

**ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS, QUÍMICAS
Y NATURALES DE ZARAGOZA**

**LA ECOLOGÍA DE MONTAÑA: OPORTUNIDADES
PARA LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA**

DISCURSO DE INGRESO LEÍDO POR EL ACADÉMICO ELECTO

Ilmo. Sr. D. Juan Pablo Martínez Rica

*EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN SOLEMNE
CELEBRADO EL DÍA 24 DE OCTUBRE DE 2002*

Y

DISCURSO DE CONTESTACIÓN POR EL

Ilmo. Sr. D. Juan A. MARÍN VELÁZQUEZ

ACADÉMICO NUMERARIO



ZARAGOZA

2002

Depósito legal: Z-2489-2000

Imprime:

Sdad. Coop. De Artes Gráficas

Librería General

Pedro Cerbuna, 23

50009 Zaragoza

imprentalg@efor.es

**LA ECOLOGÍA DE MONTAÑA: OPORTUNIDADES
PARA LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA**

POR EL

Ilmo. Sr. D. Juan Pablo Martínez Rica

Excelentísimo Sr. Presidente,

Excelentísimos e Ilustrísimos Sres. Académicos, Sras. y Sres.

Tres rasgos son comunes en el comienzo de los discursos de ingreso, el agradecimiento, la reticencia y la justificación. El primero es absolutamente general y no falta en ningún caso, por razones de coherencia, oportunidad y hasta de necesidad. Todas aquellas personas a quienes se otorga públicamente una distinción lo agradecen sincera y fervientemente. En el caso del ingreso en esta Academia, la expresión del agradecimiento es, además, una regla obligada, ya que normalmente se exige por parte del nuevo académico una glosa de la personalidad de quien le precedió. No es este mi caso, ya que mi puesto es de nueva creación, y no tiene precedente. De modo que mi agradecimiento habrá de limitarse al Presidente de la institución, su verdadero elemento motor y revitalizador, y a todos los miembros de la misma, que me honraron con su propuesta. Quiero mencionar especialmente al Dr. Juan Marín, sin duda el artífice más o menos declarado de dicha iniciativa. Me gustaría compensar esta limitación en mis expresiones de gratitud con una mayor intensidad de las mismas, de manera que reitero aquí mi agradecimiento más sincero a todos los asistentes, en un grado que espero sea igual o mayor - sin duda no es menor - que el de cualquiera de mis predecesores en este trance. Y también quisiera aprovechar la ocasión para hacer extensivo este agradecimiento a otras personas, algunas de ellas presentes en la sala y otras ausentes, que han contribuido a mi formación científica. Este es un foro apropiado para declarar públicamente mi deuda para con ellas y devolverles con unas pobres palabras de agradecimiento un poco de lo mucho que me han dado. Así, debo mencionar a mis queridos compañeros del Instituto Pirenaico de Ecología, que me han enseñado no solamente ciencia sino también paciencia. De entre ellos debo destacar al Dr. Enrique Balcells, verdadero fundador y alma mater inicial del Instituto, quien confió en mí cuando yo no era más que un estudiante desorientado pero ilusionado. Pero en mi formación científica influyó sobre todo otra persona, el Dr. Ramón Margalef, primer ecólogo del país en cualquier sentido de estos términos y cuyo contacto conmigo fue, por

desgracia demasiado breve. Breve pero decisivo, y suficiente en todo caso para que yo considere un deber el expresar aquí mi gratitud hacia él, no solo por haberme ayudado y formado, que ya es mucho, sino sobre todo por haberme concedido el privilegio de llamarme su amigo. La concisión me obliga a no glosar aquí la trayectoria científica de estas personas, algo que ya he hecho cumplidamente en otros foros, y en esta misma ciudad de Zaragoza.

El segundo rasgo esperable en un discurso de este tipo es la reticencia, una reticencia bienintencionada, que no es más que un ejercicio de humildad y que habitualmente toma la forma de una declaración de insuficiencia de los propios méritos. Es cierto que este rasgo no es tan general como el anterior. Algunas personas no se sorprenden de la distinción que se les otorga, bien porque la consideran plenamente justificada, bien porque no desean que su actitud se interprete como falsa modestia. Probablemente tienen razón. En algún caso he oído decir al receptor que no es posible poner en duda lo adecuado de la elección, porque ello sería lo mismo que poner en duda la competencia de las personas que la hicieron. Pero yo me veo obligado a declarar aquí mi convicción de que las personas que me propusieron como miembro de esta corporación fueron demasiado generosas, y esto no es dudar en modo alguno de su competencia, sino afirmar su benevolencia. No pretendo al decir esto aparentar una modestia que no tengo, simplemente me remito a los términos de comparación que he tenido a mano. He podido examinar el discurso de contestación al último de ingreso pronunciado en esta sala, el pasado 16 de Mayo, en el cual el Dr. Rebolledo Sanz describía la trayectoria científica de mi querido amigo y compañero de fatigas en el CSIC, D. Pablo Javier Alonso. Cuando, en los primeros párrafos de dicho discurso uno se encuentra con una persona que inicia su carrera con dos licenciaturas simultáneas, obteniendo en ambas Premio Extraordinario, y continúa con un Premio Nacional de Licenciatura, un Premio Extraordinario de Doctorado, y varios más relacionados con sus estudios, es perfectamente normal que se sienta apabullado. Así me siento yo en este momento, sucesor menor de quien me precedió en este discurso. Quizás no soy la única persona en la sala que duda de que la confianza implícita en la propuesta de mi elección esté justificada, de manera que probablemente tampoco seré la única en ponderar la generosidad de quienes me propusieron.

Y el tercer rasgo común en los discursos de ingreso es el de la justificación. Este tampoco es general, pero sí habitual, una costumbre comprensible de explicar la elección del tema del discurso y el modo de tratarlo. Y también a mí, como a cualquier otra persona, me ha preocupado el tema que debería discutir aquí. Una Academia de Ciencias está formada por personas expertas en disciplinas diversas. El nombre de la nuestra es “*Academia de Ciencias Exactas, Físicas, Químicas y Naturales de Zaragoza*”. El orden de

los términos no es casual, y corresponde a una jerarquía implícita, con las ciencias exactas en primer y más noble lugar, y las naturales en el último y vergonzante. Y es además un reflejo de la realidad: En Zaragoza las ciencias exactas y físicas son poderosas, se cultivan desde hace mucho tiempo, y los profesionales de las mismas, muchos de los cuales se hallan presentes, alcanzan un nivel de excelencia proverbial en nuestro país y también fuera del mismo, mientras que las ciencias naturales, salvo en el ámbito de aplicación agrícola, son unas recién llegadas a una ciudad que incluso carece de Facultad de Biología. Y si esto decimos de las ciencias naturales en general, ¿qué diremos de la ecología, pariente pobre de las sofisticadas disciplinas relacionadas con la genética y la biología molecular, por más que goce de una proyección social indudable?

Estas consideraciones han pesado a la hora de decidir el tema y el modo del discurso. Dada la condición de recién llegada a esta casa de la ecología, me ha parecido oportuno que el discurso sea asimilable a una presentación. Tendrá, por lo tanto, un carácter general, lo que le impondrá una cierta superficialidad ya que no es posible tratar en detalle un campo extenso, pero a cambio tendrá la ventaja de llegar a un mayor número de oyentes. Ahorro así el riesgo de tratar un tema que quizás solo interese a quien lo expone. Supuesto, pues, que voy a hablar de ecología, y que lo voy a hacer de forma general, solo queda decidir el tema específico. Y naturalmente, éste debe estar relacionado con la disciplina que yo mismo he cultivado, la ecología de montaña.

Pero no es fácil hoy hablar de cualquier tema alejado de la propia disciplina, y no es fácil tampoco hacerlo de la propia especialidad, pero de una forma general. Un colega norteamericano, hoy jubilado, me dijo en una ocasión que él ya era lo bastante mayor como para atreverse a decir incluso en público que su interés era la ciencia en general, que se le podía calificar de generalista. Había empezado a investigar en ornitología y de ahí pasó al estudio de la ecología de los vertebrados de montaña, luego a la ecología general, y en el momento en que me hablaba le interesaba casi cualquier aspecto de la estructura y el funcionamiento del mundo. Pero lo que más me llamó la atención de su comentario no fue la ampliación del campo de su interés, ampliación esperable o al menos frecuente en cualquier científico, sino el que considerase su declaración como peligrosa, como fuente de problemas de los que le salvaba su edad. Realmente, la presión competitiva a que los científicos estamos sometidos hace muy arriesgado cualquier enfoque distinto a una superespecialización progresiva que nos permita publicar nuestros trabajos en revistas punteras. La declaración abierta de generalismo es mal vista por las autoridades científicas y a menudo también por una gran parte de los investigadores. Pero yo también tengo una edad que me permite ignorar las consecuencias de una afirmación arriesgada, de manera que no voy a someterme a la disciplina social y, si bien voy a hablar de ecología, mi campo

de trabajo, no renunciaré a un enfoque amplio que permita que cada uno de los presentes sienta aludida, al menos de pasada, su propia disciplina. Y en algún punto descenderé a un detalle mayor, únicamente para permitir que se pueda columbrar cuán lejos pueden llevar en este ámbito los caminos cuyo comienzo simplemente se esboza.

La ecología en su conjunto, e incluso la ecología de montaña, es un tema demasiado general. Para un ecólogo hablar de ecología es como para casi cualquier persona hablar del mundo entero. Hay que acotarlo para hacerlo accesible. De hecho, entre los cientos de definiciones que se han dado de la ecología hay una, levemente humorística pero no muy disparatada, que afirma que “*La ecología es la ciencia de todas las cosas*”. Esta pretensión de universalidad no es sorprendente. Si la ecología estudia las relaciones de los seres vivos entre sí y con su entorno, está claro que engloba a la totalidad de los organismos — incluido el hombre — y de sus ambientes y agrupaciones, incluidas las sociedades humanas. Así pues, la fisiología y la economía, la agricultura y la climatología, la sociología y la arquitectura urbana, tienen conexiones directas con la ecología. La totalidad de nuestro planeta es campo de trabajo para la ecología, e incluso en algún modo puede decirse que este campo se extiende a todo el Universo, por cuanto existen ya trabajos científicos sólidos, si bien algo especulativos, sobre la ecología de los hipotéticos organismos de otros planetas y la construcción de biosferas extraterrestres (MCKAY et al., 1991; FOGG, 1995).

No es de extrañar que una ciencia tan amplia sea invocada, adecuada e inadecuadamente, para fines muy diversos. En las manifestaciones estudiantiles de la década de los 60, en Estados Unidos, no era infrecuente leer pancartas con la consigna “Ecology now!” (¡Ecología ya!). También se habla de que un determinado lugar tiene una buena o mala ecología, de que un determinado producto es ecológico. O de que es necesario cuidar la ecología. Todos estos usos del término son inapropiados y hasta risibles. La confusión habitual entre ecología, una ciencia, y ecologismo, un movimiento social o político más o menos reivindicativo, no hace sino dificultar aún más la comprensión de los conceptos relacionados con el tema. Por más que se invoque constantemente la ecología para actividades que corresponden al ecologismo, no existe más relación entre una y otro— y que me perdonen mis amigos ecologistas— que la que existe, por ejemplo entre la meteorología y el meteorismo.

La ecología no se reduce a la lucha contra la contaminación por residuos industriales, como se la entiende a menudo, ni a la lucha contra la contaminación en general, ni siquiera equivale al conjunto de acciones encaminadas a la protección de nuestro ambiente. La ecología es una ciencia compleja y densa. Se ocupa de analizar sistemas biológicos ordinarios y extraordinarios, compuestos de miles y aún millones de partes que interaccionan

entre sí de manera muy poco predecible. De algún modo es el polo opuesto de la física, que estudia en profundidad sistemas sencillos, compuestos de pocos elementos y con interacciones claramente determinadas. El azar y la complejidad de sus objetos de estudio obligan a la ecología a un enfoque mucho menos profundo, de manera que en ocasiones ha sido considerada una ciencia “blanda”, a regañadientes aceptada como ciencia por algunos investigadores, a pesar de que en ocasiones, y como luego comentaremos, las investigaciones ecológicas han iluminado el camino de los físicos (MAY, 1976). La situación es comparable, aunque en menor grado, a la de ciencias como la psicología o la sociología, asimismo marginadas por algunos científicos “duros”, y esta circunstancia dificulta aún más el hablar de la ecología en su conjunto.

Pero he dicho que me ocuparía únicamente de la ecología de montaña. Como Director de un Instituto especializado en este campo, una reflexión sobre las montañas como espacios ecológicos me ha parecido especialmente adecuada, particularmente en este año, designado por las Naciones Unidas como Año Internacional de las Montañas. Además, como ahora veremos, las montañas son mundos en sí mismas, pequeños retazos de la biosfera en los que ésta se comprime para presentarnos reunidas muchas de sus manifestaciones. Desde el punto de vista económico, ecológico y estético las montañas son fundamentales para la humanidad, y por desgracia lo son también a causa de su fragilidad y del grado de amenaza que sus ecosistemas experimentan. En una u otra forma el 40% de la humanidad depende de las montañas, y si consideramos exclusivamente la procedencia del agua dulce que utilizamos, claro está que este porcentaje es muy superior (IVES, 1992). Pero subrayo el interés científico más que el económico: en cierto modo estudiar la ecología de las montañas es equivalente a estudiar el funcionamiento de la mayor parte de los sistemas que integran nuestro planeta.

A pesar de su interés, las montañas no son más que arrugas imperceptibles de la corteza terrestre. Incluso desde una perspectiva bastante próxima las grandes cordilleras presentan un aspecto relativamente plano. La Tierra es uno de los mundos más lisos del sistema solar, si no el que más, pero para los animales y los hombres, generalmente limitados a una percepción bidimensional de la superficie terrestre, las montañas añaden a esta percepción un componente vertical que enriquece y completa su visión del mundo. Su variedad y su belleza, su carácter a veces idílico y a veces grandioso, se hacen aparentes sólo desde su interior, y despiertan desde antiguo en el hombre ecos de antiguas afinidades, como si representasen la naturaleza en estado puro. Muchas culturas han asignado a determinadas montañas un carácter sagrado, tomándolas como puntos privilegiados para la comunicación con el cielo. Pensemos en el Monte Sinaí. Pensemos en las cimas andinas, emplazamiento de sepulturas sagradas de los incas y sus predecesores. Pensemos en

el Monte Fuji de Japón, o en los míticos montes Meru o Kailasa del hinduismo, representación de los cuales son muchos de los templos del sur y sureste de Asia. Un antiguo poeta chino, Li Tai Po, expresa este sentimiento con particular elegancia cuando escribe:

*“Esta noche duermo en el templo situado en la cima del monte sagrado
Desde aquí podría tomar las estrellas con la mano.
No me atrevo a elevar la voz en este silencio
Por temor a perturbar a los moradores del cielo.”*

Pero incluso las montañas más prosaicas y desprovistas de aureola sacra, como los Pirineos, tienen un aire mágico o se hallan envueltas en leyendas. Los nombres de los grandes macizos y accidentes, la Maladeta, el Monte Perdido, las Tres Sorores, la Brecha de Rolando, el Viñamala, etc. se asocian a leyendas o narraciones semihistóricas. De hecho, las recopilaciones de leyendas asociadas a la topografía pirenaica han dado lugar a diversos libros ya publicados, algunos de ellos bastante voluminosos (DUHORCAU, 1985). No en vano la alta montaña fue durante la Edad Media, un ámbito poblado por demonios y gigantes, en el que no era conveniente aventurarse.

Todas las características ecológicas de las montañas se hallan vinculadas a la fuerza de la gravedad. Debido a ésta es más fácil siempre bajar que subir, y por ello las áreas montañosas son centros de exportación. A favor de la gravedad, las montañas pierden suelo y nutrientes en beneficio de las tierras bajas circundantes. Y no sólo esto: el aire frío y el agua, los bloques rocosos, las semillas y los organismos, las poblaciones y las especies son transportados hacia abajo. Incluso los pueblos y las culturas se han expandido a partir de núcleos originarios en las montañas. No es sorprendente que las denominaciones de las tres grandes razas humanas tengan alguna relación con las áreas montañosas donde quizás se originaron (Cáucaso para la raza caucásica, Macizo de Etiopía para la etiópica y montes del norte de China para la mongólica). Uno de los factores de la importancia ecológica de las montañas estriba precisamente en su papel de centros de exportación, que hace que, como hemos dicho, un porcentaje importante de la población mundial dependa directa o indirectamente de los recursos aportados por las mismas.

El rasgo fundamental de los sistemas montañosos también es consecuencia de la gravedad: El aire denso se acumula a baja altitud y se va haciendo tenue a medida que se asciende. Así se establece un gradiente de presión atmosférica que conlleva un gradiente térmico debido al enfriamiento adiabático. El gradiente térmico ligado a la altitud varía de unos sistemas montañosos a otros, pero se sitúa normalmente entre los 0.4 y los 0.7 grados centígrados cada 100 m de ascenso, y es tanto mayor cuanto más seco es el aire. A

su vez, el gradiente térmico establece una zonación vertical: organismos progresivamente más resistentes al frío se escalonan en altitud, hasta llegar a las zonas más altas, donde sólo pueden prosperar especies muy resistentes, o ninguna en absoluto. De ahí deriva la existencia de los llamados pisos de vegetación, formados por especies que viven a altitud similar, y con exigencias de temperatura y humedad parecidas. En las montañas árticas y subárticas no existen más que uno o dos pisos de vegetación, los superiores, mientras que en las de latitudes más bajas el número de estos aumenta hasta los ocho o nueve del Himalaya y otras montañas tropicales. En los Pirineos se distinguen básicamente cinco pisos de vegetación, llamados colino, montano, subalpino, alpino y nival. El primero es la zona más antropizada, ocupada por cultivos, construcciones y vías de comunicación. En el segundo predominan los bosques de hoja perenne o caduca. El piso subalpino está formado por bosques de coníferas resistentes al frío, como el pino negro, y por matorrales de montaña. El piso alpino alberga sólo matorrales rastreros y pastos de altitud. Por último el piso nival, de extensión muy reducida, no sostiene más que líquenes, que crecen con gran dificultad y lentitud.

La existencia de los pisos de vegetación proporciona a la montaña una gran variedad de paisajes y ambientes de la que resulta una buena parte de su interés ecológico y estético. En la mayor parte de las cordilleras existe un contraste adicional entre sus dos vertientes, contraste debido a la diferencia de humedad disponible por las plantas. Este contraste es particularmente acusado en las Montañas Rocosas y en los Andes, pero se aprecia en muchas otras cordilleras del mundo, y desde luego en los Pirineos. En esta última cadena los vientos que soplan del Océano Atlántico, y que transportan la mayoría de los frentes nubosos, quedan detenidos en las laderas septentrionales, donde el aire cargado de humedad es obligado a ascender hasta superar la barrera. Al ascender se enfría y la humedad se condensa, dando lugar a las lluvias y nieblas tan frecuentes en la vertiente francesa. Desprovisto de esta forma de su humedad, el aire seco pasa a la vertiente sur, donde se calienta al descender. Este calentamiento es mucho más rápido e intenso que el enfriamiento precedente debido al bajo contenido en vapor de agua que, por su elevado calor específico, amortiguaría los cambios térmicos. En consecuencia, el aire que podría haber llegado al lado sur con una temperatura de 15 grados, igual a la del comienzo de su viaje, termina recalentado, a una temperatura de 22 o 24 grados. En su descenso ha ido absorbiendo la escasa humedad disponible en plantas y suelo, de manera que mientras que el aire atlántico tiene un efecto humidificador en el Pirineo francés, tiene un efecto desecante en el español. Este efecto de los vientos transmontanos se denomina efecto föhn, y es responsable del contraste que ofrecen en todos los sistemas montañosos afectados las vertientes situadas a barlovento y las situadas a sotavento (FRANZ, 1979).

Dicho contraste se manifiesta especialmente en los pisos de vegetación. Cuando estos son similares en ambas vertientes, al menos se sitúan a diferente altitud. Así, en el Pirineo el piso alpino comienza unos 400 m más abajo en las vertientes septentrionales que en las meridionales. Pero es normal que también sean diferentes en una y otra vertiente. Por ejemplo, a lo largo de la vertiente sur de los Pirineos discurre una frontera biogeográfica importante, la que separa el mundo eurosiberiano, extendido desde Europa central y septentrional hacia el sur, y el mundo mediterráneo, que se extiende desde las tierras bañadas por este mar hacia el norte. En las montañas mediterráneas los pisos de vegetación tienen otras características que las que corresponden al ambiente alpino, y están formados por otras especies; incluso sus nombres, que no hacen aquí al caso, cambian. Favorecidos por el efecto föhn, retazos del mundo mediterráneo penetran profundamente por los valles meridionales hasta el centro de la cordillera, de manera que en un espacio reducido de la misma podemos encontrar los cinco pisos alpinos y otros cinco mediterráneos, un conjunto comparable por su variedad al que ofrecen las montañas tropicales más altas, como los Andes o el Himalaya (RIVAS MARTINEZ, 1986).

Pero a esta variedad debe agregársele la derivada de la topografía, de la historia, de la intervención humana, etc. Es la topografía la responsable de que existan en las zonas montañosas cañones encajados, crestas batidas por el viento, acantilados más o menos accesibles, cavernas y simas que forman un mundo aparte, etc. Es la historia de la vida en esos territorios la que ha alumbrado los miles de especies montañas de distribución restringida, originadas por un proceso de diferenciación insular que los ecólogos conocen bien: las poblaciones aisladas, restringidas a unas cumbres o una banda de altitud que no pueden abandonar sin cruzar por terrenos hostiles, evolucionan in situ, deviniendo especies endémicas, diferentes de las que se han formado de modo similar, quizás en algún macizo vecino. Es la intervención humana la que ha configurado ecosistemas complejos, en los que los procesos naturales y los artificiales se entrelazan, a veces sosteniéndose mutuamente, a veces interfiriendo de modo frontal. Y también es la intervención humana la que, a través de las pautas culturales, ha conferido a determinadas montañas el carácter sagrado que antes mencionaba, y que las ha salvado de la explotación. En resumen gravedad y biogeografía, evolución y presión humana son la causa de que en las regiones montañosas exista una gran variedad de condiciones ambientales, una inmensa provisión de nichos ecológicos, y por ello una enorme riqueza específica, genética, taxonómica y ecológica. Estas circunstancias hacen de las zonas montañosas espacios privilegiados para el estudio ecológico. En el Pirineo podemos comprimir un viaje de seis mil kilómetros, los que van de las estepas de Asia hasta los hielos polares, en los poco más de 100 km que separan la cumbre del Aneto de las estepas de Huesca. No puede sorprender en modo alguno que

en las montañas se localicen muchos de los centros de diversidad biológica, los llamados “biodiversity hotspots” en la jerga de los ecólogos, y en consecuencia, también gran parte de las reservas naturales y espacios protegidos del planeta.

Echemos un vistazo breve, pero algo más detallado, al proceso de formación de especies en los sistemas montañosos. Este proceso afecta, naturalmente, a la evolución de las poblaciones de organismos de montaña, es decir, a sus dotaciones genéticas, y a través de ellas a sus rasgos externos. Si la morfología de la mayoría de los individuos de una población llega a cambiar sustancialmente esta población llega a convertirse en una especie distinta de la que le dio origen. La aplicación de las leyes genéticas, no a la transmisión de caracteres hereditarios de padres a hijos, sino a la transformación de los complejos genéticos en poblaciones enteras constituye el objeto de la genética de poblaciones, una rama de la genética que se individualizó hacia el comienzo de los años 30 del pasado siglo, y que constituyó una de las bases sobre las que se edificó la teoría sintética de la evolución, todavía aceptada hoy con más o menos modificaciones. De paso vale la pena indicar que la teoría subyacente a la genética de poblaciones ha servido también de base para el desarrollo posterior de muchas técnicas de análisis estadístico que hoy son moneda corriente en el trabajo científico.

Toda la genética de poblaciones se apoya sobre el desarrollo de una ley, llamada de Hardy-Weinberg por los científicos que la postularon simultánea e independientemente, y que no es más que la transposición a las poblaciones de las leyes de combinación independiente de los alelos génicos que había descubierto Mendel medio siglo antes. En uno y otro caso dicha combinación independiente comporta el cálculo del cuadrado de un binomio formado por la probabilidad de presencia de un determinado alelo y de su homólogo. La ley de Hardy-Weinberg enuncia la consecuencia cualitativa más importante de esta manipulación algebraica elemental: que en una población natural cuyo complejo genético se combine al azar y sin restricciones - una población panmíctica - las proporciones de los distintos alelos de un mismo gen permanecen constantes de generación en generación.

Esta ley presupone unas condiciones que no se dan más que rara vez en las poblaciones naturales de las regiones montañosas, concretamente unos efectivos elevados y un flujo de genes libre y aleatorio. Como toda ley estadística, se halla sujeta a variaciones aleatorias, que pueden ser muy importantes. Supongamos, por ejemplo, que tenemos una población semelpara (sin solapamiento de generaciones) en la cual se presentan dos alelos de un mismo gen con igual proporción. Un cambio de un 10% en cada generación a causa del simple azar no es sorprendente, y resulta en proporciones del 40 y 60% . Este cambio puede repetirse en la generación siguiente, y aunque la probabilidad de que tenga el mismo sentido que el anterior es baja, no es en modo alguno despreciable. Cuatro o cinco cambios

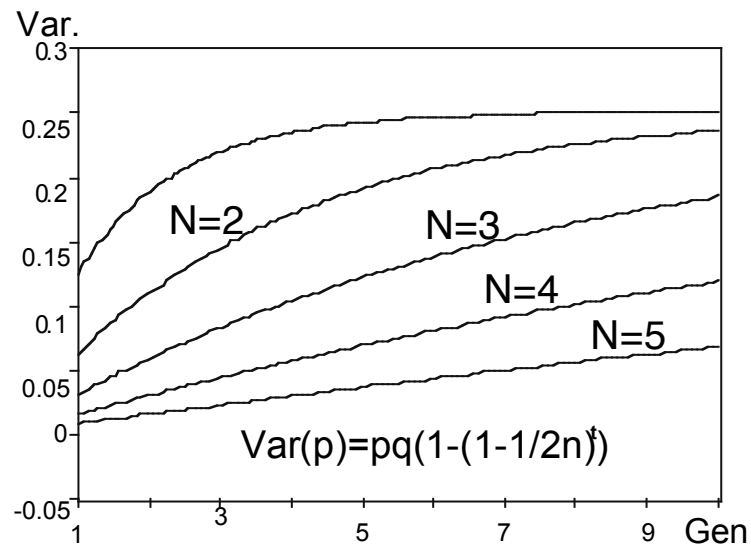


Figura 1.—Fig. 1: La figura ilustra las consecuencias de la deriva genética en una población ficticia de escasos efectivos, para un alelo con probabilidad p , de presencia, igual a la de su contrario. La varianza aumenta linealmente en las sucesivas generaciones incluso para efectivos moderadamente bajos. La fijación es casi segura a las pocas generaciones para poblaciones pequeñas. Calculado a partir de EMLLEN (1984)

en el mismo sentido, que lleven las proporciones relativas a 0% y 100% pueden tener una probabilidad bajísima, pero si tenemos en cuenta que en cada población hay muchos miles de genes, y que en una cordillera puede haber miles de pequeñas poblaciones de una especie, podemos suponer con seguridad que en cada generación tiene lugar, en muchas especies de montaña, la fijación de un alelo y la correspondiente eliminación de otro. Este proceso es el que se denomina deriva genética, y que caracteriza la diferenciación de poblaciones pequeñas y aisladas.

Para resumir, en todas las poblaciones la evolución procede en dos etapas, primero creando polimorfismos e incrementando la diversidad genética, y luego fijando alguna de las variaciones en una población y otras en poblaciones distintas. La creación de nuevos alelos de genes se debe fundamentalmente a la mutación, que luego comentaremos brevemente, mientras que su fijación o eliminación se debe a un conjunto de factores, como la migración, la deriva genética, la meromixia— cruzamientos no aleatorios— y sobre todo la selección natural. Cada uno de estos factores merece un estudio detallado, ya que su acción se conoce desde hace tiempo incluso a nivel cuantitativo, pero no es posible entrar en su discusión. Sí señalaremos que en las zonas de montaña todos estos factores actúan de forma extremada: la tasa de mutación es más elevada, la migración es general, e incluso forma parte esencial de la regulación demográfica, la deriva genética se ejerce sobre poblaciones minúsculas, reducidas a veces a uno o dos individuos, y en ese caso provoca oscilaciones muy amplias en las frecuencias génicas a las que se da el nombre

de “efecto fundador”, la meromixia es tan extrema que lleva a menudo a situaciones de estricta endogamia, donde la diversidad genética desaparece por completo, etc. Otros tantos caminos abiertos a la investigación, que los ecólogos llevan recorriendo hace tiempo, y en los que se ha avanzado una distancia considerable.

En la práctica, ¿en qué se traduce todo esto? En que las zonas montañosas constituyen centros de creación de especies, la mayor parte de las cuales no se sostendrán, pero que en algún caso podrán ser también exportadas a zonas más bajas, como el agua y el suelo. Y hasta podrán aclimatarse allí y ser aprovechadas por el hombre. Muchas de las especies de plantas que forman la base de la alimentación mundial se originaron en zonas montañosas. Por ejemplo el maíz en las montañas de México o el trigo en las de Irán y Anatolia, la patata en los Andes, el arroz en el Himalaya, o el sorgo en los Montes de Etiopía. También plantas de menor peso en la alimentación, pero asimismo importantes para la economía humana, como la quina, el manzano, el nogal, el café o el tomate tienen su origen en las montañas. Y cientos o miles de especies vegetales y animales a las que el hombre no ha encontrado una utilidad relevante, pero que, usadas o no, ilustran perfectamente la potencia creadora de la evolución en las regiones montañosas.

Pero caracterizar a las montañas como ambientes complejos, de elevada biodiversidad, no deja de ser una simplificación. Al fin y al cabo, en la alta montaña la vida es muy simple, y la densa malla de la red funcional de la biosfera se aclara, reduciéndose a unos pocos eslabones, unas pocas especies interrelacionadas mediante los finos hilos de las transferencias de materia y energía que constituyen el cañamazo de los ecosistemas. Y más arriba aún, en el piso nival, incluso esta laxa red desaparece. No hay apenas organismos visibles (aunque una mirada atenta revele incluso allí una vida insospechada). Pero una conclusión aparece clara: en el juego complejo de factores productores de diversidad, como la multiplicidad de nichos ecológicos o la formación de especies en áreas aisladas, y los factores limitantes de la vida, como la dureza de las condiciones ambientales, acaban triunfando estos últimos. El mundo de los niveles más altos de las montañas es un mundo frío e inhóspito, terriblemente duro.

Y sin embargo, ¡qué pujanza, qué resistencia exhibe la vida incluso donde nadie lo esperaría! Quizás alguno de Vds. conozca un relato breve de Ernest Hemingway titulado “Las Nieves del Kilimanjaro”, aunque no sea más que porque en los años cincuenta dio lugar a una película famosa. Ese relato comienza con una cita-información curiosa, que traducida dice más o menos así: *Muy cerca de la cumbre occidental hay una carroña helada de leopardo. Nadie ha podido explicar lo que el animal buscaba a esa altitud.* La pregunta de Hemingway no es específica para el Kilimanjaro, sino que vale para todas las montañas. Lo que buscaba un leopardo perdido a 5800 metros, en un glaciar que ¡ay!

está hoy desapareciendo, es lo mismo que buscan todos los animales (y las plantas, y los hombres, y los pueblos) en la alta montaña: escoger la presión del ambiente para librarse de la presión ejercida por los competidores o depredadores de zonas más acogedoras. Esta elección puede ser ilustrada por un leopardo muerto, por el desdichado cazador neolítico caído en la frontera austroitaliana hace 5000 años (el llamado Hombre de Ötzi, más conocido como el Hombre de Hielo) (FOWLER, 2000) , o por los líquenes y bacterias endolitotrofos, que viven literalmente en el interior de las piedras, y que se han descubierto en ambientes extremos, desde la Antártida al desierto del Negev, y naturalmente, también en la alta montaña .

Yo he visitado muchas cordilleras en todo el mundo, y atesoro un gran capital de impresiones derivadas de mis visitas. Pocas pueden compararse a la que me produjo contemplar, a 5200 metros de altitud, en la ladera del volcán Sajama, en los Andes de Bolivia, el árbol más alto del mundo, no el que alcanza más talla, sino el ejemplar que vive a mayor altitud. Nadie lo llamaría un árbol. Consiste en una especie de raíz tortuosa y agrietada, que discurre horizontalmente por un par de metros, a lo largo de una resquebrajadura entre dos rocas. En su extremo exhibe trabajosamente dos pequeñas hojas que dan fe de que está vivo. Y aunque no tenga porte arbóreo sabemos que es un árbol porque sus compañeros de la misma especie (*Polylepis tarapacana*, la queñua), prosperan unos cientos de metros más abajo. En todo caso es un ejemplo claro de la tenacidad que exige la supervivencia en un ambiente difícil como es la alta montaña.

La ecología de la alta montaña empezó a estudiarse, naturalmente, en los Alpes, y el vocabulario técnico asociado a la misma contiene, como es de esperar, numerosos términos alemanes (ya hemos encontrado uno, föhn). Otro de ellos es el de “Kampfzone”, o zona de combate, que designa el nivel situado por encima del límite del arbolado, donde todavía algunos árboles dispersos, retorcidos y enanos, luchan por sobrevivir en un entorno hostil. Ese término refleja de modo perfecto las condiciones de la vida en esos ambientes montanos, condiciones que son perceptibles para cualquier observador, y que se traducen para los organismos en un conjunto de adaptaciones más o menos notables, que luego comentaré. Estas adaptaciones son precisamente las armas usadas por los seres vivos de las montañas en su lucha por sobrevivir.

Me he referido a la compresión espacial de los ecosistemas montanos, compresión gracias a la cual la tundra alpina, los densos bosques mesófilos de montaña media y los páramos esteparios de las cumbres mediterráneas pueden hallarse muy próximos, y gracias a la cual también, las áreas de montaña exhiben una elevada biodiversidad. Pero esta razón no es la única por la cual las montañas constituyen laboratorios privilegiados para el ecólogo. Otra razón importante es que las montañas propician también la compresión

temporal de los procesos dinámicos. Como en el caso de las variables ligadas a la altitud, la causa de esta compresión temporal deriva del hecho de que las montañas representan elevaciones del terreno con una evolución lenta. En la Tierra, y en los planetas rocosos de su mismo tamaño, existe un manto fundido cuyos movimientos de convección actúan como motor de los procesos tectónicos, de erección de montañas y cordilleras, e indirectamente también de los procesos eruptivos que crean montañas volcánicas de una forma mucho más rápida. En otros cuerpos celestes, y también en la Tierra, aunque en nuestro planeta la atmósfera elimina rápidamente las señales, se dan asimismo procesos instantáneos de creación de montañas mediante los impactos cometarios o asteroidales, pero la mayor parte de las montañas que conocemos son de origen tectónico, creadas por la interacción de dos placas corticales que chocan arrastradas por las corrientes del manto. Este proceso es lento, e incluso los plegamientos más rápidos se desarrollan a lo largo de periodos extensos, de millones de años. Por ejemplo, el Cáucaso, la cadena que actualmente se eleva con mayor rapidez, lo hace a una velocidad media de 6 mm/año, es decir, 6000 m en un millón de años. Buena parte de la elevación ganada se pierde además por erosión durante el proceso, de manera que la edificación de una cordillera lleva al menos unos millones de años. Esta lentitud contrasta con la rapidez que el gradiente gravitatorio impone a la mayor parte de los procesos ecológicos en alta montaña, especialmente a los relacionados con el transporte.

Así, el transporte del agua se acelera gracias al desnivel existente, y los saltos y cascadas son aprovechados por el hombre, bien en forma de energía, bien como simple elemento visual que añade valor escénico al paisaje. El transporte de suelo es mucho más rápido que en zonas bajas debido a la velocidad del agua que lo arrastra, y a la intensidad de los procesos erosivos ligados al hielo/deshielo, como la gelifración, la solifluxión, la crioturbación, etc. Nada de esto es sorprendente. Menos conocido, pero también evidente, es el hecho de que los procesos ecológicos ligados a los ciclos biológicos de los organismos de montaña suelen también acelerarse, forzados como están a desarrollarse dentro del breve espacio de la estación activa. Y por supuesto, también, como se ha indicado antes, los procesos evolutivos se aceleran en montaña debido a la coexistencia de varios factores: el aislamiento de las poblaciones que propicia una diferenciación rápida, el pequeño tamaño de las mismas, que también ayuda a una evolución rápida por deriva genética, y la dureza de las condiciones ambientales que se traduce en una fuerte presión selectiva y por ende en una aceleración de los cambios adaptativos (MARTINEZ RICA, 1990). En resumen, los ecosistemas montañosos constituyen entornos excepcionales, en los que, a escala regional, comarcal, o incluso de paisaje, podemos estudiar una gran complejidad estructural, con muchos elementos distintos reunidos en un espacio reducido, y una gran complejidad

funcional, con muchos procesos temporales comprimidos en un lapso relativamente breve.

Claro está que esta aceleración de los procesos es a veces traumática. Muchos de ellos comportan fases de estabilidad relativa, en las que se acumulan tensiones, y otras fases breves en las que las tensiones acumuladas se liberan de forma catastrófica. Y nuevamente pueden aportarse ejemplos de ello ligados a distintas escalas temporales. Así, los procesos orogénicos comportan acumulación de tensiones entre las placas corticales que interactúan, tensiones que se liberan bruscamente en forma de terremotos. Los movimientos sísmicos y la actividad volcánica, también asociada a la interacción entre placas tectónicas, están vinculados a determinadas cadenas montañosas, como los Andes o el Cáucaso, y la violencia catastrófica de estos procesos es bien conocida. Otros acontecimientos catastróficos de menor entidad y, por lo tanto, de menor periodo de recurrencia, son los debidos a movimientos en masa del suelo o del agua, tales como aludes, avalanchas de piedras, riadas, deslizamientos, etc. La masa movilizada en estos casos es mucho menor, pero a menudo suficiente como para provocar grandes tragedias. Muchos de nosotros podemos aportar un ejemplo de primera mano en este sentido, la catástrofe de Biescas, pero acontecimientos similares tienen lugar casi cada año en el Pirineo, y no alcanzan notoriedad porque no provocan víctimas humanas. Y no digamos si se toman en cuenta otras cadenas montañosas. Entre las impresiones a que antes me he referido, obtenidas en diversas cordilleras de la Tierra, figuran algunas que he podido plasmar en imágenes y que corresponden a los efectos de terremotos en el Cáucaso o a los de enormes avalanchas de piedras en el Himalaya, pero no es necesario ir tan lejos para percatarse de la intensidad y rapidez de algunos procesos geomórfológicos en la montaña: Un ejemplo bien conocido en nuestro Pirineo es el de las diferentes iglesias medievales (la más notable es la de San Adrián de Sasabe), sepultadas o semisepultadas por grandes coladas de piedras.

En otros ámbitos la aceleración de procesos ecológicos es menos espectacular, pero no menos importante. En un ambiente caracterizado por los cambios bruscos de todo tipo la mayor parte de los sistemas siguen una dinámica oportunista, que refleja estos cambios. Por ejemplo, es bien sabido que en la mayoría de los sistemas la dinámica es tanto más caótica y menos predecible cuanto mayores sean las tasas de cambio y los posibles desfases entre estímulo y respuesta del sistema. Muchas especies de montaña tienen tasas de natalidad muy elevadas, como corresponde a especies pioneras, que pueden soportar mortandades catastróficas, también derivadas de las condiciones fuertemente cambiantes del entorno. En consecuencia, son de esperar dinámicas poblacionales erráticas, con bruscos incrementos de efectivos, seguidas por extinciones locales masivas, y ello sin periodicidad alguna. Bien es verdad que en las regiones templadas, la fuerte estacionalidad del ambiente montano impone unas pautas periódicas que no son inherentes a la dinámica del

sistema. Pero en cualquier lugar de la Tierra las montañas exhiben este comportamiento impredecible, caótico, derivado de la interacción múltiple de los elementos de sistemas complejos, con multitud de relaciones no lineales y aún discontinuas, con multitud de umbrales, con numerosas zonas de estabilidad local que permiten transiciones bruscas, etc. Incluso los cambios suaves y continuos en los parámetros de control del sistema pueden dar lugar a transformaciones catastróficas.

Vamos a penetrar un poco en el terreno de la dinámica de los sistemas naturales en territorios montañosos. Los términos “catástrofe” y “catastrófico” que abundan en los párrafos precedentes se toman, por supuesto, en su sentido habitual y llano. Pero no podemos olvidar que los ecólogos disponen de una herramienta de análisis en la que el término “catástrofe” tiene otro significado, y que es de singular utilidad en el estudio de los procesos no lineales en las regiones de montaña a que se ha referido el párrafo anterior. Se trata de la teoría de catástrofes, creada por René Thom a principio de los años setenta del pasado siglo. Es cierto que esta teoría dio lugar a vastas polémicas sobre su utilidad, y que ahora se halla un tanto olvidada. En la ciencia también existen modas, y no cabe duda de que teorías, ideas y paradigmas actuales serán desplazados a su vez por otros, que no tendrán más valor sobre ellos que el de la novedad. Esto le ocurrió a la teoría de catástrofes, que, a mi entender, conserva su valor tanto teórico como práctico.

La teoría de catástrofes se inserta en una rama de las matemáticas, la topología, aunque igualmente pudiera ser considerada como parte del análisis funcional o de la teoría general de sistemas. Su generalidad le permite ser aplicada en disciplinas tan diversas como la física y la psicología, la sociología y, por supuesto, la ecología. Y la primera observación que podemos hacer sobre ella responde precisamente a un comentario que hemos efectuado varias páginas atrás, y es que en ocasiones no son los físicos los que abren el camino a las investigaciones biológicas, sino al contrario. Thom no es físico, sino biólogo, y desarrolló su teoría para intentar aplicarla a los cambios que constataba al observar el desarrollo embrionario de los animales, a pesar de lo cual su contribución destaca dentro de las ciencias exactas. La segunda observación nos lleva a destacar lo inapropiado del nombre elegido, dado que la teoría de catástrofes tenía ya carta de naturaleza en el campo científico, y corresponde a las suposiciones de algunos geólogos y biólogos de principios del siglo XIX, según los cuales los cambios experimentados por la tierra y la vida en el pasado geológico se debían a grandes catástrofes (esta teoría, revivida hoy para explicar la transición Cretácico-Paleoceno mediante un gran impacto asteroidal, se oponía al gradualismo, postulado por los demás geólogos, y que acabó triunfando). Además, y como se ha dicho, la palabra catástrofe tiene un significado habitual en el lenguaje cotidiano, mientras que en el ámbito de la teoría de catástrofes su significado es

muy distinto, y esto es fuente de ambigüedades: Thom llama catástrofe a toda transición brusca entre dos estados en un sistema dinámico. Y la tercera observación es que la teoría de catástrofes constituye un medio útil de analizar sistemas dinámicos discontinuos, en los que tienen lugar dichas transiciones bruscas y cuyas funciones asociadas, por ser discontinuas no son diferenciables y por ello no son accesibles al cálculo infinitesimal, la herramienta básica de la ciencia. Esta última observación no debe tomarse al pie de la letra, pues se contradice con lo que indicamos algo más adelante, pero la explicación de la aparente incoherencia no es necesaria ni cabe en estas líneas.

La demostración fundamental de Thom es que el número de catástrofes que él llama elementales es finito y bastante bajo, de sólo siete. En realidad este número dependerá de lo que se entienda por elemental. Si la codimensión de la catástrofe, es decir, el número de factores implicados en el control del sistema es cuatro, resultan las siete catástrofes indicadas, pero si es cinco el número asciende a once, y si es tres desciende a cinco. Podríamos limitarnos a considerar como elementales aquellas catástrofes que más aplicaciones han encontrado, en tal caso tres, o únicamente las dos que permiten una visualización de la superficie de respuesta.

Una catástrofe se ilustra mediante una función de varias variables que representa los estados de energía potencial del sistema en cuestión. Como es bien sabido, los sistemas alcanzan estabilidad en configuraciones de energía mínima, por lo que los estados estables de un sistema podrán representarse como la función obtenida igualando a cero la derivada de la función de energía original. Si existe un factor de control y una variable de respuesta puede concebirse una catástrofe muy simple, llamada de pliegue, con sólo dos dimensiones y por ello representable en un plano. Su conjunto de bifurcación se reduce a un punto a lo largo del factor de control. Al cruzar ese punto la variable cambia, desde un estado estable a uno inestable o viceversa. Si existen dos factores de control y una variable de respuesta, la superficie de equilibrio, igual que la superficie de energía, toma la forma de una función tridimensional, mientras que su conjunto de bifurcación es una función bidimensional, en forma de pico o punta, lo que le ha valido a esta catástrofe el nombre de cúspide. Si se aumenta el número de factores de control o de variables de respuesta resultan catástrofes de orden superior que no pueden representarse visualmente más que de forma incompleta.

¿Qué tiene que ver todo esto con la ecología de montaña? Bastante. Entendidas como transiciones bruscas en sistemas dinámicos las catástrofes, como ya se ha dicho, son frecuentes en los ecosistemas de montaña, y la teoría de catástrofes facilita su análisis y su interpretación. Por ejemplo, la catástrofe más simple, la de pliegue, es asimilable a un umbral. Existen multitud de sistemas en los que una variable va cambiando de manera

regular y continua a medida que cambia el factor de que depende, hasta que alcanza un punto, el de bifurcación, en el cual salta bruscamente a un estado nuevo. Ejemplos notables y próximos los proporcionan las poblaciones de algunos animales de nuestras montañas como el oso o el bucardo, que fueron disminuyendo lenta y gradualmente hasta que cruzaron el umbral de la extinción: por debajo de una docena de individuos las poblaciones no suelen ser viables, y están abocadas a su desaparición. Ésta ha tenido ya lugar para el bucardo, y sucedería también con el oso si no se reconstruye artificialmente la población, como se está haciendo.

La dinámica de poblaciones de especies de montaña proporciona una rica fuente de ejemplos a estudiar bajo la perspectiva de la teoría de catástrofes. Uno de los animales más frecuentes en los pastos supraforestales de los Pirineos es el topillo (*Microtus arvalis*). Esta especie se caracteriza por una elevada capacidad reproductiva, que le permite multiplicar por 100000 los efectivos de sus poblaciones en sólo un año. Naturalmente, este crecimiento demográfico nunca llega a observarse, controlado como está por la escasez de recursos y la abundancia de depredadores, pero sí se observan con frecuencia explosiones demográficas y migraciones masivas, mediante las cuales los individuos alivian la presión de la competencia por el alimento. En las montañas estas migraciones toman generalmente la forma de dispersión en todas direcciones, pero en otros ambientes extremos, como la tundra ártica, las migraciones de roedores pueden ser unidireccionales y coordinadas, de manera que los animales se desplazan simultáneamente en grandes grupos, que generalmente son aniquilados por los depredadores, las catástrofes climáticas o incluso el suicidio colectivo. Lo importante es que la migración es un fenómeno brusco, que se desencadena de manera muy rápida cuando se reúnen las condiciones adecuadas: una elevada densidad de población, que equivale a una elevada competencia. Esta situación presenta las cinco características básicas que definen los procesos catastróficos: salto brusco, divergencia, bimodalidad, inaccesibilidad e histéresis. Las dos situaciones divergentes, que representan sendas modas en una distribución bimodal, son la permanencia en el lugar y la migración. Se pasa de una a otra bruscamente, pero existe una conducta intermedia que es inaccesible por contradictoria (permanecer en el área y migrar). En cuanto a la histéresis, claro está que no hay un punto definido a partir del cual se realiza la migración: los animales permanecen en sus territorios incluso por encima de densidades críticas, retenidos por la inercia de la adhesión a su ambiente y a sus congéneres. La variable de conducta mide el porcentaje de individuos que migran, y las dos variables de control serían la intensidad y la posición en el continuo permanencia/migración.

El ejemplo indicado es inédito, y a mi entender se propone aquí por primera vez. Pero son numerosos los trabajos que ilustran otros procesos, propios de la alta o media montaña

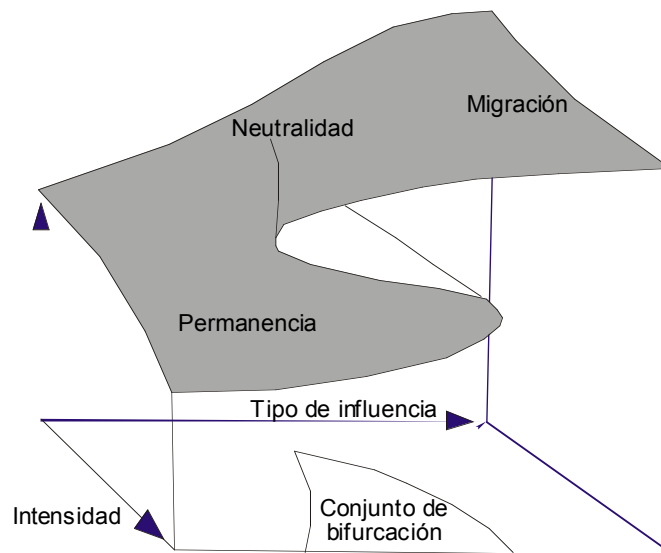


Figura 2.—La dispersión periódica de los roedores de montaña interpretada como una catástrofe de cúspide. Las tendencias opuestas de territorialismo y competencia por los recursos pueden provocar trayectorias divergentes si aumentan en intensidad. Las trayectorias normales al factor intensidad provocan saltos catastróficos.

por medio de la teoría de catástrofes. Así, Lockwood (LOCKWOOD & LOCKWOOD, 1988) ha invocado explícitamente las catástrofes elementales más simples para describir la dinámica de las poblaciones de ortópteros en los sistemas ecológicos de altitud. Otros autores (DAVENPORT et al., 1998) han invocado la catástrofe de cúspide para describir el comienzo de los procesos de erosión masiva en los ecosistemas de *Pinus edulis* y *Juniperus monosperma* de las montañas de Nuevo México. Los ejemplos pueden multiplicarse fácilmente, y todos llevan a la conclusión de que la alta montaña constituye un entorno extraordinario, donde las poblaciones de organismos se asimilan a grandes experimentos naturales utilizables por el especialista en microevolución, por el especialista en genética de poblaciones, por el fisiólogo y, en suma, por el ecólogo.

¿Cómo responden los seres vivos a las exigencias de este medio? Antes he mencionado una de las respuestas más generalizadas, la adaptación. A partir del piso subalpino, cuando las condiciones térmicas se endurecen de manera clara, las especies ubicadas en las montañas muestran adaptaciones sorprendentes. Sin ellas sería imposible comprender como pueden sobrevivir pequeños vertebrados de sangre fría a 3000 m en los Pirineos o en los Alpes, y aún a mayor altitud en otras cordilleras. Entre los más sorprendentes records de altitud registrados, y además del leopardo del Kilimanjaro y la queñua del Sajama antes mencionados, se cuentan, para los mamíferos, los 3400 m de la cabra montés en Sierra Nevada, los 4700 m del topillo nival en los Alpes o los 6100 m alcanzados por el yak en el Himalaya. Para las aves los límites son difíciles de establecer, ya que pueden

cruzar volando por encima de las montañas; la máxima altitud registrada ha sido de unos 9000 m para una bandada de gansos que cruzaba el Himalaya. Los vertebrados europeos heterotermos alcanzan su máxima altitud en Sierra Nevada (lagartija común, 3400 m), mientras que el record mundial se sitúa en 5100 metros para algunas ranas y lagartos del Himalaya y de los Andes (PLEGUEZUELOS, 1986; BANNIKOV et al., 1977). Cada uno de estos ejemplos, y de los muchos otros que podrían aportarse correspondientes a altitudes inferiores arrastra consigo un conjunto de interrogantes que son otras tantas vías abiertas a la investigación.

Cuando se piensa en las adaptaciones a la alta montaña normalmente se nos ocurren adaptaciones a la temperatura baja. Pero existen muchos otros factores limitantes en la montaña además del frío, y frente a cada uno de ellos caben numerosas respuestas diferentes, de manera que el estudio de las adaptaciones de los seres vivos a la montaña contempla un panorama complejo. Las condiciones de frío, nieve y, en las montañas de las zonas templadas, fuertes contrastes estacionales, son compartidas con los ambientes boreales de tundra, por lo que las adaptaciones a estos factores son también comunes a los organismos de montaña y a los de las zonas árticas. No mencionaré las viejas reglas de Bergmann y de Allen, que relacionan la temperatura media del entorno con el tamaño del cuerpo o con el de sus apéndices externos, porque presentan tantas excepciones como ejemplos confirmatorios. Si que indicaré, en cambio, que la respuesta más común al frío es la adquisición de un pelaje o plumaje denso y aislante para los animales homeotermos. En éstos cabe además el recurso a la migración estacional, que comporta el descenso a pisos de vegetación más hospitalarios durante el invierno. Para los animales heterotermos, que ni pueden regular su temperatura ni, en general, poseen la movilidad suficiente como para efectuar migraciones, no cabe otra respuesta que la invernada en un refugio adecuado.

Esta invernada no es exclusiva de los animales de sangre fría o las plantas. Se da también en algunos mamíferos, y a veces comporta cambios fisiológicos tan profundos que constituye una verdadera hibernación. Los procesos fisiológicos que participan en la hibernación son tan complejos (incluyen modificaciones en el hipotálamo, concretamente en el centro cerebral de regulación de la temperatura, en los centros de control metabólico y en los de regulación endocrina) que por si mismos constituyen un campo de estudio de gran interés médico (GEISER et al., 1996). El análisis de los factores desencadenantes y de las cadenas de respuestas implicadas en la hibernación (hipotermia, bradicardia, metabolismo reducido, disnea o supresión total de la respiración, letargia, etc), encuentran fácil aplicación en medicina, astronáutica o incluso en las ciencias militares. Pero no siempre la respuesta adaptativa al frío es tan evidente. A veces puede ser muy sutil, como ilustra el siguiente ejemplo, que yo mismo he tenido ocasión de investigar.

Lacerta bonnali es un pequeño saurio localizado únicamente en el Pirineo y circunscrito además a la parte central de la cordillera. Dentro de este área, entre los 2000 y los 3000 m de altitud, se sitúan todas las poblaciones de la especie. Se trata, pues, de un microendemismo que, no hay que decirlo, por su propia escasa entidad se encuentra seriamente amenazado. Su hábitat normal soporta más de ocho meses al año de nieve o temperaturas medias bajo cero, y su estación activa se reduce a unas pocas semanas, en las que tiene que acumular reservas, reproducirse y desarrollar mínimamente sus crías antes de invernar. He estudiado la capacidad de termorregulación de esta especie, y no he quedado sorprendido al constatar que su tolerancia a las bajas temperaturas alcanza siete u ocho grados centígrados más (es decir, menos) que en las demás especies, de manera que las temperaturas que inducen a éstas a entrar en sus refugios no afectan a la especie pirenaica. Esta tolerancia es indispensable, pues de lo contrario el animal no podría persistir en zonas en que las temperaturas se mantienen por debajo de los 8°C durante largos periodos, incluso en pleno verano.

El caso de esta especie no es único. Existen otras especies, géneros, y hasta familias enteras cuyos miembros exhiben una tolerancia a las bajas temperaturas mucho mayor que la de grupos afines. Los grilloblatoideos de las Montañas Rocosas canadienses son insectos que viven activamente sobre la nieve, y no son capaces de completar su desarrollo si no son sometidos a congelación ocasional. En el ambiente ártico viven anfibios como *Rana sylvatica*, o peces como *Dallia pectoralis*, que pueden ser congelados durante largo tiempo, y permanecer vivos en el seno de un bloque de hielo, volviendo a la actividad tras su descongelación. Estas dos especies no viven en montaña, pero entre las de zonas montañosas se pueden hallar otras con rasgos similares, especialmente entre los insectos.

La adaptación a la nieve se traduce habitualmente en la adquisición de plumajes y pelajes blancos, a menudo diferentes de los estivales, que son pardos o castaños. El ejemplo más característico de esta adaptación en nuestras montañas es el armiño, un animal muy especializado en la caza de roedores subterráneos de montaña. Estos últimos, como también aquellas especies que no permanecen activas en superficie durante el invierno, no cambian el color externo. Un detalle interesante relativo a la coloración de los animales de montaña es la frecuencia entre ellos de melanismo, bien de especies cuyos individuos son normalmente negros u oscuros, bien de mutaciones melánicas en el seno de una especie de coloración más clara. El melanismo es más común en vertebrados inferiores y en invertebrados, que no pueden disponer de la protección del pelo o las plumas, y que no permanecen activos sobre la nieve. Se trata normalmente de una adaptación a las bajas temperaturas durante las horas más frías de los días estivales, ya que los colores oscuros absorben mejor la radiación térmica, pero también es un mecanismo protector

contra la radiación ultravioleta más dura. En efecto, uno de los factores ambientales tan importantes como ignorados en la alta montaña es el alto nivel de radiación ultravioleta, consecuencia del menor efecto de filtrado de la atmósfera a gran altitud. Por término medio y en las montañas de la zona templada, la radiación ultravioleta recibida a 3000 m de altitud es el doble de la que llega al nivel del mar en verano, mientras que en invierno la proporción respecto al nivel del mar es de 5 a 1 (SAUBERER y DIRMHIRN, 1958). Para radiaciones más duras, como la cósmica, la correspondiente relación es, en promedio, ésta última. La respuesta de los tegumentos animales a la radiación ultravioleta es bien conocida incluso en el hombre, y aprovechada por las personas que quieren adquirir un tono bronceado en su piel, ya que en todos los casos induce la producción de melanina protectora, pero se trata entonces de una respuesta temporal y directa, que no se da sin el estímulo de la radiación, y que se desvanece tras el cese de ese estímulo. Por el contrario, el melanismo en los animales de montaña es claramente adaptativo, está determinado genéticamente y es permanente durante toda la vida del individuo. La importancia de la radiación ultravioleta en montaña estriba en su carácter mutágeno. La tasa de mutación genética inducida por esta radiación en los organismos de montaña es muy superior a la que se registra en el llano, y por ello son frecuentes allí los animales que presentan pequeñas anomalías cutáneas, correspondientes a otras tantas mutaciones menores, de carácter no letal. A pesar de su importancia para el estudio de la inestabilidad en el desarrollo y para la detección de situaciones de estrés en organismos y ecosistemas, este aspecto de la ecología montana ha sido muy poco analizado, y no se ha cuantificado en absoluto. Sin embargo está claro que la aludida mutagenicidad de la radiación constituye un factor más entre los que propician una aceleración de la formación de especies en ambientes de montaña, y por ende, un incremento de la biodiversidad en esas zonas.

La respuesta al frío de las plantas de montaña es muy distinta a la que observamos en los animales. Las plantas no pueden trasladarse, por lo que no les cabe el recurso a la migración invernal. Si que presentan el equivalente de la hibernación animal, reduciéndose a los órganos subterráneos de resistencia y brotando de nuevo en la primavera, a menudo antes de la desaparición de la nieve para aprovechar al máximo la estación activa. La abundancia de especies vegetales provistas de bulbos o rizomas, y por tanto capaces de soportar el invierno en la fase de diapausa, es característica de las montañas y se traduce para nosotros en un espectáculo de gran belleza, cuando los pastos subalpinos y alpinos de nuestras montañas se cubren de una alfombra florida de narcisos, lirios, gencianas y azafranes de montaña. Por supuesto, lo mismo ocurre en los pastos supraforestales de montañas equivalentes, como las de Sudáfrica, donde, puedo atestiguarlo, todo el pasto se convierte durante el verano en un inmenso jardín. Pero las plantas presentan

también otras adaptaciones al frío. Las especies de montaña suelen carecer de tallos erguidos, y adoptan la forma de roseta pegada al suelo, lo que disminuye la exposición de sus órganos a las bajas temperaturas. Y en algún caso, por ejemplo en las montañas tropicales, adoptan una estrategia similar a la de los mamíferos que se recubren de un pelaje denso. Por ejemplo, las espeletias o frailejones de los páramos andinos tienen hojas cubiertas de una pelusa aterciopelada, verdadera lana vegetal que las protege de las inclemencias del frío nocturno. Estas plantas forman rosetones elevados sobre un tallo alto, al que permanecen pegadas las hojas muertas recubriéndolo y abrigándolo. Este abrigo es aprovechado también por numerosos animales: insectos, caracolillos, ciempiés, hasta algún reptil o ave encuentran allí protección cuando cae la noche, de manera que el revestimiento de estas plantas constituye un ecosistema peculiar de cierta complejidad. Los frailejones son ejemplos de una notable evolución convergente en ambientes de alta montaña tropical, ya que otras plantas, pertenecientes a distintos géneros y familias, han adoptado el mismo porte y desempeñan la misma función en otras montañas (senecios y lobelias en las montañas de Africa, puyas en los Andes, hoja de plata en Hawaii, etc).

Una estrategia adaptativa muy común en las plantas de montaña consiste en la adopción de formas pulvulares, o en almohadilla. Con esta forma las plantas disminuyen la relación superficie/volumen y por lo tanto la pérdida de calor, dificultan la entrada del aire frío en su base, proporcionan en su seno un refugio a pequeños organismos y son menos accesibles a los animales herbívoros. No es de extrañar que esta forma vegetal sea frecuente tanto en el Pirineo (p. ej. erizón) como en otras montañas ibéricas (erinaceas), europeas (saxífragas o silenes) o de otros continentes (yareta). Aunque esta forma comporta ventajas múltiples, debe considerarse sobre todo como una adaptación al frío, y por ello es más frecuente en las montañas áridas, que reciben poca innivación. En las montañas de tipo alpino, con abundante nieve invernal, ésta proporciona una cubierta aislante eficaz, que protege a las plantas de las heladas más severas. No obstante, la nieve también comporta daños directos en las plantas no adaptadas. En el bosque, las ramas bajas sufren quemaduras y perturbaciones en el desarrollo bajo el manto de nieve. En muchas montañas puede determinarse el espesor habitual de la nieve invernal examinando la altura de los daños en las ramas de los árboles durante el verano .

Como ya he dicho, el frío no es el único factor limitante para los seres vivos en la montaña. He aludido ya a otros como la nieve o la radiación ultravioleta, pero no debemos olvidar, en todo caso, el viento, las fuertes pendientes, el suelo escaso y somero, la inestabilidad de canchales y gleras, la extensión del sustrato rocoso desnudo, la menor presión parcial de oxígeno, etc. Para cada uno de estos factores los organismos han desarrollado respuestas a veces adaptativas y fijadas en el genotipo, a veces simples reacciones

directas a un estímulo adverso. Uno y otro tipo pueden ser ilustrados por las plantas en almohadilla, antes comentadas, o por los deformados “árboles bandera”, que con la dirección de sus ramas señalan de manera conspicua la del viento dominante.

Las adaptaciones de los organismos a las condiciones de la montaña no son sino un subconjunto de las adaptaciones a ambientes extremos, y como tales su estudio encuentra aplicación allí donde la técnica debe afrontar condiciones particularmente duras, desde las expediciones polares a los viajes espaciales, pero asimismo en ámbitos más cotidianos, como la investigación médica.

Voy a referirme ahora a un aspecto de las condiciones de las montañas que se acepta como evidente pero cuyas consecuencias no siempre se tienen en cuenta. Es un rasgo derivado también del gradiente gravitatorio. Se trata de la relativa dificultad de acceso de las regiones montañosas, que ha hecho de ellas refugios donde persisten especies que en zonas más bajas y accesibles han desaparecido hace tiempo. Es verdad que existen depredadores a los que no arredran las dificultades del entorno montano y que, como el leopardo de Hemingway, se arriesgan a buscar sus presas hasta en la nieve permanente. Algunos de ellos incluso se circunscriben a las áreas de montaña, y se alimentan de presas que viven en esos ambientes, por ejemplo, el armiño en nuestras montañas, o la pantera de las nieves en el Himalaya. Así pues, las montañas no son refugios absolutos ante los depredadores, pero siempre establecen una diferencia respecto a los territorios más abiertos, que resulta rentable para las presas. Y sobre todo, protegen a todas las especies, en alguna medida, del superpredador humano.

El hombre también ha utilizado las montañas como refugio, entre otras razones porque en los territorios montañosos es más fácil encontrar cuevas que le sirvan de albergue. Es muy posible que los primeros humanos en Africa se acogiesen ocasionalmente a la protección de abrigos rocosos, y desde luego, sus sucesores magdalenenses utilizaron ampliamente las cuevas de las cordilleras Cantábrica y Pirenaica como habitación, recinto sagrado, lugar de enterramiento o soporte de expresión artística. Todo ello, naturalmente, en detrimento de otras especies que también buscaban refugio en las montañas. Aquí, en las montañas de Aragón, existen cavidades en las que se han acumulado restos humanos y de otros muchos mamíferos que desde hace 50000 años utilizaban la cueva como refugio y podían competir con el hombre por este recurso (BLASCO, 1995). Pero las relaciones entre el hombre y otras especies no eran habitualmente de simple competencia sino de predación abierta. Basta pensar en las numerosas especies de mamíferos salvajes que existieron otrora en los Pirineos y que desaparecieron hacia el final de la última glaciación. No todas estas desapariciones pueden achacarse a la retirada de los hielos, y de hecho, en el Pirineo se ha documentado el papel directo del hombre en la muerte masiva de grandes

manadas de caballos salvajes a los que los cazadores prehistóricos inducían a despeñarse por determinados acantilados.

Pero en todo caso la presión humana ha sido siempre inferior en las montañas respecto a los llanos, y ello ha permitido la supervivencia de especies extintas en otras partes. Por ejemplo, el bisonte europeo (*Bison bonassus*) que, como reflejan las pinturas rupestres, fue cazado desde la prehistoria y estuvo a punto de extinguirse por completo, ha podido sobrevivir. Algunas manadas salvajes permanecen en el bosque de Bialowiecza y en las montañas del Cáucaso occidental, y ahora forman rebaños florecientes de los que se ha podido obtener ejemplares para los zoológicos y para repoblar otras zonas. Y en tiempos recientes el bisonte americano sufrió una evolución similar, habiéndose extinguido en toda su área salvo en una pequeña región de las Montañas Rocosas, donde quedó un rebaño de veinte ejemplares a partir de los cuales se ha recuperado la especie. Los ejemplos de especies que han desaparecido en casi todo el planeta y se han conservado en zonas montañosas remotas son numerosos, y esta circunstancia es otro factor más que explica la elevada biodiversidad en las cordilleras, y que explica también el hecho de que la gran mayoría de las reservas naturales, parques nacionales y espacios protegidos se sitúen precisamente en dichas zonas (UNESCO, 2002).

Nada de esto nos parece sorprendente. Y tampoco lo es, aunque si es mucho menos conocido, el hecho de que las montañas sirven también de refugio a pueblos y culturas. Todo el mundo sabe que en las montañas se conservan mejor los modos de vida tradicionales y la herencia cultural del pasado. Este es un tema que, como otros que se han tocado, daría por sí solo para una exposición completa y en el que no debo detenerme. Sin embargo, no puedo dejar de mencionar mi sorpresa al encontrar en ciertas regiones montañosas los restos de pueblos que creía extinguidos hace siglos. Los Andes albergan a los descendientes de los incas y de las culturas preincaicas, los valles remotos del Pamir, a los descendientes de los macedonios que acompañaron a Alejandro en la conquista de Asia, las montañas del Kurdistán a los pobres vástagos del pueblo asirio, antaño forjador de un imperio próspero y terrible, pero es el Cáucaso, verdadera encrucijada de razas y pueblos, donde el papel de la montaña como refugio y sumidero de culturas aparece de forma palmaria. Si nos interesa la historia de la antigüedad y hemos leído a Heródoto podemos preguntarnos qué se hizo de pueblos como los escitas, que él describe extensamente como habitantes de las tierras cercanas al Mar Negro. O, si preferimos otra época, qué ha sido de los hunos, que aterrorizaron Europa y cuyo imperio se derrumbó tras la muerte de Atila. Los restos irreconocibles de escitas y hunos, ávaros y alanos se acantonan todavía en el Cáucaso, donde en algún caso el nombre de la región ocupada recuerda aún el nombre ostentado por aquellos pueblos en sus épocas de esplendor; así sucede con los

descendientes de los escitas, ubicados en Osetia. En el Cáucaso se hablan actualmente 68 lenguajes, correspondientes a otras tantas culturas pujantes o residuales. Pero no es difícil encontrar ejemplos comparables en otras cordilleras, desde los Pirineos a las Montañas de Nueva Guinea, pasando por el Atlas o los Montes de Etiopía.

No está de más señalar, para subrayar el papel que las montañas tienen como refugio, que una gran parte de las reservas naturales y espacios protegidos en zonas de montaña reciben explícitamente el nombre de refugio. Así, existen los Refugios de Vida Silvestre en toda Latinoamérica, y sus homólogos norteamericanos, que integran la red de Wildlife Refuges en Estados Unidos, Alaska incluida, y Canadá. Un sistema similar de refugios de caza (Game Refuges) existe también en Estados Unidos, y España cuenta con esta figura jurídica, el refugio de caza, como consecuencia de la Ley de Creación de las Reservas Nacionales de Caza de 1966. Esta ley se ha actualizado en las distintas comunidades autónomas, y la mayoría de los Refugios de Caza han pasado a denominarse Refugios de Vida Silvestre. Varios de ellos se ubican en la Comunidad Autónoma de Aragón.

Cuanto he dicho hasta este momento pretende resaltar el valor de las montañas como áreas de interés científico y económico. Me corresponde ahora hablar de otros aspectos menos positivos. Como indica la más elemental teoría de probabilidad, en toda apuesta entran dos factores, la probabilidad de ganar (o de perder) y el valor de lo ganado o perdido. En nuestra decisión sobre la actitud a tomar respecto a las montañas debe primar la esperanza matemática compuesta por el valor y el riesgo. Hemos examinado sumariamente el valor de las mismas, hora es de ocuparnos del riesgo que les afecta y de la probabilidad de perder el capital que representan.

Que las montañas se cuentan entre las áreas amenazadas del planeta no es un secreto. Las Naciones Unidas han reconocido explícitamente este riesgo al incluir un capítulo, el 13, dedicado a las montañas en la Agenda 21, acordada durante la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro; en el mismo título del capítulo se califica a las montañas de ecosistemas frágiles (UNCED 1992). Este año en que estamos se cumplen diez desde la celebración de dicha Cumbre de Río, y por ello está prevista una reunión de evaluación que tendrá lugar en Johannesburgo. No cabe duda de que allí se insistirá en las características de fragilidad y marginalidad de los territorios montañosos, y en el peligro de degradación y desertización en muchos de ellos. Recientemente la FAO ha señalado en Roma tales riesgos para las poblaciones humanas asentadas en las montañas, unos 600 millones de personas en todo el planeta.

Como tantas otras características, la fragilidad de las montañas deriva también del gradiente de altitud y de la mayor facilidad para moverse a favor de la gravedad que en su contra. Las montañas exportan agua y suelo, y por ello los pierden. Ya hemos visto

que muchos procesos naturales comportan la pérdida de la débil capa de suelo fértil, que desaparece de los niveles altos para depositarse en el fondo de los valles. En muchos de éstos tampoco servirá de gran cosa, condenados como están a ser anegados por las aguas de una presa, o a servir de asentamientos turísticos. A esta degradación contribuyen la minería y la industria hidroeléctrica, el sobrepastoreo y las estaciones de esquí, la tala indiscriminada y la lluvia ácida inducida por industrias más o menos alejadas, las plagas forestales, más desmandadas hoy que nunca, y el cambio climático global.

Cada una de estas y otras amenazas merece un tratamiento completo e independiente. Los problemas de sobrepastoreo, por ejemplo, son muy diferentes en las montañas españolas, donde la cabaña ganadera se halla en regresión, que en los Montes Drakensberg, de Sudáfrica, donde los pastores basutos mantienen en el nivel supraforestal una carga ganadera elevadísima, con los consiguientes problemas de erosión (NATIONAL ENVIRONMENT SECRETARIAT, 1997). Yo mismo he podido comprobar en esas montañas el efecto beneficioso de una mínima regulación del pastoreo, y el efecto notable, y hasta sorprendente de la exclusión del ganado durante sólo cinco años en áreas previamente esquiladas. Pero referirme, siquiera sea de pasada a todos los problemas que afectan a las montañas no es posible. Voy a limitarme a comentar uno de ellos, desde luego brevemente, el relativo al cambio climático global.

La realidad de este cambio, discutida desde que las primeras voces alertaron sobre el mismo, es cada vez más incontestable, y el número de especialistas que la niegan disminuye asintóticamente hacia cero, aunque probablemente nunca alcanzará este valor. En la propia Cumbre de Río antes nombrada se puso en marcha el Convenio Internacional sobre Cambio Climático, que sancionó oficialmente esta realidad, por más que sus reuniones sucesivas no hayan permitido avanzar mucho ante las reticencias de algunos sectores. En 1995 el Panel Internacional para el Cambio Climático contestó oficialmente a las dos principales preguntas sobre el tema: la realidad del cambio climático y su magnitud en comparación con los cambios registrados históricamente. Ambas respuestas indican que el cambio actual existe, y que no es comparable con los debidos a procesos naturales. Parece ser que la contribución humana a dicho cambio puede darse también como aceptada oficialmente, y que está convirtiéndose en la más importante. Las restantes preguntas, acerca del papel de los bosques, de la capacidad de los sumideros naturales para absorber el dióxido de carbono, de la función de este y otros gases en el calentamiento global, etc., no pueden contestarse de modo taxativo en tanto no terminen las investigaciones a ello encaminadas.

Las montañas son especialmente sensibles al cambio climático, y por ello tienen mucho más valor, tanto desde el punto de vista de la investigación, ya que constituyen

laboratorios privilegiados para la observación de los cambios globales, como desde el de la conservación y protección ya que, por su sensibilidad resultan especialmente afectadas por dichos cambios. Precisamente el primer laboratorio del mundo destinado a seguir la variación de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera se halla en lo alto de una montaña muy elevada, el Mauna Loa, y opera desde 1957. La sensibilidad de los ambientes montanos al cambio puede ilustrarse claramente con la regresión o desaparición de los glaciares en todo el mundo. Algunos casos, como el comentado antes sobre el Monte Kilimanjaro, o los relativos a los glaciares residuales pirenaicos, que son Monumentos Naturales declarados por el Gobierno de Aragón, nos resultan especialmente llamativos, pero el retroceso de los glaciares se da en todas las zonas montañosas, desde los Alpes a las Montañas Rocosas, y también fuera del ámbito montano, como sucede en la periferia de la Antártida. En lo que respecta a los glaciares pirenaicos, en el siglo transcurrido entre 1890 y 1990 han perdido el 60% de la superficie que cubrían y el 80% del volumen que ocupaban (SERRANO y MARTÍNEZ DE PISON, 1994).

Si se examinan las series de temperaturas medias de los últimos 30 años se aprecia claramente el calentamiento general de la atmósfera, pero si se analizan los valores correspondientes a zonas más restringidas las conclusiones no son tan claras, pues en algunas de ellas, la mayoría, se registran ascensos sostenidos, mientras que en otras la tendencia es estable o incluso descendente. Pero en las regiones montañosas la situación es mucho más patente. Lo que en las tierras bajas próximas puede ser indefinido o discutible, en la alta montaña se torna evidente. En las estaciones meteorológicas pirenaicas de mayor altitud se registra un aumento de entre uno y dos grados centígrados en la temperatura media anual en las últimas tres décadas, valor muy superior al estimado por todos los modelos climáticos existentes para el conjunto de la atmósfera. Esta sensibilidad se explica por la relativa escasez de perturbaciones inducidas por el hombre en la atmósfera montana, y resalto el calificativo de relativa, porque tales perturbaciones son frecuentes e intensas, pero siempre menores que en las zonas llanas circundantes. El valor de las montañas como observatorio del cambio climático global aparece aún más claro si pensamos en los ambientes subterráneos singulares, cuevas, simas y surgencias, donde las condiciones ambientales son todavía más estables, y que no son afectadas por las variaciones cotidianas o estacionales. Pues bien, precisamente en algunas cavidades de las montañas españolas, a 60 u 80 metros de profundidad, hemos registrado temperaturas en la última década que difieren de las de 30 años atrás en dos o tres grados. En este caso la tendencia general no está enmascarada por el ruido de las variaciones de corto periodo.

Naturalmente, estos cambios no pueden dejar de afectar a los ecosistemas de montaña. Por ceñirnos únicamente a los cambios térmicos, y sin tener así en cuenta los que se dan

en otros factores climáticos, claro está que la extensión de los glaciares o del ambiente periglacial, la altitud de la línea de nieves permanentes, la del límite del bosque, la de la vegetación herbácea, la altitud y extensión de los distintos pisos bioclimáticos, etc, variarán perceptiblemente. De hecho, todos estos cambios se están produciendo (PONEL et al., 1995). Ya se ha comentado la regresión de los glaciares, pero es igualmente cierto que el límite del bosque, de la vegetación y de la isoterma de 0 grados están actualmente ascendiendo en todos los sistemas montañosos. El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente acaba de hacer públicos los datos sobre calentamiento en el Himalaya, estimándolo en 0.06 °C por año, un valor concordante con el obtenido por nosotros en los Pirineos y que he señalado anteriormente, y advierte del cambio de nivel de los lagos de montaña, que se llenan con el agua de fusión. Pero existen otras consecuencias previsibles y menos evidentes del calentamiento global en las montañas, aunque naturalmente, estas consecuencias varían de unas regiones a otras. En Europa, la mayor parte de los modelos climáticos predicen un calentamiento de entre 1 y 3.5 °C durante el próximo siglo, con valores más cercanos al segundo para las zonas de montaña. Dado que el gradiente térmico adiabático en nuestras latitudes es de unos 0.5 °C cada 100 m de ascenso, este calentamiento equivale a un descenso en altitud de unos 700 m. Precisamente esa es la extensión promedio en altitud de un piso bioclimático, por lo que el calentamiento indicado se traduciría normalmente en un cambio de piso. Así, la zona ocupada por el piso nival pasaría a estarlo por el alpino, la de éste por el subalpino, éste por el montano superior, etc (OZENDA y BOREL, 1995).

Este cambio sería especialmente trágico para nosotros por dos motivos principales. En primer lugar, en los Pirineos el piso alpino ocupa extensiones muy reducidas, y generalmente limitadas a las cumbres. Al no poder elevarse más con el incremento de temperatura, este espacio es ocupado por el piso subalpino, y el alpino desaparecerá. También lo harán las especies ligadas a éste, muchas de ellas endémicas y limitadas a la franja más alta del Pirineo. El porcentaje de endemismos en el piso alpino pirenaico es del 20% entre las plantas, y similar entre los animales, de manera que puede predecirse que al menos un quinto de las especies que pueblan los niveles más altos de la cordillera desaparecerán. Pero hay otra consecuencia negativa menos evidente. Puesto que la superficie disponible disminuye con la altitud, la elevación de los pisos bioclimáticos comporta habitualmente una disminución de su extensión. Esto representa ya una pérdida, pero es mayor la derivada de la imposibilidad de una sustitución completa. En efecto, en el piso montano superior, y en el subalpino, por ejemplo, se desarrolla el bosque porque existe suficiente suelo para ello. En los pisos más altos, sometidos a procesos erosivos más intensos, no existe apenas suelo, y el sustrato suele ser roca desnuda. El desarrollo de un suelo

suficiente es un proceso lento, que exige entre 1000 y 5000 años en las condiciones adecuadas, posiblemente más en alta montaña. El desplazamiento de los pisos bioclimáticos que acompaña al calentamiento global tendría lugar cuando más en uno o dos siglos, por lo que el sustrato no estaría disponible para la implantación de las comunidades naturales procedentes de los niveles inferiores.

Como la mayor parte de los problemas derivados de la intervención del hombre en la naturaleza, el del cambio climático se reduce a una cuestión de diferencia de tasas. La tasa de alteración inducida por el hombre es muy superior a la de regeneración o recuperación del ecosistema, del mismo modo que la tasa de extinción de especies o de disminución de la biodiversidad es muy superior a la de su formación. Como cualquier matemático sabe, esto se traduce en una ecuación diferencial elemental, en la que el segundo término es constante, y que integrada, da lugar a una función exponencial de crecimiento o disminución. En nuestro caso y en la práctica, significa que las perspectivas para los bosques pirenaicos y de otras montañas templadas son poco esperanzadoras, y que, al menos en los niveles superiores, se orientan a su extinción.

No es un panorama positivo, y no es de este modo como quisiera terminar mi exposición. Más bien desearía transmitir, para acabar, alguna idea alentadora que permita albergar esperanza en los que me escuchan. Por ello voy a referirme a otra de las experiencias atesoradas durante mi trabajo en montañas lejanas. En el rincón sudoriental de Polonia, allí donde se unen las fronteras de este país con las de Ucrania y Eslovaquia, se encuentra el extremo oriental de los Cárpatos septentrionales. Se trata de una zona con montañas no muy altas, que hoy constituye la reserva natural de Wieszczade. Durante la Guerra Fría, y al menos hasta la firma de los acuerdos SALT, era uno de los puntos clave en el cinturón militar estratégico que circundaba la Unión Soviética y los países satélites. Albergaba docenas de silos cargados de misiles balísticos que apuntaban a Europa occidental, y extensas instalaciones subterráneas de conexión y control. Por supuesto, el acceso al área estaba absolutamente prohibido para el personal no militar. Yo visité la zona sólo seis años después de que se hubieran retirado de ella todas las instalaciones militares. Los bosques de hayas que cubrían gran parte de la región habían crecido y los retazos alterados que se ubicaban entre ellos habían sido repoblados y cuidadosamente tratados para eliminar las huellas de los pasados usos. En las zonas no intervenidas, el bosque y el pasto natural se habían recuperado hasta tal punto que nadie que ignorase la condición anterior del lugar hubiera podido deducirla. De hecho el área parecía lo que era entonces, una reserva natural con muy pocas alteraciones. Digo esto para señalar la prodigiosa capacidad de recuperación de la vida y de los ecosistemas naturales, siempre que se lo permitan y que las perturbaciones inducidas por el hombre no hayan alcanzado

un nivel irreversible. Creo que este ejemplo, que no es único, permite la esperanza de un futuro más halagüeño para estas porciones de nuestra sufrida biosfera.

No está de más recordar aquí el relato bíblico del diluvio universal. Su final, en la cumbre de una montaña majestuosa, el Ararat, simboliza el fin de una catástrofe y el compromiso, sellado con la aparición del arco iris, de que la misma no se repetirá. Creo que podemos tomar este relato no sólo como símbolo de la salvación que deseamos, sino también como símbolo del papel clave de las montañas en la repoblación de un mundo devastado. Ojalá sea así. Porque el mundo de la montaña es el mundo de la belleza y de la grandiosidad, pero también el de la fuerza y la catástrofe; es el de la primavera idílica y el invierno terrible, el de las especies valiosas y el de las especies a punto de desaparecer, el de las estaciones de esquí y el de las culturas terminales reducidas a una sola aldea. Un mundo agobiado por la pobreza, el abandono y la marginalidad, y un mundo de complejos hoteleros para turistas acomodados, un mundo donde los habitantes pueden ser feroces y al mismo tiempo sumamente hospitalarios. Un mundo que se puede temer y que se puede amar, casi siempre simultáneamente. Al comienzo de mi intervención he citado a un poeta chino del siglo VIII, Li Tai, quizás el mejor que ha producido ese país. Voy a citar ahora a otro, más próximo tanto temporal como geográficamente. Se trata de Joan Maragall, el poeta catalán de principios del siglo XX, cuyo nieto Pasqual es, probablemente mucho más conocido. Desde luego, la política es mucho más rentable que la literatura de cara a escalar los peldaños de la fama, pero ello no resta brillo ni belleza a este sencillo verso debido a la pluma del Maragall poeta:

“Yo no sé lo que teneis, que os amo tanto, montañas...”

Referencias

- [1] BANNIKOV, A.G., DAREVSKII, I.S., ISCHENKO, V.G., RUSTAMOV, A.K. i SCHERBAK, N.N., 1977.- *Opredelitel Zemiovodnikh i Presmikayuschikhsya Fauni SSSR*. Ed. Prosvetschenie, Moscú.
- [2] BLASCO, M.F., 1995.- *Hombres, fieras y presas: Estudio arqueozoológico y tafonómico del yacimiento del Paleolítico Medio de la Cueva de Gabasa 1 (Huesca)*. Ed. Depto. De Ciencias de la Antigüedad (Área de Prehistoria), Universidad de Zaragoza. Monografías Arqueológicas, No. **38**.
- [3] DAVENPORT, D.W., BRESHEARS, D.D., WILCOX, B.P. & ALLEN, C.D., 1998.- “Sustainability of piñon-juniper ecosystems - A unifying perspective of soil erosion thresholds.” *J. Range Management*, **51**: 231-240.
- [4] DUHORCAU, B. 1985.- *Guide des Pyrénées Mystérieuses*. Ed. Tchou, “Les Guides Noirs”, Paris.
- [5] EMLEN, J.M., 1984.- *Population Biology: The Coevolution of Population Dynamics and Behaviour*. Ed. McMillan, New York.
- [6] FOGG, M.J., 1995.- *Terraforming: Engineering Planetary Environments*. Ed. Society of Automotive Engineers Inc., Warrendale.
- [7] FOWLER, B., 2000.- *Iceman: Uncovering the life and times of a prehistoric man found in an alpine glacier*. Ed. Random House, New York.
- [8] FRANZ, H., 1979.- *Ökologie der Hochgebirge*. Ed. Eugen Ulmer, Stuttgart.
- [9] GEISER, F., HULBERT, A.J. & NICOL, S.C., 1996.- *Adaptations to the Cold: Tenth International Hibernation Symposium*. Ed. University of New England Press, Armidale.
- [10] IVES, J., 1992.- “Preface”. In: STONE, P.B. (Ed.): *State of the World Mountains: A Global Report*. Zed Books, London.
- [11] LOCKWOOD, D.R. & LOCKWOOD, J.A., 1988.- “Application of catastrophe theory to population dynamics of rangeland grasshoppers”. In: MCDONALD, L., MANLY, B., LOCKWOOD, J.A. & LOGAN, J. (Eds.): *Estimation and analysis of insects populations—*. *Lecture Notes in Statistics*, **55**: 268-277. Springer-Verlag, New York.
- [12] MARTINEZ RICA, J.P., 1990.- “La fauna de montaña: Aspectos ecológicos y biogeográficos”. En: GARCA RUIZ, J.M. (Ed.): *Geoecología de las Áreas de Montaña*. Geoforma Ediciones, Logroño.

- [13] MAY, R., 1976.- *Theoretical Ecology*. Ed. Blackwells, London.
- [14] MCKAY, C.P., TOON, O.B & KASTING, J.F., 1991.- “Making Mars Habitable”. *Nature*, **352**: 489-496.
- [15] NATIONAL ENVIRONMENT SECRETARIAT, 1997.- *Lesotho: State of the Environment Report*. Ed. Lesotho Government, Maseru.
- [16] OZENDA, P. et BOREL, J.L., 1995.- “Possible responses of mountain vegetation to a global climatic change: The case of the Western Alps”. In: GUI SAN et. Al. (Eds.): *Potential Ecological Impacts of Climate Change in the Alps and Fennoscandian Mountains*. Editions du Conservatoire et Jardin Botaniques, Genève.
- [17] PLEGUEZUELOS, J.M., 1986.- “Distribución altitudinal de los reptiles en las Sierras Béticas Orientales”. *Revista Española de Herpetología*, **1**: 65-83.
- [18] PONEL, P., JAY, P. et LUMARET, J.P., 1995.- “Past and present changes in the coleopteran fauna since the end of the last glaciation: The case of the Western Alps and the Apennines”. In: GUI SAN et. Al. (Eds.): *Potential Ecological Impacts of Climate Change in the Alps and Fennoscandian Mountains*. Editions du Conservatoire et Jardin Botaniques, Genève.
- [19] RIVAS MARTINEZ, S., 1987.- *Memoria del Mapa de las Series de Vegetación de España*. Ministerio de Agricultura. ICONA, Serie Técnica. Madrid.
- [20] SERRANO E. y MARTINEZ DE PISON, E., 1994.- “Geomorfología y evolución glaciaria en el Pirineo Aragonés Oriental”. En: MARTI BONO, C. y GARCIA RUIZ J.M. (Eds): *El Glaciarismo surpirenaico: Nuevas aportaciones*. Geoforma Ediciones, Logroño.
- [21] SAUBERER F. und DIRMHIRN, I., 1958.- “Das Strahlungsklima”. In: STEINHAUSER, F. (Ed.): *Klimatographie von Österreich. Denkschriften von Österreichisches Akademie von Wissenschaften*, **3**(1): 13-102.
- [22] UNCED, 1992.- *Agenda 21: Programme of Action for Sustainable Development*. Ed. U.N., New York.
- [23] UNESCO, 2002.- *Biosphere Reserves: Special Places for People and Nature*. Ed. UNESCO-MAB Secretariat, Paris.