. Las temperaturas bajas propias de las zonas de gran altitud ralentizan los procesos metabólicos en general y disminuyen las tasas de crecimiento y acumulación de biomasa en organismos y ecosistemas. Por el contrario, la pendiente acelera numerosos procesos, en especial los de tipo exportativo, favoreciendo las pérdidas de agua, de suelo y nutrientes, y de organismos y sus propágulos. Como la temperatura y la pendiente varían de forma inversa con la altitud, disminuyendo la primera y creciendo la segunda, está claro que la influencia de esta última será predominante en las cotas más altas. Allí el metabolismo de la montaña es únicamente de pérdida, reduciéndose las manifestaciones de la vida a ocasionales migraciones procedentes de los niveles inferiores, o a organismos extremófilos capaces de mantener su actividad en condiciones de gran dureza ambiental. Estas condiciones se dan únicamente en el piso nival o subnival, cuya altitud varía inversamente con la latitud. La situación no afecta únicamente a los organismos vivos, pues también los procesos erosivos favorecen la exportación y pérdida del sustrato edáfico y lítico, y pueden calificarse como procesos naturales de explotación del ecosistema.

Los Pirineos están sometidos a procesos erosivos intensos, como sucede en las demás montañas. La gelifracción es el proceso dominante en las cumbres rocosas, por encima de la isoterma anual de 0 °C, que en esta cordillera se sitúa por encima de los 2700 m. Entre esta altitud y la de 1700 m, correspondiente a la misma isoterma durante la estación fría tienen lugar alternancias

de hielo y deshielo más o menos frecuentes, que se traducen también en una gelifración activa. Pero a estas altitudes menores, correspondientes a los pisos subalpino y alpino, existen ya unas cubiertas mínimas de suelo y vegetación que limitan la acción crioclástica a determinadas zonas, y que permiten la manifestación de otros fenómenos erosivos periglaciares como la crioturbación, la soliflucción, la reptación, etc (DEL BARRIO *et al.*, 1990).

Puesto que tanto la baja temperatura como la fuerte pendiente contribuyen a aumentar las tasas de erosión, y ambos factores se hallan ligados a la altitud, no es de extrañar que en los Pirineos las zonas más erosionadas se den en los puntos más altos, y que el mapa de intensidad erosiva reproduzca en cierta manera el mapa de pendientes. Los procesos erosivos en las porciones más elevadas de la cordillera han sido estudiados en detalle, especialmente en el Pirineo Central. La actual distribución espacial de gleras y canchales concentrada en torno a los picos de mayor altitud, da una idea de la actual intensidad erosiva ligada a la gelifración (GÓMEZ ORTIZ *et al.*, 1998).

Existen otros procesos erosivos vinculados a las condiciones de la alta montaña pirenaica, el más destacado de los cuales es el debido a la acción glaciaria. En los Pirineos españoles los glaciares se hallan hoy reducidos a su mínima expresión, y además están sufriendo un proceso regresivo, quizás a causa del calentamiento global, que puede llevarlos a la desaparición en poco tiempo. Sólo media docena de cuencas de alimentación de circo permanecen activas, y otras han pasado al estado de glaciares rocosos, con un núcleo de hielo cubierto por derrubios. Pero en el pasado muchos glaciares pirenaicos alcanzaron gran desarrollo, con formación de un aparato glaciario completo con lenguas de muchos kilómetros de longitud y espesores de hasta 600 m. Antes del Holoceno los glaciares pirenaicos eran puntos donde se concentraba la acción erosiva, y muchos de los valles transversales pirenaicos muestran claramente que son herederos de la acción glaciaria. Los glaciares actuales carecen de capacidad erosiva e incluso de flujo, pero las huellas de su acción en el pasado, cuando tenían mayores dimensiones, se hallan presentes por doquier en la alta montaña pirenaica, en la forma de circos, cubetas de sobreexcavación, rocas aborregadas, morrenas de diversos tipos, artesis glaciares, etc. Las huellas de esta acción erosiva pretérita se hallan incluso a baja altitud, en los puntos alcanzados por el extremo de las lenguas glaciares, a 1200 m e incluso más abajo (GARCÍA RUIZ & MARTÍ BONO, 1994).

Como buena parte del sustrato rocoso que forma los Pirineos es piedra caliza, no es de extrañar que los fenómenos kársticos, una forma particular de erosión debida a la acción del agua y a la meteorización, alcancen gran desarrollo en esta cadena, como en otras cordilleras similares. En todas las áreas calizas de los Pirineos aparecen fenómenos kársticos, a veces superficiales, a

veces muy profundos. De las 55 simas registradas en el mundo con una profundidad superior a los 1100 m ocho se encuentran en los Pirineos, y la más profunda de ellas llega a los 1408 m de desnivel. Enormes salas subterráneas, como la Sala de la Verna en la Sima de la Pierre Saint Martin, dan fe de la capacidad erosiva del agua que circula bajo tierra. Como es de suponer casi todas las simas de gran profundidad se ubican en este y otros sistemas montañosos, hallándose las cinco más profundas en el Cáucaso, los Alpes y los Montes Cantábricos (GUNN, 2003).

Como se ha dicho, los sistemas montañosos organizan y articulan una red de drenaje que transporta el agua acumulada en los mismos. Los Pirineos son también cabecera de importantes ríos, cuya acción ha creado la morfología básica de la zona. En efecto, los Pirineos constituyen una cadena de cuyas dos vertientes parten valles fluviales más o menos paralelos, dirigidos hacia el norte o hacia el sur. En la vertiente norte los ríos alcanzan pronto las llanuras francesas, pero en la vertiente sur existen alineaciones de cadenas montañosas paralelas al eje de la cadena principal, que cortan el curso de muchos ríos. Éstos deben abrirse paso a través de las sierras prepirenaicas, formadas generalmente por depósitos de calizas o de conglomerados, dando como resultado estrechas gargantas, cañones y hoces, que junto con los abruptos cantiles formados en el borde de la cuenca sedimentaria ibérica (“mallos”) conforman un relieve y un paisaje muy singulares. Aquí la erosión hídrica ha producido formas de excavación espectaculares.

7. Las montañas como refugios

El hecho de que las regiones de gran altitud alberguen organismos y hasta ecosistemas relativamente complejos a pesar de las fuertes exigencias que comportan, obedece al mismo principio que explica la colonización de cualquier ambiente extremo. La ventaja de colonizar tales ambientes consiste en la disminución de la competencia: los recursos son escasos, pero si se reparten entre pocas especies bien adaptadas para soportar las condiciones del entorno, son suficientes para asegurar la supervivencia de todas ellas. A menudo la escasez de especies implica también la ausencia de predadores que se alimenten de ellas, y esto es lo que proporciona compensación adicional a la baja producción de biomasa de tales áreas y las hace atractivas para algunos organismos. Además muchas especies eurioicas, que pueden vivir sin problemas a diferentes altitudes, acaban acantonadas en regiones montañosas porque sus congéneres de zonas más bajas y accesibles han sido eliminados por la predación o por las perturbaciones inducidas por el hombre. Esta es una de las razones que dan a las montañas su papel de refugio biológico.

gico y que hacen que la mayor parte de dichas regiones sean ricas en especies que encuentran allí sus últimos reductos.

Desde este punto de vista las montañas del mundo comparten también otro rasgo. Al ubicarse en ellas unos ecosistemas sometidos a condiciones ambientales muy duras la presión selectiva sobre éstos es fuerte. Las poblaciones que la sufren sobreviven en núcleos reducidos, que aún pueden verse mermados o extinguidos por alguna de las catástrofes que el fuerte dinamismo de la montaña impone. Tales núcleos constituyen verdaderos cuellos de botella genéticos, en los que la presión selectiva actúa con fuerza e impone una aceleración evolutiva, un mayor ritmo en la fijación de las mutaciones y en la extinción de genotipos inadaptados, etc. Combinada esta circunstancia con la estructura insular de cumbres y valles, semejantes a archipiélagos entre cuyos elementos es difícil un intercambio que suavice los vaivenes genéticos, ello resulta en una rápida multiplicación de los endemismos. En efecto, las montañas en general, y los niveles subalpino, alpino y sus homólogos en particular, son especialmente ricos en especies endémicas (LUTZ *et al.*, 2000).

Los elevados índices de biodiversidad y de endemidad que caracterizan la alta montaña han sido analizados y comparados en trabajos diversos, algunos de ellos acogidos en esta misma revista. La riqueza específica en las montañas parece responder a una pauta similar a la que se desprende de los análisis efectuados en las islas (biogeografía insular), pero difuminada por la circunstancia de que las montañas no son propiamente territorios aislados. Las reglas generales halladas en las islas, como la relación entre la riqueza específica y el tamaño del área considerada o su grado de aislamiento se mantienen también para los “archipiélagos” montañosos, pero no se cumplen más que de forma aproximada (VÅRE *et al.*, 2003).

Por supuesto, los Pirineos ilustran como otras muchas montañas este papel de reservorios de biodiversidad y de refugio para especies amenazadas. Tanto en su vertiente española como en la francesa existe una gran variedad de ecosistemas, una consiguiente multiplicidad de nichos ecológicos y una riqueza específica especialmente elevada. Existe constancia de que esta cordillera y la de los Montes Cantábricos sirvieron de refugio a las últimas poblaciones de megafauna cuaternaria de Europa durante el Holoceno, y todavía persiste en ambas alguna especie residual de grandes mamíferos, como el oso. En cuanto a los vertebrados heterotermos, los invertebrados y las plantas, son numerosas las especies que permanecen en la cordillera habiendo desaparecido de las regiones próximas. A pesar de su gran sensibilidad a las perturbaciones inducidas por el hombre algunos reptiles, insectos y plantas del nivel alpino han logrado mantener poblaciones residuales en ese hábitat debido a su relativa inaccesibilidad por parte del hombre y de otros depredadores.

8. La estación activa

Otra consecuencia de las bajas temperaturas propias de la alta montaña es la menor duración de la estación activa. El periodo invernal, en el que la nieve y el hielo pueden limitar o suprimir completamente la actividad biológica es prolongado, y reduce la estación activa a veces a unos pocos meses o incluso a algunas semanas. Esto se aplica, desde luego, a las montañas de latitudes templadas, sometidas a un régimen climático estacional. En las montañas tropicales la época activa se prolonga durante todo el año, limitándose la interrupción de la actividad biológica a la sucesión de días y noches. Esta limitación afecta también a las montañas extratropicales, pero como en ellas el día se alarga y la noche se acorta durante la estación activa, la alternancia cotidiana pierde importancia frente a la alternancia anual, en tanto mayor grado cuanto más elevada es la latitud. En latitudes intermedias, como las de los Alpes, la estación activa dura unos 9 meses a 900 m de altitud, unos 7 meses a 1600 m y unos 5 meses a 2100 m, donde se sitúa más o menos el límite de la vegetación arbórea. A unos 3000 m comienza el piso nival, en el que la estación activa queda eliminada por completo (KÖRNER *et al.*, 2003).

La latitud influye directamente sobre la estacionalidad del clima, y por ello las características de la estación activa son muy diferentes en las montañas tropicales, en las templadas y en las de latitud muy elevada. En estas últimas el efecto de la latitud, además de implicar un descenso de los pisos de vegetación, implica también un contraste mayor de las estaciones. El invierno es muy largo, la luz disminuye y la diapausa invernal es obligada. El verano también es largo, y la actividad fotosintética de las plantas y la de los animales que de ellas viven pueden mantenerse durante más de 12 horas, y a veces durante muchos días sin interrupción. De hecho la estación activa es muy intensa y la producción muy alta. Se favorecen los organismos anuales, capaces de pasar el invierno en hibernación o en fase de diapausa o resistencia. En las montañas tropicales, por el contrario, la estacionalidad es muy reducida, y la duración de los días y noches cambia poco del verano al invierno. Por lo tanto no existe propiamente una estación activa, pero sí un contraste regular y predecible entre el día y la noche. No se encuentran adaptaciones para la invernada, pero sí para soportar el frío de las horas nocturnas. Incluso existen ecosistemas especializados en los que muchos animales encuentran refugio durante la noche. Por ejemplo, los acúmulos de hojas colgantes, secas pero persistentes, que rodean la parte basal de las coronas foliares de las plantas en roseta de las montañas tropicales, como senecios, lobelias, espeletias, etc, albergan una compleja comunidad de animales, que se protegen allí de forma permanente o sólo durante la noche (SMITH & YOUNG, 1987).

La Cordillera Pirenaica, situada entre los 42 y 43 ° de latitud norte, presenta lógicamente características intermedias. La estación activa es más corta en la vertiente norte que en la sur, y en ambas depende fuertemente de la altitud. Puede considerarse inexistente en el piso nival, es decir, a partir de los 3000 m de altitud en la vertiente española y de los 2600 en la francesa. Hay que señalar, sin embargo, que este límite no es estable, que en la actualidad, y quizás por efecto del calentamiento global, tiende a elevarse, y que en todo caso durante el verano el piso nival cobija un ecosistema mínimo, compuesto por el plancton nival, unos pocos líquenes sobre rocas descubiertas y algunos animales en tránsito procedentes de niveles inferiores, así como por las escasas plantas fisurícolas y los artrópodos a ellas asociados. En el piso alpino, por debajo del límite antes señalado y hasta el contacto con el piso subalpino, contacto que en los Pirineos se sitúa entre los 1800 y los 2300 m, existe ya una corta estación activa, que dura entre dos semanas y cuatro meses y medio según la altitud. En general este tiempo es insuficiente para la construcción de un ecosistema complejo, pero sí basta para activar el crecimiento en líquenes y pastos, y para permitir la floración de especies criófilas.

Más abajo, en el piso subalpino pirenaico, la estación activa dura ya de tres a siete meses en promedio, lo que permite el establecimiento de ecosistemas complejos, una producción a menudo suficiente y una disminución del periodo de diapausa, que con todo, aún abarca más de la mitad del año. La producción de recursos durante la estación activa es aquí suficiente como para mantener la propia comunidad y el ganado ovino que, procedente de los niveles inferiores, aprovecha los pastos supraforestales en su trashumancia estival. Por último, en el nivel montano superior la duración de la estación activa es más variable, pudiendo reducirse a cinco meses en los lugares más altos y expuestos, y ocupar la totalidad del año en los más bajos y abrigados. En tales condiciones la mayor parte de los organismos experimentan una fase relativamente corta de reposo durante los meses más fríos del invierno, o pueden no experimentarla en absoluto.

La duración de la estación activa, y su localización en el espacio, dependen, pues, de unos límites muy variables, concretamente de las isoterma de 0 °C, correspondiente a la frontera de hielo deshielo, y de la isoterma de 7 °C, correspondiente en general al umbral de activación biológica, sobrepasado el cual comienzan a acumularse los grados x día que han de permitir el desarrollo completo del ciclo anual para plantas y animales. Estas isotermas, tienen una posición muy variable, que depende no solo de la vertiente y de la localización topográfica concreta, sino también, por supuesto, de la época del año, así como de los organismos implicados.

9. Las adaptaciones

Como la principal limitación para la vida a gran altitud deriva del frío, no es sorprendente que los organismos de alta montaña presenten adaptaciones a su ambiente similares a las que presentan los organismos de las zonas árticas o antárticas, entre las que figuran la diapausa invernal, a menudo en forma de hibernación completa, el cambio estacional de pelaje o plumaje, la adquisición de vellosidad protectora en las hojas, la presencia de compuestos anticongelantes en sangre y savia, etc. Pero la alta montaña se caracteriza también por condiciones ambientales que no se dan o se dan en menor grado a baja altitud en latitudes extremas, como son el viento, la mayor radiación de longitud de onda corta, la menor densidad del aire que comporta un menor contenido de oxígeno, etc. Las adaptaciones a estas condiciones son específicamente montanas, y es frecuente hallar en la alta montaña organismos que presentan varias de ellas simultáneamente.

Naturalmente, este tipo de adaptaciones se observan también en los organismos que pueblan la alta montaña pirenaica. La diapausa invernal es obligada en las plantas, muchas de las cuales son terófitos, con órganos de resistencia subterráneos. Cuando se trata de árboles de hoja perenne, como el pino negro (*Pinus uncinata*), que deben afrontar las bajas temperaturas invernales, las hojas se endurecen y se cubren de una capa de cera que disminuye el riesgo de congelación (CAMARERO *et al.*, 1998). En otras plantas el agente protector es una densa cubierta pilosa (caso, por ejemplo de la flor de nieve, *Leontopodium alpinum* en los Pirineos y en otras montañas paleárticas, y de las diversas especies de *Espeletia* en algunas montañas neotropicales). El recurso a los compuestos anticongelantes en la sangre o savia está documentado en algunos grupos de organismos de alta montaña (p. ej. en los grilloblatoideos de las Rocosas de Norteamérica), pero no se conoce todavía en los Pirineos. Sin embargo, la peculiar resistencia al frío comprobada en algunas lagartijas pirenaicas de alta montaña (p. ej. *Iberolacerta bonnali*) hace sospechar la existencia en las mismas de un mecanismo similar.

Con todo, las adaptaciones más evidentes, al menos en los animales de montaña, son las que tienen que ver con la presencia de una cubierta de nieve en invierno. Las perdices nivales (*Lagopus mutus*) o los armiños (*Mustela erminea*) presentan en esa estación un pelaje blanco, útil para el camuflaje. La nieve obliga pues al armiño a este cambio de pelaje, y a sus presas, principalmente topillos (*Microtus*) les permite pasar el invierno viviendo activamente a expensas de sus reservas subterráneas, en una situación térmica confortable, pues el manto nival les protege de las temperaturas extremas. Hay que señalar que las adaptaciones de la piel a las bajas temperaturas de la alta montaña se manifiestan a menudo de manera opuesta, desembocando en la

aparición de formas melánicas. El melanismo es muy frecuente en los Pirineos, afectando a la mayoría de los grupos animales y en especial a aquellos que, como los reptiles o los insectos, no permanecen activos durante el invierno. Mientras que la coloración blanca o clara es una evidente adaptación a las condiciones invernales las coloraciones melánicas son adaptaciones estivales, que permiten aprovechar mejor la radiación solar en situaciones promedias de déficit térmico.

La adaptabilidad de los organismos montanos tiene que ver, en último término con la intensidad de la presión selectiva en esas zonas. Es un ambiente más mutágeno que el de las llanuras, a causa de la mayor intensidad de la radiación electromagnética dura. Cuando las mutaciones no comportan ventaja para las poblaciones, lo que sucede la mayor parte de las veces, son rápidamente eliminadas. Cuando comportan ventajas, como sucede en el caso del melanismo, pueden mantenerse al menos durante unas generaciones, y reaparecer en forma de mutaciones recurrentes. No siempre la selección natural es operativa en el ambiente de alta montaña, porque a menudo la presión ambiental actúa de forma catastrófica, eliminando una gran parte de la población con independencia de sus adaptaciones. Frente a esto sólo caben adaptaciones conductuales vinculadas a las migraciones masivas o a la adquisición de hábitos subterráneos, y ambos tipos de ellas se dan con bastante frecuencia en los biomas montanos, y concretamente en los Pirineos.

10. La acción humana

Desde la prehistoria el hombre ha colonizado la montaña y ha debido adaptarse también a sus condiciones ambientales, pero al mismo tiempo ha dejado su huella sobre el paisaje, modelándolo de forma parecida en los distintos sistemas montañosos del mundo. Así, la agricultura de montaña ha debido enfrentarse con el problema de las fuertes pendientes, generalmente concentrando los cultivos en los valles o en las zonas más llanas, o abanquillando con terrazas las laderas. La limitación de la vegetación arbórea en los niveles supraforestales y su sustitución por formaciones de pasto ha inducido el aprovechamiento ganadero de esas formaciones y la obligada trashumancia del ganado entre la montaña y el llano. La implantación de culturas vinculadas al pastoreo en zonas de montaña ha tenido consecuencias profundas en el modelado de los paisajes naturales montanos en muchas partes del mundo.

Pero actualmente las intervenciones del hombre en la montaña se orientan a otros fines y tienen otras consecuencias. En este aspecto no existen patrones tan generales, difiriendo la situación de, por ejemplo, los sistemas montaño-

tos tropicales, donde se mantiene e incrementa la presión antrópica agrícola y ganadera sobre los ecosistemas, a las montañas de las zonas templadas, donde las actividades agrícolas tradicionales se van abandonando y van siendo sustituidas por actividades de tipo lúdico, como las estaciones de esquí, o por un incremento de las industrias extractivas en minería o electricidad, con la consiguiente retransformación del paisaje tradicional.

Este cambio en las actividades del hombre sobre el territorio se desarrolla en todas las regiones montañosas del mundo y muestra su fase más avanzada en las de los países más desarrollados. A medida que mejora el nivel de vida de una sociedad se van sustituyendo los usos tradicionales de la montaña por otros centrados en los deportes de invierno y la residencia secundaria en verano. Los centros turísticos de montaña en EE.UU., Francia, Suiza o Austria muestran un estadio avanzado de esta evolución, con importantes volúmenes construidos, grandes superficies transformadas y un alto nivel de tecnificación. La situación se aproxima rápidamente a esta en otros países desarrollados, como España, Italia, Grecia o Canadá, si bien en este último país, como en Suecia, Noruega, Argentina o Nueva Zelanda la abundancia de espacios montañosos vírgenes hace menos aparente la transformación en el conjunto del país. Todavía en otros casos las montañas siguen usándose como territorio dedicado a la agricultura o ganadería, o bien mantienen una presión humana muy moderada. En todo caso es evidente la tendencia a la terciarización de la economía en todas las regiones montañosas.

Los Pirineos, como otras cordilleras de su misma latitud, han sido fuertemente intervenidos por el hombre desde tiempos remotos. En muchos puntos de la cadena, incluyendo el piso subalpino, se hallan restos megalíticos correspondientes a la Edad del Bronce, fechados hace unos 5000 años. Se supone que por estas fechas había llegado ya la agricultura y la ganadería a casi todas las zonas bajas de la cordillera. Las cuevas con pinturas prehistóricas magdalenenses, situadas en el sur de Francia no se hallan verdaderamente en zonas de montaña, ya que cuando se pintaron el núcleo de la cadena estaba cubierto por el hielo. Pero persisten pinturas posteriores, de hace 6000 a 10000 años, en las cuevas y abrigos situados en las sierras prepirenaicas de la vertiente sur. Está documentado el uso ganadero de los pastizales de alta montaña desde hace más de 4000 años, y el de los puertos o pasos de comunicación entre ambas vertientes de la cordillera al menos desde que Aníbal cruzó la cordillera con su ejército hacia Italia (BAHN, 1984). Los Pirineos sirvieron de refugio a los restos de los visigodos españoles expulsados por los árabes, y como núcleos de reconquista para la reconstrucción de los Reinos de Navarra y Aragón. La influencia humana sobre el territorio ha sido pues constante e intensa durante varios milenios, y ha llegado a modificar profundamente los ecosistemas y el paisaje de la cordillera. Este proceso

se ha traducido principalmente en una intensa deforestación y una consiguiente pérdida de suelo, proceso que sólo recientemente se ha llegado a frenar y aun a invertir, no tanto por las repoblaciones forestales efectuadas artificialmente cuanto por la reforestación natural derivada del abandono de los asentamientos humanos, de la pérdida de la agricultura tradicional y de la disminución de la cabaña ganadera en las zonas de montaña de todo el país.

En resumen, esta nueva forma de intervención humana en la montaña es menos extensiva pero más intensiva, permitiendo en amplias extensiones una recuperación del paisaje y una reforestación natural a costa de unas tasas muy elevadas de pérdida de recursos naturales y de deterioro ambiental en zonas concretas y limitadas. La ecuación no es equilibrada, pues los procesos naturales de recuperación se ven frenados por las condiciones globales, como el cambio climático o el incremento de incendios forestales, pero todavía no se poseen los datos necesarios para predecir la situación futura con suficiente confianza.

Pero aunque todavía no se poseen datos suficientes para una predicción fiable a futuro, sí hay indicios respecto a algunos aspectos o escalas espaciales. En las montañas y a alturas escasamente ocupadas por el hombre la zonación altitudinal característica relacionada con los gradientes bioclimáticos (HUMBOLDT 1991, CAROTHERS *et al.* 2001) se mantiene a escala de cordillera o de grandes valles, o en espacios protegidos (BENITO, 2005). Pero también es cierto que en la mayoría de los sistemas montañosos del mundo la influencia humana ha cambiado esta distribución a favor de utilizar las condiciones climáticas de las distintas zonas o los recursos naturales. En el caso de los Pirineos, el paisaje cambió desde hace siglos alcanzándose una situación estable entre la dinámica de la vegetación natural y la utilización de los pastos de forma controlada para la producción ganadera y en menor extensión para producción de alimentos propios y construcción de viviendas en núcleos tradicionales compactos. Así se conformó el paisaje conocido de los Pirineos hasta el último tercio del siglo XX. A partir de entonces y por diversas motivaciones, sobre todo socio-económicas, la disminución de la población local y el aumento de usos temporales de recursos de alta montaña, empezó a cambiar de forma acelerada la cobertura de grandes zonas en el sentido de aumentar la cobertura vegetal en algunas zonas por disminución de la población y de actividades ganaderas, y de aumentar el área edificada por expansión de núcleos urbanos y de zonas de segunda residencia en zonas de recreo asociadas a la nieve.

El aumento de la capacidad técnica y de transporte ha acelerado durante los primeros años del Siglo XXI esta tendencia, sin una previsión de beneficios y costes, y mucho menos de estudios medioambientales o de alternativas

en este sentido. Ello está impactando claramente y de forma negativa sobre los recursos naturales de algunas zonas del Pirineo. Y sin una previsión en el marco del cambio climático actual y de sus impactos a futuro en las zonas de montaña. Así, la previsión del desplazamiento ascendente de los pisos bioclimáticos es generalmente aceptada (WALTER *et al.* 2002) al igual que la del cambio en la composición de las especies de estas comunidades (ROOT *et al.*, 2003). La serie de impactos que están ocurriendo (DIAZ & GRAHAM 1996, LOPEZ-MORENO, 2005) y de los potenciales (MORENO, 2005) tienen alcance a un rango amplio de escalas espaciales, por lo que para los Pirineos, unas montañas en una posición geográfica especialmente sensible a los impactos del cambio climático, es de prever que tengan lugar con mayor intensidad y fiabilidad. Todo ello aconseja tener en cuenta, primero la necesidad de obtener información para hacer previsiones con bajo margen de error y a diferentes escalas, cuanto más definidas en el espacio mejor, pero también que se deben incorporar a los planes de uso de los recursos naturales y del territorio en los Pirineos todas estas perspectivas. Y esto no solo por conseguir un uso racional y eficiente en las propias zonas de montaña, también porque las montañas cumplen unas funciones a escala global y a escala regional de incalculable valor, de las cuales dependen buena parte de las actividades de poblaciones humanas y del funcionamiento de otros sistemas territoriales.

11. Uso y conservación

La relativa inaccesibilidad de las regiones montañosas ha reducido en algún grado las perturbaciones que el hombre suele inducir en la naturaleza, y en especial la disminución de la fauna debida a la caza. No es de extrañar, por lo tanto, que las montañas constituyan un refugio final para muchas especies que en otras partes no han podido subsistir. Esta condición, sumada al elevado nivel de endemidad propio de las cordilleras, y a la elevada heterogeneidad ecológica de las mismas derivada de su estructura zonal en pisos de vegetación, es lo que confiere a las montañas su valor como depósitos de biodiversidad, donde la variedad de biotopos se traduce en una diversidad de especies y de taxones superiores. Si añadimos a esto el valor escénico y paisajístico característico de las regiones montañosas, y la sensibilidad y fragilidad propias de muchos de sus ecosistemas, será fácil comprender que las acciones encaminadas a la protección y conservación se concentren notablemente en áreas de montaña. Realmente, cerca de la mitad de los espacios protegidos del planeta, cualquiera que sea su figura de protección, se ubican en regiones montañosas a pesar de que las montañas ocupan un porcentaje de la superficie de las tierras emergidas que no alcanza el 20 %.

La concentración de espacios naturales protegidos en regiones montañosas se puede constatar a todos los niveles. Para la Unión Europea la Red Natura 2000 constituye un conjunto de miles de espacios a proteger o protegidos que ocupa del 5 al 20 % de la extensión de cada país si éste es predominantemente llano, y del 20 al 40 % en el caso de los países montañosos. Para España el 65 % de los centenares de espacios que integran esta red se hallan en zonas de montaña, y el porcentaje sube al 75 % cuando se considera la superficie de dichos espacios. Los primeros espacios protegidos que se establecieron en el mundo (Parque de Yellowstone, Estados Unidos), en Europa (Parque Nacional de Abisko, Suecia) y en España (Parques Nacionales de Covadonga y de Ordesa), correspondían a zonas de montaña. En lo que respecta a la cordillera pirenaica, concentra buena parte de los espacios protegidos de las regiones administrativas circundantes en número de más de 200, incluyendo dos parques nacionales en la vertiente española y otro más en la francesa. Unos de estos parques, el de Ordesa y Monte Perdido, creado en 1918, fue el primer espacio natural protegido de la cordillera (VILLAR, 1999).

La política de protección de especies se manifiesta asimismo de forma destacada en los territorios montañosos, debido a la circunstancia, ya aludida, de que éstos sirven de refugio a numerosas especies que han desaparecido de otras áreas o que son endémicas de la montaña. El porcentaje de especies amenazadas propias de las regiones montañosas es superior al de la extensión ocupada por dichas zonas, y aumenta todavía si se incluyen los invertebrados y los grupos poco conocidos ligados a ambientes muy especiales (cuevas, fuentes, etc.), que no son exclusivos de las regiones montañosas pero que abundan en ellas de forma particular. El Atlas de la Flora Amenazada de España (BAÑARES *et al.*, 2003) revela la concentración de especies fanerógamas amenazadas en las principales cadenas montañosas de la Península Ibérica, principalmente en las cordilleras Béticas y Subbéticas, y en los Pirineos, Sistema Ibérico y Macizo Galaico.

De los 229 taxones protegidos que integran el Catálogo de Especies Amenazadas de Aragón, 53 (un 23 %) pueden considerarse vinculados a la montaña, la mayoría de ellos a la cadena de los Pirineos. A estos hay que añadir un número similar de taxones que, si bien no son exclusivos de la montaña, abundan en ésta y forman parte esencial de los ecosistemas montanos, de manera que el número de especies a proteger en los Pirineos se acerca a la mitad de los que se consideran para todo el territorio aragonés, una proporción muy superior a la de territorio ocupado por la cordillera. Por desgracia, las políticas de protección de especies llegan en algunos casos demasiado tarde, no habiendo podido impedir la extinción de algunas poblaciones o posibilitando la supervivencia de otras solamente mediante el recurso a procedimientos artificiales y extremos.

La solución parcial y crítica de delimitar como espacios protegidos algunas zonas de las montañas por su representatividad y estado de conservación ya no es suficiente para asegurar los fines con que se crearon. Tres tipos de factores nuevos con impactos negativos en la integridad y en aspectos parciales de los espacios protegidos han alterado esta situación. Por orden cronológico, se puede decir que el transporte de elementos contaminantes por la atmósfera alcanza a toda la Tierra pero puede tener una especial incidencia en los lugares de flujo preferente del aire y elevados como los Pirineos (MEIJER *et al.*, 2006). La ocupación del territorio por usos intensivos como edificación, frecuentación humana, transporte por vehículos, uso de agua para producción de nieve, uso de suelo para ocupación de infraestructuras recreativas, en la cercanía de espacios protegidos de montaña se ha acelerado, especialmente en los Pirineos y en los últimos años (VISCONTI *et al.*, 2001). Este factor tiene connotaciones socio-económicas relevantes, porque las actividades relacionadas condicionan y transforman la actividad de la población humana y su cultura, lo cual a su vez repercute sobre los recursos naturales y las áreas protegidas. Por último, los impactos del cambio climático pueden hacer que los espacios protegidos hace décadas lleguen a alterarse perdiendo o cambiando su representatividad desde la escala de especie hasta la de paisaje (PRATO & FAGRE, 2005; 2007)

En estas circunstancias es conveniente plantear estudios y análisis consistentes sobre la distribución actual y futura de los espacios protegidos y su representatividad. También sobre la necesidad de establecer corredores ecológicos entre ellos y en qué condiciones de espacio, tiempo, estructura y funcionalidad ecológicas. Y, muy especialmente, es conveniente definir y prever estrategias de uso de los espacios protegidos y de sus alrededores ante distintos escenarios para anticiparse a diferentes alternativas posibles de cambio climático y/o cambios globales.

12. Conocimiento de los Pirineos

Los experimentos de Blaise Pascal a mediados del siglo XVII sobre la disminución de la presión atmosférica con la altitud, que fueron realizados en montañas francesas, no correspondían propiamente a un estudio científico de las montañas, sino del conjunto de la atmósfera terrestre. Los primeros pasos dados para lograr un mejor conocimiento de las montañas del mundo se enmarcaron en las necesidades cartográficas de los estados europeos, y en especial de sus estamentos militares, para establecer con precisión las fronteras de los países respectivos, en la segunda mitad del siglo XVIII. Pero es bien sabido que el primer científico que recogió y organizó las observaciones per-

tinentes a la estructura y función de las montañas del mundo fue Alexander von Humboldt, a principios del siglo XIX.

Desde entonces la literatura científica existente sobre las montañas de la Tierra es copiosa. Se cuentan vastas bibliotecas dedicadas a este tema, numerosos centros de investigación y observatorios, y varias revistas científicas que recogen la investigación desarrollada en distintos países. Las organizaciones deportivas y los servicios meteorológicos de muchos países han sido agentes decisivos para adquirir y propagar este conocimiento, y la atención por el tema ha llevado incluso a las Naciones Unidas a poner en marcha organizaciones internacionales encaminadas a esta misión.

El conocimiento científico de los Pirineos encaja en esta trayectoria. Las primeras observaciones de este tipo hechas en la cordillera eran cartográficas o topográficas, y estaban encaminadas a delimitar la frontera entre España y Francia. Aunque fueron interrumpidas por la Revolución Francesa y las guerras subsiguientes, no dejaron de realizarse a lo largo de los siglos XIX y XX, encabezadas en primer lugar por pirineístas como Ramond o de Saussure, que unían en su actividad la condición de observadores geográficos y de deportistas enfrentados a difíciles retos.

La síntesis de los conocimientos logrados en 200 años de estudio de la cadena no es fácil de allegar. Varios centros de investigación, entre los que destaca el actual Instituto Pirenaico de Ecología albergan bibliotecas extensas relacionadas con el estudio de esta cordillera, incluyendo algunas publicaciones que son precisamente recopilaciones bibliográficas. Existen o han existido varias revistas periódicas, por lo menos dos en la vertiente española y otras dos en el lado francés, que llevan el título de "Pirineos" o "Pyrenées". Dos de ellas recogen artículos de investigación y tienen una historia lo bastante dilatada como para contener una copiosa cantidad de material relativo al estudio de la cordillera. La presente "Pirineos", se publica desde 1945 por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España, y ha editado más de 160 números. La revista francesa homóloga, "Pyrenées", se edita por el Museo del Castillo de Lourdes. A este material hay que añadir el suministrado por otras publicaciones periódicas, como las actas de los ocho congresos internacionales de estudios pirenaicos que se han celebrado, o las monografías publicadas por el Instituto Pirenaico de Ecología. Y, naturalmente, deben considerarse también las numerosas publicaciones que se ocupan de otras cadenas montañosas, y que proporcionan datos generales aplicables a todas ellas, incluyendo la pirenaica. Destacan en este aspecto los abundantes libros sobre alta montaña referidos a los Alpes, el Himalaya, los Andes o las Montañas Rocosas, que son las cordilleras más estudiadas.

13. Perspectivas a gran escala para la gestión de los Pirineos:

Hasta mediados del siglo XX la alta montaña y los humedales extensos, así como los bosques densos y otros territorios poco acogedores eran las últimas zonas de la tierra que no habrían sufrido una degradación importante a gran escala. La mayor parte de esas zonas han sufrido impactos negativos intensos a medida que los transportes y la capacidad tecnológica iban desarrollándose durante la segunda mitad del siglo pasado. Al mismo tiempo que avanzaban los procesos de globalización, crecía la conciencia sobre la degradación de los ecosistemas y los esfuerzos para preservar los recursos naturales, y crecía también el interés sobre el uso racional de los servicios suministrados por los ecosistemas de montaña en amplios territorios, incluyendo algunas grandes cordilleras (KORNER & OHSAWA, 2005).

A comienzos del siglo XXI la gestión a gran escala de cadenas montañosas como los Pirineos, situadas en países desarrollados, se encuentra en una encrucijada. El sistema socioeconómico de los Pirineos ha cambiado desde una situación de alto valor local de los recursos naturales y escaso valor externo de los mismos, a una situación inversa, en la que el establecimiento de las actividades de ocio ligadas a la nieve y el turismo de montaña como verdaderas industrias, han dado a los recursos naturales un valor local escaso y han aumentado notablemente su valor para ámbitos externos. Este tipo de uso se caracteriza por actividades intensivas (uso masivo de los recursos durante cortos periodos de tiempo), que requieren el uso, transformación y degradación de grandes cantidades de tales recursos en determinadas zonas de la cordillera. Pero al tratarse de un sistema socioeconómico industrial este nuevo sistema se rige por los mismos criterios que utilizan las actividades industriales clásicas en otros ambientes, es decir, basándose y evaluándose en la continuada inversión económica y en el crecimiento constante. En consecuencia, cada vez se emplea una mayor cantidad de recursos (agua, suelo, bosques, etc), y se incrementa el riesgo de un colapso general a medida que avanza la competencia con actividades similares o diferentes en la misma zona y en zonas no montañosas.

Otras consecuencias de esta estrategia de desarrollo incluyen la pérdida del conocimiento y la cultura tradicionales y la pérdida del capital social (LYNCH & MAGGIO, 2000). Los usos tradicionales son abandonados y el capital social (el valor y la cohesión de la comunidad local) decrecen a medida que los habitantes locales cambian la valoración de su sistema socioeconómico, sustituyendo una estrategia a largo plazo basada en un uso sostenible de los recursos naturales, por una estrategia a corto plazo basada en la obtención rápida de ingresos elevados, a costa de perder la propiedad y el control de los recursos naturales.

Así, los Pirineos, un desafío importante al que se enfrentan es poner en marcha un desarrollo sostenible basado en la conservación de los recursos naturales. Esto puede llevarse a cabo de diversas maneras. Sin embargo, una estrategia basada en la obtención de beneficios rápidos y elevados por parte de algunos elementos sociales foráneos, y en los consiguientes deterioro y agotamiento de los recursos naturales, no será efectiva a largo plazo, e implica riesgos de colapso a corto plazo, tanto por su propia dinámica como por la influencia de los escenarios previstos de cambio climático, que se han comentado ya. Las opciones alternativas para un desarrollo sostenible de la montaña pirenaica incluyen la limitación del uso intensivo de los recursos en áreas pequeñas, acompañada de una reducción de la inversión económica para adaptarla al tamaño de esas áreas. También la diversificación de las actividades, no basándolas en tan sólo un recurso natural, como el agua o la nieve, es un punto importante para fortalecer la estructura y el capital sociales. Además de ello se debe incrementar el capital humano y de conocimientos promocionando la información de calidad y la educación, lo cual constituye una herramienta esencial para favorecer el desarrollo sostenible en zonas de montaña. En cualquier caso, para conseguir un desarrollo sostenible en áreas de montaña, es de la mayor importancia a escala global la integración del capital humano local en la protección de la naturaleza y en la conservación de los recursos naturales (THORSELL, 1997).

Referencias

- BAHN, P.G. (1984). *Pyrenean Prehistory: A Palaeoeconomical Survey of the French Sites*. Ed. Aris & Phillips, Oxford. 400 pp.
- BAÑARES, A, BLANCA, G., GÜEMES, J, MORENO, J.C. & ORTIZ, S. (Eds). (2003). *Atlas y Libro Rojo de la Flora Vascular Amenazada de España*. Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Madrid. 1072 pp.
- BARRY, R.G. (1992). *Mountain Weather and Climate*. Ed. Routledge, New York. 402 pp
- BEAUMONT, C., MUNOZ, J.A., HAMILTON, J. & FULLSACK, P. (2000). Factors controlling the Alpine evolution of the central Pyrenees from a comparison of observations and geodynamical models. *Journal of Geophysical Research*, 105 (B4), 8121-8145.
- BENITO, J.L. (2005). Flora y vegetación del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido (Sobrarbe, Pirineo aragonés). Bases científicas para su gestión sostenible. *Ph. D. Thesis, University of Barcelona*.
- CAMARERO, J.J., GUERRERO-CAMPO, J., & GUTIERREZ, E. (1998) Tree-Ring Growth and Structure of *Pinus uncinata* and *Pinus sylvestris* in the

- Central Spanish Pyrenees. *Arctic and Alpine Research*, 30(1) :1-10
- CAROTHERS, J.H., JAKSIC, F.M. & MARQUET, P.A. (2001). Altitudinal zonation among lizards of the genus *Liolaemus*: questions answered and unanswered questions. *Rev. Chil. Hist. Nat.* 74(2):313-316.
- CARPORZEN, L. & GILDER, S. A. (2006). Evidence for coeal Late Triassic terrestrial impacts from the Rochechouart (France) meteorite crater, *Geophysical Research Letters*, Vol. 33.
- DAVIDSON, H. M. (1983). *Blaise Pascal*. Boston: Twayne Publishers.
- DEL BARRIO, G., CREUS, J. & PUIGDEFABREGAS, J. (1990). Thermal Seasonality of the High Mountain Belts of the Pyrenees *Mountain Research and Development*, 10(3): 227-233.
- DIAZ, H.F. & GRAHAM, N.E. (1996). Recent changes in tropical freezing heights and the role of sea surface temperature. *Nature* 383:152-155.
- FRANZ, H. (1979). *Ökologie der Hochgebirge*. Ed. Ulmer, Stuttgart. 495 pp
- GARCÍA RUIZ, J. M. & MARTÍ BONO, C.E., (Eds). (1994). *El glaciario surpirenaico: nuevas aportaciones*. Geoforma Ediciones, Logroño.
- GIRAUDI, C. (2005). Middle to Late Holocene glacial variations, periglacial processes and alluvial sedimentation on the higher Apennine massifs (Italy) *Quaternary Research*, 64 (2) 176-184
- GÓMEZ ORTIZ, A.; SALVADOR, F.; SCHULTE, L. & GARCÍA NAVARRO, A. (eds.) (1998). *Procesos biofísicos actuales en medios fríos. Estudios recientes*. Barcelona: Public. Universitat de Barcelona, 374 pp.
- GUNN, J. (2003). *Encyclopedia of caves and Karst Science*. Ed. Routledge, New York. 960 pp.
- HUMBOLDT, A. VON, (1991). "Viaje a las regiones equinocciales del nuevo continente". (2ª ed.). Monte Ávila Editores. Caracas – Venezuela. 5 Volúmenes.
- KÖRNER, CH., PAULSEN, J. & PELAEZ-RIEDL, S. (2003). A Bioclimatic Characterisation of Europe's Alpine Areas. In: Nagy, L., Grabherr, G., Körner, Ch. & Thompson, D.B.A. (Eds.) *Alpine Biodiversity in Europe. Ecological Studies* 167. Springer, Berlin :13-30.
- KORNER, C. & OHSAWA, M. (2005). *Mountain Systems-Millennium Ecosystem Assessment*-Island Press 1 (24):681-716.
- LÓPEZ-MORENO, J.I. (2005). Recent variations of snowpack depth in the Central Spanish Pyrenees. *Artic, Antartic, and Alpine Research*, 37 (2): 253-260.
- LUTGENS, F. K. & TARBUCK, E.J. (1995). *The Atmosphere*, Prentice Hall, 6th ed.
- LUTZ, E., SCHNELLER, J.J., & HOLDEREGGER, R. (2000). Understanding population history for conservation purposes: population genetics of *Saxifraga aizoides* (Saxifragaceae) in the lowlands and lower mountains

- north of the Alps. *American Journal of Botany*, 87: 583-590.
- LYNCH, O.J. & MAGGIO G.F. (2000). *Mountain laws and people: moving towards sustainable development and recognition of community based property rights*. The Mountain Institute, Washington D.C., 48 pags.
- MALLARACH, J.M. (1998). *El volcanisme prehistòric de Catalunya*. Diputació de Girona. 372 pp.
- MEIJER, S. N.; DACHS, J.; FERNANDEZ, P.; CAMARERO, L.; CATALAN, J.; DEL VENTO, S.; VAN DROOGE, B.; JURADO, E. & GRIMALT, J. (2006). Modelling the dynamic air-water-sediment coupled fluxes and occurrence of polychlorinated biphenyls in a high altitude lake. *Environmental pollution* 140: 546-560.
- MORENO, J.M. et al. (2005). *Principales conclusiones de la evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. 39 pp.
- OLLIVIER, R. (1980). *Le pic d'Ossau, monographie, impressions et récits*, 1948, Pau. Réédition Slatkine, 1980, Genève. 204 pp.
- PARTRIDGE, T.C. & MAUD, R.R. (1987). Geomorphic evolution of southern Africa since the Mesozoic. *South African Journal of Geology* 90, 179-208.
- PRATO, T. & FAGRE, D.B. (2005). *National Parks and Protected Areas: Approaches for Balancing Social, Economic, and Ecological Values*. Blackwell Publishing, Oxford, U.K. 416 pp.
- PRATO, T. & FAGRE D.B. (2007). *Sustaining Rocky Mountain Landscapes: Science, Policy and Management of the Crown of the Continent Ecosystem*, RFF Press, Washington D.C.
- RIVAS MARTÍNEZ, S. (1987). *Memoria del Mapa de Series de Vegetación de España*. Ed. ICONA, Ministerio de Agricultura, Madrid. 268 pp.
- ROOT, T.L., PRICE, J.T., HALL, K.R., SCHNEIDER, S.H., ROSENZWEIG, C., & POUNDS, J.A. (2003). Fingerprints of global warming on wild animals and plants, *Nature*, 421, 57-60.
- TEIXELL, A. (2000). Geotectónica de los Pirineos. *Investigación y Ciencia*, 288: 54-65.
- THORSELL, J. (1997). Protection of nature in mountain regions. In Messerli, B. and Ives J. (eds.). *Mountains of the world-A global priority*. Parthenon Publ., New York, pags.: 237-248.
- VÄRE, H., LAMPINEN, R., HUMPHRIES, C. & WILLIAMS, P. (2003). Taxonomic diversity of vascular plants in the European Alpine Areas. In: Nagy, L., Grabherr, G., Körner, Ch. & Thompson, D.B.A. (Eds.) *Alpine Biodiversity in Europe. Ecological Studies* 167. Springer, Berlin: 133-148.
- VILLAR, L. (Ed). (1999). *Espacios Protegidos del Pirineo: Ecología y Cartografía*. Publicaciones del Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón. Serie Conservación, nº 2., Zaragoza. 167 pp. + 27 lám. separadas.

Comín, F. *et al.*: LOS PIRINEOS EN EL CONTEXTO DE LAS MONTAÑAS DEL MUNDO: RASGOS...

VISCONTI, G., BENISTON M., LANNORELLEI, E.D. & BARBA, D. (2001).
Global change and protected areas (Advances in global change research 9)
Lavoisier Lib., Paris.