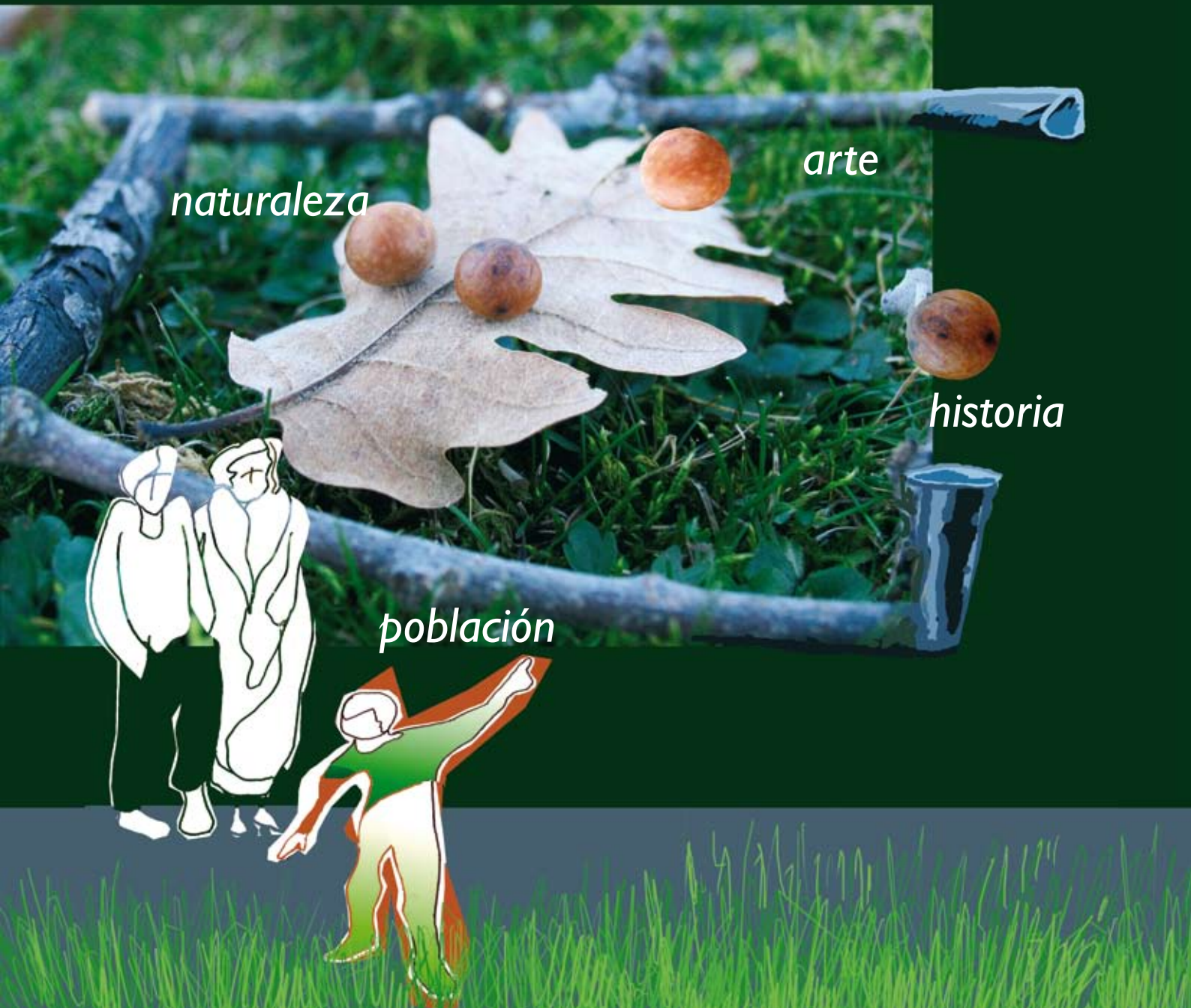


# VI Jornadas Científicas del Parque Natural de Peñalara y del Valle de **El Paular**

## patrimonio, paisaje y cultura



*naturaleza*

*arte*

*historia*

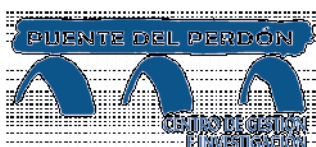
*población*



# Sextas Jornadas Científicas del Parque Natural de Peñalara y del Valle de El Pular

El Pular (Rascafría)

Mayo 2007



**Equipo de trabajo de esta edición:**

**Coordinación:**

Servicio de Espacios Naturales Protegidos

**Dirección técnica:**

Juan Antonio Vielva Juez  
Director - Conservador del Parque Natural de Peñalara

**Equipo técnico:**

Luis Navalón Blanch  
Ignacio Granados Martínez



**Edita:** Dirección General del Medio Ambiente  
Consejería de Medio Ambiente, Vivienda y Ordenación del Territorio  
Comunidad de Madrid



© Textos y fotografías: Ponentes de las Sextas Jornadas Científicas del  
Parque Natural de Peñalara y del Valle de El Paular

Depósito Legal: M-21996-2009  
Imprime: Gráficas J. Sánchez de Guadarrama, s.l.

Tirada: 1000 ejemplares  
Fecha de edición: junio 2009

Impreso en papel reciclado libre de cloro

# PRESENTACIÓN

El Parque Natural de Peñalara es uno de los hitos medioambientales de la Comunidad de Madrid y del que, desde la Dirección General de Medio Ambiente, nos sentimos particularmente orgullosos.

En las más de 750 hectáreas del Parque Natural de Peñalara y las casi 15.000 hectáreas del Valle de El Paular, encontramos una gran diversidad de hábitats y especies vegetales y animales, así como un rico mosaico de paisajes de gran valor ecológico.

Esta singularidad y el interés que su estudio ofrece a la comunidad científica internacional, nos llevó a organizar en 1998 las *Primeras Jornadas Científicas del Parque Natural de Peñalara y el Valle de El Paular* que este año 2009 celebran su séptima edición.

El interés de los temas tratados y la calidad de los ponentes nos decidieron, además, a publicar en un libro el contenido de las conferencias, y los resultados y conclusiones de cada edición.

En esta ocasión, presentamos la publicación correspondiente a las *Sextas Jornadas Científicas del Parque Natural de Peñalara y el Valle de El Paular*, que continúa la serie iniciada en 1998 y recoge las distintas aportaciones a los encuentros realizados en mayo de 2007 en Rascafría.

Bajo el título “*Patrimonio, Paisaje y Cultura*”, quisimos enfatizar que el paisaje que actualmente disfrutamos los madrileños en el valle de El Paular, corazón de la Sierra de Guadarrama, es fruto de la interacción durante siglos de sus pobladores con el medio natural.

Temas tan dispares como el molino de papel de El Paular, la ordenación histórica de las masas forestales, la energía útil para la vida, la luz del sol y el medio ambiente, conformaron las jornadas. No obstante, estas visiones son complementarias y ayudan a entender los diferentes usos que se han realizado en el territorio, y cuyo resultado es el paisaje y sus tramas, valores que la Consejería de Medio Ambiente, Vivienda y Ordenación del Territorio se esfuerza en conservar.

Por todo ello, esta publicación será una buena referencia para todos los que valoramos la Sierra de Guadarrama y sus recursos y luchamos por un desarrollo sostenible de este entorno de gran riqueza natural, paisajística y cultural.

**Federico Ramos de Armas**

*Director General del Medio Ambiente*

*Consejería de Medio Ambiente, Vivienda y*

*Ordenación del Territorio de la Comunidad de Madrid*



# ÍNDICE

<b>La energía útil para la vida, la luz del sol y el medio ambiente</b>	<b>7</b>
Antonio Hernando Grande Director del Instituto de Magnetismo Aplicado de Madrid. Catedrático de Magnetismo. Universidad Complutense de Madrid	
<b>Dinámica histórica de paisajes forestales y sostenibilidad</b>	<b>21</b>
Josefina Gómez Mendoza <sup>1</sup> , Gonzalo Madrazo García de Lomana <sup>2</sup> y Ester Sáez Pombo <sup>3</sup> <sup>1</sup> Catedrática de Análisis Geográfico Regional. Universidad Autónoma de Madrid <sup>2</sup> Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física. Universidad Complutense de Madrid <sup>3</sup> Profesora titular de Análisis Geográfico Regional. Universidad Autónoma de Madrid	
<b>Tramas del paisaje en territorios de montaña</b>	<b>37</b>
Francisco Díaz Pineda Catedrático de Ecología. Universidad Complutense de Madrid	
<b>Cambio climático en general y en las áreas de montaña</b>	<b>49</b>
Antonio Ruiz de Elvira Presidente del Comité Científico del European Climate Forum	
<b>La contaminación atmosférica en la Sierra de Guadarrama.</b>	
<b>Riesgos potenciales para la vegetación</b>	<b>63</b>
Rocío Alonso <sup>1</sup> , Victoria Bermejo <sup>1</sup> , Susana Elvira <sup>1</sup> , Amelia Aguirre Alfaro <sup>2</sup> , Javier Sanz <sup>1</sup> , M <sup>a</sup> Dolores Herce Garraleta <sup>2</sup> , Ignacio González Fernández <sup>1</sup> , Rosalía Fernández Patier <sup>2</sup> , Benjamín S. Gimeno <sup>1</sup> . <sup>1</sup> Ecotoxicidad de la Contaminación Atmosférica. Departamento de Medio Ambiente CIEMAT. <sup>2</sup> Área de Contaminación Atmosférica. Centro Nacional de Sanidad Ambiental. Instituto de Salud Carlos III.	
<b>Reconstrucción paleoambiental y paleoclimática en el entorno del Valle del Lozoya: valoración del impacto humano</b>	<b>87</b>
M. Blanca Ruiz Zapata <sup>1</sup> , Clemencia Gómez González <sup>1</sup> , Juan I. Santisteban <sup>2</sup> , Rosa Mediavilla <sup>3</sup> , Fernando Domínguez <sup>3</sup> , María José Gil García <sup>1</sup> , José Antonio López Sáez <sup>4</sup> y María Soledad Vera <sup>5</sup> . <sup>1</sup> Dpto. Geología. Edificio de Ciencias. Universidad de Alcalá. <sup>2</sup> Departamento de Estratigrafía. Universidad Complutense de Madrid. <sup>3</sup> Instituto Geológico y Minero de España. <sup>4</sup> Laboratorio de Arqueobiología, CSIC. <sup>5</sup> Departamento de Química Analítica. Edificio de Ciencias. Universidad de Alcalá.	
<b>La Sillería del Coro de Padres Profesos del Monasterio de El Paular</b>	<b>97</b>
Antonio Gómez Iruela Historiador	
<b>El Molino de Papel de El Paular. Un reto ante el futuro</b>	<b>111</b>
María del Carmen Hidalgo Brinquis y José María González Lastra Instituto del Patrimonio Cultural de España	
<b>La gestión de espacios naturales protegidos en una era de valores ambientales en conflicto</b>	<b>121</b>
José Antonio Corraliza Rodríguez Departamento de Psicología Social y Metodología. Universidad Autónoma de Madrid	





# LA ENERGÍA ÚTIL PARA LA VIDA, LA LUZ DEL SOL Y EL MEDIO AMBIENTE

ANTONIO HERNANDO GRANDE

Director del Instituto de Magnetismo Aplicado de Madrid.  
Catedrático de Magnetismo  
Universidad Complutense de Madrid

A José García. Escorial. Quien ya, tan temprano, es pura y eterna luz

*Este artículo pretende ser de divulgación porque aunque contiene expresiones matemáticas termodinámicas, éstas pueden ser omitidas sin afectar la comprensión de su hilo argumental ni de sus más importantes conclusiones.*

## INTRODUCCIÓN

La naturaleza, mediante la evolución y durante cuatro mil millones de años, ha creado máquinas maravillosas que funcionan regidas por los mismos principios termodinámicos que el género humano descubrió en el siglo XIX. Desde entonces los humanos aprendimos a producir máquinas con ayuda de las cuales dejamos de ser esclavos de la selección natural y pudimos desplegar el mundo tecnológico que hoy conocemos (probablemente a costa de otras esclavitudes nacidas de la revolución industrial). La termodinámica es ciencia difícil que goza de extremada belleza, encierra una fecunda tensión dialéctica entre conocimiento básico profundo de la naturaleza y guías de ingeniería práctica; pensando en estudiantes de ciencias no me he resistido a escribir las sencillas ecuaciones que engloban tanta sutileza y complejidad como las contenidas en el segundo principio.

***Un gramo de nuestro cuerpo convierte por segundo diez mil veces más energía que el sol.***

Los procesos químicos más característicos de la vida elemental pueden clasificarse en dos grupos: a) los mecanismos de réplica celular y síntesis de proteínas que están asociados a la estructura genética localizada en el ADN que forma los cromosomas y b) las reacciones que permiten obtener, a partir de la energía almacenada en los enlaces de las moléculas de los alimentos, energía disponible para la propia vida y para la realización de un trabajo mecánico. Esta conversión

energética se realiza en las mitocondrias celulares, auténticas centrales energéticas de nuestra vida.

Las mitocondrias son partículas englobadas en el citoplasma de las células eucariotas que en el pasado fueron bacterias, como indica su contenido genético propio, y se adaptaron a vivir en células complejas hace dos mil millones de años. Tienen una longitud entre 1 y 4 micras y aproximadamente media micra de diámetro. En un humano adulto existen  $10^{16}$  mitocondrias que representa en peso un 10% del peso de nuestro cuerpo. Su distribución en número varía muy acusadamente con el tipo de célula. Las células metabólicamente más activas, como las del hígado, los riñones y las neuronas, contienen cientos o miles de mitocondrias constituyendo un 40% de su citoplasma, mientras que las células de la sangre o del esqueleto tienen unas pocas.





El funcionamiento de las mitocondrias puede analizarse desde una perspectiva física y afecta principalmente a dos de sus campos fundamentales: la termodinámica y la física de superficies. Desde un punto de vista estrictamente termodinámico resulta apasionante el intento de comprender cómo la evolución - parcialmente, al menos, conducida por selección natural- ha desembocado en una maquinaria tan perfecta de conversión de energía térmica en energía mecánica. Así consideradas, las mitocondrias comparten con las máquinas y motores construidos por el hombre, la propiedad de ser sistemas capaces de generar orden, aparentemente a contracorriente del segundo principio de la termodinámica. La esencia del proceso energético que acontece en las mitocondrias, sin entrar en sus detalles que en su conjunto son conocidos como ciclo de Krebs, consiste en un bombeo de protones a través de su extensa membrana interna. Para dicho bombeo se utiliza como energía la liberada por la respiración que consta de una serie de procesos químicos exotérmicos de combustión del oxígeno e hidrógeno contenido en la glucosa y que tienen lugar en complejos proteínicos contenidos en la membrana (complejos enzimáticos). El gradiente de concentración de protones se neutraliza parcialmente mediante su flujo restaurador únicamente permitido a través de unas ventanas selectivas. Cuando los protones se aceleran a través de estas ventanas tendiendo a igualar la concentración a ambos lados de la membrana se ven obligados a mover “las palas” de un motor molecular que produce ATP. El ATP constituye la moneda universal de energía útil para el trabajo mecánico.

Antes de entrar en una descripción más detallada que permita comprender la utilidad del ATP y la termodinámica de la conversión energética resulta importante considerar dos aspectos que afectan a la totalidad del proceso.

### La eficiencia energética de nuestro cuerpo

El primer aspecto es de tipo cuantitativo. Como decíamos más arriba, la eficiencia por segundo y por gramo de la maquinaria formada por las mitocondrias en la conversión de energía química en ATP es diez mil veces superior a la eficiencia del sol. Para comprobar este aserto consideremos los siguientes datos. La luminosidad del sol es  $4 \times 10^{26}$  vatios y su masa es  $2 \times 10^{30}$  kilogramos. Durante la vida del sol, estimada en  $10^{10}$  años, cada gramo produce  $6 \times 10^7$  julios de energía. Esta energía se genera lentamente por fusión nuclear que solo tiene lugar en una fracción reducida del volumen del sol situada en el núcleo de la estrella. Dividiendo la luminosidad por la masa solar se obtiene que cada gramo de sol genera **0.0002 miliwatios por gramo** ó  $2 \times 10^{-7}$  julios por segundo y por gramo. Supongamos,

ahora, una persona de 70 Kg de peso, que come  $3 \times 10^6$  calorías ó  $12.6 \times 10^6$  julios cada día. Si suponemos una eficiencia en la conversión energética razonable como un 30% (la energía final contiene fracciones de calor, trabajo mecánico y acumulación de grasas) resulta una conversión de **2 miliwatios por gramo**, esto es diez mil veces superior a la eficiencia del sol. Conviene hacer notar que algunas bacterias altamente energéticas como la Azotobacter genera 10 vatios por gramo con una eficiencia, consecuentemente, 50 millones de veces superior al sol.



### El efecto invernadero y el balance energético atmósfera-tierra.

El segundo aspecto a destacar es la importancia que para el funcionamiento del proceso de conversión energética tiene el medio ambiente. Como hemos visto las mitocondrias parten de la glucosa y el oxígeno atmosférico para convertir la energía almacenada en los enlaces químicos de las moléculas de azúcar en ATP. A su vez la energía química o energía potencial del enlace proviene de la fotosíntesis de las plantas. La fotosíntesis utiliza la energía radiante del sol para unir a las moléculas de agua y  $\text{CO}_2$  en un estado de mayor energía química como es el de los enlaces de las moléculas de azúcar. La energía radiante del sol es consecuencia de la energía térmica desprendida por la fusión nuclear que quema constante pero lentamente el centro del sol que se encuentra a 20 millones de grados. La energía que llega a la superficie externa o superior de la atmósfera terrestre en forma de radiación electromagnética con un máximo, en el rango del visible, correspondiente a 6000 grados kelvin, tiene una densidad de 1400 vatios por metro cuadrado. Si no existiera atmósfera la temperatura estacionaria de la tierra sería de -22 grados centígrados. Gracias al efecto invernadero su temperatura promedio es de 14 grados. El cálculo es sencillo: La temperatura de la tierra alcanza su valor de equilibrio cuando la energía que absorbe es la misma que emite. De los  $1400 \text{ W/m}^2$  que llegarían a la superficie de la tierra solo su cuarta parte es efecti-



va, la que corresponde a la superficie terrestre que da al sol. Por tanto, si no hubiera atmósfera y promediando a toda la superficie terrestre, llegarían del orden de 340 W/m<sup>2</sup>. Un 32% de esta energía es reflejada por la tierra con los mismos fotones que llegan, en su mayoría del visible. En consecuencia, la tierra absorbería 235 W/m<sup>2</sup>. En equilibrio la energía total radiada por la tierra tiene que ser del mismo valor que la energía absorbida. La energía que radia un cuerpo viene descrita por la ley de Stefan-Boltzmann que establece que la radiancia es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo y puede expresarse como  $5.67 \times 10^{-8} T^4$  W/m<sup>2</sup>. Igualando esta expresión a la densidad de energía absorbida por unidad de tiempo, es decir, a 235 W/m se obtiene la temperatura de la tierra T que es de 251K ó -22 grados centígrados.



La existencia de la atmósfera modifica el balance debido a los siguientes efectos. De los 235 W/m<sup>2</sup> de visible y ultravioleta que llegan a la alta atmósfera y que no se reflejan directamente, 67 W/m<sup>2</sup> quedan absorbidos por la atmósfera y 168 W/m<sup>2</sup> son finalmente absorbidos por la superficie del planeta. Sin embargo, la temperatura media de la tierra es de 14 grados centígrados lo que implica, según la ley de Stefan-Boltzmann, que su radiancia tiene que ser de 492 W/m<sup>2</sup>. Además, la energía emitida por la tierra debe encontrarse principalmente en el infrarrojo. Como el balance neto obliga a que la energía absorbida por la tierra sea igual a la emitida, la atmósfera debe devolver a la tierra 324 W/m<sup>2</sup> de infrarrojo. El balance neto de energía absorbida y emitida por la tierra es entonces nulo, recibe 168 W/m<sup>2</sup> de visible solar y 324 W/m<sup>2</sup> de infrarrojo de la atmósfera (efecto invernadero) y emite 492 W/m<sup>2</sup> de infrarrojo. El balance en la atmósfera es también nulo, absorbe 67 W/m<sup>2</sup> de visible solar y 492 W/m<sup>2</sup> de la tierra y emite 324 W/m<sup>2</sup> a la tierra y 235 W/m<sup>2</sup> al espacio, compensando de este modo la energía de 235 W/m<sup>2</sup> que le llega del sol. Si la capacidad de absorción de la atmósfera aumentara la energía que reflejaría sería mayor, la tierra tendría que emitir en mayor proporción y su temperatura subiría. En este

efecto consiste la amenaza de cambios radicales en el balance térmico de la atmósfera con el aumento de la concentración de moléculas capaces de absorber la radiación infrarroja.



Es evidente que las perturbaciones de las condiciones atmosféricas pueden alterar las proporciones de energía radiada por la tierra y reabsorbida en la atmósfera dando lugar a cambios de la temperatura promedio y modificando sustancialmente las condiciones en que la vida actual se desarrolla tras un largo proceso de evolución. Sin duda, la evolución también ha transformado la biosfera. A lo largo de los 4600 millones de años transcurridos desde la formación de nuestro planeta ha habido múltiples composiciones de la atmósfera y variadas formas de vida. El gran salto que representó en el proceso evolutivo la aparición de las células eucariotas pudo estar ligado, como indica de Duve, a la aparición de oxígeno. De cualquier forma, la existencia, durante los dos mil millones de años iniciales de la tierra, de un reino exclusivo de bacterias, algunas con formas de vida en la que la conversión energética se lleva a cabo generando gas metano a partir de hidrógeno y CO<sub>2</sub>, caso de las arqueas, y en otro caso reduciendo los sulfatos a sulfhídrico, nos indica que la vida es adaptable a un gran espectro de condiciones. Es lógico que estos argumentos basados en escalas de tiempo geológico no tranquilicen ni satisfagan a nuestra especie tan naturalmente proclive a preocuparse por acontecimientos de la escala del siglo o de la duración de la vida humana. Consecuentemente, los problemas asociados a la influencia del consumo actual de energía en el efecto invernadero, el calentamiento global y el esperable cambio climático son temas que producen, o deberían producir, razonable y profunda preocupación.

A lo largo de este artículo se analizan, en dos apartados, los siguientes conceptos físicos referidos en esta introducción: a) La termodinámica de la conversión de energía, b) la importancia de las superficies en la evolución darwiniana.



## LA TERMODINÁMICA DE LA CONVERSIÓN DE ENERGÍA EN LA CÉLULA.

Subyacente al funcionamiento general de las membranas biológicas existe una termodinámica básica que condiciona su comportamiento.

### *Los principios de la termodinámica.*

La configuración de equilibrio de un sistema físico aislado es aquella en que todos los estados posibles del sistema son equiprobables. Dicho en lenguaje menos técnico, el equilibrio se alcanza cuando el sistema ha evolucionado a su configuración de máximo desorden o máxima entropía. Entropía máxima es la condición de equilibrio de los sistemas aislados según el postulado fundamental de la física estadística. Un sistema aislado es aquel que no intercambia energía ni masa con su exterior. Todos estamos familiarizados con este principio estadístico que implica el segundo principio de la termodinámica. Los procesos espontáneos que se producen en los sistemas tienden siempre a aumentar su desorden. El primer principio de la termodinámica enuncia la ley general de conservación de la energía. Según este principio tan posible es que una pesa caiga moviendo una paleta en el interior de un líquido y aumentando su temperatura como que el líquido se enfriara y subiera la pesa. En ambos casos la energía se conserva. En el primero la energía potencial de la pesa se transforma en calor que cede la paleta al líquido. En el segundo caso el líquido cede calor a la paleta y ésta la convierte en energía potencial de la pesa. Este segundo proceso, aunque no viola el principio de conservación de la energía o primer principio, nunca fue observado por nadie. El segundo principio hace explícita la imposibilidad de este proceso estableciendo que no es posible convertir el calor cedido por un solo cuerpo en trabajo mecánico. El postulado general de la estadística formula el segundo principio de la termodinámica en lenguaje probabilístico.

### *Las máquinas y las células como generadores de energía ordenada*

Los procesos permitidos en los sistemas aislados conservan la energía contenida en el sistema y se producen espontáneamente siempre que generen un aumento de desorden (el trabajo mecánico o energía ordenada se transforma en calor o energía desordenada pero no a la inversa). Es, sin embargo, también obvio que los cristales o sólidos ordenados se encuentran en la naturaleza en estado de equilibrio. Pero aún resulta más aparentemente desafiante al segundo principio la existencia de máquinas que permiten extraer trabajo de forma cíclica de la energía calorífica y la existencia

de células vivas que autogeneran un complejísimo orden interno. El ingenio del hombre, que permitió el descubrimiento de las máquinas térmicas y que dio lugar a la revolución industrial, parece competir con la selección natural en la búsqueda de los mecanismos más eficientes para luchar contra las limitaciones del segundo principio de la termodinámica.

### *¿Cómo son posibles los procesos que generan aumento de orden, como los que caracterizan la vida?*

Si llamamos  $S^*$  a la entropía o grado de desorden de un sistema aislado, la condición de equilibrio corresponde a  $S^*$  máximo y cualquier proceso espontáneo que se produzca en el sistema antes de alcanzarse el equilibrio inducirá un aumento de  $S^*$ , es decir el incremento de  $S^*$  es positivo,  $\Delta S^* > 0$ .

Una célula, o un ser humano, no son sistemas aislados. Si se aislara totalmente a una persona, se aproximaría lenta y fatídicamente al equilibrio y acabaría descompuesta en los átomos que la forman los cuales se desorganizarían con el máximo desorden concebible. **El orden se puede producir** en procesos que tengan lugar en sistemas que no estén aislados, **en sistemas que intercambien energía con el medio externo.** De tal forma que si se considera el sistema formado por el ser vivo,  $A$ , y el medio externo,  $A'$ , como un sistema único y aislado  $A^*$ , la conocida condición de equilibrio para sistemas aislados  $\Delta S^* > 0$ , teniendo en cuenta ahora que las entropías son aditivas,  $S^* = S + S'$ , resulta

$$\Delta S^* = \Delta S + \Delta S' > 0 \quad (1)$$

Esta relación nos permite comprender cómo, sin violar el principio general de la estadística o el segundo principio de la termodinámica, pueden construirse máquinas o seres vivos en los que tienen lugar procesos que aumentan el orden. El sistema  $A$  puede disminuir su desorden ( $\Delta S < 0$ ) siempre que este aumento conlleve un aumento de desorden en el medio ( $\Delta S' > 0$ ) que sea superior en valor absoluto ( $\Delta S' > |\Delta S|$ ). El problema del cambio climático, por ejemplo, está íntimamente asociado a esta ligadura termodinámica que establece que la vida requiere un incremento del desorden del entorno. Incluso siendo celosamente cuidadosos del medio ambiente el mero hecho de vivir y de vivir muchos produce un aumento del desorden que aparte de inevitable podría acabar con las benignidades del medio ambiente. Cuando el efecto desordenador análogo y más intenso de las máquinas térmicas se suma al meramente biológico se pueden alcanzar los límites de peligrosidad que hoy conocemos.



### La entropía y la energía libre

Desde un punto de vista termodinámico es importante subrayar que existen procesos espontáneos en sistemas aislados que aumentan su desorden pero que, no obstante, conllevan un aumento de orden en algún subsistema de ese sistema aislado. Quizás sea la parte más bella de la termodinámica aquella que trata de describir la condición de entropía máxima del sistema total,  $S^*$ , en función de parámetros exclusivos del subsistema de interés, es decir del subsistema A. Este paso se hace partiendo de un supuesto en general siempre aplicable y que consiste en considerar el sistema externo  $A'$  como un sistema muchísimo mayor que el subsistema de interés. En el lenguaje termodinámico se dice que  $A'$  es el foco térmico de A. Por foco térmico se entiende un sistema que tiene muchos grados de libertad, por ejemplo muchísimas partículas más que el subsistema A. Un ejemplo es la atmósfera como foco térmico de una taza de té, o la atmósfera como foco de un ser vivo, o el cuerpo humano como foco respecto de una de sus células. La importancia del concepto de foco reside en que al recibir calor del subsistema, único cuerpo que tiene en contacto, no varía su temperatura apreciablemente y a temperatura constante es sencillo calcular los cambios de entropía. La temperatura de un cuerpo es una medida de su energía promedio por partícula. Si el subsistema cede una energía en forma de calor  $Q$  la temperatura del foco,  $T'$ , aumenta  $Q/N'$ , siendo  $N'$  el número de partículas del foco. Basta que  $N'$  sea varios ordenes de magnitud superior a  $N$  para que  $T'$  no se vea afectada por el calor que le cede A. La importancia de que  $T'$  sea constante está en que se puede conocer directamente la variación de entropía de  $S'$  cuando absorbe una cantidad de calor  $\Delta Q'$ , resultando  $\Delta S' = \Delta Q'/T'$ . Cuando la temperatura  $T'$  del foco y su presión  $p'$  son constantes, la temperatura y la presión de A serán iguales a las de  $A'$  en el equilibrio.

Según el primer principio de la termodinámica, el calor absorbido por el foco,  $Q'$  ha generado una variación de su energía interna  $\Delta E' = \Delta Q' - \Delta W'$ , donde  $\Delta W'$  es el trabajo realizado por el foco,  $p'\Delta v'$ , que puede expresarse en función de los parámetros del sistema A, como  $-p'\Delta v$ , considerando que  $\Delta v' = -\Delta v$  y  $p' = p$ . Teniendo también en cuenta que por el principio de conservación de la energía  $\Delta E' = -\Delta E$ , la relación (1) resulta

$$\Delta S^* = \Delta S + (\Delta Q'/T)' = \Delta S + (\Delta E' + W'/T)' = \Delta S - (\Delta E/T) - (p'\Delta v/T) > 0 \quad (2)$$

Considerando que  $T'$  y  $p'$  son iguales respectivamente a  $T$  y  $p$ , la expresión anterior pone de manifiesto que es posible escribir  $\Delta S^*$  en función de los parámetros termodinámicos del sistema A como

$$\Delta S^* = -\Delta G/T > 0 \quad (3)$$

donde  $G = E - TS + pv$  es la energía libre del sistema A

### El significado físico de G y cómo la temperatura decide de la influencia relativa de E y S

Por tanto, la condición de equilibrio del sistema total  $\Delta S^* > 0$  implica que la variación de energía libre del sistema A verifique  $\Delta G < 0$ . Es importante comprender el significado de G. De acuerdo con (3) la condición de equilibrio de un subsistema en contacto con un foco térmico a  $T$  y  $p$  constantes se alcanza cuando G es mínimo, lo que significa que  $S^*$  sea máximo. Tal afirmación equivale a limitar los procesos espontáneos posibles de A a aquellos que produzcan una disminución de G.

Consideremos un sólido a presión constante y con volumen aproximadamente fijo de modo que el sumando  $pv$  pueda considerarse constante. La minimización de G requiere aparentemente, en este caso, que E sea mínimo y S máximo. Esto, que sería formalmente cierto, no es posible en la realidad puesto que E y S varían en el mismo sentido. Las configuraciones de más energía interna de un sistema son de mayor desorden que las correspondientes al rango de bajas energías. Si E disminuye también lo hace S. Por tanto, la condición de G mínimo es sutil pues está gobernada por el valor de T. Para T alta el término TS es más importante que el término E y G mínimo se alcanza para S máximo, aunque corresponda a valores de E altos. Sin embargo, para T tendiendo a cero la condición E mínimo prevalece frente a la de S máximo y G se minimiza reduciendo la energía aún a costa de disminuir el desorden. Consecuentemente, a bajas temperaturas los procesos que ordenan el subsistema A y que implican una dis-



minución de su entropía,  $\Delta S < 0$ , producen un aumento efectivo de la entropía del sistema total  $S^*$ .

De la definición de energía libre,  $G = E - TS + pv$  se deriva que en un proceso realizado a  $p$  y  $T$  constantes

$$dG = dQ - TdS - dW'' \quad (3')$$

donde hemos considerado  $dE = dQ - pdv - dW''$ , siendo  $W''$  el llamado trabajo útil realizado por el sistema. En el caso de un proceso irreversible  $dQ = TdS - TdS_i$ , donde  $dS$  es la variación de la función de estado entropía entre los estados inicial y final del proceso diferencial y  $dS_i$  el aumento de entropía interna asociado a la irreversibilidad del proceso. Consecuentemente:

$$dG = -TdS_i - dW'' \quad (3'')$$

Si el proceso es reversible, ( $dQ = TdS$  y  $dS_i = 0$ ),  $dG = -dW''$  y toda la energía libre se libera en trabajo útil. Si el sistema está cerrado y no puede realizar trabajo toda la energía libre se invierte en aumento de la entropía interna del sistema. Para calcular el aumento de entropía interna de los procesos biológicos que llevan de un estado 1 a un estado 2 en un sistema cerrado se calcula el trabajo disipado por el sistema en un proceso reversible, y por tanto ideal, que lleve del estado 1 al 2.

En este contexto la termodinámica y la estadística dejan un comprensible resquicio para la vida y la actividad de las máquinas. Los procesos de ordenamiento son posibles en subsistemas capaces de intercambiar energía y volumen con focos térmicos a temperatura y presión constantes.

### Las máquinas biológicas y las máquinas térmicas.

Con anterioridad al desarrollo de la Física Estadística, y antes de que el calor fuera reconocido como una forma de energía, los trabajos teóricos sobre máquinas térmicas del ingeniero francés Sadi Carnot, completados por Kelvin y Clausius, condujeron a la formulación del segundo principio de la termodinámica. La pregunta clave plantea la extensión en que la energía interna desordenada de las muchísimas moléculas que forman el sistema podría convertirse en movimiento ordenado capaz de hacer girar un eje o mover un pistón. Esta interrogante equivale a preguntarse en qué extensión somos capaces de construir los motores que propiciaron la revolución industrial. Desde la perspectiva de la biología cabe cuestionarse en que extensión una mezcla al azar de moléculas simples puede convertirse en las macromoléculas complejas y organizadas que constituyen un animal o una planta.

Una máquina es un aparato que convierte una fracción de la energía interna de un sistema,  $A$ , en trabajo mecánico. El mecanismo motor,  $M$ , debe quedar inalterado al finalizar el proceso para que así pueda repetirlo cíclicamente. Como la entropía es una función de estado la entropía del motor no cambia en un ciclo ya que se recupera el estado inicial.



El trabajo mecánico consiste en elevar un peso o mover un pistón, es decir, en el cambio de un parámetro externo de otro sistema  $B$ . Al procederse según ciclos la entropía de  $B$  tampoco varía. La única entropía que variaría sería la de  $A$ , sistema que cedería energía interna para convertirse en trabajo sobre  $B$ . El caso más sencillo es que  $A$  sea un foco a temperatura  $T$  que cede en un ciclo una cantidad de calor,  $q$ , que el motor convierte en trabajo,  $w$ , actuando sobre  $B$ . El foco disminuiría su entropía por ciclo en la cantidad  $-q/T$  y ésta sería la única variación de entropía del sistema. En este sistema aislado se produciría una disminución de entropía, lo que viola el principio general de la física estadística y el segundo principio de la termodinámica en su enunciado de la imposibilidad de que exista un proceso cíclico con un solo foco en el que el único resultado sea la transformación de calor en trabajo a costa de una disminución de la entropía del sistema. Según (1) la entropía total del sistema debe aumentar en cada ciclo. Para ello debemos tener otro foco frío  $A'$  que absorba calor  $q'$  y aumente su entropía. El aumento de entropía debe ser  $q'/T'$  mayor que la disminución  $-q/T$ . Pero para poder conservar la energía y producir trabajo  $w = q - q'$ ,  $q$  debe ser mayor que  $q'$ . La combinación de ambas condiciones conduce al siguiente rendimiento  $\eta$

$$\eta = w/q = (q - q')/q < (T - T')/T \quad (4)$$

El signo igual solo aparece en los procesos reversibles en los que coexiste producción de entropía interna en el sistema.

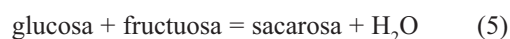




Las máquinas biológicas, como las mitocondrias dispersadas en el citoplasma de las células, están sujetas a las mismas restricciones termodinámicas que las máquinas y motores térmicos. El foco caliente o foco del que absorbe calor el organismo está constituido por las moléculas de azúcares y grasas que contienen elevada energía química de enlace. El foco frío es el medio ambiente del organismo que recibe calor producido con la actividad biológica. La diferencia entre el calor absorbido de las moléculas de alta energía y el calor cedido al medio es la fracción de la energía que se puede convertir en trabajo mecánico muscular o trabajo intelectual. Es obvio que como en el caso de las máquinas térmicas diseñadas y fabricadas por la técnica, el proceso de conversión de la energía química en trabajo requiere un mecanismo, equivalente a los pistones y cigüeñal de un motor de explosión o al sistema de bobinados de un motor eléctrico, capaz de transformar eficientemente la energía disponible en trabajo. Las componentes del motor biológico son altamente complejas, sutiles y especializadas. El esquema del mecanismo más habitual es el de la membrana lipídica que separa medios de diferente energía libre, o diferente potencial electroquímico. Estos gradientes se producen por el equivalente a las bombas hidráulicas que son proteínas que actúan como canales selectivos y son capaces de bombear contra el gradiente electroquímico algunos iones de modo que el gradiente se mantiene aún en presencia de corrientes espontáneas que tienden a anularlo. Este bombeo, contra-gradiente, se realiza a expensas de la energía química liberada en la descomposición controlada de las moléculas de azúcar y/o grasas. La descomposición está controlada por los enzimas que aceleran las cinéticas y acoplan las reacciones de modo que la energía de los electrones liberados por la oxidación sea útil para realizar el trabajo de bombear iones en las proteínas de membrana correspondientes. La forma universal de energía versátil para producir trabajo y reacciones acopladas con etapas de incremento positivo de energía libre es la molécula de ATP, cuya composición y cinética de formación describiremos más adelante.

### El concepto de reacción acoplada

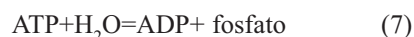
Las reacciones químicas que se producen en las células suceden a temperatura y presión constantes. Por tanto, dos moléculas distintas a y b llamadas reaccionantes se combinarán espontáneamente para dar dos moléculas c y d, productos de la reacción, siempre que la combinación represente una disminución de la energía libre G. En principio cualquier reacción que lleve implícita un aumento de G no puede darse de forma espontánea. Sin embargo, es posible pensar en reacciones espontáneas que aumenten G en una cantidad  $\Delta G$  siempre que estén inexorablemente asociadas a reacciones que disminuyan G en una cantidad  $-\Delta G'$ , siendo el valor absoluto  $\Delta G'$  superior a  $\Delta G$ , estas reacciones se llaman acopladas. Un ejemplo típico de reacción presente en el proceso metabólico es la conversión de glucosa más fructuosa en sacarosa y agua. Se trata de tres moléculas de azúcares, las dos primeras contienen un anillo de seis carbonos que difieren en su estructura, mientras la última contiene la unión conjunta de ambos



La reacción de una molécula de glucosa con una molécula de fructuosa, definida por (5), cuando se realiza de izquierda a derecha conlleva un aumento de energía libre  $\Delta G = +0.24$  eV. De acuerdo con el criterio de espontaneidad de los procesos posibles esta reacción no podría tener lugar. Con mayor rigor, deberíamos decir que solo puede darse si existe una reacción acoplada que genere una disminución de energía libre  $G'$  tal que

$$\Delta G + \Delta G' < 0 \quad (6)$$

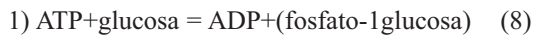
La reacción que con más frecuencia y de forma más general utilizan los seres vivos para acoplar reacciones que aumentan la energía libre es la que hace uso de la descomposición de la molécula de ATP, (trifosfato de adenosina) en ADP (difosfato de adenosina):



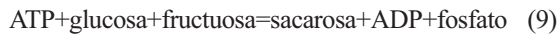
Esta reacción se daría espontáneamente ya que su balance energético es favorable,  $\Delta G' = -0.3$  eV.

Las reacciones descritas en (5) y (7), arrojan un balance neto favorable,  $\Delta G + \Delta G' = -0.06$  eV y por tanto podrían tener lugar simultáneamente si existiera un intermediario que las acoplara. El intermediario de esta reacción concreta de síntesis de la sacarosa es el fosfato-1glucosa que contiene un grupo fosfato ligado a la molécula de glucosa. Las reacciones (5) y (7) se acoplan a través de esta molécula de acuerdo con el siguiente esquema:





La suma de estas dos reacciones da lugar al siguiente balance



Es muy importante resaltar el mecanismo de acoplamiento que consiste en utilizar la energía liberada por la descomposición del ATP para bombear la unión de glucosa y fructuosa a un estado de mayor energía libre como es el de la sacarosa. También es importante indicar que el proceso de acoplamiento y la velocidad a la que proceden las dos reacciones indicadas dependen de la presencia de catalizadores, conocidos como enzimas en la materia viva.

### Enzimas y catalizadores

Es obvio que la utilización controlada de energía química es posible porque existen barreras de energía que hay que superar para iniciar las reacciones. Si cualquier configuración molecular de alta energía interna se descompusiera espontáneamente de modo inmediato todas las moléculas se encontrarían en su configuración de energía libre mínima, o de equilibrio. La posibilidad de utilizar el calor de la combustión desprendido en la chimenea o la energía interna de la glucosa para producir trabajo muscular requiere que, tanto la simple combustión de la leña como la alambicada serie de procesos que permiten que un músculo trabaje con la energía de la molécula de un azúcar, sean procesos no solo que tiendan a disminuir  $G$  sino que para su puesta en marcha necesiten un detonante. Este detonante es la cerilla en el caso de la chimenea y son los enzimas o catalizadores en el caso del trabajo muscular.

**VIDA. TRANSFORMACIÓN DE ENERGÍA**

**PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE ENERGÍA**

- **Combustión:** Reacción química en la que un elemento combustible se oxida, con oxígeno gaseoso, desprendiendo calor y produciendo un líquido. Es una reacción exotérmica.
 
$$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{Calor}$$
- **Fermentación:** Proceso catalítico de oxidación incompleta de hidratos de carbono orgánicos.
- **Respiración:** Intercambio gaseoso (oxígeno y dióxido de carbono) con el medio ambiente en el que se genera energía necesaria para la respiración celular, y se libera el dióxido de carbono como subproducto del metabolismo energético.

El gráfico muestra una curva de energía libre con un pico que representa la barrera de activación. Una flecha vertical hacia abajo indica la disminución de energía libre ( $\Delta E$ ) durante el proceso. Una flecha vertical hacia arriba indica la acción de las **ENZIMAS**, que reducen la altura de la barrera de activación.

La necesidad de catalizadores no viola la generalidad de los principios de la Física Estadística. Es siem-

pre cierto que cualquier sistema tiende a alcanzar su configuración de equilibrio, pero la propia Estadística es precisa al continuar su principal aserto con una importante apostilla respecto a los sistemas alejados de su configuración de equilibrio: “equilibrio que alcanza pasado un cierto tiempo llamado tiempo de relajación”. Lo que la cerilla o los catalizadores promueven es una disminución controlada del tiempo de relajación. Para alcanzar su configuración de energía libre mínima o configuración de equilibrio un sistema tiene que atravesar configuraciones intermedias de alta energía interna o barreras de potencial. El ritmo al que es capaz de superar estas barreras marca la denominada cinética del proceso. Cuando al sistema alejado del equilibrio se le suministra desde el exterior energía que puede utilizar para atravesar las barreras, lo hace y acelera su acercamiento al equilibrio. En los procesos termodinámicos utilizados por la materia viva siempre se extrae energía de forma controlada de un sistema químico. El control requiere que durante el proceso existan etapas parciales en las que la energía libre aumente, el que esto suceda en tiempos razonables depende de la presencia de catalizadores especializados. Si no existieran estas etapas intermedias las moléculas se habrían descompuesto inmediatamente en sus formas de menor energía y no podrían haber sido almacenadas en el organismo conteniendo su valor energético. El organismo determina, mediante el control de la cinética conseguido con los catalizadores, cuando la energía contenida en las moléculas debe ser liberada. Por tanto, los enzimas constituyen, desde un punto de vista termodinámico, elementos tan imprescindibles para la vida como los ácidos nucleicos, los glúcidos y los fosfatos. Las proteínas son las sustancias que más comúnmente forman los enzimas.

### La energía libre de moléculas en disolución.

Como hemos indicado más arriba, el funcionamiento de las membranas como motores biológicos utiliza el gradiente de energía libre que existe a su través y que es continuamente mantenido por bombas que actúan como las baterías eléctricas en los circuitos, bombas capaces de mantener constante esa diferencia de energía libre. Para comprender su funcionamiento estableceremos unas consideraciones termodinámicas más enfocadas sobre la energía libre de moléculas en disolución.

Consideremos una membrana que separa dos medios acuosos en los que se hallan disueltos iones, por ejemplo, de sodio. Llamemos  $V^{\text{ext}}$  y  $V^{\text{int}}$  a los potenciales eléctricos de los medios exterior e interior, respectivamente, y  $c^{\text{ext}}$  y  $c^{\text{int}}$  a las concentraciones respectivas de iones  $\text{Na}^+$ . En equilibrio, supuesto que el sistema se encuentra a presión y temperatura constantes, la

energía libre del sistema debe alcanzar un mínimo. La energía libre de disolución por mol se conoce como potencial químico,  $\mu$ , de tal forma que la energía libre  $G$  de un sistema de  $N$  moles a presión y temperatura constantes, puede escribirse como  $G=N\mu$ .

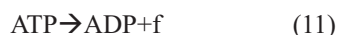
El mínimo de energía libre se alcanza cuando se igualan los potenciales químicos,  $\mu$ , a ambos lados de la membrana. El potencial químico  $\mu$  puede expresarse a  $T$  y  $p$  constante como

$$\mu=\mu_0+zFV+RT\ln c \quad (10)$$

Y es, por tanto, la suma del potencial químico estándar,  $\mu_0$ , que es la energía libre del ión a la presión atmosférica y temperatura ambiente correspondiente a la concentración unidad; mas un término de energía electrostática  $zFV$ , donde  $z$  es la valencia del ión,  $F$  la carga eléctrica del electrón multiplicada por el número de Avogadro y  $V$  el potencial electrostático y mas un término dependiente de la concentración dado por  $RT\ln c$ , donde  $R$  es la constante de Boltzmann multiplicada por el número de Avogadro.

#### **Termodinámica de la reacción $TPA \rightarrow DPA + \text{fosfato}$ . Producimos y consumimos 65 kg de ATP al día**

Quizás la reacción química más importante y característica de la materia vida es la de conversión de la adenosina trifosfato, ATP, en un grupo fosfato mas adenosina difosfato, ADP, y viceversa. Esta reacción, cuyo efecto en el acoplamiento de reacciones se ha ilustrado con el ejemplo de la reacción (8), constituye el paso esencial del proceso de transformación de la energía química de los alimentos en energía útil para la vida. Las moléculas de ATP constituyen la reserva de energía disponible para los procesos vitales y se considera la moneda universal de energía biológica. Si consideramos una molécula de ATP descomponiéndose en una molécula de ADP y un fosfato, a temperatura ambiente y presión atmosférica, observamos que la energía libre de la molécula de ATP en estas condiciones es 0.3 eV superior a la suma de las energías libres de la molécula ADP y el grupo fosfato. Este balance energético se escribe así:



$$\mu_0(ADP) + \mu_0(f) - \mu_0(ATP) = -0.3 \text{ eV} \quad (12)$$

Como sabemos, la energía libre por molécula depende de la concentración según (10). Las concentraciones de equilibrio en el citoplasma corresponderán a aquellas que hagan mínima la energía libre total,  $\mu(ADP) + \mu(f) - \mu(ATP) = 0$ , condición que, a partir de (10), puede escribirse como

$$-0.3/k_B T = \ln(c(ATP)/c(ADP)c(f)) \quad (13)$$

Siendo  $k_B$  la constante de Boltzmann y, para  $T=330\text{K}$ ,  $k_B T=0.026 \text{ eV}$ . Por tanto la concentración de equilibrio apenas contiene ATP, ya que todo el ATP se descompone en ADP y fosfato para que el logaritmo del cociente de concentraciones sea del orden de 10.

Sin embargo, muy al contrario de lo que pasaría en un tubo de ensayo en que moléculas de ATP y ADP se mezclaran juntas y se dejaran durante días hasta que al alcanzarse el equilibrio con la desaparición del ATP, en la célula existe una enorme mayoría de moléculas de ATP. En la célula, por tanto, las concentraciones existentes ponen de manifiesto que el estado del sistema está fuera y alejado del equilibrio. Para generar tales concentraciones funcionan unas bombas que producen ATP, a partir de ADP y fosfato en contra del sentido que requeriría el equilibrio termodinámico. La fermentación, la glucólisis, la fotosíntesis y la respiración son los mecanismos que suministran la energía necesaria para el funcionamiento de estas bombas productoras de ATP.

El ATP se utiliza en todas las actividades de las células que requieran energía. Por ejemplo, la contracción muscular requiere que las fibras musculares descompongan ATP para utilizar la energía liberada en la contracción y su sucesiva relajación. El ATP sirve para acoplar reacciones que suponen parcialmente un incremento de energía libre y se utiliza también para la síntesis del ARN y ADN.

La primera vez que se observó la formación de ATP en 1929 fue como producto derivado de la fermentación. Como la cantidad producida por este proceso en la glucólisis del citoplasma es pequeña, respecto a la requerida para la vida, se sospechó que en su gran mayoría estas moléculas se sintetizaban con la energía liberada durante la respiración, como indicó Engelhardt. Poco después Severo Ochoa mostró que de la respiración de una simple molécula de glucosa se podrían obtener hasta 38 moléculas de ATP, lo que representaba 19 veces mas por molécula que la fermentación. Tal observación le supuso la concesión del Premio Nóbel en 1959. En 1950 se supo que ATP era también sintetizado como resultado de la fotosíntesis.

La capacidad de producción de ATP es realmente colosal. En una persona media se pueden generar  $10^{21}$  moléculas por segundo, lo que indica que se produce y consume a un ritmo de 65 kg por día





### Flujos generados fuera del equilibrio termodinámico

En la materia viva nunca se alcanzan estados de equilibrio termodinámico. Los estados biológicos son estados estacionarios alejados del equilibrio. Este concepto se comprende considerando lo que sucede cuando dos sistemas termodinámicos en contacto tienen distinta temperatura,  $T$ , ó distinta concentración iónica,  $c$ , ó distinto potencial eléctrico,  $V$ . En estos casos aparece, respectivamente, un flujo de calor ó de materia ó de carga eléctrica que tiende a igualar las temperaturas, concentraciones y potenciales, alcanzándose el equilibrio y la anulación de los flujos. Los gradientes de las magnitudes termodinámicas,  $T$ ,  $c$  ó  $V$ , se denominan fuerzas y los flujos pueden considerarse en primer orden proporcionales a las fuerzas.

Un estado estacionario es un estado de flujo constante, a diferencia de un estado de equilibrio que es un estado de flujo nulo. Los sistemas biológicos son generalmente sistemas en estado estacionario. El flujo de calor generado por el gradiente de temperatura se mantiene constante si el gradiente de temperatura es constante. El flujo de calor tiende a disminuir la diferencia de temperaturas, por lo que para mantener constante esta diferencia requerimos una bomba de calor que bombee desde el foco frío hacia el foco caliente la misma cantidad que llega al frío por el propio gradiente. Esta bomba realiza un trabajo análogo al que realiza una batería para mantener constante la diferencia de potencial y mantener así constante la corriente eléctrica. Al mantenerse constantes las fuerzas los procesos son irreversibles y espontáneos ya que la existencia de fuerzas implica la separación del equilibrio.

Las bombas de proteínas que actúan bombeando iones a través de los canales de membrana en contra del gradiente electroquímico existente entre los medios que separa son ejemplos de generadores biológicos capaces de mantener flujos estacionarios. Por ejemplo en el caso de la membrana separando dos disoluciones de iones  $\text{Na}$ , resulta obvio de (10) que en el caso que no exista diferencia de potencial,  $V^{\text{ext}}=V^{\text{int}}$  el equilibrio se alcanza con la igualdad de concentraciones. La aplicación de un voltaje a través de la membrana  $\Delta V = V^{\text{int}} - V^{\text{ext}}$  es equivalente a un campo eléctrico normal a la membrana de valor  $E = (\Delta V / \delta)$ , donde  $\delta$  es el espesor de la membrana, típicamente dos nanómetros. Bastaría, por ejemplo una diferencia de potencial de 10 mV para generar un campo eléctrico de  $5 \cdot 10^6$  V/m. Bajo la acción de este campo los iones positivos  $\text{Na}^+$  sufren una fuerza que los impulsa a acelerarse en la dirección del campo hasta que el desequilibrio de cargas produce un campo interno que contrarresta exactamente al aplicado externamente. Esto sucede cuando

$$F\Delta V = RT \ln \frac{c^{\text{ext}}}{c^{\text{int}}} \quad (14)$$

Esta relación describe el potencial de membrana que debe aplicarse para mantener en estado estacionario un cociente de concentraciones distinto de uno.

### LA EVOLUCIÓN Y LAS MEMBRANAS CELULARES

Hasta aquí hemos repasado como los conceptos termodinámicos básicos se aplican al mundo de la conversión energética celular. Pero para la comprensión completa del proceso de conversión energética es también preciso conocer los detalles del mecanismo que permite la síntesis del ATP y la utilización de su energía en forma de trabajo. Parte de tales mecanismos son las reacciones acopladas que requieren enzimas, pero existen también otros mecanismos que contienen elementos análogos a los motores y máquinas. En especial, enfocamos nuestra atención en el papel desarrollado por las membranas biológicas y en el proceso de quimiósmosis.

Quizás los instrumentos biológicos más versátiles para el funcionamiento del proceso de evolución general de la materia viva sean las membranas tanto internas como externas de las células. El gradiente de composición iónica a través de las membranas, la existencia de canales selectivos que permite el paso controlado de iones y las bombas que restablecen el gradiente, son capaces de generar un conjunto de procesos vitales de máxima relevancia. La comunicación sináptica entre neuronas, los voltajes de acción propagados a lo largo de los axones neuronales, el viaje del ARN mensajero a través de la membrana nuclear y la conversión de energía química en la fabricación de ATP en la membrana de las mitocondrias, constituyen excelentes ejemplos de la importancia de las membranas biológicas en el proceso evolutivo.

La multiplicación de la superficie total de membranas intercelulares, que conlleva la existencia de un gran número de mitocondrias, ha sido un factor determinante en la posibilidad de evolución hacia las formas complejas que hoy conocemos. Las membranas constituyen la frontera a través de la cual se intercambia energía y materia entre su interior y el medio externo. Las bacterias al poseer una sola membrana externa no pudieron crecer de tamaño. La fracción superficie-volumen decrece muy rápidamente con el aumento de volumen. En un cuerpo esférico, el número de átomos de la superficie dividido por el número de átomos de



su volumen varía con el radio,  $r$ , de la esfera como  $a/r$ , donde  $a$  es la distancia interatómica. Los átomos de la superficie son los responsables de suministrar a la bacteria la energía y la masa que necesita para vivir. Evidentemente, la cantidad de energía y masa requeridas aumentan con el volumen. En consecuencia, existe un límite superior de volumen para el cual la superficie no es suficiente para transmitir la energía necesaria. La mencionada razón superficie-volumen decreciente con el tamaño pudo, muy razonablemente, constituir un obstáculo para la evolución de las bacterias que durante dos mil millones de años fueron incapaces de aumentar su tamaño y complejidad. Las mitocondrias contienen una enorme superficie de membrana interna y al contener la célula un gran número de mitocondrias la fracción superficie volumen celular aumenta considerablemente. Por tanto, la aparición de células eucariotas con una altísima fracción superficie-volumen supuso la posibilidad de evolución hacia las formas complejas de los seres multicelulares y los animales de organización superior que aparecieron explosivamente en el Cámbrico.

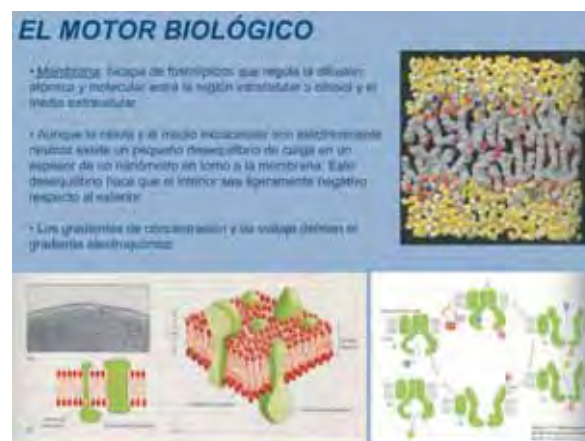
### ***El funcionamiento de la membrana interna de las mitocondrias: los citocromos y los complejos enzimáticos***

La respiración es el mecanismo de obtención de la mayor parte de la energía que necesitamos para vivir, tanto en forma de calor como de trabajo. El combustible de este proceso de oxidación, o combustión controlada, es el enlace químico de alta energía que une a los átomos de las moléculas de grasas y azúcares. El combustible lo ingerimos con los alimentos, lo descomponemos en sus componentes más gruesas en el aparato digestivo y llega al citoplasma de las células en forma molecular. La glucólisis, que tiene lugar en el citoplasma y es análoga a un proceso de fermentación de la glucosa, da lugar a la aparición de cantidades de ATP muy moderadas respecto a las necesarias para la vida. Pero como hemos indicado más arriba nos vamos a limitar a describir el proceso de respiración que constituye la fuente mayoritaria de ATP y que utiliza el oxígeno presente como consecuencia de la fotosíntesis y que, en consecuencia, en el panorama evolutivo es muy posterior a la glucólisis anaeróbica.

La oxidación es una reacción electroquímica por la que una sustancia pierde electrones. Estos electrones son ganados por otra sustancia que se reduce. Oxidarse equivale a perder electrones mientras que reducirse equivale a ganarlos. Como el oxígeno tiene tendencia a ganar electrones se dice que tiende a reducirse. La oxidación de la glucosa equivale a la transferencia de dos electrones y dos protones por lo que el oxígeno forma agua. Como los electrones no son estables aislados las

reacciones de oxidación se dan siempre acopladas a las de reducción. Los electrones que salen de una sustancia se acomodan en otra, en otras palabras, el oxígeno se reduce oxidando a otra especie química.

Fue Lavoisier quien intuyó que la respiración era una combustión. Muy poco después de los trabajos de Joule y Lord Kelvin que permitieron establecer en 1843 la equivalencia del calor y el trabajo y el primer principio de la termodinámica, el físico alemán von Helmholtz aplicó estas ideas a la biología. Puso de manifiesto que parte de la energía liberada por las moléculas de los alimentos era empleada para generar fuerza en los músculos. A finales del siglo XIX los científicos sabían que la respiración ocurría en las células. Pero, ¿cómo se producía el mecanismo de conversión de la energía potencial de las moléculas de alimentos en trabajo útil para la vida?. Tras un apasionante camino de descubrimientos jalonados por muchos premios Nóbel y narrado magistralmente por Nick Lane en su libro "Power, Sex, Suicide, Mithochondria and the meaning of life" Peter Mitchell publicó en Nature en 1961 su original y revolucionaria hipótesis basada en el acoplamiento quimiosmótico.



Una primera característica de la respiración es que, a diferencia de la combustión incontrolada que libera una gran cantidad de calor en un proceso irreversible, requiere subdividir el proceso en una serie de etapas intermedias que permita controlar la fracción energética liberada en cada una de ellas. La forma de atemperar la cesión de energía de una reacción es la utilización de reacciones acopladas intermedias. Supongamos una reacción de oxidación exotérmica que lleva del estado 1 (los reaccionantes) al estado 2 (los productos) y que la energía disipada con la reacción es  $\epsilon$ . Si acoplamos reacciones intermedias de modo que entre los estados inicial y final existan  $p$  pasos podemos conseguir que cada paso libere una energía  $\epsilon/p$ .

Primero la glucosa se rompe en pequeños fragmentos durante la glucólisis y entra en las mitocondrias



en forma de piruvatos y ácidos grasos donde son degradados hasta el grupo acetilo. El hidrógeno de las moléculas combustibles se separa de ellas y el resto de los átomos moleculares forma  $\text{CO}_2$  residual. Posteriormente los átomos de hidrógeno se disocian en electrón y protón. En los complejos proteínicos  $C_1, C_2, C_3$  y  $C_4$  que se hallan en la membrana interna de la mitocondria se producen una serie de reacciones de oxidación-reducción acopladas por coenzimas, enzimas y citocromos que, en definitiva, van trasladando los electrones de una molécula a la siguiente, de modo que unas se oxidan y se reduce la siguiente la cual se oxida a continuación y así sucesivamente. Los electrones viajan por los complejos como si fueran por un cable cuyas baterías fueran la cadena de reacciones de oxidación-reducción. Las moléculas de  $\text{NAD}^+$  y  $\text{NADH}$  actúan como transportadores de electrones que viajan a un ritmo de un electrón cada 10 milisegundos. Cada una de estas reacciones es exotérmica y durante años se mantuvo el misterio sobre el proceso en que esta energía liberada se utilizaba con el fin de obtener la energía para la vida. Todo el proceso se conoce como ciclo de Krebs. Hoy sabemos que la energía liberada en cada oxidación se emplea para bombear los protones del hidrógeno al lado externo de la membrana interna. Esta fue la propuesta, después comprobada, que hizo Mitchell en *Nature*. En el último complejo,  $C_4$ , los electrones se juntan con oxígeno a través del citocromo, *c*, donde se reúnen con protones y se forma agua. Es curiosa la historia del descubrimiento de los citocromos que, en definitiva, como es el caso de la hemoglobina o de la clorofila pertenecen al tipo de sustancias que cambia su color según fije oxígeno o lo libere y que sirven para transportar oxígeno del que puede desprenderse reversiblemente. Es también interesante reseñar que algunas de las proteínas que forman los enormes complejos insertados en la membrana están construidas con normas genéticas que provienen del genoma de la propia mitocondria, mientras que otras lo están con el genoma del núcleo de la célula.

Es interesante remarcar que los mecanismos de bombeo de protones, hacia el exterior o espacio intermembrana de la mitocondria, que tienen lugar en los complejos enzimáticos no se conocen aún de modo satisfactorio. Mientras un complejo bombea un protón por electrón otro bombea dos. Se conocen bastantes detalles de este proceso en la bacteriorodopsina en cuya membrana los cambios ordenados de conformación de la proteína transmembrana conllevan diferentes afinidades para  $\text{H}^+$ . En aquella conformación en que la afinidad es baja se libera al exterior un protón que había sido capturado en el interior cuando la conformación potenciaba la captura.

La alta concentración de protones en el exterior de la membrana interna mitocondrial genera un gradiente

electroquímico que produce, según (14), un potencial de membrana de 150mV y un gradiente de pH de 60 mV que debe sumarse al eléctrico. La suma de ambos de 200mV es la denominada fuerza protón-motriz. Los campos eléctricos normales a la membrana son del orden de 50 millones de V/m. En resumen: la energía disipada en la combustión ordenada de la glucosa se almacena en forma de energía potencial electroquímica en la membrana. Este parece ser un principio general de la conversión energética en la materia viva: la utilización de gradientes de concentración de protones a través de membranas.

#### ***La ATP sintasa y el nanomotor accionado por protones.***

El gradiente electroquímico de protones no sólo impulsa la formación de ATP, sino que la mayor parte de su energía se utiliza para transportar a la matriz de la mitocondria las moléculas que ésta necesita para su propio funcionamiento. Pero ahora solo nos interesa proseguir con el proceso de obtención de energía útil para la vida.

Sabemos pues que la energía desprendida en este proceso de combustión controlada que es la respiración se almacena en forma de energía potencial electroquímica a través de la membrana o en fuerza protón-motriz. Pero, evidentemente, esta energía se necesita en todas las partes de la célula y del organismo por lo que resulta necesario un mecanismo de transporte. La energía asociada a la fuerza protón-motriz almacenada en la membrana interna de las mitocondrias debe transportarse a todas las partes de las células. Como la energía potencial almacenada en una presa debe convertirse por medio de un generador en energía eléctrica para que de esta forma pueda transportarse a su lugar de uso, la energía almacenada en la membrana de la mitocondria tiene que convertirse en energía transportable. El equivalente a la energía eléctrica de la materia viva es la molécula de ATP, siglas del nucleótido adenosina trifosfato.

Como hemos ya señalado, la molécula de ATP almacena energía que se libera controladamente en millones de reacciones acopladas en las que en alguna etapa la energía libre aumenta y es, también, la causa de la capacidad muscular para realizar trabajo mecánico. El ATP se forma a partir del grupo fosfato y del ADP, aumentándose la energía libre mediante un motor molecular propulsado por el flujo de neutrones generado por la fuerza protón-motriz. Y es tal la eficiencia del motor que la concentración de ATP es muy grande, de forma que por efecto de su alta concentración la hidrólisis genera mucha más energía libre que la standard



Como vimos la hidrólisis del ATP genera ADP y un grupo fosfato y libera una energía libre standard por molécula de 0.3 eV. Este balance equivale a una diferencia de energía libre standard por mol,  $G_0$ , de -7.3kcal/mol. Donde  $G_0=N\mu_0$  y N es el número de Avogadro. Conocidas las concentraciones de ADP y ATP en la célula podemos conocer el balance de energía libre de la reacción según la expresión

$$\Delta G = \Delta G_0 + RT \ln(C(\text{ADP})/C(\text{ATP})) \quad (15)$$

El valor de  $\Delta G$  en las condiciones habituales de la célula es de -11 ó -13 kcal/mol. Por lo que  $RT \ln(C(\text{ADP})/C(\text{ATP}))$  es del orden de -4 ó -6 kcal/mol ; mientras que en equilibrio sería 7 kcal/mol.

Podemos concluir que la cantidad de energía libre desprendida mediante la hidrólisis de ATP es debida a la enorme concentración de ATP existente en la célula que es muy superior a la de ADP, en contra del equilibrio. Esta enorme concentración es debida a la buena eficiencia del proceso respiratorio que puede llegar a producir mas de treinta moléculas de ATP al quemar una sola molécula de glucosa.

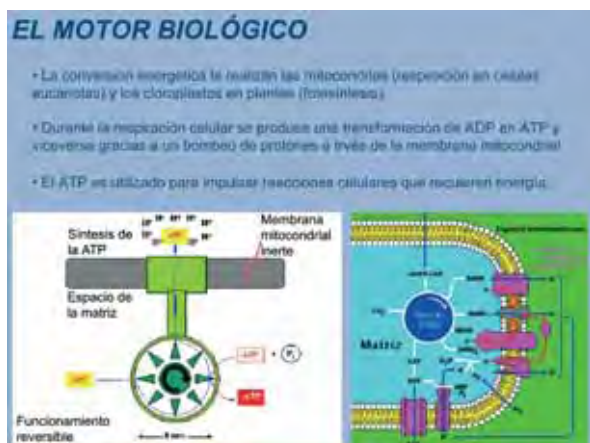
Hemos visto cómo el transporte de la energía se realiza en los organismos vivos mediante las moléculas de ATP que equivalen al fluido eléctrico en el suministro de energía a las ciudades. Pero queda por describir el equivalente al generador de la central que en nuestro caso sería el mecanismo mediante el cual la energía almacenada por la fuerza protón motriz se convierte en ATP. El descubrimiento del instrumento que hace el papel biológico de generador de energía eléctrica usando el símil de la central hidroeléctrica mereció el Premio Nóbel de 1997. Aisladas de los complejos enzimáticos de la membrana interna, pueden observarse por microscopía electrónica unas partículas semejantes a champiñones también perfectamente insertadas en la membrana y que constituyen una enzima formada de proteínas conocida como ATP sintasa o ATPasa.

La ATPasa es un ejemplo único de nanotecnología producida por la naturaleza. Constituye un motor de rotación que es la máquina más pequeña basada en las partes móviles de una proteína. Contiene dos partes fundamentales: un eje de giro que atraviesa la membrana desde la matriz hasta la región intermembrana y una cabeza rotante. La presión ejercida por la diferente concentración protónica fuerza a los protones a acelerarse por el eje de modo que ponen en rotación la cabeza que es precisamente la parte que recuerda a un champiñón. El paso de cada tres protones produce un giro de la cabeza de 120 grados, en tres pasos sucesivos de tres protones se recorre una vuelta completa. La cabeza tiene tres sitios de enlace y en ellos se manufactura el ATP. Cada vez que gira la cabeza las tensiones ejercidas fuerzan a los enlaces a formarse o a romperse. El primer sitio enlaza una molécula de ADP durante el primer paso, durante el segundo paso el segundo sitio enlaza un grupo fosfato y lo ensambla al ADP formando ATP y en el tercero se desprende el ATP. Una vuelta completa requiere nueve protones y permite la formación de tres moléculas de ATP. En otras especies la ATPasa requiere un número diferente de protones para completar el giro de 360 grados. La nanomáquina es completamente reversible y puede utilizarse para bombear protones hacia el exterior a través del eje utilizando la energía liberada por la descomposición del ATP en ADP y fosfato.

Es curioso observar que durante la fotosíntesis, o mecanismo principal de producción de moléculas de alta energía, la energía contenida en la luz solar se emplea para bombear protones a través de la membrana de los cloroplastos de una forma análoga a como sucede en la respiración. Un mecanismo de enorme versatilidad es el de producción de energía de las bacterias. Pero en todos los casos el principio es exactamente el mismo, los electrones se propagan a lo largo de una serie de reacciones de oxidación-reducción hasta llegar a un aceptor final de electrones que en el caso de la respiración es el oxígeno, pero que en las bacterias puede ser  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{SO}_4^{2+}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  y otros. Pero, una vez más, en todos estos casos, independientemente del receptor final, la energía liberada durante las etapas sucesivas de las oxidaciones se emplea para bombear protones a través de una membrana.

### Unas consideraciones finales

La vida, entendida como capacidad de replicación y movimiento, requiere energía tanto en forma de calor como de trabajo mecánico. La evolución ha construido máquinas cada vez mas complejas que realizan termodinámicamente el mismo papel que las máquinas inventadas por el ingenio humano en los siglos XIX y XX. La energía de las moléculas de grasa y azúcar se



---

extrae mediante etapas sucesivas de oxidación reducción. Para este proceso la función de los transportadores de electrones tipo NADH es fundamental. La energía liberada en cada etapa se emplea para bombear protones en contra del gradiente electroquímico. Para poderse transportar la energía se convierte en ATP. Esta conversión la realiza un nanomotor de sofisticado y eficiente diseño.

Es curioso que, como señala Gregory Clark en su obra "A Farewell to Alms", la invención de las máquinas térmicas y eléctricas permitió a la especie humana escapar del régimen económico gobernado por la selec-

ción natural. Tal selección natural había sido capaz de generar máquinas incluso a escala nanométrica como la reseñada ATPasa.

Podemos concluir que tanto para la vida en general como para la evolución cultural de nuestra especie la importancia de las máquinas es difícil de sobreestimar.

*Agradezco a la filóloga María Vielva la lectura paciente y atenta del manuscrito que le ha permitido corregir múltiples erratas y defectos del texto.*

# DINÁMICA HISTÓRICA DE PAISAJES FORESTALES Y SOSTENIBILIDAD\*

JOSEFINA GÓMEZ MENDOZA<sup>1</sup>, GONZALO MADRAZO GARCÍA DE LOMANA<sup>2</sup> Y  
ESTER SÁEZ POMBO<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Catedrática de Análisis Geográfico Regional.

Universidad Autónoma de Madrid, josefina.gomez@uam.es

<sup>2</sup> Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física.

Universidad Complutense de Madrid, gmadrazo@ghis.ucm.es

<sup>3</sup> Profesora titular de Análisis Geográfico Regional.

Universidad Autónoma de Madrid, ester.saez@uam.es

Nos encontramos, sin duda, en un momento de inflexión de la gestión forestal, en un punto de no retorno de la silvicultura más ortodoxa, canónica y rígida. En 2001, al hacer balance de los diez años transcurridos desde la generalización del concepto de gestión forestal sostenible, el ingeniero de montes Christian Barthod decía en la prestigiosa *Revue forestière française*: «En cierto modo el principio de los años noventa ha estado marcado por el cuestionamiento del axioma fundador de las políticas forestales europeas, según el cual una gestión racional de los potenciales productivos de la madera en los montes no podía más que tener consecuencias benéficas para el conjunto de los demás componentes de los ecosistemas forestales, quizá no siempre localmente, pero sin duda a la escala de un territorio» (Barthod, 2001, 29). Por las mismas fechas, los forestales daneses Gamborg y Larsen hacían una constatación aún más rotunda: «Por toda Europa y en partes de América del Norte, las plantaciones coetáneas, orientadas a la producción y de silvicultura intensiva están empezando a ser consideradas como los viejos complejos industriales: algo con lo que hay que terminar o que hay que convertir en una cosa distinta» (Gamborg y Larsen, 2002, 559-560). En consecuencia, la gestión forestal tendría que responder hoy a diferentes objetivos, valores y prioridades.

Estos nuevos valores deberían tender, según los autores mencionados, a un *back to nature*, a un retorno al bosque naturalizado o seminatural que cerraría el círculo del modelo de los aprovechamientos forestales a lo largo de la historia. En su esquema, en efecto, partiendo de la fase de bosques originales sin extracción se habría pasado a la de aperturas del bosque con rozas y cortas incontroladas pero de impacto reducido, seguida de la etapa de los sistemas de explotación tradicionales, caracterizados por la economía ganadera y la abundancia de los pastizales, bosques mixtos irregulares explotados en monte bajo y paisajes forestales mixtos. La cuarta fase se caracteriza por una intervención más intensa en las masas forestales, con el objetivo principal de conseguir un rendimiento sostenido de madera, a través una silvicultura encaminada a lograr masas regulares y coetáneas por medio de cortas de regeneración y aclareos sucesivos. Esta es la llamada silvicultura científica, siguiendo los principios teóricos enunciados para el mundo sajón por Hartig y Cotta y trasladados a diversos contextos. Es en esta etapa cuando los sistemas de gestión y de manejo se encuentran en su momento máximo de conversión y forestación, y también cuando, una vez completado el proceso de conversión, las masas podrían en principio ser manejadas sobre la base de los usos múltiples y los principios de sostenibilidad. De modo que se emprendería el retorno a las estructuras, funciones y

\* Este texto ha sido elaborado en el marco del proyecto "Aprovechamiento forestal y dinámica histórica de los montes del Sistema Central" [Plan Nacional de I + D + I (2004-2007), ref. SEJ2006-15029-C03-01]



dinámicas consideradas propias de los sistemas originales, mitigando los efectos negativos de las técnicas silvícolas intensivas aplicadas en las fases anteriores y convirtiendo a las masas en bosques más diversos y estructuralmente más variados, mediante cortas suaves, cuidadosas, selectivas con especies predominantemente autóctonas y buscando preservar el ecosistema. En suma, el *back to nature* sería el último estadio de este modelo (Gamborg y Larsen, 2002; Gómez Mendoza, 2007: 123-124).

Como todos los modelos, este incluye tanta verdad como simplificación y genera tanto acuerdo como insatisfacción. No es nuestra intención discutirlo, y menos aún en sus fases finales de defensa de una gestión más naturalizada. En cambio sí nos gustaría aprovechar estas páginas para documentar con investigación empírica las fases intermedias de la gestión territorial, forestal y ambiental de las sociedades tradicionales y de la administración forestal moderna, cuyos objetivos, principios y técnicas de intervención tardaron en traducirse sobre los paisajes forestales, como vamos a tener ocasión de mostrar y que son hoy objeto de revisión.

Los geógrafos sabemos que entender los territorios, sus usos y sus dinámicas, suponía remontarse en su historia y en el conocimiento de las formas de apropiación y de aprovechamiento, y más aún en el caso de los territorios boscosos y de montaña por las inercias de sus formas de paisaje. Los ecólogos, por su parte, con Fernando González Bernáldez a la cabeza, también han insistido en la importancia enorme de los sistemas de uso tradicionales, incluso los ya desaparecidos, porque dejan huellas en los medios, que son claves para la comprensión ecológica de los territorios. Unos y otros creemos que el conocimiento riguroso de los sistemas tradicionales es también importante para la conservación y gestión forestal presente. Si en algo fallaron la silvicultura y la ordenación de montes modernas, hoy cuestionadas, es precisamente en haber querido ignorar las formas tradicionales de apropiación y de gestión, a pesar de haber conocido de primera mano –y, en algunos casos, comprendido con precisión– esa gestión tradicional de los bosques. Parece ahora que en esas formas de uso tradicionales se podrían encontrar algunas claves e, incluso, algunos remedios para los paisajes a los que aspiramos, amenos, interesantes, diversos, ecológicamente útiles y equilibrados, funcionales, en todo caso huyendo de dogmatismos o mitificaciones, lo que en definitiva supone un conocimiento veraz y detallado.

Estudiosos de muy distintas procedencias han venido trabajando desde hace años en el conocimiento detenido de los medios forestales de la Sierra de Guadarrama. Entre ellos, el grupo de geógrafos en el que nos integramos ha llevado a cabo varias tesis doctorales sobre

los montes de distintos sectores de la Sierra (Manuel Valdés, 1996; Sáez Pombo, 2000; Madrazo García de Lomana, 2007), con dos convencimientos: la importancia de la propiedad de la tierra como base de la gestión y de los aprovechamientos; y en la medida en que se detectan diferentes modos de gestionar el monte a lo largo de los siglos, la perspectiva histórica larga es una herramienta para evaluar la sostenibilidad de los recursos y de los paisajes. Estos estudios sirven de base a estas páginas que se proponen presentar sucintamente la evolución de los paisajes forestales en la Sierra de Guadarrama en el marco de los estudios geohistóricos y desde una perspectiva de sostenibilidad, y, a partir de ello, reflexionar sobre la situación de las políticas territoriales y forestales actuales.

### LA SOSTENIBILIDAD DE SISTEMAS FORESTALES TRADICIONALES EN LA SIERRA DE GUADARRAMA, Y SUS LÍMITES.

«Un siglo del hombre pesa sobre la tierra más que veinte siglos de la naturaleza». En estos términos se expresaba Ramond de Carbonières, uno de los primeros pireneístas, si no el primero, al reconocer en los primeros años del siglo XIX «los desiertos de las altas montañas» y constatar que los bosques «no son en absoluto morada del hombre. [...] Solo penetra en ellos para introducir el hierro y el fuego» (cit. en Galop, 1998, antepágina).

Precisamente los Pirineos han sido objeto desde hace más de veinte años de un conjunto de investigaciones desde perspectivas tan fecundas como poco habituales, realmente transdisciplinarias, en las fronteras de las ciencias humanas y de las naturales, que han mostrado cómo las sucesivas sociedades montañosas han ido construyendo sus medios para satisfacer sus múltiples necesidades y actividades, a partir de la realidad natural del momento y en función de su conocimiento y capacidad técnica (Métaillé y otros, 2003). No se trata pues de hablar de una genérica acción antrópica, sino, como bien dice Georges Bertrand, de puesta en funcionamiento y organización de sistemas antrópicos precisos e históricamente datados. «Cada comunidad de montaña organiza su territorio a partir de las constricciones que encuentra y de los recursos que valora en ese territorio. Dicho de otra forma es preciso definir sistemas antrópicos autónomos, que en diferentes periodos y diferentes medios pueden dar cuenta con bastante precisión del estado y del funcionamiento de los paisajes» (Bertrand, 1998 en Galop, 1998: 12); también de los ecosistemas. Eso es lo que ha hecho el grupo de investigadores de Toulouse y de otros centros vinculados a ellos y para eso hace falta, entre otras cosas, sensibilidad y metodología histórica, geográfica y ecológica; porque se trata de análisis

ambientales y paisajísticos multiescalares en el tiempo y en el espacio.

Volvamos a nuestra experiencia. Hace años, partiendo de los trabajos jurídicos de José Esteve Pardo, intentamos representar en un esquema cómo se ha modificado históricamente la relación de las comunidades rurales con sus espacios forestales, dados los cambios de las funciones prioritarias que han desempeñado (Gómez Mendoza, 1997; Esteve Pardo, 1995). En este esquema, reproducido en el Cuadro 1, se distinguen los fines que cumplen los montes (sociales, productivos, de conservación, ecológicos y recreativos), los tipos de propiedad y de usufructo, así como los medios normativos, administrativos y técnicos para su gestión.

En la sociedad campesina del Antiguo Régimen forestal, cuando prevalecían funcionamientos económicos y territoriales integrados, los montes cumplían una función eminentemente social, entendida como satisfacción de necesidades primarias, y eran objeto de diversas formas de posesión colectiva, entre las que destacan las comunidades de pastos. Los usos eran múltiples, prevaleciendo el pastoreo y la explotación para leña. La totalidad del espacio forestal se solía organizar de acuerdo con ordenanzas locales y, en general, la intervención sobre él era escasa. Ya advertíamos entonces que la reglamentación era mayor en la fincas con más interés económico como los prados, las dehesas boyales y los montes arbolados productivos; mientras que por el contrario, los terrenos abiertos, de pastoreo extensivo o poblados de matorral de escaso interés económico, quedaban relativamente fuera de control, reflejándose así la distinta capacidad o volun-

tad de manejar estos recursos. Como resultado, este sistema tradicional nos ha legado a escala territorial mosaicos de paisaje, cuya diversidad y amenidad han sido resaltadas por autores de diversa procedencia. La modernidad ilustrada inicia la intervención activa en el territorio desde instancias exteriores a las comunidades locales. En el caso de los espacios forestales, la gestión externa queda consagrada por la ley de Montes de 1863, sin olvidar los precedentes del siglo XVIII y, sobre todo, las Ordenanzas de 1833 que fueron las que establecieron el principio de tutela administrativa estatal de los montes públicos.

En términos generales este esquema interpretativo sigue siendo válido; pero las investigaciones llevadas a cabo para diversos sectores de la Sierra del Guadarrama por miembros del equipo al que pertenecemos, ponen de manifiesto ciertos aspectos que matizan lo allí contenido y que son fundamentales para lo que ahora nos ocupa. En primer lugar, fue en los siglos medievales, con la ocupación del territorio, cuando se forjaron los paisajes forestales que nos son habituales y que solo el éxodo generalizado de las poblaciones de montaña en los últimos cincuenta años y las repoblaciones masivas de gran entidad superficial llevadas a cabo durante los años cincuenta a ochenta del siglo pasado han empezado a dismantelar. Esta ocupación medieval confirma lo establecido para otras montañas y muy en particular para el Pirineo, aunque en este caso la fase determinante se remonte en ciertos sectores hasta el alto medievo, iniciándose entre el siglo IX y X y alcanzando su máximo en el siglo XIII. «Es en efecto en esta época cuando se produce la instalación definitiva de los sistemas agrosilvolpastoriles, los terrazgos, y cuando se organizan las grandes unidades de paisaje

**Cuadro 1.** Relación montes-sociedad-ciencia y técnica  
Fuente: Gómez Mendoza, 1997

	Antiguo Régimen	1855-1957	Último tercio siglo XX
<b>Función</b>	Social - satisfacción necesidades primarias	Conservación-producción	Ecológica: procesos naturales-biodiversidad
<b>Aspectos de propiedad y posesión</b>	Diversas formas de titularidad colectiva	Privatización/Catalogación MUP/Definición de Montes Protectores	Demanialización - Publicación
<b>Relación con los pueblos</b>	Cercana: integración	Alejada: despojo de derechos	Rota: Naturaleza sin hombres
<b>Aprovechamientos</b>	Múltiples. Pastos y leñas prioritarios	Silvícolas. Prioridad madera	Urbanos: recreo y ocio. Culturales
<b>Intervención - Gestión</b>	Escasa. Municipal y comunidades vecinos	Activa. Administración forestal	Administración forestal y tutela ambiental
<b>Explotación</b>	Integrada en distintos grados (espacios acotados y abiertos)	Sectorializada. Explotación racional recursos renovables: PAF y Ordenaciones. Subasta pública productos	Planes técnicos forestales
<b>Territorio</b>	Mosaico territorial	Orden territorial	Reservas territoriales
<b>Normativa jurídica</b>	Ordenanzas locales- Ordenanzas de la Corona	Catálogo MUP 1901 Leyes de Montes 1863 y 1957	Ley EE.NN.PP. 4/1989 Leyes forestales CC.AA. Ley Montes 2003





**Cuadro 2.** Cambios en los paisajes forestales de la Sierra de Guadarrama.

Fuente: Madrazo García de Lomana, 2007: 37.

Periodo	Elementos del paisaje forestal			Discurso y otros elementos
	Propiedad	Aprovechamiento	Vegetación	
XI – XVI	Constitución de la estructura fundiaria basada en la ocupación concejil	Derechos de uso de lógica comunalista. Gestión local / comarcal	Deforestación tras un periodo de escaso uso del monte	Utilitarista. Primeras ordenanzas y disposiciones reales
XVII–XIX	Adaptaciones del régimen comunal: señorialización, venta de baldíos...	Intensificación de usos, nuevas demandas regionales y creciente complejidad en la gestión.	Continuidad. Estructura de los montes de lógica concejil.	Conflictos por la carencia de energía y madera. Oposición concejos Vs Corona
1848 – 1939	Desamortización civil. Privatización e individualización de la propiedad	Sustitución de la gestión concejil por la de la nueva administración forestal	Continuidad y degradación local por nuevas demandas de productos forestales	Institucionalización de la ciencia forestal (ciencia y política). Otros discursos.
1939 – 1986	Retorno de fincas al Estado: compras y consorcios del PFE / ICONA	Las repoblaciones se imponen a otros criterios de gestión forestal y rural	La repoblación y la regeneración natural hacen aumentar la superficie arbolada	Puesta en práctica de un siglo de doctrina forestal.
1986 – 2007	Consolidación de la propiedad forestal (UP, convenios)	Continuidad. Creciente valoración ecológica y paisajística del monte	Continúa la expansión de la superficie arbolada	Nuevo discurso forestal, sin clara aplicación territorial

pirenaico. Pero ante todo, la Edad Media pone de manifiesto la diversidad de las prácticas, de los modos de explotación o de los sistemas socio-económicos vigentes en cada valle. Estas diferencias, que hacen ilusorio todo intento de modelización del periodo medieval, están en el origen de la multiplicidad actual de los paisajes pirenaicos»<sup>1</sup> (Galop, 1998: 257).

La segunda precisión que los estudios empíricos aportan al esquema se refiere a que es tanta la diversidad de titularidades colectivas y modos de disfrute y gestión durante el antiguo régimen forestal que también por este motivo es difícil generalizar. Baste como muestra la abundancia de términos de distinta índole que contienen los documentos para referirse a lo colectivo y a sus usos: concejiles, comunes, propios, del común, de la villa; sierras, montes, baldíos, ejidos, dehesas, alijares; matas, bardales, sardonales, etc. En tercer lugar, al resaltar las rupturas producidas por los cambios científico-técnicos, el Cuadro 1 deja en la

sombra la relativa inflexión a partir del siglo XVI, con una intensificación de los usos, las readaptaciones del régimen concejil, y la mayor presencia de la Corona; y en cambio confiere carácter de ruptura mayor a la introducción de la tutela estatal de los montes con la creación del Cuerpo de Montes y una gestión fundada en la silvicultura científica. De hecho, como bien han demostrado los trabajos recientes sobre el Guadarrama y como expondremos con algo de detalle después, la «estatalización» de los montes no conllevó un cambio inmediato de la apariencia de los paisajes forestales serranos. Estos cambios habrían de esperar un siglo más, hasta mediados del siglo XX cuando las nuevas fuentes de energía liberaron al monte de la multifuncionalidad y aceleraron el éxodo desde el medio rural a la ciudad, dejando campo libre, o semilibre, a las grandes operaciones de repoblación del Patrimonio Forestal del Estado.

De este modo, es oportuno completar el Cuadro 1 con el Cuadro 2 en el que se sintetiza la evolución de los paisajes forestales en la Sierra de Guadarrama relacionando los aspectos patrimoniales con los de aprovechamiento y vegetación y con otros acontecimientos y tipos de gestión dominantes<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Lo que no resta importancia a ese «agujero negro», a esos tiempos inciertos que van de la Edad de Hierro hasta la Edad Media, en el sentido de que, como ha dicho Marcel Dubois, se conoce mejor, gracias a la palinología, las etapas de la reconquista de la vegetación natural durante el Holoceno que la de su desaparición y modificación por la ocupación humana; se debe en buena medida a que el periodo que va desde la Antigüedad hasta la Edad Media ya avanzada queda en los límites de la precisión palinológica y todavía fuera de los archivos (Dubois, 1986). Estas lagunas son las que se han tratado y se están tratando de colmar. Para los vacíos de información posteriores, el estudio antracológico de las carboneras está mostrando todas sus posibilidades.

<sup>2</sup> El cuadro fue elaborado en primera instancia por Gonzalo Madrazo para su tesis doctoral sobre el paisaje forestal de la vertiente segoviana del Guadarrama y ha sido adaptado para servir al conjunto de la Sierra de Guadarrama (Gómez Mendoza, Gómez Mediavilla, López Estebánez, Madrazo García de Lomana y Sáez Pombo, 2008).





Panorámica de la zona superior de la “Dehesa de Braojos”

Con el cuadro como guía y referencia, repasamos ahora brevemente los principales hechos de la evolución de los paisajes forestales de la montaña central para medir su sostenibilidad y los límites de la misma. Durante la repoblación medieval se van organizando las grandes instituciones de apropiación y gestión, Comunidades de Villa (o Ciudad) y Tierra y concejos de aldea, poseedoras de patrimonios destinados al aprovechamiento en común de los pueblos que integran sus territorios. En los estudios correspondientes se ha cartografiado en detalle tanto la organización administrativa en comunidades, sexmos, tierras y partidos de la Sierra de Guadarrama, tanto de su vertiente meridional (Sáez Pombo, 2000: 26), como de la septentrional (Madrazo García de Lomana, 2007: 37). Destaca sobre todo el relevante papel de la Tierra de Segovia en ambas vertientes, que -como en los casos de las Comunidades de Villa y Tierra de Sepúlveda y Ayllón- repobló y ensanchó sus términos por las tierras de *allendela sierra*. A ellas se suman jurisdicciones menores, como las de la Tierra de Buitrago, el Real de Manzanares, el Condado de Puñonrostro, la Tierra de Talamanca, la Tierra de Uceda -al sur de la Sierra- y las de Pedraza o el Concejo de Riaza, junto a las ya mentadas de Segovia, Sepúlveda y Ayllón, al norte de la sierra. Distintos sexmos, ochavos, cuartos, etc. complican aún más la pluralidad jurisdiccional, que se suma a la diversidad patrimonial y administrativa de la época (Figuras 1 y 2)<sup>3</sup>.

3 Hacia el Este y el Oeste del Sistema Central la organización de jurisdicciones a través de grandes concejos de villa y tierra es similar. En el caso del sector central y meridional de la Sierra madrileña, el ámbito de realengo del concejo segoviano tenía un papel clave (Sexmo de Casarrubios), que compartía con el Real de Manzanares y más al sur el ducado de Escalona; sin que en tales espacios, estuvieran ausentes -por supuesto- los usos comunales del territorio. Sólo en el señorío solariego de Valdemaqueda faltan de forma casi absoluta los bienes de titularidad pública (Manuel Valdés, 1996: 47-71).

Las ordenanzas, cartas pueblas, pleitos y avenencias, amojonamientos, etc., permiten entender hasta cierto punto el funcionamiento de todas estas instituciones, en general supramunicipales, en cuanto al manejo de los recursos. Pese a la gran diversidad de situaciones, el modelo de ocupación y expropiación es bastante común y tiene que ver, como no podía ser de otra manera, con la localización, topografía y vegetación de predios y montes: apropiación y cultivos de los terrazgos más feraces de las partes bajas de los valles; reserva concejil de los montes (dehesas y ejidos) en las vertientes bajas y medias para uso de los vecinos, repliegue de los amplios pastos comunales a las zonas más altas y rasos en las cumbres. La situación en el Sexmo de Lozoya según el ordenamiento de 1302 distinguía bien estos tres tipos de espacios: « Los *quiñones*, parcelas de labor cedidas a particulares con la condición de la puesta en explotación en un plazo y que deben ser colindantes para evitar la dispersión del espacio cultivado; los *ejidos* y *predios forestales acotados*, destinados al disfrute privativo de los vecinos, lo que parece indicar que es en estos momentos o en los inmediatamente anteriores cuando se delimitan las dehesas boyales; y los *alijares*, resto de las superficies asignadas a las aldeas, de carácter montuoso y abierto, cuyo usufructo corresponde a todos los vecinos de la Comunidad de Ciudad y Tierra y sobre los que el concejo segoviano mantiene el pleno dominio limitando roturaciones y acotamientos» (Sáez Pombo, 2000: 34).

Es decir que el modelo de aldeas o núcleos-ruedos-dehesas-eriales y pastos en las cumbres tendría raíces antiguas aunque sin duda su consolidación



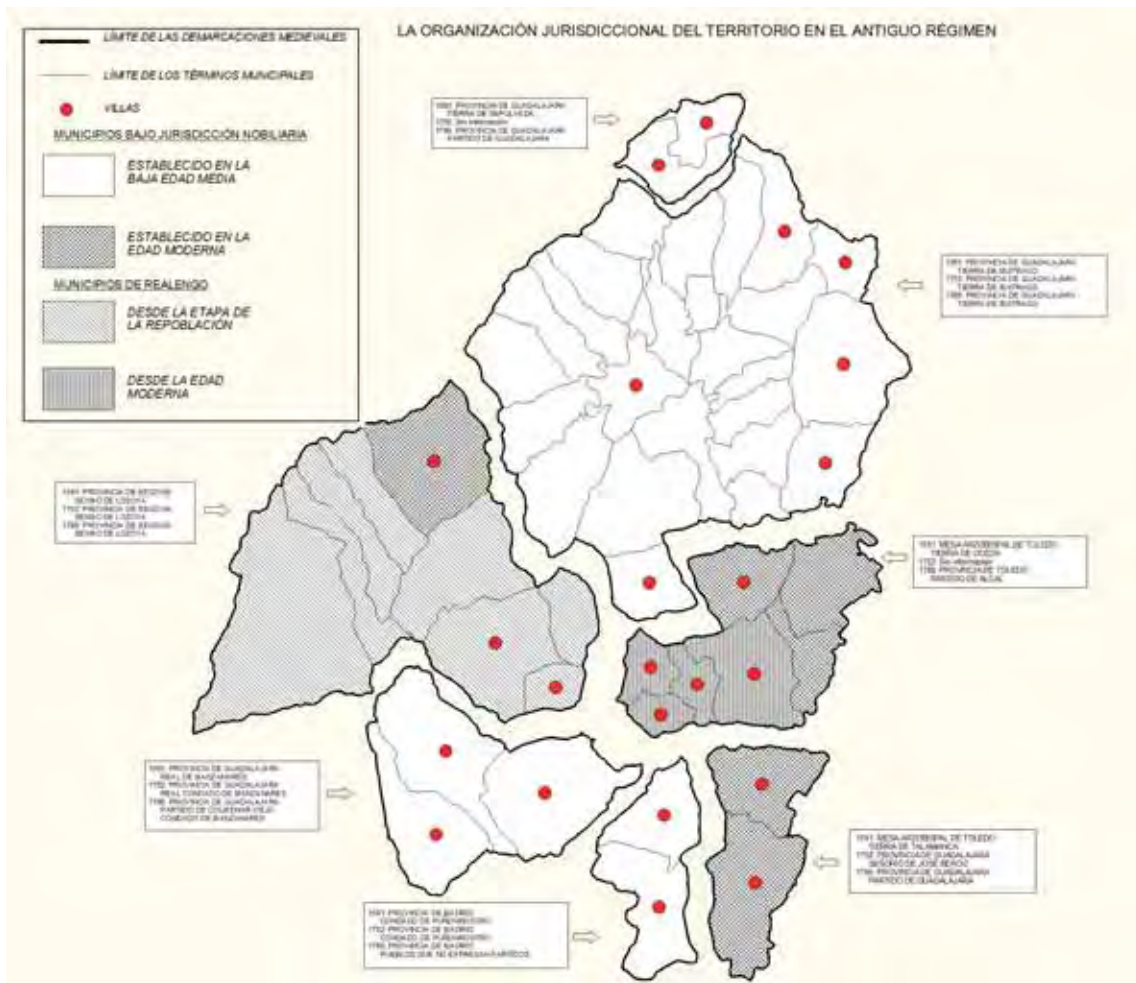


Figura 1. Las jurisdicciones de la Sierra Norte Madrileña durante el Antiguo Régimen. Fuente: Sáez Pombo, 2000: 26.

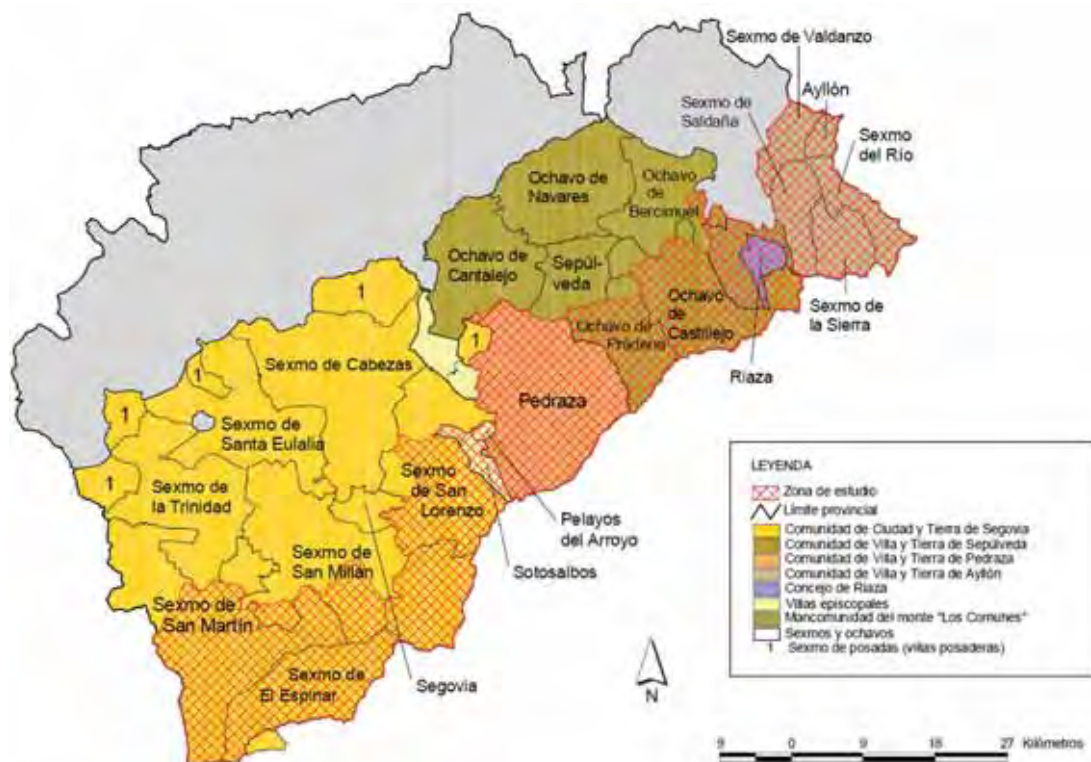


Figura 2. Las jurisdicciones segovianas durante el Antiguo Régimen Fuente: Madrazo García de Lomana, 2007: 517.

se desarrolló a lo largo de varios siglos<sup>4</sup>. Desde el punto de vista del paisaje, este modelo heredado de los sistemas tradicionales ha mostrado una considerable estabilidad e inercia con el dibujo nítido de espacios arbolados que se recortan como parches entre los cultivos de piedemontes y los rasos de las cimas: son las manchas y perfiles arbolados de las dehesas y montes concejiles habitualmente encerrados en sus muros, que siguen siendo elementos distinguidos de estos paisajes.

Pero los conflictos entre usuarios dentro de las Comunidades y desde fuera de ellas, las ventas de baldíos considerados de realengo llevadas a cabo por la Corona en varias ocasiones, y otros acontecimientos que se reflejan minuciosamente en las fuentes archivísticas posteriores, sometieron a presiones fortísimas a muchos de estos espacios. Los documentos de los siglos XVI al XVIII muestran la común preocupación por la disminución de la superficie forestal, amenazada genéricamente por el intenso y, a veces, inapropiado aprovechamiento de los productos (madera, leña y carbón, cortezas, bellotas, etc.), por la presión ganadera y por la rotura de tierras en términos comunes, subiendo los labrantíos (las centeneras) en momentos de gran presión demográfica, y consiguiente necesidad de recursos, hasta altitudes que hoy parecen inverosímiles.

Muchos conflictos se dan en todo caso dentro de cada comunidad: sexmos y ochavos serranos que suelen reflejar la pugna entre los propietarios de grandes cabañas (la Mesta, pero no sólo) y los pequeños ganaderos estantes. También chocan los intereses por arrendar los montes defendidos por los ayuntamientos de Villa y Tierra con el mantenimiento de usos comunales sostenidos por los vecinos de la Tierra. En la vertiente sur los patrimonios concejiles fueron aumentando a costa de los de Villa y Tierra de Segovia; por su parte, el monasterio de El Paular se va haciendo progresivamente con los aprovechamientos madereros de los pinares del Alto Valle del Lozoya, y, pese a los esfuerzos de Segovia, consigue que la Corona le venda el más valioso pinar de Rascafría, Cabeza de Hierro, aunque con limitaciones en los derechos de uso ya que los vecinos mantienen sus derechos de pastos y

leñas. Cabeza de Hierro no fue el único pinar vendido: el Monte de las Conveniencias, cuya propiedad y usufructo compartían las Tierras de Uceda y Segovia también es privatizado; y, por supuesto, la venta obligada del pinar de Valsaín a la Corona en 1761 (Grau, 1969: 300-301). Todo ello contribuye a la reducción de las tierras abiertas al uso libre y gratuito de los vecinos de la Tierra de Segovia. Según los cálculos de Ester Sáez, a mediados del XVIII, los alijares suponían solo el 37,5 % de la superficie pública del Sexmo de Lozoya figurando el resto como predios concejiles.

Con todo, tan cierto como que aldeas y pueblos consiguieron mantener al menos en parte sus patrimonios formados por dehesas y por montes, es que las



Panorámica del pinar "Cabeza de Hierro".



Pino de grandes dimensiones en el límite altitudinal del pinar. Monte "La Cinta"

4 Lo que supondría una réplica de fundamento historiográfico a la hipótesis avanzada a finales del siglo pasado en el sentido de que la antigüedad de las dehesas es muy relativa y de que la mayoría no habrían completado un primer ciclo o turno desde el adhesamiento inicial, hasta el punto de que no tienen por qué considerarse sistemas sustentables. Parece en cambio incuestionable que, en muchos lugares, a finales de la Edad Media el adhesamiento se presentaba ya como algo generalizado, lo que supondría que no se puede asociar los problemas de regeneración que se presentan actualmente en muchas dehesas con las características intrínsecas del adhesamiento, sino con problemas variados que han afectado a estas fincas desde mediados del siglo XIX (Llorente Pinto, 2003, 135-140).

Comunidades de Villa y Tierra mostraron una voluntad decididamente protectora de los terrenos colectivos. Prohibieron con desigual fortuna romper las tierras del común, cortar y desarraigar en los montes todos los géneros de árboles, y también cerrar tierras para no impedir el disfrute común y gratuito. Con mayor ahínco aún defendieron su dominio sobre los pinares de Valsaín, Cabeza de Hierro, Navafría o El Espinar. De hecho, cuando los ingenieros identificaron estos montes como verdaderas reservas forestales en los que ensayar la silvicultura del rendimiento sostenido, deberían haber reconocido que eran herencia del sistema concejil y comunal, que, aun explotándolos intensamente, permitió su regeneración secular. No es poca cosa para un régimen de aprovechamientos que demostró una notable estabilidad a lo largo de varios siglos, lo que sin duda habla en favor de su relativa sostenibilidad.

#### **ADMINISTRACIÓN FORESTAL Y BÚSQUEDA DEL RENDIMIENTO SOSTENIDO DE MADRAZO, PERO CONTINUIDAD DE LOS PAISAJES**

A mediados del siglo XVIII cristaliza un primer precedente de administración forestal centralizada, regulada por la Ordenanza de Montes y Plantíos de 1748, con la que la Corona aspiraba a controlar y reforestar los predios forestales del entorno de la Corte. A pesar de que el esfuerzo normativo y administrativo fue intenso y que las exigencias a las comunidades locales eran rigurosas, la intervención efectiva de la Superintendencia de Montes y Plantíos (1748-1833), tuvo unas consecuencias nimias sobre los espacios forestales de los alrededores de Madrid (Madrazo García de Lomana, 2003). Sin embargo, no es hasta 1863, cuando la gestión estatal queda consagrada por la moderna Ley de Montes, aunque ya las Ordenanzas de treinta años antes (1833) habían establecido el principio de tutela administrativa de los montes públicos. Claro que, lo que nos interesa subrayar aquí es que, como demuestran los estudios monográficos, si bien las estructuras de esos paisajes eran sometidas a un auténtico terremoto, que sacudía la propiedad de los montes y la gestión de sus aprovechamientos, la continuidad de la cubierta forestal fue la nota dominante en una y otra vertiente de la Sierra de Guadarrama.

Un hecho de primera importancia radica en que la nueva relación de propiedad forestal e ideología liberal quede mediatizada en su desenvolvimiento por el proceso desamortizador. Se entiende que privatizar los montes es condición inexcusable para ponerlos a producir pero que, por razones «cosmológicas» que tienen que ver con la influencia física que ejercen los bosques, el monte alto maderable se tiene que mantener bajo propiedad pública, del mismo modo que por razones

sociales y económicas quedarían exceptuados de la enajenación los terrenos de aprovechamiento comunal previa declaración de serlo (artículo 2.6 y 2.9 de la ley general de desamortización de 1 de mayo 1855, conocida como Ley Madoz) y también las dehesas de los pueblos destinadas a pasto de ganado de labor de las poblaciones (artículo 1º de la ley de 11 de julio 1856). Por la primera y fundamental causa, la acción del Gobierno debe extenderse a la región alta y media cuyas masas forestales tienen que quedar excluidas de la venta (Gómez Mendoza, 1992: 19-28 y Mata Olmo y Llop Pomares, 1989). De modo que la finalidad productiva lleva asociada complementariamente la de conservación. Tiene que haber un «orden territorial», una «regionalización geográfica» que en última instancia logre preservar los espacios forestales de las regiones altas por ser de interés general y utilidad pública.

En relación con lo que estamos analizando, esta consideración supone en buena medida despojar de sus derechos consuetudinarios a las comunidades vecinales. Las Juntas de las Universidades de Tierras ya habían sido extinguidas dejando sin titular efectivo a las tierras comunales, corriendo su defensa a cargo de juntas provisionales. Pero las resistencias a la desarticulación de usos y derechos comunales fueron intensas. La oposición a la venta se manifestó, por ejemplo, al conseguir que ciertos montes se catalogaran como robledales o pinares (las especies exceptuadas de hecho como propias de las regiones altas de influencia física sobre las poblaciones) cuando realmente estaban poblados de especies susceptibles de ser enajenadas como las encinas. También parece evidente que se adujo aprovechamiento comunal en los términos previstos por la Ley de Montes de 1863, o que se ocultaron patrimonios concejiles.

Las investigaciones sobre el proceso desamortizador en el Guadarrama son muy detalladas y muestran, en términos generales, que los criterios de exceptuación a la desamortización por especie arbórea funcionaron bastante bien, manteniéndose en su mayoría los rebollares y masas de silvestre, mientras se privatizaron proporcionalmente más fresnedas y encinares, aunque incluso en estos casos algunos montes fueron catalogados por los procedimientos dichos. De modo que, por ejemplo en el sector central, en los municipios de carácter eminentemente forestal, los porcentajes vendidos a particulares fueron menores (Cercedilla, Navacerrada, Los Molinos, Guadarrama), mientras que eran mayores en terrenos de baja pendiente sometidos a cultivo desde antiguo (Colmenar Viejo, Galapagar, Chapinería, Villa del Prado, Colmenarejo, Navalagamella, etc.) (Manuel Valdés, 1996: 236). En la vertiente segoviana, el proceso enajenador en los antiguos términos comunes de Rianza y Sepúlveda afecta aproximadamente a 40 % del monte en lotes de tamaño grande, a los que difícilmente

podían aspirar los pequeños labradores de los pueblos (Madrado García de Lomana, 2007). Pero en todos los sectores, las tierras más afectadas por las ventas fueron los rasos de las altas vertientes pertenecientes a las comunidades de Villa/Ciudad y Tierra (por ejemplo en la tierra de Buitrago donde entre 1861 y 1862 se traspasaron a particulares la mayor parte de los patrimonios públicos), superficies de matorral formadas tanto por pionales de las zonas cimeras como brezales, jarales y tomillares.

El resumen de lo ocurrido en Rascafría es muy expresivo: «[el] trasvase a particulares de las altas laderas de las alineaciones montañosas que delimitan el término y forman la cabecera del río Lozoya –desarboladas y pertenecientes a una institución que carece de personalidad jurídica para defender sus propiedades–, el mantenimiento del carácter público de los robledales municipales –excepción por extensión y especie dominante– y titularización de los escasos prados que conservaban la titularidad municipal a mediados del siglo XIX son los cambios más relevantes» (Sáez Pombo, 2000: 199). Pero la cosa no acaba

ahí porque se anulaban algunas subastas, precisamente las que afectan a las zonas de mayores pendientes, lo que permitió a los ingenieros tratar de evitar la venta de las suertes aún no vendidas y pobladas de silvestre de Peñalara y de Cabeza de Hierro (Monte *La Cinta*) incluyéndolos en el Catálogo de montes exceptuados desde 1864 y consiguiendo que aparecieran con titularidad estatal en el de 1901 los cuarteles no vendidos del Cerro del Ventisquero y la Laguna de Peñalara, así como Hoyo de Pepe Hernando. (Figura 3). Constituye un buen testimonio de cómo se invierte la tendencia patrimonial en el Alto Valle de Lozoya, cuando el Estado pasa de vender a comprar. Tiene que ver con la temprana constitución de la Comisión de Repoblación de la Cuenca de Lozoya como consecuencia de la ley de repoblación de 1877, que inaugura el periodo de compras de tierras en la cabecera por el Estado.

En comparación con la masiva privatización de los comunes del Sexmo de Lozoya, los patrimonios municipales de Rascafría y de Oteruelo, formados sobre todo por dehesas municipales de rebollos sobre las laderas entre 1.100 y a 1.400 metros sufrieron mucho

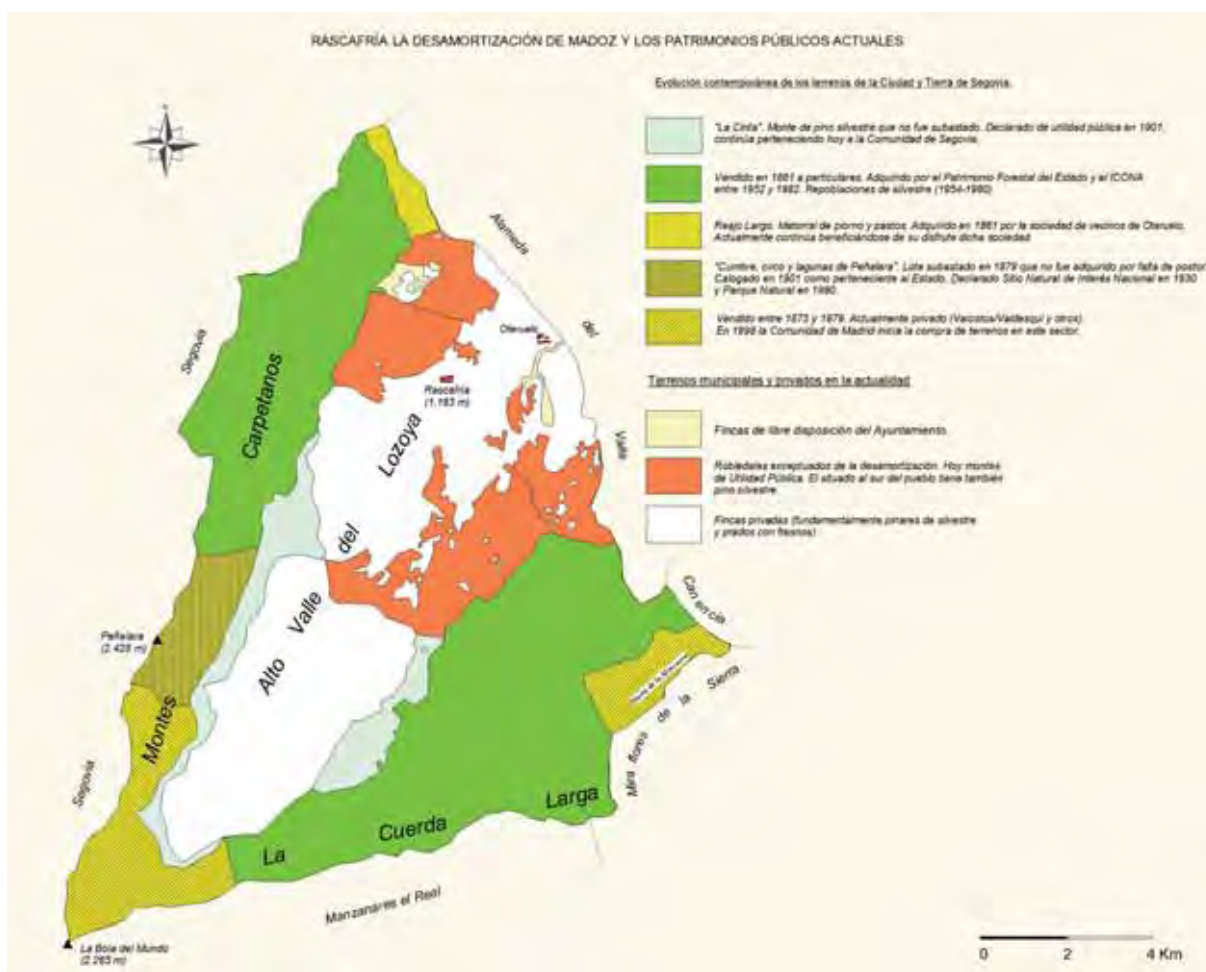


Figura 3. La desamortización civil y los patrimonios públicos actuales en Rascafría  
Fuente: Sáez Pombo, 2000: 200.

menos los embates de la privatización. Y lograron, en general, mantener su sistema de gestión de tallares, que la nueva silvicultura técnica que se estaba imponiendo connotará de forma negativa como monte bajo, lo que conllevaba implícitamente la voluntad de convertirlo en monte alto. Sin embargo, la falta de interés forestal y la carencia de recursos de la administración de Montes, provocaron que en lo que hace a estos tallares no existiera una verdadera ruptura en su modo de uso respecto a su aprovechamiento tradicional.

En efecto, al mismo tiempo que las economías campesinas empiezan a ser desarticuladas por el funcionamiento de economías sectorializadas de lógica económica externa -en particular la maderera- la nueva administración forestal, formada por funcionarios jerarquizados, trata de controlar los modos de gestión tradicionales que por otra parte han quedado desprovistos de amparo legal. Son ingenieros de montes, formados científica y técnicamente en la dasonomía sajona, que aspiran a conseguir la explotación racional de los recursos renovables, con prioridad maderera y fijación de aprovechamientos. Una vez promulgada la ley de montes de 1863, los planes de aprovechamientos municipales de carácter anual fijan las condiciones de uso y sus límites (habitualmente límites de carga ganadera) y todos los productos son sometidos a pública subasta, con lo que la privatización se logra también a través de la gestión. Por último, las instrucciones de ordenación de 1857 y las disposiciones de 1890 vinieron a establecer los principios doctrinales de los complejos planes de ordenación para regularizar las masas y asegurar su mantenimiento y producción. En principio, pues, la discrecionalidad técnica y administrativa venía a sustituir a los modos de gestión tradicionales.

No ocurrió así, o al menos no ocurrió desde al principio y salvo en algunos montes muy específicos como los del Patrimonio de la Corona. Los intentos por limitar algunos esquilmos no resultaron lo bastante

efectivos ya que, comparando los aprovechamientos de pastos y leñas de finales del siglo XVIII y principios del XX en algunas zonas de la vertiente norte de la Sierra, se constata en la segunda fecha, en el caso del carbón, un volumen de aprovechamiento semejante, si no superior (Madrazo García de Lomana, 2007: 328). El aprovechamiento intensivo de los tallares de rebollo en los montes concejiles, con cortas de de leña por turnos de entre diez y veinte años, no parece sufrir muchas variaciones.

Hasta que se abandonaron prácticamente los aprovechamientos leñosos a mediados del siglo XX los criterios técnicos para la corta de tallares estaban, básicamente, fundados en la experiencia, con expresiones indefinidas como esta de 1784: «dejar las guías y resalvos correspondientes y con arreglo a ordenanza, estilo y práctica de carbonero...» o esta otra de 1822: «que las operaciones de reducción del monte dejen los resalvos necesarios una vez realizada la corta [...] de acuerdo a la ordenanza de 1748» Estas condiciones técnicas no variaron mucho con la implantación de la moderna administración forestal desde mediados del siglo XIX, pues sí, por ejemplo, el testimonio de un carboneo de 1832 en los términos de Riaza, especificaba la obligación de dejar 20 resalvos por fanega (unos 50 por hectárea) y la prohibición de arrancar cepas o raíces, uno de los primeros ingenieros de montes que teorizó sobre la cuestión, proponía para las matas de rebollo una cría de 13 años y que tras la tala se reservaran tan sólo 35 resalvos por hectárea (Madariaga, 1917). Estas cifras quedan muy lejos de los 200 resalvos que empiezan a dejarse en cada corta a raíz de las ordenaciones de mediados del siglo XX cuando se presiente el abandono de la leña como combustible (Gómez Mendoza, Gómez Mediavilla, G., López Estebáñez, N., Madrazo García de Lomana, G. y Sáez Pombo, E. 2008). En todo caso, esta forma de explotación tradicional deja todavía hoy su huella en el paisaje de las dehesa, por la estructura heredada de su masa forestal (López



Resalvos tras una poda en el “Los Comunes” (Comunidad de Villa y Tierra de Sepúlveda).



Detalle de la estructura del tallar en la “Dehesa del Alcalde” (Riaza)

Estebáñez, 2003) y, de manera más concreta, por la abundancia de carboneras aún visibles en los montes que se han estudiado<sup>5</sup>.

Sirvan estos datos y estos ejemplos de manifestación de la persistencia de usos y paisajes pese a los cambios en los discursos técnicos de ordenanzas e instrucciones forestales.

## LOS NUEVOS PAISAJES DEL ABANDONO POBLACIONAL Y DE LA REFORESTACIÓN

A mediados del siglo pasado al quebrar las bases productivas del mundo rural español y producirse la revolución energética que libera del abastecimiento al carbón vegetal, sí que asistimos a cambios generalizados de los paisajes forestales y de la estructura de la cubierta (Cuadro 2). Con considerable retraso sobre otros países de nuestro entorno, en los que el tránsito de sistemas energéticos solares a otros de origen fósil es anterior (Sieferle, 2001), no es hasta mediados de los años cincuenta cuando se hace evidente el progresivo aumento de la superficie forestal y arbolada, producto de las repoblaciones realizadas durante la dictadura y de la regeneración del bosque en tierras de cultivo y de paso ganadero abandonadas por las sociedades rurales. Hemos estudiado en más de una ocasión los datos generales de la repoblación y la relación de las actuaciones con los discursos dominantes de reconquista del suelo por el árbol (Gómez Mendoza y Mata Olmo, 1992 y 2002), ejemplificando tales dinámicas también a escala comarcal (Fernández Muñoz, 2001; López Estebáñez, 2003; Madrazo García de Lomana, 2007).

Pero lo que pretendemos aquí es rescatar algunos datos de lo investigado para la Sierra del Guadarrama en sus diferentes sectores. Si desde mediados del siglo XIX se habían liquidado, como hemos visto, las bases fundiarias y estatutarias de los sistemas comunales concejiles, hubo que esperar casi cien años desde la creación del Cuerpo de Montes para que fuera definitivo el cambio en la economía de los espacios rurales, hecho fundamental para poder iniciar el programa repoblador que reclamaba el forestalismo español desde su constitución. La excepción la constituye el alto Valle

del Lozoya y el Cerro de los Alcabenos en la zona de Turbias del Lozoya (Alpedrete de la Sierra, provincia de Guadalajara), donde la Comisión de la Cuenca inició los trabajos de planificación y repoblación en el último decenio del siglo XIX y primeros años del XX (Sáez Pombo, 2000: 203-206; López Estebáñez y Sáez Pombo, 2003).

El Plan para la repoblación forestal de España elaborado para el gobierno de Burgos en 1939 recogía en las páginas dedicadas a la descripción forestal de la región carpetana, un diagnóstico de desolación forestal basado en el autorizado reconocimiento de la Sierra por Máximo Laguna en 1864, y una recomendación de inmediata intervención con forestaciones en los rasos de las vertientes de la Sierra de Guadarrama. En 1942, se declaraba de interés nacional la repoblación de la parte de la zona forestal de la comarca denominada «Paramera de Ávila, Guadarrama y Somosierra». Se trataba de un amplio territorio, las disposiciones eran de carácter genérico, pero sí permitían la declaración de utilidad pública, de ocupaciones y expropiaciones y el deslinde de perímetros de repoblación obligatoria<sup>6</sup>.

Retendremos solo los siguientes hechos. El PFE fue el organismo que más directamente intervino en el proceso, comprando y consorciando gran número de predios y ejecutando las forestaciones con notable celeridad. Valgan como ejemplo de esas intervenciones del PFE las repoblaciones en el «núcleo de Somosierra», en los rasos de la Mujer Muerta y de los Montes Carpetanos –sobre el valle del Lozoya o en la cabecera del Pirón (Madrazo García de Lomana, 2007: 376-444), en las vertientes de San Lorenzo de El Escorial, la Pedriza del Manzanares (Manuel Valdés, 1996: 398-404), en Puebla de la Sierra (Sáez Pombo, 2000: 225) y en la cabecera del Jarama o en el Alto Sorbe (Fernández Muñoz y López Estebáñez, 1999).

Los montes comprados y consorciados se corresponden en gran medida con los rasos serranos vendidos un siglo antes en desamortización, pero la vuelta al dominio público (Estado) no supuso retorno a sus antiguos propietarios y desde luego en estos casos sí que se consumaba la sustitución en la gestión. Lo que sin duda refleja tres aspectos: la porfiada lucha del forestalismo español por recuperar muchos de los predios forestales vendidos en desamortización, la posición cimera de los rasos como herencia de un sistema concejil, que, con su repoblación, desaparecen definitivamente, y que fueron precisamente aquellas grandes fincas las que

5 Un inventario exhaustivo de las carboneras aún visibles en algunos talleres de las vertientes norte y sur de la Sierra de Guadarrama (Riaza, Braojos, Horcajo de la Sierra) revela una densidad sobresaliente de entre nada menos que entre 0,9 y 1,56 carboneras por ha, densidades parecidas e, incluso, superiores a las observadas en algunos sectores del Pirineo central -1,4 carbonera/ha- (Pèlachs Mañosa, 2004). Por otra parte la distancia media está por debajo de las obtenidas por este mismo autor (40,94 m en Somosierra frente a 48 m en Pirineos). La abundancia de carboneras prueba, igualmente, que los productos leñosos de estos montes tenían por destino la villa de Madrid y la Corte, ya que para abaratar el transporte se imponía hacer el fabrico en el monte.

6 La amplia documentación del Patrimonio Forestal del Estado (PFE) que reposa en el fondo documental del monte y en los distritos forestales ha permitido llevar a cabo pormenorizados estudios de las actuaciones repobladoras, aunque haya todavía ciertas lagunas en ese amplio territorio de la «Paramera de Ávila, Guadarrama y Somosierra».





resultaron más accesibles desde el punto de vista físico y patrimonial para la obra repobladora del PFE.

Terminamos con algunas consideraciones que tienen que ver con aspectos paisajísticos y de sostenibilidad de las repoblaciones consideradas desde una perspectiva histórica. Junto con los rasos cimeros y las altas vertientes que, como hemos visto, son las más intervenidas por las repoblaciones del franquismo, también algunos piedemontes se vieron tocados, por razones de riesgo hidrológico –real o supuesto– en pisos más propios de los rebollos y de las encinas que de los pinos que se utilizaron (*Pinus sylvestris* o *Pinus nigra*). La plantación de resinosas sobre tallares de quercíneas ha sido particularmente discutida. También lo han sido las técnicas de reforestación, sobre todo cuando se cambia del ahoyado manual y fajas abiertas con bueyes a las terrazas preparadas con bulldozer, de mucha repercusión sobre los paisajes. La artificialidad de las terrazas abiertas con maquinaria pesada es uno de los aspectos que más rechazo crea, por su fuerte impacto visual y sus consecuencias ecológicas (García López, Martín Muñoz y Allúe, 1998).

Con ser estos aspectos importantes, quizá más decisivo aún sea la discutible sostenibilidad de los nuevos pinares, al menos hasta la fecha. Como hemos señalado con insistencia, usos múltiples de los montes, presión demográfica y regulación concejal explican la perdurabilidad de los paisajes históricos forestales. Ocurre, en cambio, que las repoblaciones contaron con tanto impulso y dinero para ser acometidas, como retraimiento, pérdida de prestigio y falta de inversiones para ser mantenidas y manejadas. Como hemos tenido ocasión de decir, la administración repobló en muchas ocasiones guiada por la accesibilidad de las fincas, de

modo que la posibilidad de comprar o consorciar predios con facilidad (entre otras cosas por la emigración de las poblaciones locales) determinó la automática repoblación. No faltan ejemplos de ello en la Sierra de Guadarrama, por ejemplo en zonas donde las masas forestales no son más que pequeñas manchas de dibujo geométrico, ajustadas a los límites de pequeñas fincas adquiridas por el PFE, o también montes aislados, desconectados de masas continuas. A la inversa, la imposibilidad de adquirir o consorciar algunos montes en zonas de intervención prioritaria ocasiona discontinuidades en las masas de coníferas que cubren las vertientes serranas. De modo que, como dejó dicho uno de los primeros directores del ICONA del Estado constitucional, Santiago Marraco, se repobló más dónde, cómo y cuándo se pudo, que dónde, cómo y cuándo debía.

Faltaron además recursos y faltó tiempo para gestionar las masas creadas, desde luego para enriquecerlas florística y estructuralmente, pero también incluso para aplicar cuidados silvícolas indispensables. Las masas de repoblación aparecen así con mucha frecuencia como el pariente pobre de las montañas españolas: casi siempre demasiado espesas, a menudo desmedradas, con abundantes pies caídos, exceso de leñas secas en el sotobosque, que las hacen estar más expuestas a las plagas e incendios.

## EL CAMINO HACIA UNA NUEVA GESTIÓN FORESTAL SOSTENIBLE DE LOS MONTES

Aunque se ha hecho esperar, la Ley de montes dictada en 2003 se decanta por la gestión forestal sostenible definida en la misma ley como «la organización, administración y uso de los montes de forma e intensidad



Piedemonte de la Sierra en Cerezo de Arriba. Monte “El Raso” antes y después de su repoblación.  
Fuente: AICONA, SECC. ADQUISICIONES, CARP. 879, Monte “El Raso”

que permita mantener su biodiversidad, productividad, vitalidad, potencialidad y capacidad de regeneración, para atender ahora y en el futuro, las funciones ecológicas, económicas y sociales relevantes en el ámbito local, nacional y global, y sin producir daños a otros ecosistemas». Pero además la nueva ley establece la dimensión territorial de la política forestal y, a partir de ella, su incardinación con las otras políticas de ordenación del territorio, la cohesión territorial y subsidiariedad. En definitiva, si antes la política forestal se relacionaba especialmente con la política hidrológica, ahora queda ligada además a las políticas de protección de la naturaleza y de ordenación del territorio. Se pretende también recuperar, a través de los Planes de Ordenación de Recursos Forestales, la escala comarcal de la que la política forestal había carecido en los últimos años.

Queda saber si la renovación de las políticas, de las normas y de los discursos forestales se traduce en una puesta a punto y aplicación de nuevas técnicas silvícolas, que mantengan lo más válido de la dasonomía y de la silvicultura ortodoxa. Hay indicios en este sentido, expresados en diversas estrategias, planes e instrucciones forestales de las Comunidades Autónomas, pero también en los discursos de otras políticas de incidencia territorial, valga de ejemplo el reconocimiento en muchas instancias de las oportunidades que ofrece para el sector forestal la red Natura 2000, que representa 24 % del territorio español. Entre otras muchas prácticas, se están llevando a cabo ensayos de sustitución de pinares sometidos a situaciones de estrés por monte bajo de frondosas (Garitacelaya Saldise, 2007); se ensaya la adaptación de modelos silvícolas generales establecidos para el monte bajo de rebollar en función de los objetivos y características de cada masa aplicando por tanto una silvicultura que se podría llamar 'a la carta' (García González, 2007); se intenta recuperar técnicamente la ordenación pascícola que se reconoce injustamente pospuesta o ignorada por la silvicultura técnica clásica. Muchos tópicos de la ortodoxia forestal están pues cayendo y una consideración más flexible parece imponerse.

Estas actuaciones siguen, sin embargo, siendo demasiado puntuales y discriminadas. La gestión actual de los montes bajos carece de patrón común debido en buena medida a su falta de funcionalidad económica y a la diversa estructura y vivacidad de las matas. En los casos estudiados de las Sierras de Somosierra-Ayllón esa indefinición ha servido para que los talleres de melojos continúen mostrándose como una herencia de usos y paisajes tradicionales.

No faltan, además, actuaciones que en nada ayudan a cambiar la relativa insensibilidad territorial de las repoblaciones masivas. Es el caso de las forestaciones

agrarias establecidas en el marco de la reforma de la Política Agraria Común, en cuya aplicación se advierte cierta improvisación y ausencia de criterios ambientales y paisajísticos, de modo que se ha mutado en poco más que una línea más de subvenciones, hasta el punto de que las forestaciones han podido incluso empobrecer agrosistemas de gran riqueza ecológica y cultural, como es el caso de las dehesas (Lacasta Reoyo y Mata Olmo, 2000: 224-230). Con todo, la mayoría de las voces del sector se han alzado a favor de que debían haberse aprovechado estas actuaciones con criterios más integrales y con el objetivo más de crear una masa forestal sostenible que de limitarse a compensar la pérdida de renta del propietario. Pero en su momento, la administración forestal no quiso saber demasiado de esa acción forestadora.

En suma, podemos terminar por donde empezamos. Orazio Ciancio, profesor de Florencia, ve en la silvicultura sistémica y en la gestión forestal sostenible, unidos a la conservación de la biodiversidad, un gran paso adelante para construir la casa común de los forestales y de los ambientalistas. «Han pasado los tiempos, decía, de los Hartig y Cotta, de Lorentz y Parade, de Berenger y Serpieri, más recientemente, de Pavari y Patrone, de Philipps y Susmel. [Ha llegado el momento] de pasar de la silvicultura canónica, linear, intensiva, comercial –subalterna fundamentalmente de la lógica industrial- a la silvicultura sistémica, no-linear, extensiva y adaptativa, fuertemente unida a la gestión sostenible y la conservación de la biodiversidad». A lo que nosotros nos permitimos añadir, anclada en la comprensión territorial y atenta a la calidad y diversidad de los paisajes y a las claves de las gestiones tradicionales con éxito. En este sentido, el recorrido por la historia de los paisajes sería no solo un argumento de autoridad para comprender e interpretar los que vemos, sino también un medio para valorar el patrimonio natural y cultural de los monte y establecer con cordura su futuro.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARTHOD, Ch. (2001) : «Politique forestière et patrimoines naturels forestiers», *Revue Forestière Française*, LIII, n° especial: 29-36.
- BERTRAND, G. (1975): «Pour une histoire écologique de la France rurale» in Duby, G. y Wallon, A. (eds.), *Histoire de la France rurale*, París, Le Seuil : 36-116.
- BERTRAND, G. (1998) : «Préface. Du naturel à l'anthropique», en Galop, D. *La forêt, l'homme et le troupeau dans les Pyrénées. 6.000 ans d'environnement entre Garonne et Méditerranée*, Toulouse, GEODE, Laboratoire d'Ecologie Terrestre, FRAMESPA.
- DUBOIS, J.J., (1986) : « Du pollen au cadastre : contribution sur les aspects de méthode». *Actes du Colloque. «Du pollen au cadastre »*. Hommes et Terres du Nord. 2-3 : 84-88.
- ESTEVE PARDO, J. (1995): *La realidad y perspectivas de la ordenación jurídica de los montes (Función ecológica y explotación racional)*, Generalitat de Catalunya, Escola d'Administració Pública de Catalunya, Civitas.
- ESTEVE PARDO, J. (2005): *Derecho del medio ambiente*, Madrid, Marcial Pons.
- FERNÁNDEZ MUÑOZ, S. Y LÓPEZ ESTÉBANEZ, N. (1999): «Evolución del paisaje propiedad y repoblaciones forestales en los montes del sector occidental de Cantalojas (Guadalajara)», *Cuad. Soc. Esp. Cien. For.*, 8: 75-83.
- FERNÁNDEZ MUÑOZ, S. (2001): «Consecuencias socioeconómicas y territoriales de las repoblaciones forestales en el Alto Sorbe (Guadalajara)», *Ería*, 58: 183-204.
- GALOP, D. (1998): *La forêt, l'homme et le troupeau dans les Pyrénées. 6.000 ans d'environnement entre Garonne et Méditerranée*, Toulouse, GEODE, Laboratoire d'Ecologie Terrestre, FRAMESPA.
- GAMBORG, CH. Y LARSEN, J.B. (2002): «“Back to nature”: a sustainable future for forestry?», *Forest Ecology and Management*, 179 (2002): 559-571.
- GARCÍA GONZÁLEZ, M.D. (2007): «Tratamientos selvícolas observados en masas puras de rebollo (*Quercus pyrenaica* Wild.) en Castilla y León», *Cuad. Soc. Esp. Cien. For.*, 21: 43-48.
- GARCÍA LÓPEZ, J.M.; MARTÍN MUÑOZ, J.C. Y ALLUÉ, M. (1998): «Bases para la ordenación de las masas artificiales de propiedad estatal en la provincia de Segovia», *Cuad. Soc. Esp. Cien. For.*, 6: 49-60.
- GARITACELAYA SALDISE, J. (2007): «Sustitución de un pinar de pino carrasco quemado utilizando el monte de frondosas», *Cuad. Soc. Esp. Cien. For.* 21: 55-60.
- GÓMEZ MENDOZA, J. (1992): *Ciencia y política de los montes españoles (1848-1936)*, Madrid, ICONA Clásicos.
- GÓMEZ MENDOZA, J. (1997): «Historia reciente del paisaje forestal español en las áreas de montaña» en Martínez de Pisón, E. y Sanz Herráiz, C. (eds.): *Estudios sobre el paisaje*, UAM-Fundación Duques de Soria: 85-102.
- GÓMEZ MENDOZA, J. (2007). «La ciencia forestal: del rendimiento sostenido a la gestión sostenible» en 4º Congreso Forestal Español: *La ciencia forestal: respuestas para la sostenibilidad*, Conferencias invitadas, 26-30 septiembre de 2005. Zaragoza, Sociedad Española de Ciencias Forestales, Gobierno de Aragón, Departamento de Medio Ambiente: 121-138.
- GÓMEZ MENDOZA, J. GÓMEZ MEDIAVILLA, G., LÓPEZ ESTEBÁNEZ, N., MADRAZO GARCÍA DE LOMANA, G. Y SÁEZ POMBO, E. (2008): «Aprovechamientos y dinámicas en los talleres de rebollo de Somosierra-Ayllón», *Actas de IV Reunión de Historia Forestal, Toledo diciembre 2008*, Sociedad Española de Ciencia Forestal (en prensa).
- GÓMEZ MENDOZA, J. Y MATA OLMO, R. (2002) «Repoblación forestal y territorio, 1940-1971, Marco doctrinal y estudio de la Sierra de los Filabres», *Ería. Revista de Geografía*, 58: 129-155.
- GRAU, M. (1969): «Notas sobre la venta de los pinares de Valsain y Riofrío», *Estudios Segovianos*, 297-308.
- LACASTA REOYO, P. Y MATA OLMO, R. (2000): «Medidas agroambientales y reforestación de tierras agrarias en Madrid: consideraciones desde un espacio rural metropolitano» en Paniagua Mazorra, A. (ed.): *Naturaleza, agricultura y política agroambiental en España*, C.S.I.C.: 211-214.



- 
- LAGUNA Y VILLANUEVA, M. (1864): *Memoria de reconocimiento de la Sierra de Guadarrama bajo el punto de vista de la repoblación de sus montes*, Madrid, Imprenta Nacional.
  - LÓPEZ ESTÉBANEZ, N. (2003): *Dinámica de la vegetación en relación con los cambios de uso*, Universidad Autónoma de Madrid, Tesis doctoral. Inédita
  - LÓPEZ ESTÉBANEZ, N. Y SÁEZ POMBO, E. (2002): "Gestión, aprovechamiento y paisaje de las dehesas de Guadarrama y Somosierra (Madrid)", *Eria*, 58: 231-245.
  - LÓPEZ ESTÉBANEZ, N. Y SÁEZ POMBO, E. (2003): «Análisis y valoración de los estudios de la Comisión de Repoblación de la Cuenca del Lozoya en Madrid (1890-1895)», *Cuad. Soc. Esp. Cien. For.* 16: 255-260.
  - LLORENTE PINTO, J.M. (2003): «El problema de la sostenibilidad de las dehesas a la luz de la evolución histórica de los terrenos adeshados», *Cuad. Soc. Esp. Cien. For.* 16: 135-140.
  - MADARIAGA, M.J. DE (1917): «Producción de un monte bajo de rebollo», *Revista de Montes*, t. XXXXI, 966: 276-279.
  - MADRAZO GARCÍA DE LOMANA, G. (2003): "Las certificaciones de montes y plantíos en la vertiente segoviana de la Sierra de Guadarrama", *Cuad. Soc. Esp. Cien. For.* 16: 55-60.
  - MADRAZO GARCÍA DE LOMANA, GONZALO (2007): *La evolución del paisaje forestal en la vertiente segoviana de la Sierra de Guadarrama*, Universidad Autónoma de Madrid, Tesis doctoral, Inédita.
  - MANUEL VALDÉS, C. (1996): *Tierras y montes públicos en la sierra de Madrid (Sectores central y meridional)*, Madrid, M.A.P.A.-Serie Estudios.
  - MATA OLMO, R. Y LLOP POMARES, M. (1989): «Clasificación y catálogos de montes públicos en el marco de la legislación desamortizadora y forestal del siglo XIX», *V Coloquio de Geografía Agraria*, Universidade de Santiago de Compostela, 117-126
  - MÉTAILIÉ, J.P.; BONHÔTE, J.; DAVASSE, B.; DUBOIS, C.; GALOP, D. Y YZARD, V. (2003): «La construcción del paisaje forestal en los Pirineos orientales, del Neolíticos a nuestros días. Un modelo cronológico del bosque en el largo plazo» en Sebastián Amarilla y Uriarte Ayo (Eds.): *Historia y economía del bosque en la Europa del Sur (siglos XVIII-XX)*, Zaragoza, Prensas Universitarias de Zaragoza: 15-38.
  - PÈLACHS MAÑOSA, A.; 2004. *Deu mil anys de Geohistòria ambiental al Pirineu Central Català. Aplicació de tècniques paleogeogràfiques per a l'estudi del territori i el paisatge a la Coma de Burg i a la Vallferrera*, Universitat Autònoma de Barcelona, Tesis doctoral, Inédita.
  - PÈLACHS MAÑOSA, A Y SORIANO LÓPEZ, J.M. «Las fuentes paelobotánicas y la historia forestal: el ejemplo de los valles de Coma de Burb y Vallferrera (Pallars Sobirà-Lleida), *Cuad. Soc. Esp. Cien. For.* 16: 155-160.
  - SÁEZ POMBO, E. (2000): *Montes públicos, territorio y evolución del paisaje en la Sierra Norte de Madrid*, Madrid, UAM Ediciones-Comunidad de Madrid- Obra Social Caja Madrid, 2000.
  - SIEFERLE, R. P. (2001): "¿Qué es la Historia ecológica?" en González de Molina y Martínez Alier (Eds.), *La naturaleza transformada*, Barcelona, Icaria: 31-54.





# TRAMAS DEL PAISAJE EN TERRITORIOS DE MONTAÑA

*Francisco Díaz Pineda*

*Catedrático de Ecología  
Universidad Complutense de Madrid*

Las montañas son uno de los escasos ambientes naturales donde permanecen los ecosistemas y paisajes mejor conservados en la actualidad. Varias razones permiten explicarlo. Entre ellas hay dos que son determinantes hoy en día: su difícil accesibilidad y su compleja topografía. Históricamente tanto el trasiego de las sociedades humanas como sus asentamientos permanentes han tenido lugar en sitios ‘energéticamente accesibles’, es decir, en zonas en sí mismo productivas de forma prolongada o estacional y –sobre todo en el segundo caso– comunicables con otras fuentes de productividad sin elevado gasto energético de transporte.

La alta montaña es inhabitable por la gran mayoría de los seres vivos y también por la especie humana. En las montañas de mediana altitud, optimizado aquel gasto, la producción estacional de la vegetación ha constituido el factor esencial de una discreta y conservadora explotación humana mantenida hasta hoy. La estacionalidad es un condicionante clave de la dinámica espacial de muchas especies biológicas con ciclos vitales adaptados al ambiente de cada momento, cada altitud y cada posición topográfica. Esta circunstancia ha sido aprovechada por la humanidad a lo largo del tiempo. Consecuencia de ello es el desarrollo en las zonas de montaña y en sus áreas circundantes de una cultura silvo-pastoral que hoy puede reconocerse como un patrimonio de valor extraordinario. La conservación de las montañas y el mantenimiento de esta cultura deben ser, pues, componentes de un mismo objetivo.

## PAISAJE Y ECOSISTEMA

El observador percibe los elementos del entorno a través de sus sentidos. Su cerebro organiza instantáneamente tales elementos en un conjunto que los engloba y sitúa en un espacio cartesiano. Esos elementos –rocas, aire, suelo, agua, plantas o animales–, entes unitarios, constituyen los ‘componentes’ de ese entorno que es percibido así como escena o ‘paisaje’. El paisaje puede entenderse, pues, como una creación del cerebro.

Es habitual referirse al paisaje considerando sólo el sentido de la vista, acudiendo a la imagen ofrecida por cuencas visuales amplias, vistas o escenas de espacios abiertos conteniendo varios planos visuales. Las formas del terreno –la geomorfología– son sin duda referencias habituales de los estudiosos del paisaje y también su percepción visual. Sin embargo, no es necesaria tal amplitud ni tampoco es suficiente este sentido, aunque muy relevante, para apreciar y valorar el paisaje. En su concepción del mundo, cualquier persona considera probablemente insuficiente la imagen que tiene en su cerebro un observador del paisaje que fuera ciego. No obstante, tan real puede ser esta imagen como la que ofrece la vista: la realidad, o no existe o sólo puede ser medianamente conocida.

El paisaje puede ser percibido a diferentes escalas espaciales y con todos los sentidos. Además, no sólo es percibido por el ser humano. Posiblemente sí lo sea





Figura 1. Paisajes considerados bellos. Arriba a la izquierda, ‘Molinos en Écija’ (pintura de R.L. Cabrera, hacia 1910). Parque Nacional Grand Tetons, EEUU (arriba a la derecha). Picos de Europa (abajo a la izquierda). ‘Ribera con barca en el Guadaira’ (abajo a la derecha; pintura E. Sánchez Terrier, hacia 1890). Para mostrar un paisaje bello es frecuente referir una montaña o escenas con notable protagonismo del agua; usualmente ambas cosas. Al referirse a un paisaje cultural suele resaltarse el carácter y personalidad de la obra humana y para mostrarlo es muy común acudir a una pintura, que convierte en arte tanto a esa obra como al propio paisaje.

una escena entendida y valorada con criterios estéticos, artísticos o en general de percepción racional. Esta percepción sí enmarcaría el paisaje en un contexto exclusivamente humano (Figura 1).

La percepción sensorial del entorno es un acto propio de un ser vivo que tiene capacidad para ello –por ejemplo, a través de los sensores que envían información al cerebro del observador antes referido, pero también mediante sensores de otros tipos–. Las plantas perciben el ambiente mediante sensores de luz, sombra, temperatura o humedad. Su comportamiento fisiológico y sus lentos movimientos vienen condicionados por ello. También ocurre esto con otros seres vivos. Algunos animales perciben cuencas visuales amplísimas y detalles muy concretos de éstas. Otros apenas ven pero pueden percibir formidables extensiones mediante su olfato u oído.

La percepción del entorno puede ser consciente o no. A pesar de su racionalidad, el ser humano percibe habitualmente el paisaje sin prestar atención al hecho de que la imagen recibida sea ciertamente el resultado de

un conjunto de ‘fenómenos físicos’ y ‘procesos ecológicos’. No es usual entender expresamente estas cosas o tomar conciencia de ellas al percibir el paisaje.

Esos fenómenos físicos son básicamente flujos de energía. Resultado de éstos es la disposición espacial de los elementos materiales presentes. Así resulta la abundancia y distribución de las rocas, el agua, el aire y los seres vivos que componen el ‘paisaje natural’. La escena puede ofrecer otros componentes que son producto de la actividad humana, como muros, plantas y animales domésticos, construcciones, calles, ventanas, muebles y diversos enseres, como ocurre en los paisajes rurales, urbanos, de interior o, en general, en el ‘paisaje cultural’.

En cuanto a los procesos ecológicos, éstos son resultado de aquellos fenómenos físicos y de sus relaciones con otros que tienen tanto naturaleza biológica –esencialmente formas de crecimiento y distribución de especies y comunidades– como cultural, es decir, condicionada por la actividad humana. Hoy se tiende a llamar ‘procesos socio-ecológicos’ a las características

dinámicas emergentes de la interacción entre estos dos tipos de naturalezas.

Teniendo en cuenta estos criterios, aunque el paisaje respondería a una idea antropocéntrica, o tal vez etnocéntrica, la frontera entre su percepción exclusiva por los humanos y por todos los seres vivos no parece estar conceptualmente clara. Sobre todo cuando es la ecología –no sólo la psicología, la antropología, la sociología, la estética, el arte o la historia– la vía de conocimiento con la que se trabaja y con la que se trata de formalizar la idea de paisaje.

Los recursos naturales son manifestaciones de la materia, la energía o el espacio susceptibles de usar por los humanos. El paisaje es un recurso que se asocia al espacio. Con esta perspectiva su percepción y disfrute podría entenderse como algo propio del uso y aprovechamiento del entorno por la sociedad humana, es decir, como un patrimonio más de cuya propiedad están convencidas muchas personas. La conservación del paisaje –la conservación de la naturaleza– es así un problema generado por los humanos que ellos mismos tienen que resolver. Debe considerarse por tanto la concepción radicalmente cartesiana que los humanos tenemos del mundo y de su ‘propiedad’ –prueba de ello es, entre otros casos, la tendencia a delimitar fincas (incluso en la Luna) y espacios para su conservación (espacios naturales ‘protegidos’)–. Así pues, paisaje y territorio son ideas complementarias que tienen en común el espacio cartesiano, pero son conceptos que deben entenderse de maneras diferentes<sup>1</sup>. Esto es mucho más importante aún en el contexto de la conservación de la naturaleza. En un artículo sobre la vida en el planeta hace varios milenios, T. Mueller y F. Latreille se refieren a las condiciones ambientales de un territorio asiático que entonces era objeto del trasiego de mamuts en sus rutas migratorias. Al pie de una fotografía tomada actualmente en ese territorio los autores comentan que hace 40.000 años la mayor parte de la vegetación sería distinta a la actual, pero que “el paisaje actual se parece al de entonces”<sup>2</sup>. El concepto de paisaje manejado por estos autores es obviamente el relativo al territorio y a las formas del terreno, la geomorfología. El paisaje lo constituye, sin embargo, un conjunto que abarca todos los elementos perceptibles y no sólo algunos de ellos.

## ECOLOGÍA DEL PAISAJE

La ecología es la ciencia del medio ambiente. Eso es lo que significa el término. Trata de analizar y expli-

car relaciones naturales y culturales entre fenómenos, componentes y procesos. Estudia sistemas cuyas propiedades se deben en alguna medida a la participación de la vida (‘ecosistemas’). El estudio cuantitativo de éstos abarca tanto fenómenos de difícil apreciación mediante los sentidos (‘criptosistemas’) como otros perceptibles a través de ellos (‘fenosistemas’ o paisajes; los términos entrecomillados fueron acuñados por F.G. Bernáldez<sup>3</sup>).

Esta ciencia, cuando se orienta expresamente al estudio del paisaje<sup>3,4</sup> abarca tareas que pueden clasificarse en tres planos. Uno focaliza el funcionamiento de los sistemas. Es la ecología fundamental. Se basa en datos físico-químicos, biológicos, cartesianos, etc., más orientados a medir procesos dinámicos que a meras descripciones de componentes y lugares. Los datos son obtenidos mediante muestreos y técnicas de laboratorio y campo que son generalmente las propias de la ciencia experimental. Enfocada al paisaje, la ecología señala que el funcionamiento de éste se sustenta en los mecanismo de sistemas que subyacen en él, básicamente criptosistemas, teniéndose *in mente* el mismo concepto que dan los físicos a la palabra ‘sistema’ –flujos de energía y materia, posible reciclaje de esta última y dinámica espacio-temporal de los componentes en que se apoyan esos fenómenos<sup>3,4,5,6</sup>–. Los sistemas contemplados son generalmente culturales. Hoy son una excepción los silvestres o ‘naturales’ que prácticamente, como tales, no existen ya en el planeta. Toda La Tierra es hoy simultáneamente ecosfera y noosfera.

Otro plano es el que plantea el estudio de imágenes o escenas espaciales que emergen del funcionamiento de los sistemas anteriores. Este estudio precisa la participación de observadores o ‘intermediarios’ en el proceso interpretativo y constructivo del concepto de paisaje. Tales observadores pueden ser directamente los propios investigadores. No necesita, como en el caso anterior, el aparataje habitual de los métodos de las ciencias físicas y biológicas experimentales. El estudio suele basarse en el empleo de imágenes satelitarias, mapas y planos geográficos, así como fotografías, dibujos, encuestas, entrevistas y otras técnicas propias de las humanidades. La imagen ha sido estudiada por diferentes especialistas a través de su análisis (descomposición en partes) o bien a través de su percepción por diferentes observadores, algo en lo que se han ocupado algunos psicólogos y antropólogos. El análisis se ha hecho hasta ahora básicamente con

1 Pineda, F.D. 2003. Paisaje y territorio. En: C. García Orcroyen (coord.). Mediterráneo y Medio Ambiente. *Mediterráneo Económico* vol. 4. Instituto de Estudios Cajamar, Almería: 181-198.

2 Mueller, T. & Latreille, F. 2009. El bebé del hielo. *National Geographic* (España) 24(5): 3-27.

3 González Bernáldez, F. 1981. *Ecología y paisaje*. Blume, Madrid.

4 Forman, R.T.T. & Godron, M. 1986. *Landscape ecology*. Wiley and Sons, New York.

5 Smithson, P., Addison, K. & Atkinson, K. 2002. *Fundamentals of the physical environment*. Routledge, London.

6 Margalef, R. 1975. *Ecología*. Omega, Barcelona.





perspectiva cartesiana: el territorio puede dividirse más o menos objetivamente en mosaicos y éstos en telas o 'manchas' de distintos tipos, o bien en asociaciones y tipos de espacios-paisajes. Hay distintas escuelas y estudios técnicos, científicos y humanísticos que usan variados caminos para la descripción y aplicación práctica de esta idea de paisaje<sup>7,8,9</sup>.

Por su parte, la percepción de paisajes por distintos observadores ha sido desarrollada habitualmente de forma transdisciplinar. Las imágenes, percibidas directamente en el entorno, o bien mediante fotografías, dibujos o grabaciones sonoras son el material con el que se estudia la reacción que produce el paisaje en el observador. Esta reacción generalmente va acompañada de valoración o de atracción-rechazo<sup>3</sup>.

Finalmente está el plano interesado en explicar la función del paisaje en la sociedad humana. Su referencia suele ser el territorio, que directamente puede identificarse también como paisaje<sup>7,8,9,10,11,12</sup> con sus condicionantes ambientales y de uso humano<sup>13,14</sup>. La función del paisaje se entiende con una perspectiva ciertamente utilitarista: el recurso que el paisaje ofrece a la sociedad humana, ya se trate de un espacio silvestre o cultural. Por ejemplo, el carácter agrario de una comarca y los recursos que ofrece, la organización de la industria que genera un determinado tipo de paisaje, la estructura socioeconómica y cultural asociada, o bien los recursos emocionales ligados, por ejemplo, a cierto tipo de turismo. La perspectiva utilitarista puede comprender detalles de carácter emotivo<sup>3,10,15</sup>, ya que

en realidad no son los recursos materiales mismos los que representan el patrimonio sino el propio paisaje resultante. El estudio del territorio con perspectivas paisajísticas implica también a diversas áreas y detalles del conocimiento que pueden suministrar información a esta temática, como la geografía regional, la socio-ecología, la biogeografía, la socio-economía, la antropología, la geografía humana o la ingeniería civil, forestal o agraria. Estos conocimientos constituyen puntos de apoyo para el estudio de la función que desempeña el paisaje en la sociedad humana.

## FUNCIONAMIENTO DEL PAISAJE

La Figura 2 muestra un esquema genérico de los fenómenos y procesos subyacentes en un paisaje. La imagen de éste es la de la fotografía que aparece arriba a la izquierda, un lugar concreto donde es patente la frontera de separación entre un terreno con monte y otro con pasto. En la imagen destaca un árbol situado en esa frontera y dos zonas del terreno ocupadas por el matorral y por la hierba. El paisaje se considera dependiente ( $y$ ) de una serie de fenómenos y procesos ( $x$ ) que aparecen indicados en la figura simplificada como una función matemática,  $y = f(x)$ . Esos fenómenos y procesos pueden ser naturales y culturales.

Básicamente el funcionamiento esencial (físico) del ecosistema subyacente en el paisaje depende de la radiación solar. Esta dependencia ocurre directamente en casi todos los ecosistemas. La radiación incidente en el lugar ( $I$ ) sufre una pérdida por reflexión ( $R$ ). La energía solar incidente que no se pierde en esta reflexión calienta el suelo y éste emite radiación de onda más larga y menor energía ( $E$ ). Esta emisión es la que calienta al aire, que es transparente a la radiación solar incidente y reflejada pero no a la emitida por el suelo. El aire se organiza instantáneamente en células convectivas, cuya temperatura ( $T$ ) es mayor en contacto con el suelo caliente. Estas células se dilatan al recibir calor del suelo, pierden densidad y flotan en el aire, generando el viento. Al dilatarse baja la temperatura del aire. El calor del suelo también provoca un flujo energético hacia el sustrato y hacia el aire<sup>16</sup>.

En el lugar también entra agua de lluvia ( $P$ ) que empapa el suelo y la vegetación. El agua se evapora gracias al calor suministrado al suelo por el Sol, entran-

- 7 González-Bernáldez, F., Díaz-Pineda, F. et al. 1974. *Estudio temático Ecológico de la Subregión de Madrid*. Informe técnico. COPLACO. Mº de la Vivienda. Madrid. 3 Volúmenes, 350 pp. 6 mapas. [Gómez-Orea, D., Díaz-Pineda, F. et al. 1975. *Plan Especial de la Protección del Medio Físico en la Provincia de Madrid*. ICONA / COPLACO. Mº Obras Públicas y Urbanismo. Madrid, 200 pp. 2 mapas].
- 8 Forman, R.T.T. 1995. *Land mosaics. The ecology of landscapes and regions*. Cambridge Acad. Press, Cambridge.
- 9 Mata Olmo, R. & Sanz Herráiz, C. (dirs.). 2003. *Atlas de los paisajes de España*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- 10 Martínez de Pisón, E. 1998. *Imagen del paisaje. La Generación del 98 y Ortega y Gasset*. Caja Madrid, Madrid.
- 11 Consejería de Obras públicas y transporte. 2002. *Paisaje y Ordenación del territorio*. Publicaciones de la Junta de Andalucía, Sevilla.
- 12 Schmitz, M.F., Pineda, F.D., Castro, H., De Aranzabal, I. & Aguilera, P. 2005. *Paisaje Cultural y Estructura Socioeconómica*. Publicaciones de la Junta de Andalucía, Sevilla.
- 13 Schmitz, M.F., Aranzabal, I., Aguilera, P., Rescia, A. & Pineda, F.D. 2003. Relationship between landscape typology and socioeconomic structure. Scenarios of change in Spanish cultural landscapes. *Ecological Modelling* 168:343-356.
- 14 De Aranzabal, I., Schmitz, M.F., Aguilera, P. & Pineda, F.D. 2008. Modelling of landscape changes derived from the dynamics of socio-ecological systems. A case of study in a semi-arid Mediterranean landscape. *Ecological Indicators* 8: 672-685.
- 15 Martínez de Pisón, E. 1972. La destrucción del paisaje natural en España. *Cuadernos para el Diálogo* 31. EDICUSA, Madrid.

16 En la figura, el flujo de calor ( $Q$ ) en el suelo se representa como su transmisión por unidad de tiempo,  $dQ/dt$ , que se explica en función de la conductividad del suelo,  $K$ , y del gradiente de temperatura de éste con la profundidad,  $z$ , es decir,  $dT/dz$ . Desde el suelo también se genera un flujo de calor hacia el aire, esta vez no determinado sólo por conducción sino por convección (movimiento del aire,  $A$ , en relación con la presión atmosférica,  $Pr$ ) donde  $z$  representa ahora la altura sobre el suelo.



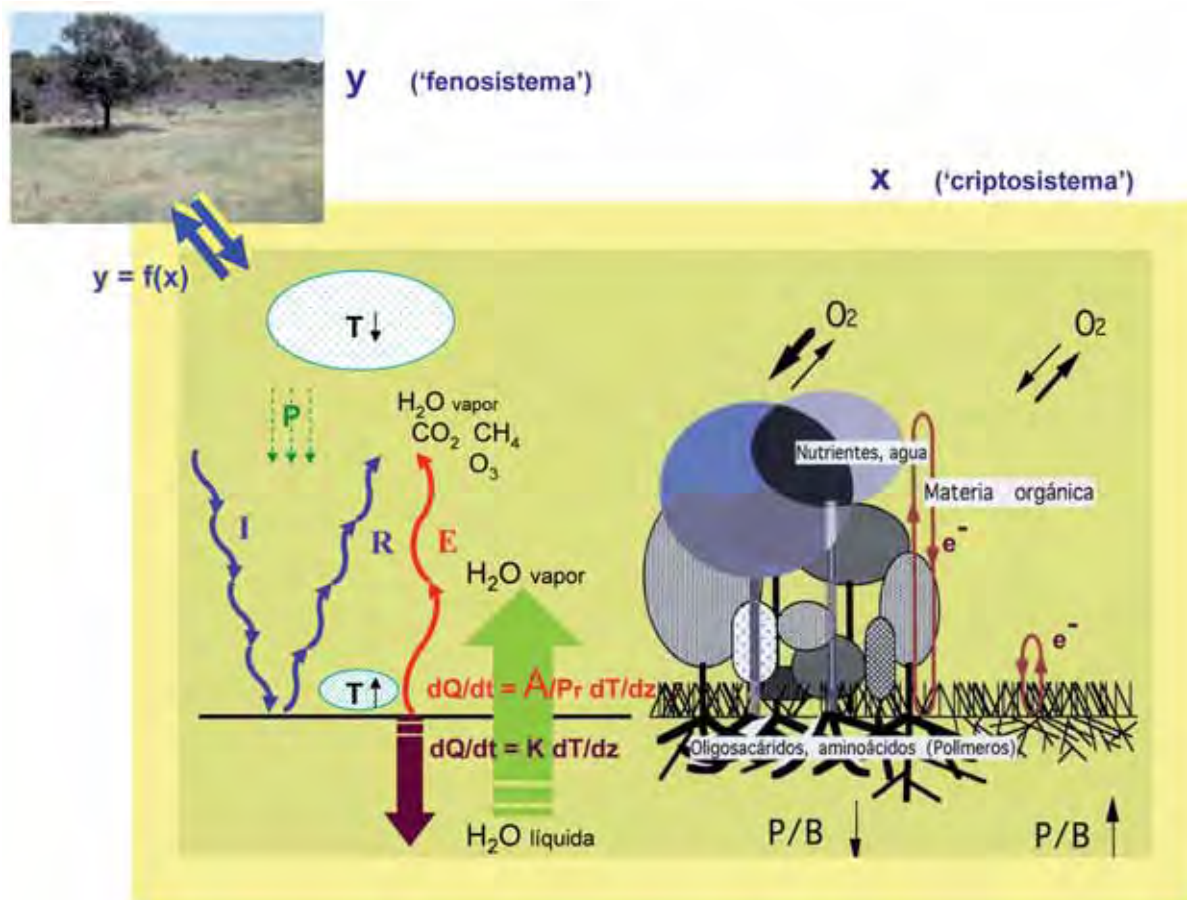


Figura 2. Fenómenos físicos y procesos bióticos esenciales del 'criptosistema' o sistema oculto a los sentidos que subyace en el paisaje. Los detalles de la figura se comentan en el texto.

do a formar parte del aire ( $H_2O$  en forma de vapor; las células convectivas que contienen vapor de agua son ligeramente más ligeras que si estuvieran secas). El vapor y el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) del aire son los gases que absorben la radiación emitida y los responsables de que el aire se caliente. En el aire puede haber circunstancialmente otros gases, como metano ( $CH_4$ ) y ozono ( $O_3$ ) que también absorben esa radiación.

La 'parte viva' del ecosistema recibe también la radiación solar, calentándose y canalizando una pequeña parte de esta radiación por otra vía: captada en fotosíntesis esta radiación produce materia vegetal a una cierta velocidad (producción primaria,  $P$ ) y libera oxígeno ( $O_2$ ) del agua de las plantas (fotólisis del agua). Esa materia es la masa viva del lugar (biomasa vegetal,  $B$ ). En la fotografía puede apreciarse que esta biomasa es muy abundante en el monte y escasa en el pastizal. El pasto es la comida del ganado, que lo consume continuamente favoreciendo su regeneración pero no su acumulación, como ocurre en el monte. En éste el consumo es menor y, por ello, es mayor la biomasa que termina siendo acumulada a lo largo del tiempo (en el pasto hay unos 400g de hierba seca por metro cuadrado en el momento de la foto, mientras que

en el monte esa biomasa será unas cuatro veces mayor; además contiene troncos, ramas y hojas duras poco consumibles por el ganado).

Para el crecimiento vegetal es necesario que las raíces tomen agua y nutrientes del suelo. Éstos, mediante fotosíntesis entrarán a formar parte de la masa viva, que se muestra erguida y activa. Estas sustancias permanecen también más o menos tiempo en la masa muerta (necromasa) que termina cayendo al suelo, pudriéndose por acción bacteriana y fúngica y formando humus. El humus es una sustancia negruzca y pastosa de tipo coloidal que da cohesión a las partículas del suelo al crear pequeñas esponjas, grumos o 'agregados edáficos', que evitan la erosión y mantienen el agua líquida más tiempo, sin evaporarse. La excesiva evaporación y pérdida de agua por escorrentía tiene mucho que ver con la falta de humus en el suelo, originada por fenómenos naturales y, sobre todo, por una gestión humana poco sensata de este recurso.

En la figura se llama la atención al hecho de que el monte, como en general todos los bosques, produce poco oxígeno, mientras que el pasto lo produce notablemente. El cociente  $P/B$  (tasa de renovación de la



energía contenida en la biomasa) es bajo en el primero y alto en el segundo, de manera que en el monte el consumo de oxígeno por respiración termina aminorando la producción neta de este gas. Esta respiración es muy alta en el monte porque la biomasa es aquí abundante y sólo una pequeña parte de ella es fotosintética (verde), transcurriendo su descomposición microbiana en el suelo a base de consumir oxígeno (respiración del suelo). La figura esquematiza estos procesos en el monte y en el pasto como un ciclo de electrones ( $e^-$ ) procedentes del agua del suelo. Éstos suben y bajan a cierta altura sobre el suelo en el monte y a baja altura en el pasto, según tiene lugar su incorporación a sustancias orgánicas mediante fotosíntesis y su liberación mediante respiración.

En el monte se refugian ciervos y jabalíes. La caza y diferentes actividades selvícolas se practican en este lugar. En el pasto paca el ganado, cuya producción de leche o carne es retirada periódicamente por el ganadero. La relación entre un espacio y otro ocurre de diferentes formas, de manera que no funcionan como sistemas independientes, sino como partes de un tejido espacial interconexo. Así, el agua de escorrentía del monte fertiliza al pastizal, los herbívoros del monte comen también en el pasto, como los carnívoros que buscan sus presas en este sitio. El mantenimiento de unos y otros tipos de manejo forma parte de la administración (gestión) humana del espacio. El paisaje resultante es, en buena medida, consecuencia de todo ello y la función que desempeña para la sociedad humana puede abarcar diferentes escalas y contextos socioeconómicos.

En resumidas cuentas, los mecanismos ecológicos comentados tienen fundamentos naturales y culturales y subyacen en paisajes como el que muestra la fotografía. Se han comentado brevemente fenómenos físicos, procesos biológicos y dinámicas culturales propias de la utilización humana del lugar comentado. No se han explicado las características del clima local y otros detalles, pero podría hacerse considerando expresamente algunos de los numerosos mecanismos que terminan ofreciendo como resultado la escena de la fotografía o, a menor escala, la escena de un espacio mucho más amplio.

En la Figura 3 se presenta un nuevo esquema de la correspondencia entre el paisaje de la foto y la 'radiografía' que muestra la trama geomorfológica que opera en el lugar. La síntesis aquí es más simple aún que la anterior. El agua de lluvia abandona el suelo evaporándose, escurriendo por la ladera y a través del cuerpo de plantas y animales (transpiración). La evaporación es si duda notable con el sol que ilumina la escena. La escorrentía provoca pequeños canalillos, cárcavas y erosiones en el suelo tanto más intensas cuanto menor

sea su desarrollo orgánico y su contenido en humus. El drenaje termina en la parte baja de la ladera originando tal vez un arroyo que deseca todo el conjunto. El agua se infiltra en el suelo dependiendo del grado de desarrollo de éste y percola en el sustrato generando una zona más o menos empapada y otra inferior no saturada de agua que mantienen un flujo subterráneo que también alimenta al arroyo. La zona alta se deseca antes. La gestión humana del lugar tiende a dejar crecer en esta zona la vegetación leñosa, menos explotable que la herbácea, que crece y se explota por el ganado en la zona más baja, fértil y húmeda por el suministro continuado de agua y materiales desde la zona alta.

La Figura 4 muestra un paisaje claramente cultural y rural. Los comentados anteriormente también lo eran, pero la gestión humana quizá quedaba menos patente a simple vista. La función que desempeña el paisaje de esta nueva figura es agropecuaria. La organización del espacio está hecha para ello. Destaca al fondo el borde de un páramo y una ladera que cae hacia una superficie plana en la parte delantera de la imagen. Se trata de una cuenca excavada en materiales que probablemente sean blandos y plásticos, posiblemente arcillosos o margosos, pues la erosión genera formas de relieve con perfiles convexos al fondo de la fotografía. Esos terrenos en pendiente están ocupados por espartales, pastos y construcciones rurales. La zona baja mantiene una pendiente suave en su borde y tiene olivos. Los olivares casi siempre están asociados a sustratos ricos en cal y yeso. Tales sustratos deben ser los materiales de que está compuesta la cuenca excavada. En la zona baja central el terreno es completamente llano y contiene cultivos de hortalizas y cereal ya seco en el momento de tomarse la foto. Es un mosaico con teselas de distintos colores y tamaños. Hay ribazos (bosquetes) y árboles aislados cuya presencia no es casual. Algunos están junto a pozos y constituyen pequeños enclaves de frescor y humedad que el agricultor disfruta sin duda. La cultura rural de la comarca donde se hizo la foto tendrá sin duda una base agropecuaria. En su historia habrán predominado agricultores y pastores de ovejas. Las creencias y fiestas de estos pueblos lo relejarán de algún modo. En la actualidad la estructura socioeconómica sin duda habrá cambiado por influencias ajenas al lugar.

## PAISAJE DE MONTAÑA

La acción de la altitud y la de la gravedad constituyen los factores ambientales determinantes del paisaje de montaña. La primera condiciona el clima de estos sitios y la segunda la dinámica de la topografía montañosa. La importancia estética de la amplitud de las cuencas visuales de la montaña se aprecia bien estando presentes en el lugar y también al observar una pintura



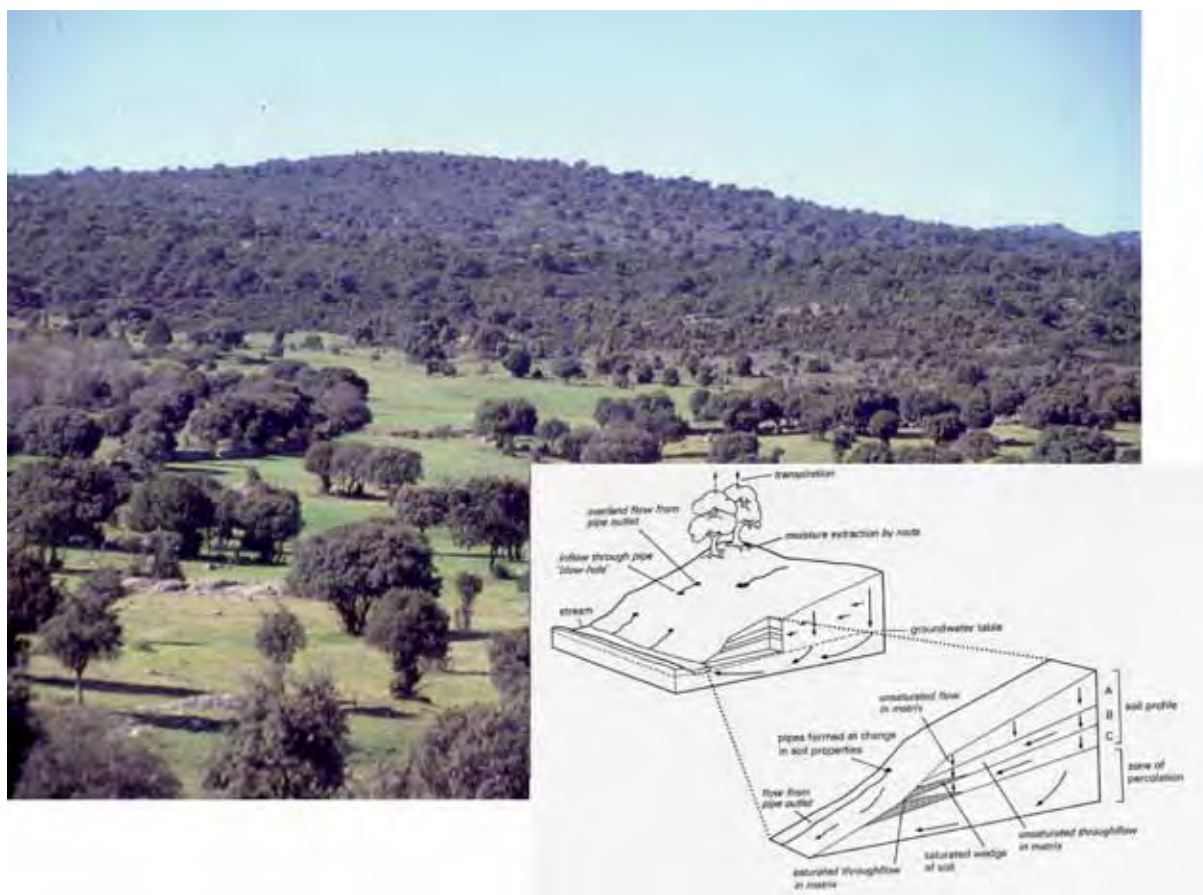


Figura 3. Fenómenos geomorfológicos y geoquímicas en los que puede sintetizarse el paisaje de una ladera de monte y pasto mediterráneo. Ver los comentarios que se hacen en el texto.<sup>17</sup>



Figura 4. Paisaje cultural rural. El contexto ambiental físico es natural en gran medida (geomorfología, clima local), pero no absolutamente, debido al uso del territorio por sucesivas sociedades y culturas.

<sup>17</sup> El esquema se ha formado de White, I. D., Mottishead, D. N. & Harrison, S. J. 1989. *Environmental Systems*. Unwin Hyman, London.



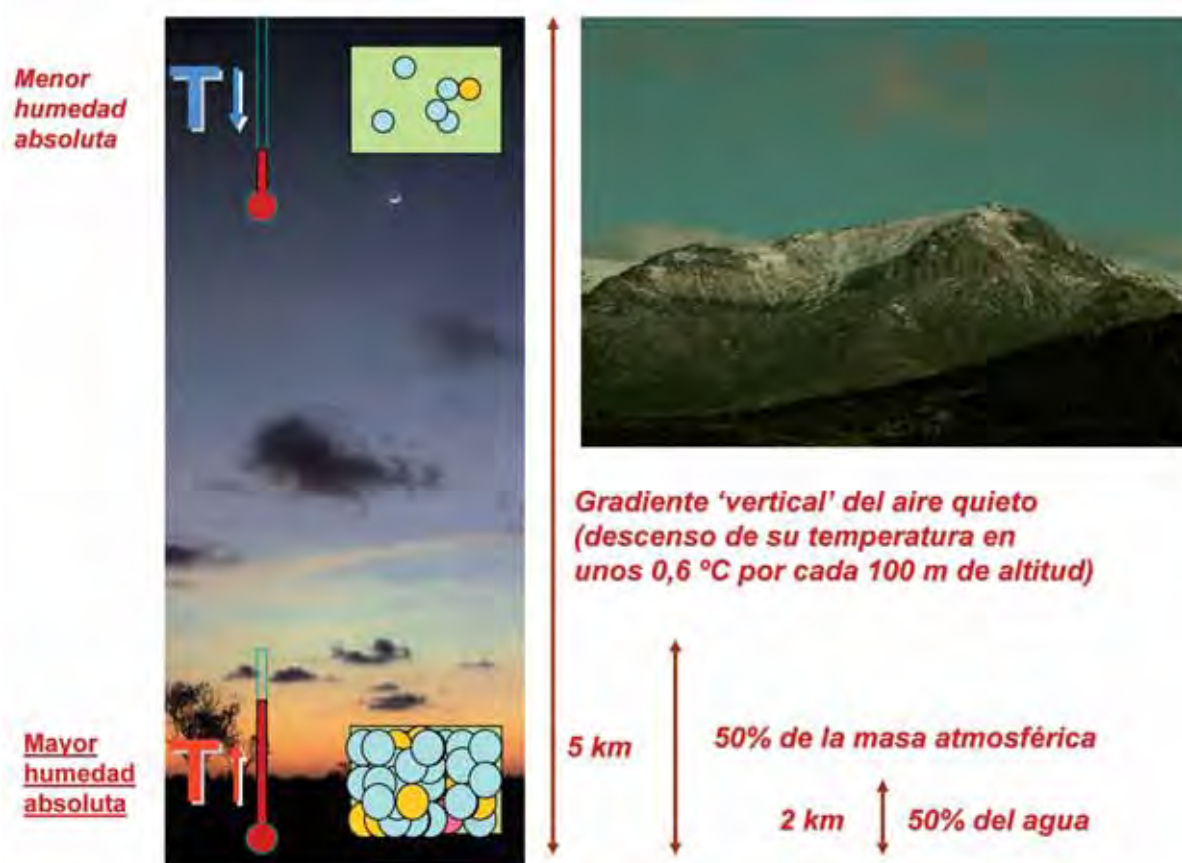


Figura 5. Variación esencial del clima de montaña debido al enfriamiento del aire. A menor altitud el aire es más denso y caliente (los recuadros con esferas representan la densidad de moléculas de sus gases) y la humedad absoluta mayor de la que tiene el aire conforme se asciende en la atmósfera. En los primeros 5 km de altura se encuentra el 50% de la masa atmosférica y en los primeros 2 km el 50% de su contenido en agua.

o una fotografía de estos sitios. En cambio, las sensaciones relativas al efecto de la gravedad sólo las tiene el observador cuando está presente en la montaña. Entonces percibe la magnitud de las pendientes y concibe el desprendimiento de materiales como indicador de la importancia de la altura en el modelado del relieve. Además, sobre el terreno se percibe que en la montaña hace frío. Estas sensaciones probablemente sean las primeras que recibe el visitante que sube allí.

La altitud condiciona el frío. El aire desciende su temperatura en algo más de medio grado centígrado por cada cien metros de altitud. Ocurre esto porque es cada vez menos compacto (Figura 5). A nivel del mar es denso, espeso y pesado y en la montaña es fluido y suelto. En la mezcla gaseosa poco densa que constituye el aire de la montaña las moléculas chocan mucho menos entre sí y la temperatura no es otra cosa que una medida de estos choques. El enfriamiento no se debe al movimiento del aire (el viento), sino a este simple fenómeno. Al descenso de la temperatura del aire con la altitud se conoce como 'gradiente vertical

de temperatura del aire' y puede medirse al subir por las laderas o mediante un globo sonda.

Con la altitud aumenta la radiación solar. El aire, muy transparente al sol, no lo es enteramente, de manera que el menor espesor atmosférico en la montaña supone también un menor filtrado de la radiación solar. Así, las superficies expuestas se calientan sobre todo por radiaciones ultravioletas, muy ricas en energía. Curiosamente el suelo de la montaña puede estar relativamente caliente y el aire, como se ha visto, frío. El color verde grisáceo de las plantas de montaña, el brillo de las superficies aterciopeladas de algunas de ellas, la cera de otras o el reflejo de la superficie del cuerpo de los insectos de estos hábitats, denuncian una fuerte insolación y una adaptación biológica a este ambiente. La adaptación supone aumentar la reflexión de las superficies y evitar el calentamiento y la desecación de los organismos. Por su parte, el visitante debe protegerse aquí con gorro, gafas y cremas que filtren la radiación ultravioleta en su piel.

En la montaña el aire está muy seco. A veces hace tanto frío que está completamente seco —es incapaz de



Figura 6. Pinares canarios situados en laderas de montaña por encima del límite de condensación de la humedad del aire. Los vientos alisios, cargados de humedad, ascienden por la ladera enfriándose y generando un 'mar de nubes'. Las gotitas de estas nubes son interceptadas por la vegetación originando un fenómeno de 'precipitación horizontal' que mantiene húmedo el suelo y representa una notable entrada de agua en el terreno.

mantener vapor de agua en su seno<sup>18</sup>. Esto también ocurre en los Polos. La humedad absoluta en la montaña es pues baja, pero la relativa tiende a ser elevada, sobre todo si asciende viento templado y húmedo a sotavento que se enfría al subir. Con ello condensa su vapor. El enfriamiento de este aire en movimiento responde a un fenómeno físico diferente al del gradiente vertical comentado antes y se explica termodinámicamente. La condensación del vapor se debe a la expansión del aire que sube, determinada por el descenso de la presión atmosférica con la altitud, y a su enfriamiento adiabático consiguiente (Figura 6). En la montaña tiende así a haber una notable nubosidad y a llover (un fenómeno algo más complejo) con alta frecuencia en las laderas de barlovento. A sotavento el aire desciende y se calienta. Si perdió el agua en la lluvia no puede evaporarla al descender, de manera que es un viento caliente y seco (sombra de lluvia, *föhn* o viento *shinook*). Las diferencias ambientales a uno y otro lado de la montaña son, pues, muy patentes. Se reflejan muy bien en los componentes naturales y culturales del paisaje. Así, el mencionado frío altitudinal es menos notable a sotavento, sobre todo si las laderas de esta parte tienen orientación sur, y los cinturones o pisos altitudinales de vegetación suben más altos en este lado que en la umbría. Igualmente, el movimiento trashumante del

ganado mantiene diferencias temporales en uno y otro lado que están asociadas a la diferente fenología del pasto dependiendo de la temperatura y la persistencia del agua en el suelo.

Las montañas son masas rocosas consolidadas que ofrecen una topografía variada. En ella predominan laderas de fuertes pendientes. Las laderas constituyen unidades espaciales prácticamente en cualquier tipo de paisaje, pero en la montaña son elementos estructurantes esenciales. Tanto a escala regional como local las laderas son sistemas donde la acción de la gravedad, favorecida por la dinámica térmica, el viento y la lluvia, determina una alta actividad de la erosión, el transporte y la sedimentación de materiales (Figuras 3 y 7). Las laderas confluyen también en sistemas de desagüe de la escorrentía (cárcavas y cuencas de diferentes tamaños) y generan zonas de descargas hídricas superficiales y subterráneas. Suelos rocosos propios de crestas y colinas, materiales inestables temporalmente situados en medias laderas y terrenos sedimentarios localizados en zonas topográfica y altitudinalmente bajas ofrecen una gran variedad de hábitats combinados con gradientes altitudinales, orientaciones y tipos de drenaje<sup>19</sup>.

La escorrentía del terreno se concentra en torrenteras y arroyos de montaña. En consecuencia la diversidad de hábitats y comunidades biológicas es notable, en

18 Cada gramo de agua necesita una cierta cantidad de calor para transformarse en vapor. El vapor es un gas invisible que se incorpora como un gas más al aire y lo hace ligeramente menos denso. Si desciende la temperatura puede condensar en forma de minúsculas gotas formando niebla, que sí es visible. Esas gotas suspendidas en el aire se conocen popularmente y son mal denominadas 'vapor'.

19 Díaz-Pineda, F. & González-Bernáldez, F. 1975. Experiencia obtenida con modelos de regresión múltiple para la descripción del hábitat de matorrales. *Anales del Instituto Botánico S.J. Cavanilles* 32(2): 1333-1348.





Figura 7. Canchal en una ladera de la Sierra de Guadarrama (Centro de la Península Ibérica). El sustrato de piedras angulosas y sueltas es escasamente colonizado por plantas superiores debido a la falta de material fino.

respuesta a esta variación del sustrato. No obstante, el valor de la diversidad biológica de la montaña, en general desciende con la altitud. Esto ocurre en espacios abiertos ocupados por praderas y pastizales, en formaciones de matorral y en bosques<sup>20</sup>. En la diversidad asociada a los bordes de cauces de los arroyos de montaña ocurre lo contrario. La estructura lineal de estos sistemas apenas se diferencia de su entorno al transcurrir por bosques y matorrales (el agua no suele ser un factor limitante en la montaña), sin embargo, a medida que estos cauces descienden en altitud van diferenciándose más del entorno circundante, particularmente si no hay bosque, constituyen estructuras de refugio de la vegetación freatofita e introducen un

elemento de diversidad en el espacio siempre muy valorado en la percepción del paisaje<sup>21, 22</sup>.

Aún en este marco de condiciones ambientales, la tipología del paisaje de montaña responde en gran medida a la gestión humana del espacio. Por ejemplo, la distribución altitudinal actual de muchos bosques está relacionada con esto. El borde superior del bosque no suele estar alterado porque las características ambientales descritas actúan como factores limitantes de esta distribución, pero las zonas inferiores de los pisos de vegetación de la montaña están con frecuencia modificadas y ampliadas hacia terrenos húmedos productivos. En la Cordillera Central española, por ejemplo, el límite altitudinal inferior del bosque de pino silvestre ocupa los terrenos naturales de los robledales y encinares. El rápido crecimiento de aquel árbol y el mercado de la madera en el mundo mediterráneo, caracterizado precisamente por una baja productividad forestal natural, ha favorecido esta gestión. A su vez el límite inferior del roble tiende a ocuparse por encinares, enebrales, espacios adheridos y pastizales de relativo alto aprovechamiento ganadero. Con frecuencia este uso ganadero es trasterminante, una forma de trashumancia localizada en entornos de montaña, y es capaz de explotar cada verano los pastos de las zonas altas.

Las faldas de la montaña, a su vez, han tenido explotaciones agropecuarias allí donde el suelo lo ha permitido, de manera que los terrenos agrícolas, generalmente localizados en 'rodeos' en los entornos de núcleos de población, así como las praderas de diente y siega, han caracterizado hasta hoy las estribaciones de muchas montañas. El reticulado espacial que ofrece en estas zonas el conjunto de setos y sotos de separación de cuarteles es propio de paisajes genuinamente culturales muy valorados por sus características biológicas y estético-culturales<sup>23</sup>. En las últimas décadas, no obstante, buena parte de las faldas de muchos territorios montañosos próximos a grandes ciudades han sido ocupadas por una caótica construcción de viviendas y urbanizaciones de segunda residencia.

20 Por ejemplo, en ambientes mediterráneos, J. Montalvo (1992) encuentra un descenso de la diversidad de las comunidades de plantas herbáceas de pastizales que alcanza 0,1 bit por cada 100m de altitud. El descenso se explica por una mayor competencia por el espacio en un ambiente progresivamente hostil asociado a la altitud y la topografía. [Montalvo, J. 1992. *Estructura y función de pastizales mediterráneos*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense, Madrid.]

21 Sterling, A. 1996. *Los sotos, refugios de vida Silvestre*. Publ. Mº Agricultura, Madrid.

22 Castro Nogueira, H. (Dir.). 2002. *Integración territorial de espacios naturales protegidos y conectividad ecológica en paisajes mediterráneos*. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía, Sevilla.

23 Schmitz, M.F., Sánchez, I.A. & De Aranzabal, I. 2007. Influence of management regimes of adjacent land uses on the woody plant richness of hedgerows in Spanish cultural landscapes. *Biological Conservation* 135:542-554.



**Figura 8.** Imágenes de zonas con pastizal de la Sierra de Guadarrama (Centro de la Península Ibérica). Se trata de paisajes culturales. Las fotografías de arriba corresponden a laderas próximas a las cumbres; la de la izquierda muestra un pastizal experimentalmente abandonado (mediante la exclusión del ganado) y la otra un pastizal pastado en verano con vacas nativas trashumantes (negras avileñas). Abajo se muestran pastos de dehesa de baja altitud y una parcela de exclusión experimental del ganado. La diversidad vegetal descende con la altitud desde estos pastos –que tienen una diversidad extraordinariamente alta– hasta los pastos de arriba. La exclusión del ganado provoca además, en ambos casos, un drástico descenso de la diversidad<sup>24</sup>

## CONSIDERACIONES FINALES

Se ha tratado de comunicar la idea de que el paisaje es en sí mismo un proceso de procesos, un conjunto de fenómenos físicos interconectados con otros biológicos y culturales que son dependientes de voluntades y necesidades de la sociedad humana.

Percatarse del paisaje requiere utilizar los sentidos. Sin duda se da prioridad al de la vista, pero la educación para el uso del paisaje, su conservación y disfrute, requiere emplear todos los sentidos. Entender los sistemas cuyos funcionamientos generan los paisajes requiere un menor empleo de los sentidos, en la medida en que esto es posible, y una cierta capacidad de deducción sobre la base del conocimiento científico.

Conocer y describir el paisaje requiere acudir a los fundamentos de este concepto. Para conocerlos ha de contarse por un lado con observadores y por otro con el objeto observado. La comprensión de la percepción del paisaje por los primeros necesita acudir tanto a elementos culturales como al conocimiento científico experimental. En cuanto al objeto observado, el análisis que hace F.G. Bernáldez<sup>3</sup> al separar criptosistema y fenosistema es probablemente una de las formas más completas y objetivas ideadas hasta ahora para entender y describir el paisaje.

La ecología hace tiempo que se preocupó por esta temática. Lo hizo, como ciencia transversal, acudiendo a conocimientos de otras ciencias y áreas del conocimiento. En el caso aquí tratado, aunque los ecosistemas de montaña mantienen en gran medida su funcionamiento natural, es decir que, a cierta escala, sus fenómenos y procesos básicos reciben una escasa influencia humana, el componente cultural está también muy presente.

24 Pineda, F.D. & Montalvo, J. 1995. Dehesa systems in the western mediterranean. In: Halladay, P. & Gilmour, D. (Eds.): *Biological Diversity outside Protected Areas; Overview of Traditional Agroecosystems*. Uicn, Forest Conservation Programme. Gland:107-122.





El paisaje de montaña tiene, por estas razones, un atractivo enorme para la sociedad desarrollada. Es un excelente material para comprender el ambiente. En la montaña destacan, por un lado, componentes emotivos, como la amplitud de las vistas, las dimensiones de las masas rocosas que impresionan al observador y la variedad de sus formas, así como el silencio singular que suele reinar en ella. Por otro lado, los fenómenos

físicos de la atmósfera, el sustrato y la vida de la montaña son muy fáciles de comprender por el visitante. Por su parte, la actividad humana está reflejada en una secuencia de usos ordenada espacial y temporalmente. Frecuentemente son usos milenarios y tradicionales, esencialmente silvopastorales. Junto con las características anteriores, estos usos constituyen componentes muy importantes de un paisaje admirable.

## CAMBIO CLIMÁTICO EN GENERAL Y EN LAS ÁREAS DE MONTAÑA

ANTONIO RUIZ DE ELVIRA

Presidente del Comité Científico del European Climate Forum

Estamos envueltos en un cambio climático de proporciones inimaginables, inimaginables porque nuestra experiencia vital y nuestro conocimiento científico no tienen nada que ver con el mismo. La experiencia vital se reduce a unos años, la memoria histórica, a la conciencia de nuestros abuelos. En esos intervalos el clima cambia muy poco, o realmente nada. El clima es la distribución de probabilidad de la evolución en el tiempo y en el espacio de las variables meteorológicas, y nuestra experiencia vital no la ha visto cambiar. Pero tampoco el conocimiento científico: Los cambios más rápidos de los que tenemos noticia en la ciencia han ocurrido en intervalos de miles de años, salvo impactos de meteoritos de los cuales no queda registro climático. El actual está ocurriendo en un intervalo de unos doscientos años.

El cambio climático es como un cambio de régimen político: Es como pasar de una monarquía a una república. Algunas de las leyes dejan de ser las anteriores y es preciso aprender las nuevas. Cambio climático no significa únicamente un aumento de la temperatura, sino esencialmente un cambio en la forma en la que se mueven las masas de aire y en la forma en la que se distribuye la precipitación del vapor de agua.

En cada deglaciación del último millón de años la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera aumentó en unas 100 partes por millón (ppm), pero el aumento ocurrió a lo largo de unos 5000 años. Hoy hemos causado ese mismo aumento de 100 ppm, pero ahora en 200 años.

El registro del aumento de concentración de CO<sub>2</sub> en nuestro planeta es de la siguiente forma:

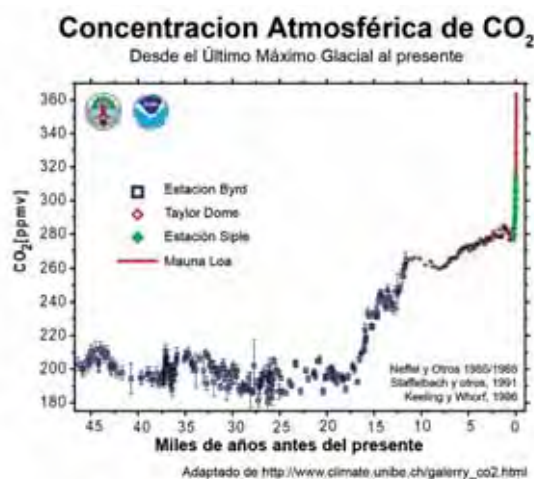


Figura 1. Evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera de la Tierra

donde podemos ver que la subida de 100 ppm de la concentración de CO<sub>2</sub> en los últimos 130 años es unas 38 veces más rápida que la correspondiente a la última deglaciación, en la que la misma subida ocurrió en 5000 años. Si, como es de esperar, porque las medidas de contención no se ponen en marcha, la concentración de CO<sub>2</sub> sube 200, 300 o 400 ppm en el siglo XXI, esa subida será la mayor y más rápida de los últimos 20 millones de años.

Esta es la realidad. La medida. Son los datos. Son incontrovertibles. Tenemos hoy más CO<sub>2</sub> en la atmósfera del que hemos tenido en el último millón de años.

En el sistema solar las temperaturas medias globales de los planetas están representadas en la figura 2, y la de la Luna es de -30°C. Si calculamos la cantidad de radiación solar que alcanza cada metro cuadrado





Figura 2. Temperaturas medias globales de los 4 planetas más próximos al Sol.

de la parte exterior de la atmósfera o de la superficie de cada uno de los planetas y de la Luna, es muy fácil deducir que las temperaturas señaladas no se deben a esa cantidad de radiación solar, sino a la temperatura de equilibrio que resulta de la potencia recibida y de la emitida (la cantidad de energía recibida tiene que ser la misma que la emitida, de otra forma los planetas se habrían convertido en plasma, o helado hasta el cero absoluto hace millones de años). Mercurio está muy cerca del Sol (la potencia disminuye con el cuadrado de la distancia a nuestra estrella). Pero Venus, la Tierra y Marte deberían tener temperaturas dentro del mismo orden de magnitud teniendo en cuenta la distancia a la que se encuentran de Sol. La diferencia esencial es la concentración de gases poliatómicos en las atmósferas de los planetas (Venus y la Tierra) o la ausencia de atmósferas (y de esos gases) en Marte y la Luna. Los gases poliatómicos pueden vibrar lentamente y pueden rotar despacio. Esos movimientos les permiten absorber radiación electromagnética de longitud de onda del rango infrarrojo, la que emiten los cuerpos entre  $-100^{\circ}\text{C}$  y  $500^{\circ}\text{C}$ . Al capturar esa energía los planetas elevan su temperatura de la misma manera que una habitación lo hace cuando, con el mismo radiador y la misma temperatura del aire exterior, cambiamos el aislamiento, por ejemplo bajando la persiana de la ventana. De la misma manera, si ponemos persianas aislantes en la atmósfera, subirá la temperatura de lo que hay entre esa persiana y la superficie del planeta.

Estas son analogías, pero se puede calcular exactamente cuanto debería subir. Esos cálculos sencillos, que solo tienen en cuenta el equilibrio de la radiación recibida y emitida y los efectos de saturación de la concentración de los gases, los realizó Arrhenius ya hace 112 años. En nuestro planeta las cosas se complican, y mucho, por la circulación del agua de los océanos y la deriva de los continentes, que cambia esa circulación. La subida o bajada de las temperaturas no es un efecto lineal, como querrían los que rechazan la existencia del cambio climático actual, sino que es un fenómeno muy complejo, que debe analizarse con las herramientas de este tipo de sistemas. El problema es un problema

de lenguaje, de un lenguaje determinista desarrollado durante los 400 años que van desde Galileo hasta finales del siglo XX. Cuando se quiere una respuesta del tipo: Si sube la concentración de  $\text{CO}_2$  en 10 ppm la temperatura debe subir una décima de grado, esa respuesta no se puede encontrar en el sistema climático. De la misma manera que no podemos predecir la posición ni la velocidad (es decir, la energía) de cada molécula del aire en una habitación pero si podemos estimar la evolución de su temperatura (es decir, del promedio de las energías de sus moléculas), no es posible asignar un comportamiento fijo a cada variable meteorológica u oceanográfica, pero podemos sin mucho problema estimar sus tendencias de evolución. En un sistema complejo como es el sistema climático, la evolución de sus variables funciona con altibajos frecuentes. Si elegimos uno de éstos, que puede incluso durar 10 años, podemos decir que las temperaturas globales están bajando en el planeta, si no consideramos el cuadro completo de la evolución a lo largo de cientos y miles de años.

La ignorancia, que es atrevida, la representan muchos libros que buscan las ventas gracias a tranquilizar al público para que no asuma la realidad. En la historia de la ciencia, o de la sociedad en su conjunto, siempre ha habido resistencia al cambio. La sociedad, y un buen científico, Tycho Brahe, se resistieron a la realidad del Sol como centro del sistema planetario. La iglesia se resistió a las afirmaciones de Galileo. España se resistió como gato panza arriba a cualquier teoría científica, hasta bien entrado el siglo XX. La Iglesia de Inglaterra se escandalizó de las ideas de Darwin. La cabeza oficial de la física en la Inglaterra de finales del siglo XIX, Lord Kelvin, rechazó todas las teorías nuevas, incluso las ecuaciones de Maxwell. Hoy los fundamentalistas de todos los colores rechazan de nuevo la evolución y la manipulación genética. No es extraño que haya quienes, buscando ventas, rechacen el cambio climático.

Maquiavelo lo advirtió ya hace 500 años. Éste, en “El Príncipe”, alerta a éste de que en todo proceso de cambio “los rentistas del sistema” se van a volver en contra y se convertirán en enemigos sólo porque quieren proteger su actual “*status quo*”.

Y no hace falta que sean ‘rentistas’. La corriente psicológica contra el cambio es muy fuerte. Las personas realizan un proceso de aprendizaje durante la infancia y la juventud, y a una mayoría considerable de ellas les supone un trauma. En vez de aprender un método de interpretación de lo que obtienen a través de los sentidos para establecer un mapa de la realidad, la gran mayoría aceptan una serie de imágenes y conceptos como esa misma realidad. Si precisan cambiarla experimentan dolores de parto. Es por ello por lo que muchas personas buscan en el dogma, de cualquier

color, una seguridad que no existe, que desaparece en cuanto se la hurga un poquito.

La humanidad, desde que la conocemos hasta hoy, ha seguido una filosofía vital resumida en el párrafo 9:1 del Génesis, en el que Yahvev dice a Noé y a sus hijos: “*Creced, multiplicaos y llenad la Tierra. Todo lo que hay en ella será de vuestro dominio*”<sup>1</sup>. Es claro que así pensaban los que escribieron la Biblia, y es claro que así piensa hoy Paco, “El Pocero”, y el resto de los de su calaña. Así piensan los rusos cuando toman “posesión” de un Ártico deshelado enviando una cápsula con una bandera rusa a sus profundidades, y así piensan los que deforestan Brasil e Indonesia, y los japoneses que insisten en la pesca de ballenas por razones de “investigación”, y las grandes flotas pesqueras que esquilman los mares, y las empresas que quieren llenar la Tierra de centrales nucleares, y ...

La idea es simple, y surgió de un esquema tribal de vida que exigía vivir en ciudades protegidas de las alimañas de cuatro y de dos patas, y hacer crecer el territorio de esa tribu. Las ciudades eran amuralladas y así siguen hasta hoy en los diseños más modernos (vide Foster, Abu Dhabi).

A finales del siglo XVIII y a principios del XIX se estableció la ciencia de la economía mediante las obras de Smith<sup>2</sup>, y de Ricardo<sup>3</sup>, y desgraciadamente se estableció con esa filosofía vital: Para ambos autores, la naturaleza (y en ella incluían a cualquier animal de cuatro y de dos patas ajeno a su propia tribu) era del dominio humano (es decir del dominio de su tribu particular) y se podía hacer con ella lo que se estimara oportuno y conveniente, en particular, destruirla sin problema alguno. Los bienes naturales, el aire, el agua de los ríos, de la lluvia, de los océanos, los hielos, la caza y la pesca, los bosques, los montes y el suelo, no eran bienes económicos, es decir, no eran bienes escasos sujetos de una optimización en su uso: Estaban ahí para su expolio sin mayor consideración. Un siglo después esa ciencia fue matematizada por Walras y Jevons, que eligieron la rama de la física que ignora el tiempo, la estática, como ejemplo de un problema de optimización en el reparto de cargas que lleva a un equilibrio general. La economía, que rige hoy nuestras vidas, se estableció bajo premisas no solo falsas, sino tremendamente dañinas para aquellos para los que se creó: Los seres humanos. Puesto que los recursos naturales son, en su concepción, ilimitados, y puesto que al no existir en ella el tiempo, nada cambia, se pueden

hacer las mayores barbaridades con el planeta Tierra sin mayor reflexión ni toma de conciencia.

Independientemente de una ciencia económica en mantillas, en aquella misma Inglaterra, y debido a la desaparición de la madera en los alrededores de la gran ciudad de Londres también a finales del XVIII, se puso en marcha la segunda revolución energética. La primera había tenido lugar al terminar la última glaciación, cuando el deshielo de los glaciares de los Zagros había llenado de barro fértil la llanura mesopotámica. Entonces el ser humano se dio cuenta de que podía utilizar una mutación de alguno de los cereales antiguos que dejaba caer las semillas bajo su tallo en vez de dispersarlas por el viento. Al moler las semillas ese ser humano recogía sistemáticamente la energía solar capturada mediante la fotosíntesis, y se hacía con unos 16 watios/m<sup>2</sup> de terreno fértil, en vez de alrededor de los 0.2 watios que podía obtener mediante la caza y el forrajeo. La población humana, como no podía ser de otra manera, pasó de unos 2 millones de individuos a unos 500 millones, que crecieron a unos 700 millones cuando se pusieron de nuevo en cultivo las tierras vírgenes de las Américas.

Pues bien, la segunda revolución energética consistió en recuperar la energía fotosintética almacenada en el subsuelo, procedente del carbonífero, a un ritmo entre 10 y 20 veces superior al de su formación en aquella etapa geológica. La población pasó de unos 700 millones de individuos a unos 7.000 en un plazo de unos 200 años. Este crecimiento se suele achacar a la revolución industrial, pero una reflexión termodinámica del tipo de “backside of the envelope” nos convence sin lugar a dudas que ha sido una revolución esencialmente energética.

Los ingenieros crearon riqueza real independientemente de los economistas. Pero al hacerlo así se guiaron por las mismas reflexiones: La naturaleza está ahí para su expolio sin cortapisas por el ser humano. Una muestra de esa forma de pensar aparece claramente en la idea machaconamente repetida de que los ríos españoles “no deben gastar un agua preciosa llegando al mar”, enunciada por los ingenieros de caminos del siglo XIX y repetida hace dos semanas por muchos administradores españoles respecto al problema de la falta de agua en Cataluña. Despreciando al resto de la naturaleza, los seres humanos consideran que “*todo lo que hay en naturaleza es de su dominio*”.

La quema de carbono fósil ha traído al ser humano una enorme riqueza momentánea, pero esa misma quema está amenazándole no con la pobreza, sino con la desaparición de su civilización. Pensemos en una pequeña tribu de esos seres humanos: Los españoles de los siglos XVI y XVII. Descubrieron entonces una

1 Bendijo Dios a Noé y a sus hijos, y les dijo: «Fructificad, multiplicaos y llenad la tierra.[a]

2 Infundiréis temor y miedo a todo animal sobre la tierra, a toda ave de los cielos, a todo lo que se mueva sobre la tierra y a todos los peces del mar; en vuestras manos son entregados.

3 Todo lo que se mueve y vive os servirá de alimento, lo mismo que las legumbres y las plantas verdes. Os lo he dado todo.



riqueza similar a la del petróleo actual, en las minas de Potosí, Zacatecas y otras repartidas por la geografía americana. La riqueza de las minas americanas generó una inmensa pobreza de la tribu española. Al recibir un dinero inesperado su ambiente degeneró de tal manera que cayeron en la miseria. Dejaron de crear riqueza, y se limitaron a gastar la que recibían.

Hoy la quema de carbono fósil está calentando el planeta y propiciando catástrofes para las cuales estamos tan poco preparados mentalmente como lo estaban los españoles del Siglo de Oro. Queremos seguir quemando, es más, las voces más generalizadas se alzan exigiendo el “derecho” a seguir quemando, carbono sin pensar en el momento en que se acaben las condiciones adecuadas para la vida fácil en el planeta, de la misma manera que los españoles quería seguir recibiendo el oro y la plata americanas sin pensar en el momento en que las minas se agotasen. Igual que Luis Ortiz, Tomás de Mercado, Antonio Serra, Martín González de Cellorigo, otros pocos, nuestras voces se alzan hoy en España ante el desprecio más profundo de la Administración, que, diciendo que “si, quiere combatir el cambio climático”, sigue permitiendo los coches 4x4, sigue permitiendo la construcción desaforada, quiere resucitar la economía mediante la construcción de carreteras y VPOs, mantiene los atascos, mantiene las centrales de carbón y permite nuevas refinerías, etc., etc., etc.. Es decir, como los reyes españoles de aquellos siglos, mantiene el camino al precipicio sin atender a los avisos bien informados.

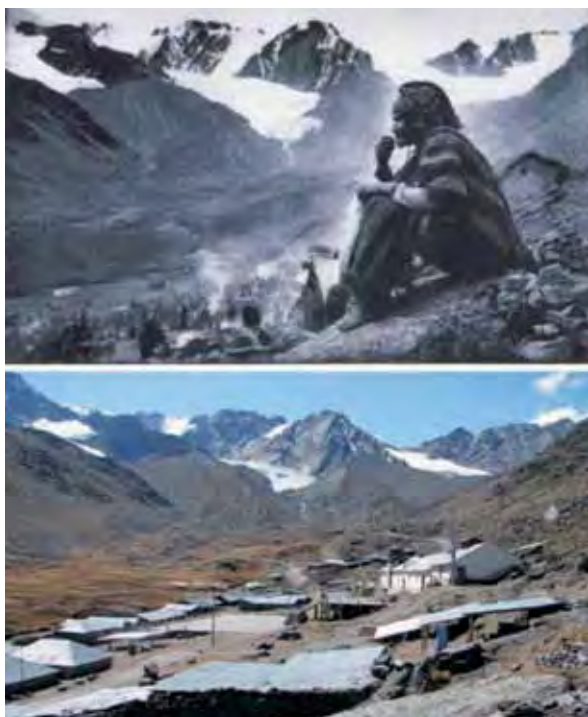


Figura 3. Un glaciar en Perú

Para poder sobrevivir como civilización industrial, con alrededor de 7.000 millones de personas en la superficie de la Tierra, necesitamos reducir la concentración de CO<sub>2</sub> en nuestra atmósfera a no más de 350 ppm. Para ello es imprescindible cambiar de filosofía vital, rechazar aquel párrafo de los cronistas bíblicos y entrar en una nueva etapa humana. Para eliminar las ideas no explícitas, los trasfondos mentales, es preciso sacarlos a la luz, exponerlos claros y contundentes. Si no lo hacemos así seguimos destruyendo el único recurso vital de que disponemos: Nuestro planeta.

Pero es que además, y como en caso de la España barroca, cambiar de filosofía vital nos puede hacer mucho mas ricos, realmente, de lo que lo somos en la actualidad, y mas ricos de forma sostenida y sostenible. La razón es que para conseguir frenar e invertir el cambio climático necesitamos algunas cosas que nos proporcionan esa riqueza, una riqueza, eso sí, no gratuita como los depósitos fósiles, como las minas de oro y plata, sino trabajada a conciencia. Quizás es el reconocimiento de la necesidad de este trabajo (como el saber de los españoles de entonces de que necesitaban mantener las sederías de Granada, la orfebrería de Córdoba, las pañerías de Segovia en vez de la molicie de un dinero fácil y no trabajado) lo que hace a una gran cantidad de seres humanos rechazar las soluciones propuestas, que traen dinero, pero como la riqueza holandesa de entonces, con trabajo. El cambio de filosofía de vida estriba, ¿Cómo no? también en cambiar otra sentencia de los cronistas bíblicos: “*Con el sudor de tu rostro comerás el pan*”, considerado como una “maldición” cuando el trabajo, la creación, es lo que realmente nos hace seres humanos.

¿Cual es ese riesgo del cambio climático? ¿Cómo podemos entender este problema, cuales son sus dimensiones, sus efectos? y ¿Podemos detenerlo?

En cuanto al riesgo del cambio climático nos basta ver las figuras siguientes, en las que se puede contemplar la evolución de los glaciares de las zonas de montaña: En las figuras 3,4 y 5 vemos la evolución de algu-



Figura 4. El glaciar de Chacaltaya en Bolivia

nos glaciares de Sudamérica, en la figura 6, del glaciar Portage de Alaska, en la 7, del glaciar Gangotri en el Himalaya, en la 8, del glaciar Pasterze de los Alpes, y en la 9 la evolución de uno de los poquísimos glaciares españoles, el de la Maladeta en los Pirineos.

Es claro que algo le está pasando a nuestro planeta, y que nos estamos quedando sin las reservas de agua para el verano que teníamos en el pasado que eran las nieves de alta montaña.

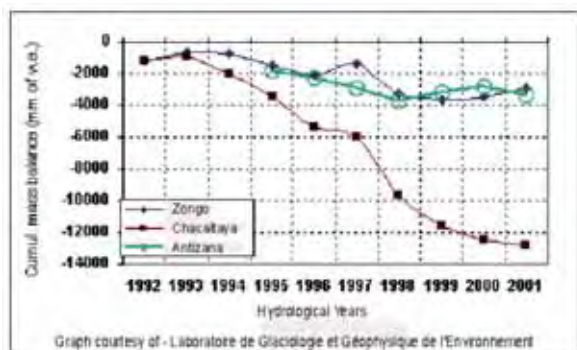


Figura 5. Hidrología de los glaciares bolivianos



Figura 6. El glaciar Portage en Alaska



Figura 7. Evolución del glaciar Gangotri en los Himalayas.



Figura 8. El glaciar Pasterze en los Andes



Figura 9. El glaciar de la Maladeta en los Pirineos.



Vamos a dedicar las páginas siguientes a las preguntas anteriores, avisando de antemano que su respuesta es científica, y está basada en las leyes de la física, contrastadas tras 400 años de desarrollo teórico y validadas en innumerables experimentos. Aún hoy, en pleno siglo XXI hay quienes dudan de su validez, quienes insisten en buscar explicaciones oscuras, fenómenos desconocidos. La ciencia utiliza el argumento de la “cuchilla de Occam”: Si podemos explicar un fenómeno mediante un razonamiento más sencillo que cualesquiera otros más complicados, ese razonamiento debe ser el correcto. Gracias a este argumento hemos avanzado más en 400 años en nuestro conocimiento del mundo que en los anteriores 20000 años de otros esfuerzos mentales.

En vez de hablar de clima, partir de ahora voy a hablar de “sistema climático”, puesto que realmente el clima es un conjunto de subsistemas distintos en interacción constante. Como he mencionado más arriba, estos subsistemas son (figura 10)

1 La atmósfera: La mezcla homogénea de gases que rodea la esfera terrestre, con un espesor efectivo de 11km en su zona activa, el 0.18% del tamaño de la Tierra, y unos 50km en la zona estratificada e inactiva. La atmósfera es tan delgada que si consideramos una piscina de 25x50 metros, la atmósfera estaría representada por una capa de agua de 1.4 cm en su fondo. El aire se mueve de unas partes a otras de la

superficie de la Tierra mediante corrientes y vientos, en masas de aire de temperaturas distintas que se mezclan poco entre sí, y que al subir unas sobre otras descargan el vapor de agua que arrastran en forma de lluvia sobre el suelo del planeta. La escala de tiempo de la atmósfera es de horas a días, y su escala espacial es global. Interacciona con el océano recibiendo de éste energía en forma de calor y vapor de agua, y entregándole energía en forma de arrastre de las olas.

2 Los océanos. Agua de distintas salinidades en las cuencas intercontinentales. Su profundidad media es de unos 3000km, y la capa que se mueve con relativa energía y mediante procesos de mezcla, la equivalente de la inferior de la atmósfera, tiene entre 200 y 500 metros de espesor, variable según las estaciones del año. Por debajo de ella se encuentra el océano estratificado, equivalente a la estratosfera en el aire. El agua se mueve de unas partes a otras del planeta mediante corrientes marinas que transportan masas de agua de salinidad y temperatura diferenciadas. Las corrientes son el mecanismo mediante el cual se transporta energía desde los trópicos, que reciben un máximo de radiación solar durante todo el año, a las regiones polares, que dejan de recibir esta radiación durante sus inviernos correspondientes. Las dos corrientes esenciales en la situación geológica actual son la Corriente del Golfo, una rama de la circulación termosalina, de la

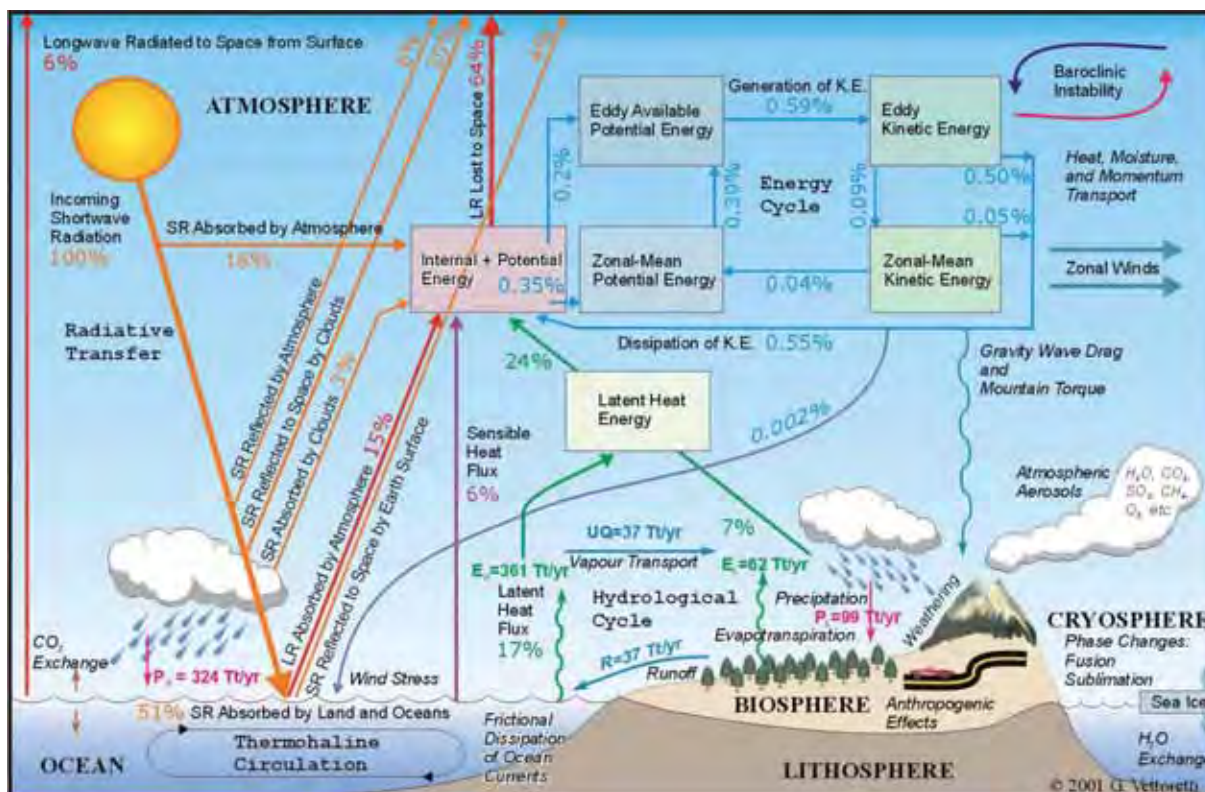


Figura 10. Un esquema del sistema complejo denominado “clima”



que hablaré más adelante, y la corriente circumpolar antártica, un cinturón de agua caliente que aísla a la Antártida del resto del globo y la mantiene helada desde hace unos 30 millones de años. La escala temporal de las corrientes arias está entre un año y 500 años, y la escala espacial es regional (las cuencas oceánicas) o semiglobal.

- 3 La radiación solar, la única fuente de energía para el planeta Tierra. Esta radiación fluctúa en intensidad, en una magnitud de alrededor de un 0.1%, a lo largo de un ciclo de 11 años, y de un 0.2-0.3% en ciclos de cientos a miles de años.
- 4 Los hielos. Son un sistema semifluido, cuya mecánica en masas grandes es aún hoy desconocida, y representan, a través de su capacidad de reflejar la energía incidente del Sol, una válvula de control del sistema climático, de manera que éste puede adoptar, en la situación geológica de los últimos tres millones de años, dos estados semiestables: Glaciación y etapa interglacial. Su escala temporal es de cientos de años (salvo en los puntos críticos, en los que puede ser de un par de décadas) y su escala espacial está limitada a las regiones polares.
- 5 La biosfera. Actúa controlando la capacidad de absorción o reflexión hacia el espacio de la energía incidente desde el Sol, mediante la función clorofílica, que convierte el CO<sub>2</sub> en hidrocarburos, extrayéndolo, o liberándolo hacia la atmósfera. Su escala temporal es desde décadas a siglos, y su escala espacial es continental.
- 6 Los gases traza de la atmósfera que absorben selectivamente la radiación infrarroja emitida por el suelo. El principal es el vapor de agua, cuya escala temporal es de unos días. El siguiente en importancia es el CO<sub>2</sub>. Su escala temporal es de 120 años, y su escala espacial es global. El metano es un gas que absorbe la radiación infrarroja con mucha mayor intensidad que el CO<sub>2</sub>, pero su escala temporal es tan solo de unos años, no más de diez. El resto de los gases traza, los óxidos nitrosos, los clorofluorocarbonos, el ozono, etc., tienen una importancia secundaria sobre el clima.
- 7 La sociedad humana: A través de su acción sobre los gases traza, una parte de la biosfera, la sociedad humana ha adquirido una importancia desproporcionada sobre el clima durante los últimos 200 años.

El sistema climático es lo que conocemos hoy como “sistema complejo”, un concepto que ha surgido como tema de estudio en la física en los últimos 20 años. Hasta entonces la física se concentraba en exclusiva

en los sistemas simples y el resto de las ciencias no tenía, sencillamente, las herramientas adecuadas para su análisis. Un sistema complejo es un conjunto de subsistemas de escalas muy diferenciadas entre sí, de energías muy diferentes, en interacción constante, con ecuaciones no lineales, con puntos críticos y cuencas de atracción distintas. En los sistemas complejos no lineales 2+2 no es igual a 4, existen realimentaciones positivas y negativas, y lo que puede pasar mañana no es simple extrapolación de lo que ha ocurrido en el pasado. En el sistema climático la evolución de mañana no es derivable estadísticamente de la del pasado ni siquiera utilizando funciones de distribución de probabilidad, puesto que son éstas las que cambian de un estado climático a otro. El paleoclima nos puede servir de laboratorio para probar nuestras ideas y métodos, pero nunca como origen de la predicción: En esto están equivocados quienes tratan de deducir la evolución del clima directamente a partir de su historia, y aquellos otros que tratan de interpolar el clima de una región concreta a partir del clima de sus contornos.

#### *¿Como estudiamos los sistemas complejos?*

La única forma de hacerlo, por el momento, son los modelos matemáticos resueltos mediante grandes ordenadores. Dentro de los ordenadores los océanos interactúan con la atmósfera, ésta y aquellos con los hielos, la biosfera evoluciona siguiendo la temperatura y las precipitaciones y la vegetación cambia el tiempo atmosférico localmente, lo que hace que cambien las corrientes de aire y de esta manera el tiempo global, en un proceso complicado pero en el cual podemos seguir paso a paso las interacciones y sus influencias mutuas. Los modelos matemáticos no son otra cosa más que herramientas en desarrollo, pero son herramientas, que aunque perfeccionables, son ya, hoy en día, muy finas.

#### *¿Qué nos dicen los modelos del clima?*

Como condiciones iniciales se toman las de 1880 para las cuales existen bancos de datos muy completos. Con estos datos se dejan funcionar (correr) los modelos durante 100, 200 o 1000 años. Puesto que en los sistemas complejos no lineales ligeras variaciones de las condiciones iniciales implican cambios importantes en la evolución de sus variables, se repiten los cálculos con distintas condiciones y con distintos modelos, lo que produce una dispersión de predicciones, que simula razonablemente bien la incertidumbre natural en la evolución del clima, y que nos ofrece resultados muy útiles.

De los resultados de los modelos quiero mostrar dos o tres ejemplos, extraídos del último informe del IPCC sobre cambio climático.





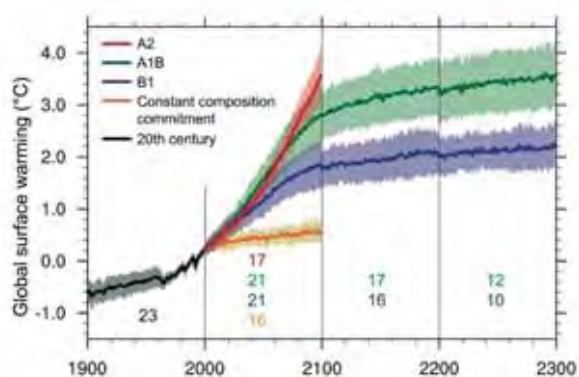


Figura 11. (IPCC, 2007) Predicción del conjunto de modelos para la Temperatura Media Global bajo 4 escenarios.

En primer lugar, en la figura 11 podemos ver la subida estimada de temperatura media global para tres escenarios: A2, A1B, y B1, y la subida esperada si hoy mismo detuviésemos la emisión de gases traza. Los escenarios son: A2, implica un desarrollo salvaje, con una población en 2100 de 15.000 habitantes, y casi nula proporción de energías libres de carbono. A1B implica un desarrollo fuerte, con una población limitada a 7.000 millones de personas, 1.5 vez mas consumo de energía que en el escenario A2, pero la energía basada en fuentes libres de carbono, en 2100, con una transición lenta hacia estas fuentes. B1 implica también una población de 7.000 millones de habitantes, una energía sin carbono, pero una transición hacia esta energía mucho más rápida que en el caso A1B. Lo temprano o tarde que se realice la transición hacia una energía libre

de carbono es determinante para el resultado final de las temperaturas y precipitaciones en el planeta. En la figura 12 podemos ver los aumentos previstos para las temperaturas en cada región del mundo, para los tres escenarios y en tres etapas del presente siglo. Vemos que en cualquier caso es de esperar una subida substancial de la temperatura media en España. Algo más abajo comentaré sobre la diferencia entre 3.5 y 4.5°C para la población y los cultivos.

En la figura 13 se muestran las variaciones en temperaturas y precipitaciones esperadas para África, mientras que en las figuras 14 y 15 podemos ver esto mismo para el mediterráneo.

¿Por qué pongo las figuras de África? Los problemas climáticos nunca han supuesto colapsos directos en las civilizaciones. Los problemas han derivado siempre de poblaciones cercanas con muchos menos recursos para enfrentar esos problemas climáticos. Aunque como he dicho más arriba no es posible utilizar extrapolaciones en el estudio de la evolución de la sociedad humana, y es de esperar que en la situación actual no procedamos de la misma manera, es ilustrativo (solo como caso de estudio) considerar el caso de Yucatán en el siglo 10 de la era común. Un desplazamiento hacia el norte de la Corriente del Golfo, en una de las fluctuaciones naturales esperables en un sistema complejo, calentó las costas noruegas, generando un exceso de población que salió de aquellas tierra en viajes de “vikings”, es decir, de piratería. Se calentó una franja muy estrecha y pequeña de la costa de Groenlandia, haciendo posi-

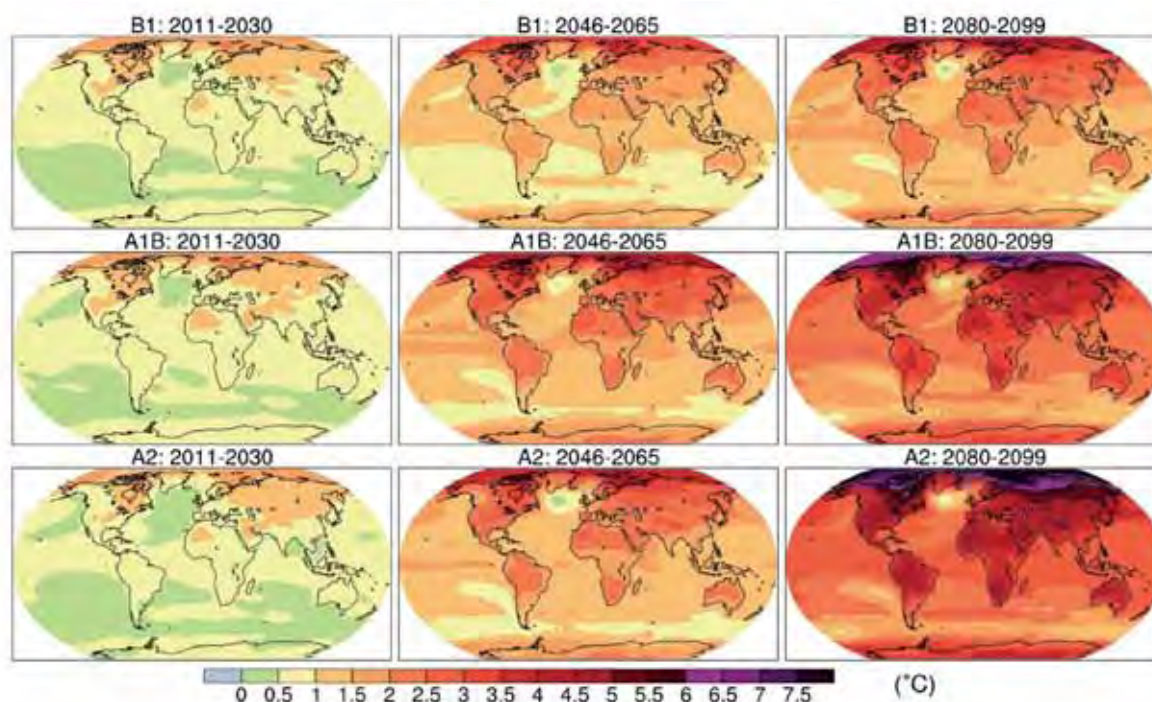


Figura 12. (IPCC,2007) Distribución geográfica de la predicción del aumento de temperaturas a lo largo del siglo XXI, para tres escenarios de emisión de gases traza.

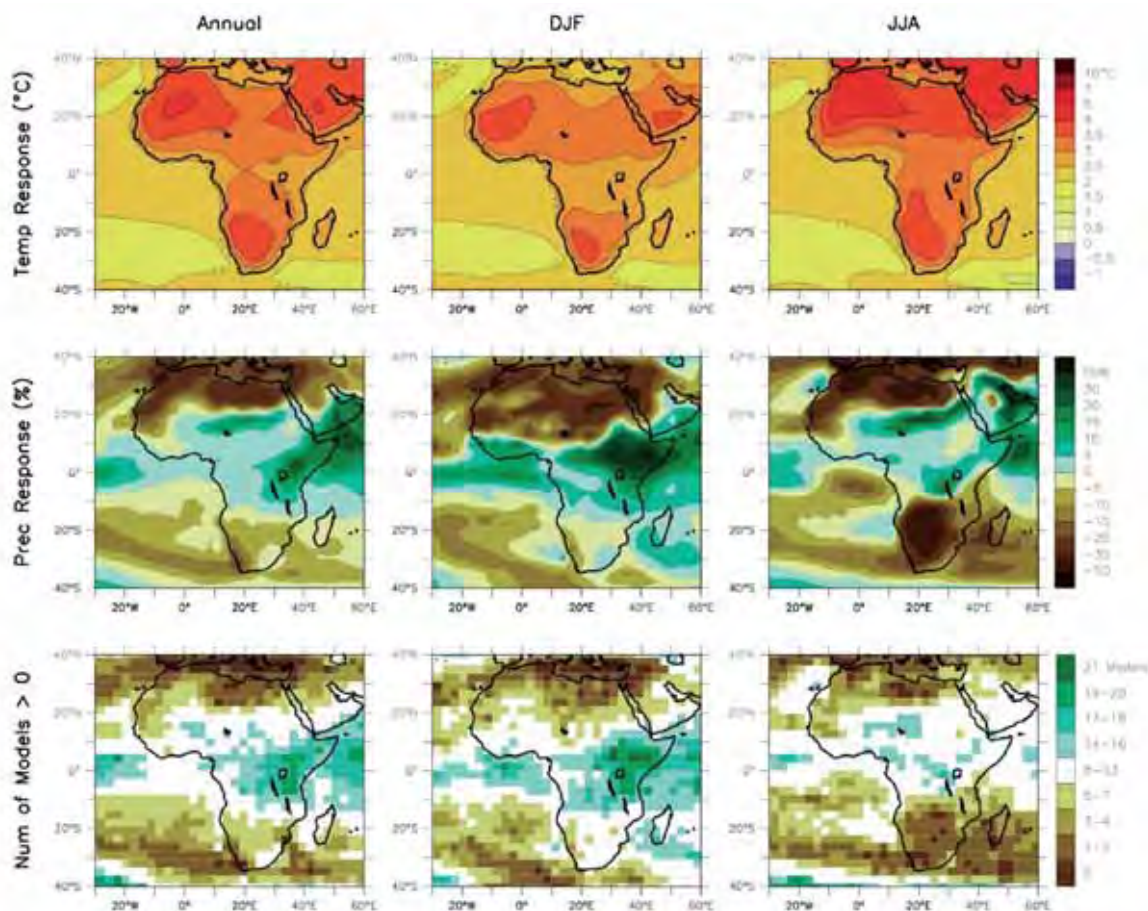


Figura 13. (IPCC2007). Cambios previstos en las temperaturas y precipitaciones en África a finales del siglo XXI, en media y para las estaciones de invierno y verano.

ble allí el establecimiento de una colonia de origen noruego. Este desplazamiento de la Corriente del Golfo produjo, simultáneamente, una sequía que duró 70 años en la península del Yucatán. Allí los Mayas habían establecido una civilización con construcciones de piedra, basada en el almacenamiento de agua de lluvia en cisternas y regadío mediante canales. Mientras había agua la población crecía, y una parte substancial de la misma se estableció en las laderas de las colinas. Mientras llovía no había problema. Pero al llegar la sequía, las poblaciones del valle siguieron disponiendo de agua, aunque en menor cantidad, mientras que las de las colinas se quedaron sin ella. El resultado fueron guerras salvajes por los recursos, que produjeron la desaparición de aquella civilización. Aunque vuelvo a insistir en que no es posible extrapolar en los sistemas complejos, uno de los problemas a que nos enfrentamos en España ante una intensificación del cambio climático es la presión migratoria desde el Sahel y el África subsahariana de una población con escasos recursos sometida a una disminución notable de las lluvias y a una desertificación creciente.

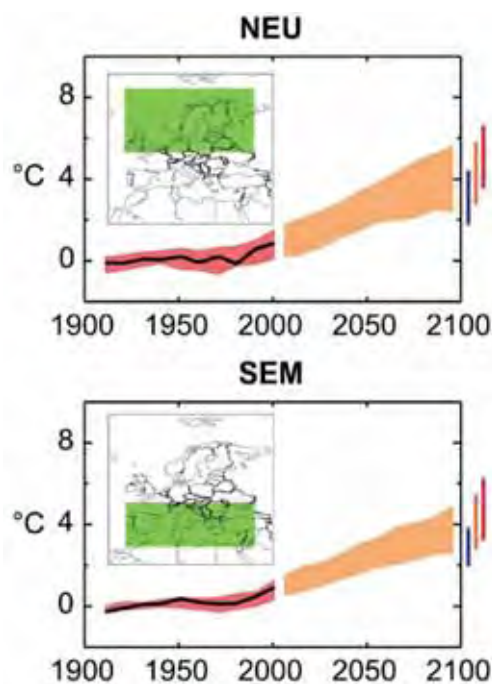


Figura 14. (IPCC, 2007) Estimación del aumento de temperaturas en la región mediterránea a lo largo del siglo XXI.



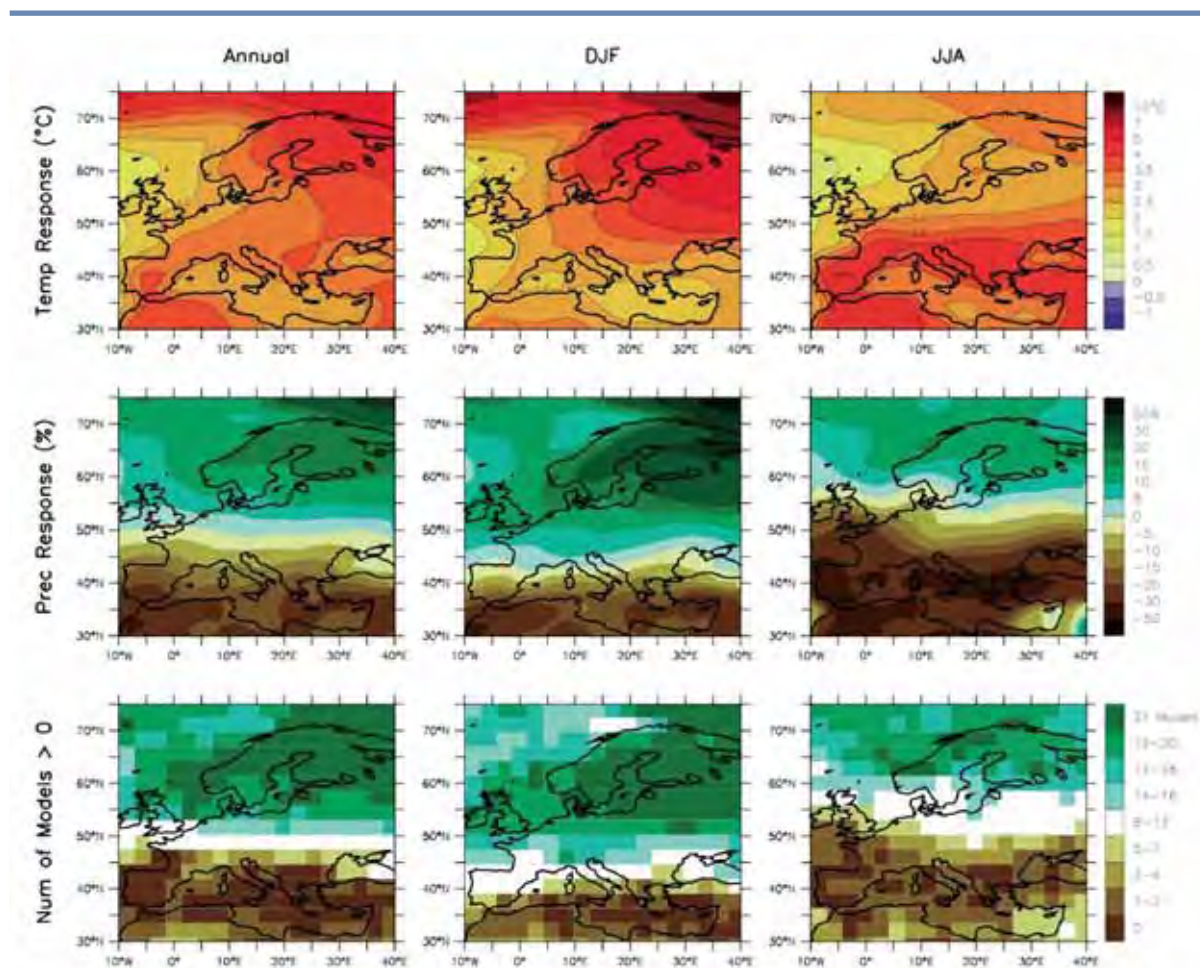


Figura 15. (IPCC,2007). Variaciones en la temperatura y en la precipitación en invierno y verano, en la región mediterránea.

Ambos riesgos son también esperables en España, como acabamos de ver en las figuras correspondientes. Debo añadir un par de comentarios: Las plantas son sistemas físicos no lineales. Su control de la humedad necesaria se realiza mediante estomas en las hojas. Dependiendo de la especie, estos estomas se mantienen cerrados y controlados hasta una cierta temperatura límite, pasada la cual se abren sin control, de manera que la planta, que aguanta sin problemas temperaturas ambiente de 38°C, muere por desecación en muy pocas horas a temperaturas de 39°C. Las plantas autóctonas de cada región están adaptadas a ciclos concomitantes de horas de luz y de calor/frío, de la misma manera que las especies de insectos y las plagas (virus, bacterias y parásitos). Si se cambian las temperaturas, y/o los regímenes de precipitaciones, las plantas (e incluso algunos animales, recordemos la reciente plaga de ratones de campo en Castilla-León) pierden el control y cambian su productividad.

Estamos, pues, ante un problema que puede llegar a ser muy grave: Nos enfrentamos, si no tomamos precauciones, a inmigraciones masivas, desertización creciente, y cambios drásticos en las formas de vida.

Hasta aquí he mencionado solo los riesgos más próximos y evidentes. Existe otro que es muchísimo mayor, de manera que cuando hablo de él, o más bien, cuando hablamos de él los científicos, la audiencia lo rechaza y nos acusan de mentirosos y apocalípticos. Es sin embargo un riesgo real y calculable. Si nos fijamos en las gráficas de la figura 12, observamos que en los dos casos A2 y A1B las temperaturas del polo norte suben, en media, por encima de los 7°C. Estos aumentos producen dos efectos concurrentes: El primero, el deshielo casi total y acelerado de Groenlandia, lo que supone una subida del nivel del mar de 6 metros. Esta subida implicaría la desaparición de ciudades como Huelva, Cádiz, Sevilla, parte de Málaga, Almería, Cartagena, Valencia y parte de Barcelona, y sus entornos, es decir, una emigración masiva interior a España, y la pérdida de un capital gigantesco. El segundo efecto es más sutil. La Corriente del Golfo mantiene libre de hielo una buena parte del hemisferio norte gracias a que el agua caliente y salada es capaz de, primero, entrar en el Ártico entre Islandia y Escocia, y luego, ese agua salada y enfriada, salir del Ártico por un enorme talud de 3000 metros de caída entre Groenlandia en Islandia. El agua caliente entra porque

sale agua fría. Pero el agua solo puede descender hacia las profundidades si es muy salada, porque los cambios de temperatura no afectan casi nada la densidad del agua marina. Para que el agua del Ártico se haga salada es preciso que los ríos canadienses y siberianos no le aporten agua dulce, y que durante los inviernos se congelen grandes masas de agua marina, que al hacerlo expulsan la sal. Un deshielo progresivo de Siberia y de Canadá, y una falta de congelación en los inviernos de las aguas árticas producen un déficit de sal que impide al agua fría salir del Ártico, y obliga a la Corriente del Golfo a desviarse hacia Portugal al llegar a las costas irlandesas. Ha sido ese desvío el que ha causado, en el último millón de años, la secuencia de 10 glaciaciones. Una Tierra glacial supondría, o bien la desaparición de la civilización actual, o un esfuerzo inimaginable para asimilar cientos de millones de personas desde las regiones nórdicas de Europa, América y Asia.

Los modelos climáticos son esquemas matemáticos basados en ecuaciones diferenciales no lineales. Las ecuaciones están validadas por 200 años de uso. Sin embargo sus soluciones dependen de las condiciones de contorno e iniciales que les suministremos. Una característica básica de los sistemas complejos no lineales es que su propia evolución modifica sus condiciones de contorno. A esto se añade que los mayores ordenadores que pueden utilizarse para la resolución de las ecuaciones no son suficientemente capaces como para incluir escalas espaciales menores de 50 km, ni para incorporar todas las interacciones existentes entre los diversos subsistemas del sistema completo. De esta manera los modelos climáticos están sometidos a incertidumbres en sus soluciones. Pero, aunque esto pese a los escépticos climáticos, podemos cuantificar esas incertidumbres, porque conocemos el funcionamiento del sistema. El propio IPCC así lo hace. La incertidumbre en el desarrollo social no es un problema puesto que se consideran 30 evoluciones posibles distintas. Con respecto a las incertidumbres en la evolución de la temperatura y de la precipitación, las figuras mostradas, del IPCC, tienen todas bandas de error, las franjas coloreadas que rodean las líneas continuas. Podemos aceptar esas incertidumbres, como aceptamos, en los laboratorios de física, los enunciados de que dependiendo de los aparatos utilizados, la aceleración de la gravedad está entre 8 y 12 m/s<sup>2</sup> o entre 9.7 y 9.9 m/s<sup>2</sup>. Tomando 10 en el primer caso o 9,8 en el segundo no nos produce dificultades en los cálculos en los que necesitemos esa aceleración.

¿Podemos, en primer lugar, combatir, parar, este cambio climático? ¿Y podemos adaptarnos al que ya es inevitable, al que ya hemos producido?

Voy a suponer, en primer lugar, que podemos detener el cambio climático en valores desagradables pero

aceptables, considerando en segundo lugar cómo adaptarnos a las consecuencias del cambio ya producido y del que se producirá aun en el caso de poder detener la subida de temperaturas en sus límites tolerables.

El problema del cambio climático actual (es decir, de la subida de temperaturas cuando naturalmente deberían estar bajando desde el anterior óptimo climático hace 10000 años hacia la siguiente glaciación) deriva del aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> y metano en la atmósfera. El CO<sub>2</sub> ha aumentado vertiginosamente desde 1850, como producto de la quema de combustibles fósiles (figura 1). Podemos hacernos una idea si consideramos que entre los años 17500 y 11000 antes de la era común (fin de la última glaciación) esa concentración aumentó en 75 ppm ( $75/6500 = 0.0115$  ppm/año), entre los años 11000 y 1500 antes de la era común aumentó en 14 ppm ( $14/9500=0.0014$  ppm/año) y sin embargo entre los años 1850 y 2007 de la era común ha crecido en 100 ppm con un ritmo de 0.637 ppm/año, 55 veces más rápido que durante aquella última deglaciación. Aunque las propiedades de retención de la radiación infrarroja del CO<sub>2</sub> no aumentan linealmente con su concentración, es fácil aceptar que una subida de tal magnitud y tan rápida tiene los efectos que producen los modelos matemáticos que la incluyen en sus cálculos.

La estimación de crecimiento de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera depende de los modelos socioeconómicos que consideremos. La única forma de controlar el cambio climático es cambiar con la máxima urgencia de paradigma energético, es decir, utilizar como fuente de energía la solar actual, en vez de la solar fósil, la energía solar capturada por la fotosíntesis hace unos 300 millones de años y almacenada en las minas de carbón y en los pozos de petróleo y gas natural.

### ¿Podemos hacer ésto?

Es evidente que sí. Tenemos hoy casi toda la tecnología necesaria, no en los laboratorios, sino ya en las tiendas para empezar a comprarla e instalarla a la máxima velocidad posible. Solo nos falta un vector de almacenamiento, que debe de ser, forzosamente, el hidrógeno. Para la generación rápida y eficiente de hidrógeno quedan todavía unos 10/15 años, pero este tiempo puede acortarse si se invierte en el proceso una cantidad adecuada de esfuerzo y dinero.

Sobre cada metro cuadrado de la parte alta de la atmósfera caen en los trópicos 1366 w/m<sup>2</sup>. De esta cantidad, 800 wátios llegan sin problemas a la superficie de la Tierra (en media entre los 40°N/S y el Ecuador) durante 6 horas al día. De los 800 wátios las celdas solares extraen hoy un 30% de energía, es decir,



240 w/m<sup>2</sup>, durante 6 horas al día, o lo que es lo mismo, 1.4 kwh/día m<sup>2</sup>. En 1 km<sup>2</sup> hay 1 millón de metros cuadrados, lo que equivale a 1.4 millones de kwh/día km<sup>2</sup>, o 7 Gwh/día en una superficie de 5.000 km<sup>2</sup>. Esto es más de lo que consume España en todas las formas de energía, eléctrica, térmica, para el transporte, para la industria. Con solo 5.000 km<sup>2</sup>, es decir, con un 1% de su superficie, España puede conseguir diariamente del Sol más energía de la que gasta cada día. Tenemos pues energía solar más que sobra para eliminar los combustibles fósiles.

Para conseguir esta energía podemos utilizar muy diversos medios. El más sencillo, útil y fácil de montar es el aerogenerador, un desarrollo moderno, con alas de aluminio y diseño aerodinámico, de los molinos de viento de vela que en una época eran tan característicos de La Mancha. Los aerogeneradores son baratos, fáciles de fabricar y de montar y sencillos de manejo. Sin embargo la cantidad de energía que pueden capturar es pequeña puesto que la cantidad de energía cinética disponible en la atmósfera no es más de un 0,1% de la energía recibida en la superficie procedente del Sol.

El medio siguiente son las olas. Hay muchos dispositivos en el mercado para extraer energía de estos movimientos de la superficie del mar, y son baratos. Sin embargo la energía disponible a partir de las olas es mucho menor que la del viento, puesto que es éste el que cede parte de su energía a aquellas.

La energía del Sol calienta el suelo. El suelo calienta a su vez el aire que tiene encima, y genera corrientes de convección que pueden mover turbinas dentro de torres. Estos dispositivos tienen la ventaja de que pueden funcionar durante la noche, ya que la energía solar se puede almacenar en ladrillos cerámicos al recibir estos la radiación solar.

La luz del sol, concentrada mediante espejos, puede calentar agua o líquidos orgánicos de altos puntos de vaporización, con el objetivo, de nuevo, de mover turbinas que pueden generar electricidad. Esta electricidad puede ser en forma de corriente continua. Hoy disponemos de transformadores en continua que permiten elevar la tensión a 400.000 o más voltios, facilitando su transporte a las distancias que sean necesarias, sin los enormes problemas de los ajustes de fase de la corriente alterna trifásica.

Por último disponemos hoy de celdas solares basadas en circuitos electrónicos, en la captura directa de la energía de los fotones, los cuantos de luz, y su conversión en corrientes eléctricas con un rendimiento real del 30%. Es preciso hacer notar aquí que muchas veces se confunden los términos y se introducen errores al hablar de los rendimientos energéticos. Así se suele

decir que una central moderna de gas natural de ciclo combinado puede alcanzar hasta un 60% de rendimiento en la producción de energía eléctrica, mientras que se desprecian las celdas fotovoltaicas porque “solo” tienen un rendimiento del 30%. ¿De que hablamos? El rendimiento total de una central de gas, como de una central de carbón o de fuel, o una central hidroeléctrica es esencialmente nulo. El carbón, el petróleo y el gas son el resultado de procesos geológicos que han durado millones de años, y que han concentrado la energía solar capturada por plantas y animalillos mediante fotosíntesis y metabolismo. La fotosíntesis tiene un rendimiento del 6% mientras crece la planta, para lo que necesita agua y nutrientes. El rendimiento pues una central de gas, será el 60% del 6% del x%, este último derivado de los procesos geológicos de concentración. Es decir, esencialmente nulo.

Todos estos procesos capturan la energía del sol. Pero esta energía llega a la superficie solo durante unas 6 horas alrededor del mediodía. Es preciso acumularla. El vector tradicional de acumulación han sido, desde hace millones de años, los vegetales, en los cuales, una vez capturada la energía de los fotones, se invierte ésta en la síntesis de hidrocarburos, en los que queda almacenada. Podemos seguir utilizando los vegetales, esencialmente las hierbas y otras plantas de zonas inválidas para el cultivo de alimentos, para generar alcoholes y gasóleos para su uso como energía para el transporte. Pero también podemos tratar de utilizar la luz, bien directamente, bien a través de la electricidad generada en las celdas fotovoltaicas, para producir la separación del agua en hidrógeno y oxígeno, utilizando el hidrógeno como combustible. Este proceso debe de ser catalítico, para acelerar la reacción. Estamos a unos diez/quince años de disponer los catalizadores adecuados para completar el proceso.

Tenemos en nuestras manos todas las herramientas necesarias para detener el cambio climático, y al mismo tiempo, para iniciar una era de una prosperidad mucho mayor que la actual, al poder disponer de muchísima mayor energía y una energía inagotable a escala humana.

Y tenemos adicionalmente la mejor herramienta: El ahorro energético puesto que la energía mejor es aquella que no se consume.

¿Por qué no avanzamos a la velocidad necesaria en esa dirección?

Por un lado, están aquellas personas que solo ven el beneficio inmediato, aun a costa del destrozo y desastre de mañana. Son como los muchachos que se dan al botellón y a la droga, en vez de trabajar hoy para conseguir mañana una formación de calidad.



Y está la inercia social, que se aterroriza ante cualquier situación novedosa: Son los luditas, aquellos que quieren seguir tejiendo a mano antes que aprender a utilizar las nuevas máquinas, aquellos que preferirían seguir como cazadores/recolectores porque eso era lo que “habían hecho siempre”. Son aquellos que quieren seguir consumiendo gasolina y gasóleo mineral antes que ponerse al trabajo de diseñar nuevas fuentes de energía, nuevas formas de vida. Son aquellos que quieren construir los nuevos edificios con las viejas técnicas, consiguiendo monstruos disipadores de energía, en vez de pensar un poco y conseguir, por el mismo precio, casas neutras en el consumo energético.

Escribo esto en Diciembre de 2008: Hace un año se presentó el último informe devastador del IPCC (de donde están sacadas casi todas las figuras de este artículo) y se celebró una reunión de responsables estatales de clima en Indonesia, que acabó en acuerdos vagos y sin compromisos formales, a la espera de seguir discutiendo el problema a lo largo de los próximos años. Los gobernantes de todo el mundo, incluidos los españoles, se presentan a si mismos como paladines contra este cambio climático, pero a la hora de la verdad siguen promoviendo el despilfarro de energía y el uso de los combustibles fósiles.

El cambio climático se está acelerando por tres motivos:

- a) La entrada de lleno en el sistema capitalista periclitado de consumo masivo de energía de la China y la India.
- b) El efecto cumulativo de los años de altas concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.
- c) La progresiva disminución del hielo ártico, que actúa como realimentación positiva.

La figura 16, tomada de Rahmstorf y otros, (Science, 4 de Mayo de 2007) indica que la evolución real del clima en los últimos años discurre por la parta alta de la banda de incertidumbre que generan los modelos.

Tenemos muy poco tiempo para detener la mayor amenaza para el sistema socioeconómico actual. Éste tiene problemas, pero son despreciables frente a los problemas de los sistemas socioeconómicos anteriores, en los que reinaba la miseria y las guerras eran endémicas. La sociedad carece del sentido de la urgencia, y los políticos, esencialmente termostatos sociales, consecuentemente también.

Tenemos las soluciones, son económicamente factibles y no solo eso: Su implantación debe generar una nueva revolución energética similar a la del carbón. Lo

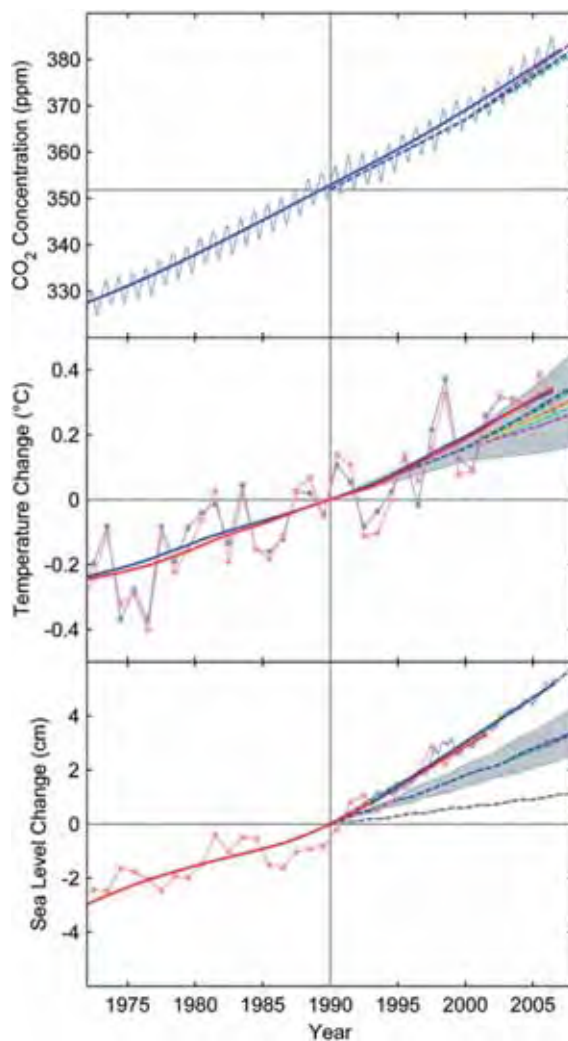


Figura 16. Evolución real de temperaturas y subidas del nivel del mar comparadas con las predicciones de los modelos.

único que dificulta la puesta en marcha de soluciones es la inercia social. No podemos esperar nada de los políticos, que prefieren vender “botellón”, pan para hoy y hambre para mañana.

Solo la reacción social, difícil pero posible, puede hacernos salir del pozo en que nos encontramos.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAM SMITH, 1776. *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*.
- DAVID RICARDO, 1817. *On the Principles of Political Economy and Taxation*.
- WILLIAMS S. JEVONS, 1862. *General Mathematical Theory of Political Economy*.
- LEON WALRAS, 1874. *Éléments d'économie politique pure, ou théorie de la richesse sociale*.
- IPCC, IVth Assessment Report, Working Group I: "The Physical Science Basis".  
<http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>
- PAGES: Past Global Changes.  
<http://www.pages.unibe.ch>

# LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA SIERRA DE GUADARRAMA. RIESGOS POTENCIALES PARA LA VEGETACIÓN

ROCÍO ALONSO\*<sup>1</sup>, VICTORIA BERMEJO<sup>1</sup>, SUSANA ELVIRA<sup>1</sup>, AMELIA AGUIRRE ALFARO<sup>2</sup>, JAVIER SANZ<sup>1</sup>, M<sup>a</sup> DOLORES HERCE GARRALETA<sup>2</sup>, IGNACIO GONZÁLEZ FERNÁNDEZ<sup>1</sup>, ROSALÍA FERNÁNDEZ PATIER<sup>2</sup>, BENJAMÍN S. GIMENO<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Ecotoxicidad de la Contaminación Atmosférica. Departamento de Medio Ambiente CIEMAT. Avda. Complutense nº 22, Madrid 28040. \* rocio.alonso@ciemat.es

<sup>2</sup>Área de Contaminación Atmosférica. Centro Nacional de Sanidad Ambiental. Instituto de Salud Carlos III. Ctra. Majadahonda-Pozuelo km. 2,2. 28220 Majadahonda, Madrid.

## INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica y el cambio climático son dos de los principales problemas ambientales a los que se enfrenta la sociedad actual y que están promoviendo esfuerzos a nivel internacional para desarrollar políticas y estrategias de gestión comunes para mitigar sus impactos. El ozono (O<sub>3</sub>) troposférico está considerado como el contaminante atmosférico más importante debido a su amplia distribución y su elevada toxicidad, además de ser un gas que contribuye al efecto invernadero (Chappelka y Samuelson, 1998; Percy *et al.*, 2000; Ashmore, 2005). En los últimos años se ha constatado también la importancia del depósito de compuestos nitrogenados atmosféricos en los ecosistemas naturales. Las actividades humanas han alterado el ciclo del nitrógeno (N) de forma más intensa que el ciclo del carbono, provocando una cascada de efectos ambientales entre los que se incluyen la formación de O<sub>3</sub> troposférico, la acidificación y la eutrofización de los ecosistemas, pudiendo además causar daños en la salud humana (Gruber y Galloway, 2008).

### El ozono troposférico

El O<sub>3</sub> es un gas atmosférico conocido principalmente por su papel protector frente a la radiación ultravioleta en las capas altas de la atmósfera. Su presencia en la estratosfera (entre 10-50 km por encima de la superficie terrestre) ha permitido el desarrollo de la vida en la tierra, al evitar la llegada de la mayor parte de la radiación comprendida entre las longitudes de onda de 210-290 nm, que es perjudicial para los seres vivos.

Alrededor del 90% del O<sub>3</sub> atmosférico se encuentra en la estratosfera cuya concentración es relativamente estable. Sin embargo, como consecuencia de la emisión de algunos compuestos químicos de origen antropogénico que destruyen el O<sub>3</sub>, en las últimas décadas se ha detectado una reducción importante en la concentración de O<sub>3</sub> en algunas zonas de la estratosfera que ha dado lugar al denominado “agujero de ozono”.

El O<sub>3</sub> también está presente de forma natural en la troposfera (la capa inferior de la atmósfera situada entre la superficie terrestre y los primeros 10 km) pero en una concentración notablemente inferior, de alrededor de 20-40 ppb<sup>1</sup>, que es lo que se conoce como fondo natural. Sin embargo, en muchas regiones las concentraciones de O<sub>3</sub> troposférico se encuentran por encima de ese nivel de fondo natural. En algunas ocasiones, estas altas concentraciones pueden deberse a

<sup>1</sup> Equivalencia de las distintas unidades que se emplean para expresar la concentración de O<sub>3</sub> en aire: 1 nmol mol<sup>-1</sup> = 1 nl l<sup>-1</sup> = 1 ppb = 1.96 µg m<sup>-3</sup>. Aunque siguiendo el Sistema Internacional de Medida (SI), la concentración de O<sub>3</sub> debería expresarse como nmol mol<sup>-1</sup>, no obstante, el Convenio de Ginebra emplea como unidad ppb (ppb h para expresar concentraciones acumuladas durante un tiempo de exposición) mientras que la Directiva Europea sobre Calidad del Aire emplea µgm<sup>-3</sup> (µgm<sup>-3</sup> h). En los trabajos publicados existe la preferencia de emplear como unidad ppb cuando se expresan promedios horarios o índices de exposición acumulada de O<sub>3</sub> (como el AOT40) que proceden de registros de datos recogidos con monitores automáticos, pero se emplean µgm<sup>-3</sup> cuando se trata de estudios realizados con dosímetros pasivos; estos criterios son los que se han seguido en el texto para facilitar su comparación con los trabajos ya publicados.





una intrusión de  $O_3$  procedente de la estratosfera, pero en general, este incremento está más relacionado con un problema de contaminación atmosférica provocado por las actividades humanas que emiten los precursores necesarios para su formación. El  $O_3$  troposférico carece de la función protectora que cumple en la estratosfera y por el contrario, debido a su fuerte capacidad oxidante, puede provocar efectos directos e indirectos en la salud humana y en los ecosistemas. Cuando la concentración de  $O_3$  sobrepasa el nivel de fondo natural, el  $O_3$  troposférico se considera un contaminante atmosférico.

El  $O_3$  troposférico está considerado como un contaminante secundario porque no se produce a partir de una fuente de emisión directa, como ocurre con otros contaminantes, por ejemplo los óxidos de azufre ( $SO_2$ ) que se emiten de forma directa con la quema de combustibles fósiles (carbón, gasolinas etc.) en centrales térmicas o calefacciones principalmente; o como los óxidos de nitrógeno ( $NO_2$ ,  $NO$ ), cuya fuente más importante es el tráfico rodado, la combustión de biomasa o los incendios. A diferencia de estos, el  $O_3$  se produce a partir de unos compuestos precursores y como consecuencia de reacciones fotoquímicas complejas que ocurren en la atmósfera que dependen principalmente de la radiación solar y de las condiciones climáticas (Figura 1). Los compuestos precursores de la formación de  $O_3$  son los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) y los compuestos orgánicos volátiles (COV), estos

últimos producto, tanto de la emisión biogénica (procedentes de la actividad biológica de océanos, humedales, suelos, pero sobre todo por la vegetación), como de la antropogénica (procedente de la combustión de combustibles fósiles). La producción de  $O_3$  troposférico es máxima cuando coinciden concentraciones elevadas de precursores con unas condiciones meteorológicas que favorecen las reacciones fotoquímicas entre ellos, como son temperaturas elevadas, alta radiación solar, ausencia de vientos fuertes y ausencia de lluvia.

Los niveles de  $O_3$  registrados en una localidad son el resultado de un equilibrio entre los procesos de formación, transporte y destrucción, que vienen determinados por una combinación de factores meteorológicos, fotoquímicos y por la distancia a los focos emisores de los compuestos precursores. Por esta razón, las concentraciones de  $O_3$  muestran una gran variación espacial y temporal, detectándose cambios en función de la latitud, la altitud, la época del año y el momento del día (Manning y Krupa, 1992). Los niveles de este contaminante en general presentan un marcado ciclo estacional, siendo más elevados en primavera y verano durante las horas centrales del día, coincidiendo con los momentos de máxima radiación solar y temperatura. Además, las concentraciones de  $O_3$  muestran una variación espacial particular, ya que sus valores más altos no se registran en las áreas donde se encuentran los focos emisores, como es el interior de las ciudades,

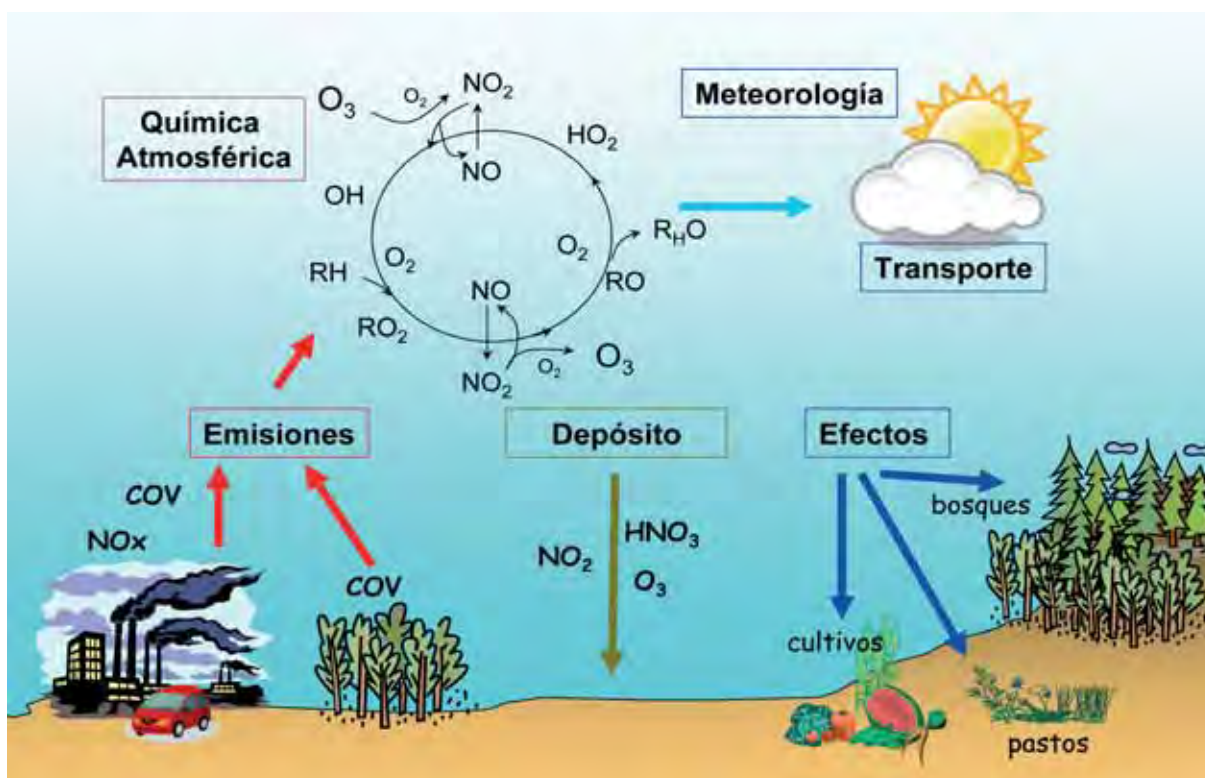


Figura 1. Ciclo fotoquímico del  $O_3$  y procesos relacionados: formación de  $O_3$  a partir de sus precursores óxidos de nitrógeno ( $NO_2$ ,  $NO$ ) y compuestos orgánicos volátiles (COV) en relación con las condiciones meteorológicas, transporte y depósito de contaminantes y efectos en cultivos y ecosistemas.

sino en las áreas circundantes más o menos alejadas (en las zonas donde los vientos dominantes dirigen los precursores) como son las áreas rurales y zonas montañosas. En las áreas de montaña, el perfil diario de  $O_3$  presenta ciertas características propias al mostrar generalmente un fondo elevado con un rango de variación diario muy poco marcado (Loibl *et al.*, 1994; Sánchez *et al.*, 2005), en contraste con las fuertes oscilaciones diarias que se observan en localidades de menor altitud. En las zonas de montaña es frecuente que la variabilidad espacial sea mayor que la temporal y que las concentraciones de  $O_3$  varíen rápidamente y en poca distancia con los cambios de altitud (Monn *et al.*, 1990, Rennerberg *et al.*, 1997).

Analizando los registros de  $O_3$  más antiguos, se ha encontrado que las concentraciones de fondo de este gas atmosférico se duplicaron en el último siglo y que este incremento está relacionado sobretodo con el aumento de la emisión de óxidos de nitrógeno, debido principalmente al uso de los combustibles fósiles (Vingarzan, 2004). Los esfuerzos internacionales para reducir los niveles de  $O_3$  elevados mediante la puesta en marcha de leyes que reduzcan las emisiones de sus precursores, como las directivas europeas para la reducción de los  $NO_x$  y COV, parecen haber sido eficaces en reducir los episodios con concentraciones muy elevadas de  $O_3$ , pero han sido ineficaces en el control del aumento del fondo de  $O_3$  cuya tasa de crecimiento anual continúa incrementándose a un ritmo que se encuentra entre el 1-2.5% anual (Jonson *et al.*, 2006). Además, también es importante destacar el papel del  $O_3$  en relación con el llamado "Cambio Global" por su comportamiento como un gas de efecto invernadero (Lefhon, 1992); aunque su importancia frente al aumento de  $CO_2$  es minoritaria, su influencia puede ir en aumento de forma paralela al incremento que se está observando en los niveles de fondo de  $O_3$  en amplias regiones del planeta.

### Efectos del ozono troposférico en los ecosistemas

El  $O_3$  troposférico es un potente agente oxidante que puede provocar efectos sobre la salud humana, produciendo irritación de ojos y vías respiratorias, aumentando la susceptibilidad a los alérgenos respiratorios y reduciendo la función pulmonar. Pero además el  $O_3$  puede provocar daños en los ecosistemas debido principalmente a la gran sensibilidad de las especies vegetales a este contaminante.

Las primeras evidencias del efecto nocivo del  $O_3$  en la vegetación fueron documentadas en California (EEUU) en los años 50, tanto en cultivos como en árboles (Middleton, 1956; Miller *et al.*, 1963), describiéndose la aparición de un moteado clorótico característico en las hojas (Figura 2) y una disminución en

el crecimiento y productividad de las plantas. Desde entonces se han realizado numerosos estudios para determinar el impacto que este contaminante provoca en las plantas y su mecanismo de acción en las distintas escalas de organización vegetal, tanto en especies de interés agrícola, como en especies herbáceas y forestales.

El  $O_3$ , al tratarse de un contaminante gaseoso, entra hacia el interior de los tejidos vegetales principalmente a través de los estomas mediante mecanismos de difusión durante el proceso habitual de intercambio de gases con la atmósfera que realizan las plantas (fotosíntesis, transpiración). Debido a este comportamiento, los efectos del  $O_3$  dependen no sólo de la concentración atmosférica del contaminante, sino también de aquellos factores climáticos y biológicos que determinan la apertura estomática y por tanto la entrada de gases al interior del tejido vegetal. Esto tiene importantes implicaciones cuando se estudia el riesgo que supone para la vegetación los niveles ambientales de  $O_3$ , ya que una atmósfera con valores elevados de este contaminante puede ser menos perjudicial para las

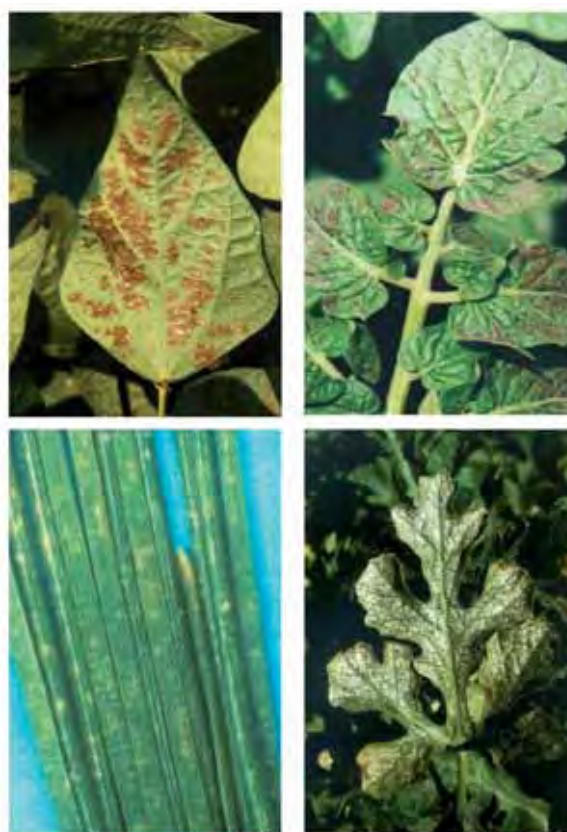


Figura 2. Síntomas visibles inducidos por una exposición experimental al  $O_3$  en tres especies hortícolas, (judía, tomate, sandía) y una forestal, pino de Alepo, en estudios realizados en la península Ibérica. Los síntomas característicos en hojas planas son el desarrollo de manchas internerviales de tonos rojizos que terminan necrosándose y tomando un color pardo o blanquecino dependiendo de la especie. En coníferas, los síntomas se desarrollan como bandeado cloróticos a lo largo de las acículas.



plantas que otra con concentraciones menores, si las condiciones atmosféricas (humedad relativa reducida, temperaturas elevadas, déficit de presión de vapor elevado) o el estado hídrico de la planta (estrés hídrico) dificultan la apertura estomática y por tanto la entrada de gases como el  $O_3$  hacia el interior vegetal a través de los estomas.

Una vez en el interior de la cavidad estomática, el  $O_3$  reacciona rápidamente con el medio acuoso produciendo radicales libres y formas activas del oxígeno que inducen procesos oxidativos a escala celular que constituyen la base del daño que este contaminante provoca en las plantas (Heath, 2008). Cuando la capacidad de protección de las células vegetales frente a las alteraciones inducidas por el  $O_3$  es sobrepasada, se producen daños a nivel metabólico, principalmente en los procesos de fijación de carbono, translocación de nutrientes o almacenamiento de sustancias de reserva, que a menudo se traducen en una disminución en las tasas de crecimiento y productividad, y una aceleración de la senescencia. Además de estos procesos a escala de organismo, el incremento de  $O_3$  puede provocar otros efectos a escala ecosistémica cuando, como consecuencia de la sensibilidad de una especie al  $O_3$ , se alteran las relaciones de competencia entre especies y con ello la estructura y diversidad de la comunidad vegetal (Taylor *et al.*, 1994), pudiendo afectar los ciclos de nutrientes y las relaciones hídricas dentro del ecosistema (McLaughlin *et al.*, 2007).

La preocupación provocada por los efectos del  $O_3$  en la vegetación llevó en los años 80 a desarrollar, tanto en Estados Unidos como en Europa, sendos programas de investigación con el fin de obtener relaciones exposición-respuesta para los cultivos agrícolas de mayor importancia económica. Estos estudios estimaban las pérdidas de producción inducidas por el  $O_3$  en las principales especies de interés agrícola, señalando pérdidas de hasta un 40% en la producción de algunos cultivos (Heck *et al.*, 1988; Runeckles y Chevone, 1992).

Desde mediados del siglo pasado, también se ha relacionado el deterioro observado en algunas masas forestales de América y Europa con la exposición a niveles ambientales de  $O_3$  elevados. Se encontró que el  $O_3$  era el principal agente responsable del empeoramiento de la salud de los bosques de pino ponderosa (*Pinus ponderosa*) y pino Jeffrey (*Pinus jeffreyi*) en el sur de California (Miller y McBride, 1999), de los bosques que se localizan en el área Mediterránea europea (Bussotti y Ferretti, 1998) y de los bosques de coníferas que circundan la ciudad de México (Fenn *et al.*, 2002). En otras regiones de Europa Central y Norte-América donde también se registró un importante deterioro de los bosques en los años 70 y 80, se encontró que aunque las concentraciones de  $O_3$  eran suficientemente

altas como para provocar daños en la vegetación, el  $O_3$  actuaba como un factor adicional que predisponía a los árboles frente a otros tipos de estrés, fundamentalmente la sequía, el ataque de patógenos y las deficiencias nutricionales (Skärby *et al.*, 1998). Mucho más desconocido es el efecto que potencialmente pueden estar provocando las concentraciones de  $O_3$  elevadas en zonas de matorrales y pastizales naturales, aunque algunos trabajos pioneros han descrito alteraciones de las relaciones de competencia entre especies inducidas por el contaminante que han desembocado en cambios en la estructura y diversidad de estas comunidades (Volk *et al.*, 2005; Bassin *et al.*, 2007).

### El ozono en el área mediterránea

Las características climatológicas de la región Mediterránea con altas temperaturas y radiación solar intensa, junto con la estabilidad en las masas de aire, favorecen la formación de contaminantes secundarios como el  $O_3$ , convirtiéndola en una de las regiones más susceptibles a la contaminación fotoquímica (Lorenzini, 1993; Millán *et al.*, 2000). El desarrollo económico experimentado en las últimas décadas ha aumentado el nivel de industrialización y la flota de vehículos de manera notable en esta región, facilitando la emisión de sus precursores. Actualmente el área mediterránea se encuentra entre las zonas de la Unión Europea donde se registran los niveles ambientales de  $O_3$  más elevados (Figura 3). Los estudios sobre la formación y dispersión de  $O_3$  en la cuenca mediterránea indican que sus altos niveles se deben principalmente al transporte a escala regional debido a la circulación de los vientos en la zona, aunque en algunos casos puede sumarse el  $O_3$  generado por la emisión de precursores desde fuentes locales (Millán *et al.*, 1996). Todos estos procesos generan un problema crónico de contaminación por  $O_3$  a escala regional de difícil control, que en la península Ibérica se ha documentado abundantemente en la costa este peninsular (Millán *et al.*, 2000; Ribas y Peñuelas., 2004) y que sucede de forma generalizada en el resto de la cuenca mediterránea (Nolle *et al.*, 2002; Kalakobas *et al.*, 2000).

El análisis de las tendencias futuras de las concentraciones de  $O_3$  indica que, asociado al cambio climático, se producirá un aumento de los niveles de  $O_3$  troposférico en el Mediterráneo ligado a la mayor frecuencia de veranos más cálidos y secos que se esperan para finales de siglo y al incremento en la emisión de compuestos biogénicos de origen natural (Langner *et al.*, 2005; Meleux *et al.*, 2007).

En el área mediterránea, se han realizado numerosos estudios experimentales que confirman la existencia de daños provocados por las concentraciones ambien-

tales de O<sub>3</sub> registradas en este área, tanto en sistemas agrícolas (Benton *et al.*, 2000; Fumagalli *et al.*, 2001, Nali *et al.*, 2002) como en forestales (Paoletti, 2006). En España, se han detectado efectos en diversos cultivos hortícolas que han resultado sensibles a los niveles elevados de O<sub>3</sub> que se registran habitualmente en la costa este peninsular durante la primavera y el verano como son el tomate (Bermejo *et al.*, 2002; Calvo *et al.*, 2007), la judía (Gimeno *et al.*, 1993; Bermejo *et al.*, 1994), la sandía (Gimeno *et al.*, 1999), la alcachofa (Sanz *et al.*, 2002) y la patata (Porcuna *et al.* 2002). Entre los daños que señalan estos estudios se encuentran alteraciones en procesos fisiológicos, aparición de síntomas foliares visibles (Figura 2), sensibilización frente a ataques víricos y disminución en la producción y/o calidad de los frutos. La extensión del área afectada se analizó mediante estudios de bioindicación en los que se emplean especies de reconocida sensibilidad al contaminante y se basan en el reconocimiento en campo de una sintomatología foliar específica inducida por el O<sub>3</sub>. Estos estudios de bioindicación mostraron que los síntomas provocados por el O<sub>3</sub> se extienden desde Barcelona hasta Almería y que su desarrollo está influenciado por factores ambientales, especialmente la humedad relativa y la velocidad del viento (Gimeno *et al.*, 1995; Peñuelas *et al.*, 1999; Ribas y Peñuelas, 2003).

Las especies forestales mediterráneas también son sensibles a los niveles elevados de O<sub>3</sub> que se registran en la zona de forma habitual. Los primeros síntomas visibles provocados por el O<sub>3</sub> en las especies leñosas del área fueron detectados en Israel, en acículas de pino de Alepo (*Pinus halepensis*) y pino piñonero (*Pinus pinea*) (Naveh *et al.*, 1980). *Pinus halepensis* es una especie particularmente sensible al O<sub>3</sub> cuyos síntomas foliares pueden detectarse en amplias zonas repartidas por todo el Este peninsular (Gimeno *et al.*, 1992; Davison *et al.*, 1995; Sanz *et al.*, 2000). Otros efectos observados incluyen alteraciones en el metabolismo, reducción en las tasa de crecimiento y disminución en la capacidad de respuesta frente a otros tipos de estrés (Elvira *et al.*, 1998; Alonso *et al.*, 2001, 2003; Inclán *et al.*, 2005). Además existen otras especies comunes en los bosques mediterráneos sensibles al O<sub>3</sub> en estudios experimentales, como la coscoja (*Quercus coccifera*), la encina (*Quercus ilex*), el algarrobo (*Ceratonia siliqua*), el olivo (*Olea europaea*) y varias especies de arce (Elvira *et al.*, 2004; Reig-Armiñana *et al.*, 2004; Ribas *et al.*, 2005 a,b; Alonso *et al.*, 2005; Cano *et al.*, 2007; Calatayud *et al.*, 2007). Otras especies forestales de clima más centroeuropeo que tienen una representación importante en los bosques del norte o en las áreas de montaña del centro y sur peninsular también pueden

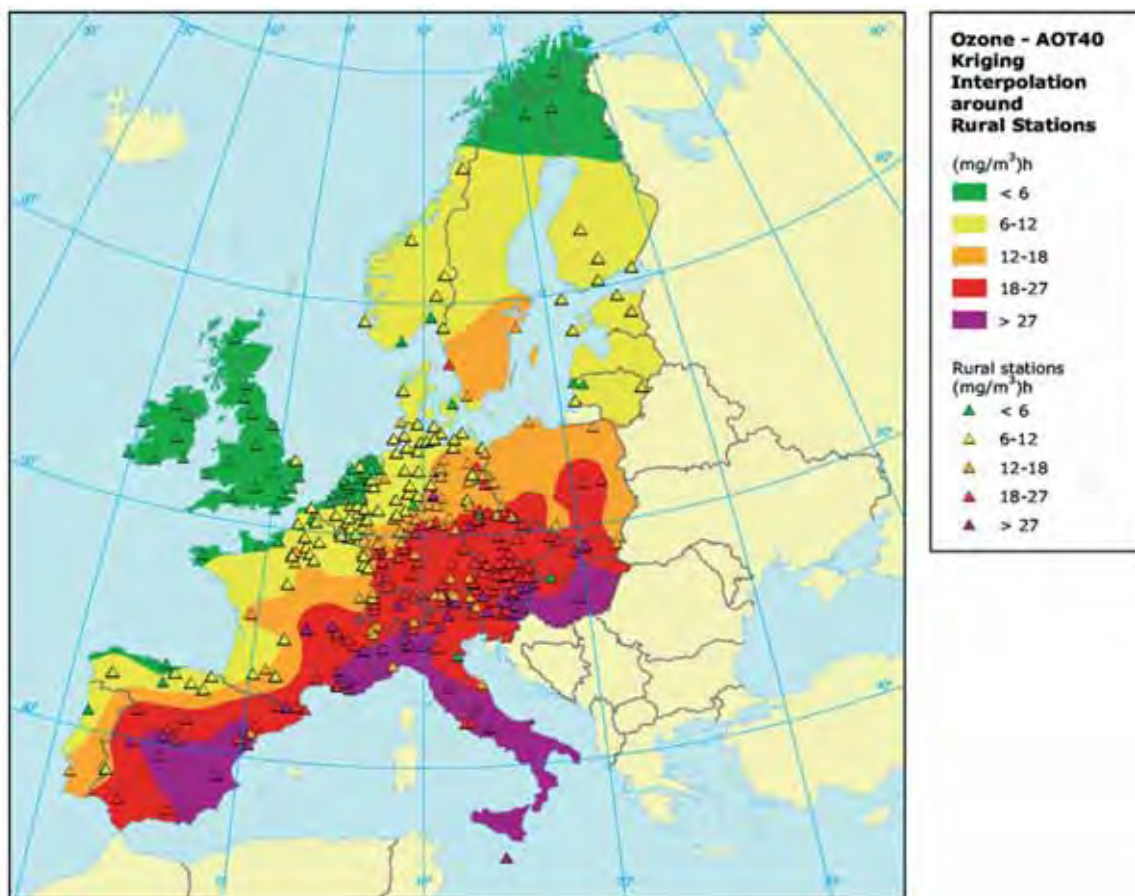


Figura 3. Distribución del ozono en Europa expresado como índice AOT40 acumulado entre mayo-julio 2002 (sólo se han empleado estaciones de medida de carácter rural). Fuente: Cortesía de European Environment Agency, EEA (<http://www.eea.europa>). En: Exposure of ecosystems to acidification, eutrophication and ozone. EEA, Copenhagen, 2005.



ser calificadas como especies sensibles al O<sub>3</sub> por los efectos observados en su crecimiento, entre ellas se encuentra el pino silvestre (*Pinus sylvestris*), el abeto blanco (*Picea abies*), el haya (*Fagus sylvatica*) y el abedul (*Betula pendula*) (UN/ECE 2007). De hecho, la definición de los límites de concentración de O<sub>3</sub> para la protección de especies forestales se basa actualmente en estas dos últimas especies (UN/ECE, 2007). Se puede recabar más información sobre la sensibilidad al O<sub>3</sub> de las especies forestales europeas en la página Web <http://www.gva.es/ceam/ICP-forests/> donde además se incluyen fotografías que muestran los síntomas foliares característicos en cada una de ellas.

En los últimos años, se está estudiando con mayor intensidad la sensibilidad al O<sub>3</sub> de las especies que forman parte de los pastizales mediterráneos anuales, comunidades particularmente interesantes por su alta biodiversidad y por su relación con los usos tradicionales del suelo. Los estudios experimentales realizados empleando semillas de anuales procedentes de las comunidades herbáceas que se desarrollan al norte de Madrid, indican la existencia de especies muy sensibles al O<sub>3</sub> pertenecientes a la familia de las leguminosas, frente a especies relativamente más resistentes de la familia de las gramíneas (Bermejo *et al.*, 2003, Gimeno *et al.*, 2004 a,b). Estas diferencias de sensibilidad entre familias que conviven dentro de la misma comunidad podrían provocar potencialmente una selección de las especies resistentes frente a las sensibles que llevaría a un empobrecimiento del pasto (pérdida de diversidad) y a una reducción de su calidad forrajera. Además, se ha encontrado que el enriquecimiento en nitrógeno (N) del sustrato interfiere con los efectos provocados por el O<sub>3</sub>, de forma que puede modular la respuesta de una especie al contaminante, pudiendo intensificar o suavizar los efectos que el O<sub>3</sub> provoca en el crecimiento y la calidad de los pastos (Sanz *et al.* 2005, 2007).

### Compuestos nitrogenados

Las emisiones de compuestos nitrogenados, tanto oxidados procedentes de la quema de combustibles fósiles, como reducidos originados por las actividades agrícolas y ganaderas, continúan aumentando a nivel mundial, y se prevé que lo sigan haciendo en los próximos años debido a la intensificación en el uso de fertilizantes y al aumento de la industrialización y concentración de la población (Gruber y Galloway, 2008). El depósito atmosférico de compuestos nitrogenados puede provocar efectos adversos en los ecosistemas, tales como toxicidad directa, alteración de los ciclos del carbono y nitrógeno, incremento del contenido de N foliar, reducciones en las tasas de C:N de la materia orgánica del suelo, alteraciones en su descomposición, incremento de las emisiones gaseosas de compuestos

nitrogenados desde el suelo, aumento de la lixiviación de nitrato hacia las aguas superficiales y subterráneas, e incremento de la biomasa en el bosque con el consiguiente aumento de riesgo de incendios (Bytnerowicz *et al.*, 1998, 1999a; Fenn *et al.*, 1998, 2003; Krupa, 2003; Gimeno *et al.*, 2009). Todas estas alteraciones provocan finalmente cambios en la estructura, diversidad y función de los ecosistemas. De hecho, la consiguiente eutrofización de los ecosistemas se ha convertido en uno de los grandes y más espectaculares, aunque socialmente aún poco conocidos, componentes del “Cambio Global” inducido en el planeta por la actividad humana. El depósito de compuestos nitrogenados podría además estar modificando los efectos que el O<sub>3</sub> provoca sobre la vegetación (Grulke *et al.*, 1998; Grulke y Balduman, 1999).

En la península Ibérica se han registrado depósitos de nitrógeno de origen atmosférico de hasta 15-22 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en bosques situados en el área de influencia de Barcelona (Rodá *et al.*, 2002), que se han asociado a incrementos en las concentraciones de N foliares de las especies arbóreas, así como en la materia orgánica del suelo (Gimeno *et al.*, 2007). También se ha detectado una tendencia al aumento del depósito de compuestos nitrogenados de origen atmosférico en lugares relativamente remotos alejados de las fuentes de contaminantes (Ávila y Rodá, 2002). La progresiva eutrofización en los ecosistemas ha sido ya detectada de la península Ibérica mediante el estudio de material de herbario recolectado a lo largo del siglo XX (Peñuelas y Filella, 2001). Sin embargo, aún está por determinar cuáles son las implicaciones que tiene este elevado aporte de compuestos nitrogenados en los ecosistemas afectados.

### Legislación de la Unión Europea. Convenio de Ginebra

La necesidad de establecer un programa conjunto a nivel internacional para desarrollar políticas y estrategias de gestión medio ambiental que controlen la contaminación atmosférica fue el origen del Convenio de Ginebra sobre Transporte a Larga Distancia y Transfronterizo de Contaminantes Atmosféricos (*Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution, CLRTAP UN/ECE*). El Convenio de Ginebra (Convenio) es la organización encargada de generar los protocolos sobre reducción de emisiones de contaminantes que deben ser reflejados en cada país mediante decretos específicos. Entre los objetivos y compromisos adquiridos por los países firmantes del Convenio están limitar y reducir la contaminación atmosférica transfronteriza, revisar periódicamente las políticas y estrategias nacionales de reducción de contaminantes y colaborar con el programa EMEP (*European Monitoring and Evaluation Programme*) sobre segui-

miento en continuo y evaluación del transporte atmosférico de contaminantes. El Convenio de Ginebra se suscribió en 1979 en el ámbito del Consejo Económico para Europa de Naciones Unidas (ONU/CEPE = UN/ECE), entró en vigor en 1983 y fue ratificado por 31 países, entre ellos los países miembros de la Unión Europea y por tanto España.

El Convenio de Ginebra adoptó la metodología de niveles/cargas críticas para establecer los protocolos de reducción de contaminantes. El nivel/carga crítica se define como la concentración/depósito umbral por encima del cual aparecen efectos perjudiciales para los receptores sensibles. Basándose en esta aproximación, las reducciones de las emisiones de los contaminantes o de sus precursores se realizarán con el fin de con-

seguir que las concentraciones sean inferiores a esos niveles o cargas críticas.

Los niveles críticos establecidos para los distintos contaminantes y receptores se consensúan en los grupos de trabajo del Convenio de acuerdo al conocimiento científico del momento y constituyen la base sobre la que se definen las directivas europeas de calidad del aire. En la Tabla 1 se indican los valores umbrales que no deben sobrepasarse para la protección de la vegetación y la salud humana indicados en la Directiva Europea de Calidad del Aire (2008/50/EC). La Tabla 2 presenta los umbrales (niveles críticos) establecidos en el Convenio de Ginebra para la protección de cultivos, especies herbáceas y forestales (UN/ECE, 2007).

**Tabla 1.** Valores indicados en la Directiva sobre la Calidad del Aire en Europa 2008/50/EC para la protección de la vegetación y la salud humana.

Directiva Europea de la Calidad del Aire 2008/50/EC	
<b>Ozono (O<sub>3</sub>)</b>	
<b>Valores Objetivo</b> (a cumplir el 1 de enero de 2010)	
<i>Protección de la Vegetación:</i> El índice AOT40 acumulado durante 3 meses (mayo-julio) debe estar por debajo de 18000 µg m <sup>-3</sup> (9000 ppb h) (media de 5 años)	
<i>Protección de la Salud Humana:</i> La media diaria máxima de 8 h no podrá superar 120 µg m <sup>-3</sup> (60 ppb) más de 25 días al año (media de 3 años)	
<b>Objetivos a largo plazo</b>	
<i>Protección de la Vegetación:</i> El índice AOT40 acumulado durante 3 meses (mayo-julio) debe estar por debajo de 6000 µg m <sup>-3</sup> (3000 ppb h)	
<i>Protección de la Salud Humana:</i> La media diaria máxima de 8 h no podrá superar 120 µg m <sup>-3</sup> (60 ppb)	
<b>Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>)</b>	
<b>Nivel Crítico para la protección de la Vegetación:</b> La media anual no podrá superar 30 µg m <sup>-3</sup>	
<b>Valor límite para la protección de la Salud Humana</b> (a cumplir el 1 de enero de 2010):	
Media horaria de NO <sub>2</sub> no podrá superar 200 µg m <sup>-3</sup> más de 18 veces al año	
Media anual de NO <sub>2</sub> no podrá supera 40 µg m <sup>-3</sup>	

**Tabla 2.** Niveles Críticos para la protección de la vegetación de acuerdo al Convenio de Ginebra (Naciones Unidas/Comisión Económica para Europa, ONU/CEPE 2007). Se establecen 3 categorías de vegetación y para cada una de ellas se indica el nivel crítico, el periodo de tiempo para su cálculo y el efecto en el que se basa. El exceso de los límites sólo indica el riesgo de daño.

Contaminante	Vegetación	NIVEL CRÍTICO	Periodo de tiempo	Efecto
<b>Ozono</b>	Cultivos	<i>Cultivos agrícolas:</i> AOT40 3000 ppb h <i>Hortícolas:</i> AOT40 6000 ppb h	<i>Cultivos agrícolas:</i> 3 meses <i>Hortícolas:</i> 3,5 meses	Reducción de la producción (5%)
	Vegetación semi-natural (herbácea)	AOT40 3000 ppb h	3 meses (o ciclo vital si es más corto)	Perennes: reducción crecimiento Anuales. Reducción de crecimiento y/o semillas (10%)
	Árboles	AOT40 5000 ppb h	Estación de crecimiento	Reducción crecimiento (5%)
<b>Óxidos de nitrógeno</b>	Toda	30 µg m <sup>-3</sup>	año	
	Toda	75 µg m <sup>-3</sup>	día	
<b>Amoniaco</b>	Briófitos y líquenes	1 µg m <sup>-3</sup>	año	
	Plantas superiores	3 µg m <sup>-3</sup>	año	
	Plantas superiores	23 µg m <sup>-3</sup>	mes	



El índice de exposición a O<sub>3</sub> AOT40, se emplea tanto en la Directiva como en el Convenio para la definición de los umbrales de protección para la vegetación. El AOT40 es un índice de exposición acumulado que se calcula como la suma de las concentraciones horarias de O<sub>3</sub> por encima del umbral de 40 ppb durante las horas diurnas de la estación de crecimiento (según la Directiva entre los meses de mayo-julio, según el Convenio entre mayo-julio para cultivos y especies herbáceas y entre abril-septiembre para las especies forestales). De acuerdo a la Directiva, para cumplir con el objetivo a corto plazo (a cumplir en el 2010), el índice 3-meses AOT40 no debe superar el valor de 9000 ppb h (18000 µg m<sup>-3</sup> h) como media de 5 años. Como objetivo a largo plazo, sin fecha de cumplimiento delimitada, la misma Directiva indica el valor del índice 3-meses AOT40 de 3000 ppb h (6000 µg m<sup>-3</sup> h) que no debe superarse para asegurar la protección de la vegetación. El Convenio de Ginebra señala distintos niveles críticos para O<sub>3</sub> en función del tipo de vegetación: un valor del índice 3-meses AOT40 de 3000 ppb h (6000 µg m<sup>-3</sup> h) para cultivos y especies herbáceas y un valor del índice 6-meses AOT40 de 5000 ppb h (10000 µg m<sup>-3</sup> h) para especies leñosas.

En el caso de la protección de la salud humana, la Directiva Europea utiliza como índice de exposición a O<sub>3</sub> la media máxima diaria de 8 horas. Para cumplir con el objetivo definido a corto plazo (para el año 2010), la media máxima diaria de 8 horas no debe superar en más de 25 días al año el valor de 60 ppb (120 µg m<sup>-3</sup>) (media de 3 años); un valor que no debería superarse en ningún caso para cumplir con el objetivo fijado a largo plazo (sin fecha delimitada de cumplimiento).

El establecimiento de los umbrales de daño de los contaminantes atmosféricos, es un proceso dinámico sometido a revisión periódica con el fin de incorporar los últimos conocimientos científicos.

## ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

A pesar de la importancia de la ciudad de Madrid como foco de emisión de contaminantes y precursores de O<sub>3</sub>, se dispone de poca información sobre la distribución espacial y temporal de los contaminantes dentro de la cuenca, especialmente en las áreas rurales. Las redes de Control de Calidad del Aire que se encuentran distribuidas por el territorio peninsular y son gestionadas por las diversas administraciones públicas, fueron diseñadas inicialmente para la protección de la salud humana, por lo que sus estaciones de seguimiento suelen localizarse dentro de los núcleos urbanos. La red que gestiona la Consejería de Medio Ambiente, Vivienda y Ordenación del Territorio de la Comunidad de Madrid (<http://gestiona.madrid.org/>

aireinternet/) dispone actualmente de 23 estaciones distribuidas por la región, de las cuales hasta 2006, sólo 3 podían considerarse de carácter rural y alejadas de la influencia de centros urbanos e industriales. En 2006 la estación de Buitrago junto con la de Guadarrama, las dos únicas estaciones válidas para el control del fondo rural de contaminación y el análisis de riesgo de la vegetación, fueron reubicadas trasladándose a El Atazar y Collado Villalba respectivamente. A partir de esta fecha los niveles de fondo rurales del norte de la CAM están representados en la Red de Control de la Calidad del Aire sólo por los valores registrados en la estación de El Atazar. Esta falta de información sobre la distribución espacial de los contaminantes en zonas rurales es especialmente importante en el caso del O<sub>3</sub>, ya que los niveles más elevados se registran en zonas alejadas de los centros urbanos donde se encuentran las estaciones de medida. Además, la distribución espacial del O<sub>3</sub> presenta una gran variabilidad por lo que no es posible extrapolar su concentración en una zona a partir de estaciones de medida alejadas.

Además de la información que puede extraerse de la Red de Control de la Calidad del Aire, la distribución espacial de los contaminantes atmosféricos en la Comunidad de Madrid ha sido caracterizada en estudios previos utilizando diferentes metodologías experimentales, aunque sus resultados abarcan periodos de tiempo limitados. Plaza *et al.* (1997) combinaron medidas realizadas con monitores, sondas de O<sub>3</sub> y aviones instrumentados con sondas meteorológicas y de O<sub>3</sub> para describir la distribución y transporte de contaminantes fotoquímicos, detectando altas concentraciones de O<sub>3</sub> a 100 km de distancia de la ciudad. Otra técnica, el empleo de dosímetros pasivos, ha permitido realizar estudios abarcando una extensión geográfica mayor y contando con gran número de puntos de muestreo (Galán-Madruga *et al.*, 2001; Sanz *et al.*, 2001). Los dosímetros pasivos son filtros impregnados con un compuesto químico específico para cada contaminante, que se exponen al aire durante un periodo de tiempo determinado, transcurrido el cual se retiran para su análisis en el laboratorio. Esta técnica permite obtener un valor de concentración media del contaminante durante el tiempo de exposición del dosímetro. Se trata de un método sencillo y de bajo coste que está siendo empleado actualmente con mucha frecuencia en los estudios de contaminación, especialmente en áreas de montaña (Ray, 2001; Alonso *et al.*, 2002; Bytnerowicz *et al.*, 2003; Ribas *et al.*, 2006; Sanz *et al.*, 2007). En los estudios realizados con dosímetros pasivos en la cuenca de Madrid, se concluye que los valores de O<sub>3</sub> más elevados se registran hacia el oeste y noroeste de la región, en zonas alejadas de la ciudad y ubicadas en las laderas de la sierra por encima de los 1000 m (Galán-Madruga *et al.*, 2001; Sanz *et al.*, 2001). Las concentraciones máximas se registraron a finales de la

primavera y en verano, con valores medios quincenales de hasta 70 ppb, valores suficientemente elevados para suponer un riesgo de daño para la vegetación sensible de la zona. Por el contrario, las concentraciones de óxidos de nitrógeno fueron mayores en el interior de la ciudad respecto a las áreas rurales alejadas (Galán-Madruga, 2004).

La información disponible sobre la concentración de contaminantes atmosféricos en zonas de elevada altitud, por encima de los 1500 m, en la sierra de Guadarrama es aún más escasa. Sánchez *et al.* (2005), midieron durante el verano de 2002 la concentración de O<sub>3</sub> empleando un monitor ubicado a 1780 m de altitud. Los valores máximos registrados, de hasta 93 ppb como promedio horario, coincidieron con vientos del SE-S-SO, indicando la influencia del transporte de la nube de contaminación de Madrid hacia la sierra.

Se han realizado estimaciones de la concentración de contaminantes en la cuenca de Madrid a partir de modelos de dispersión de contaminantes basados en los datos de emisiones de la ciudad de Madrid acoplados a modelos de circulación y predicción meteorológica, y modelos fotoquímicos y de transporte atmosférico; sus resultados apuntan en la misma dirección que los estudios experimentales. Los modelos de dispersión señalan distintos patrones en la distribución de O<sub>3</sub> dentro de la CAM en relación con la circulación de vientos a mesoescala, la circulación local de vientos y la insolación, señalando a la Sierra de Guadarrama y la Sierra de Ayllón como las áreas que más frecuentemente se encuentran expuestas a altas concentraciones de O<sub>3</sub>. Los modelos predicen o estiman valores en estas zonas que superan los límites establecidos por la legislación actual para la protección de la vegetación (Palacios *et al.*, 2002a,b, 2005). Cuando en estos modelos se consideran distintas estrategias de reducción de precursores en la ciudad de Madrid, los resultados señalan que solamente con una reducción muy severa tanto del tráfico rodado, principal emisor de NO<sub>2</sub>, como de las emisiones antropogénicas de COV, se podrían cumplir los estándares necesarios para asegurar la salud ambiental en la zona (Palacios *et al.*, 2002b).

De acuerdo a la información disponible sobre la distribución de la contaminación en la cuenca de Madrid, tanto los estudios experimentales como las estimaciones realizadas a partir de los modelos de dispersión de contaminantes, indican que los umbrales de daño actualmente definidos por la legislación para la protección de la salud humana y los ecosistemas se superan de forma relativamente frecuente en la región.

El Grupo de Ecotoxicidad de la Contaminación Atmosférica del CIEMAT lleva trabajando desde hace varios años en distintos proyectos de investigación

para evaluar la sensibilidad y el riesgo de daño de las comunidades vegetales del centro peninsular debido a su exposición crónica a los contaminantes emitidos o generados por la actividad urbana e industrial de la ciudad de Madrid, en concreto los compuestos nitrogenados y el O<sub>3</sub>. Para ello se han desarrollado de forma paralela estudios en condiciones experimentales (Bermejo *et al.*, 2003; Gimeno *et al.*, 2004a,b; Elvira *et al.*, 2004; Sanz *et al.*, 2005, 2007), junto con estudios en campo siguiendo el gradiente de altitud y contaminación que existe entre la ciudad de Madrid y la Sierra de Guadarrama (Alonso *et al.*, 2007, 2008). En ambos tipos de estudios se analiza la respuesta de las especies vegetales cuando crecen expuestas a distintas concentraciones de O<sub>3</sub> y depósito nitrogenado. En el caso de los estudios en campo siguiendo gradientes de contaminación, es imprescindible la caracterización de los niveles de contaminación que se registran en cada parcela, datos indispensables para determinar el flujo del contaminante hacia el interior del tejido vegetal y sus efectos a escala individual y ecosistémica. Los resultados que se presentan en este trabajo corresponden a la caracterización de las concentraciones ambientales de O<sub>3</sub> y compuestos nitrogenados a lo largo de un gradiente altitudinal desde la ciudad de Madrid hacia la sierra; un trabajo que se ha realizado de forma paralela al estudio del comportamiento fisiológico en campo de las especies vegetales más características.

## MATERIAL Y MÉTODOS

En junio de 2004 se establecieron 7 parcelas a lo largo de un gradiente altitudinal desde la ciudad de Madrid hacia la sierra de Guadarrama. Las parcelas se ubicaron alejadas de fuentes locales de contaminación como carreteras principales, depuradoras, granjas/establos o zonas de afluencia humana. Las parcelas se distribuyeron entre los 620 m del punto más bajo situado en El Pardo, hasta el punto más elevado situado a 2079 m en el refugio Zabala dentro del Parque Natural de la Cumbre, Circo y Lagunas de Peñalara, cubriendo una distancia de unos 80 Km. (Figura 4). Además, se situaron otros 3 puntos en la vertiente norte de la sierra de Guadarrama entre 1000 m y 1600 m en la provincia de Segovia, para analizar la posibilidad de que la nube de contaminación, el llamado *smog* fotoquímico, de la cuenca de Madrid cruzase la barrera montañosa y estuviera afectando a zonas situadas al otro lado de la sierra.

Todas las parcelas fueron equipadas con dosímetros pasivos tipo Radiello® (Fondazione Salvatore Maugeri, Italia) para la medida de O<sub>3</sub>, óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y amoníaco (NH<sub>3</sub>). Los dosímetros se colocaron a 2 m del suelo en un lugar abierto, para permitir un buen flujo de aire a través de los dosímetros, y resguarda-





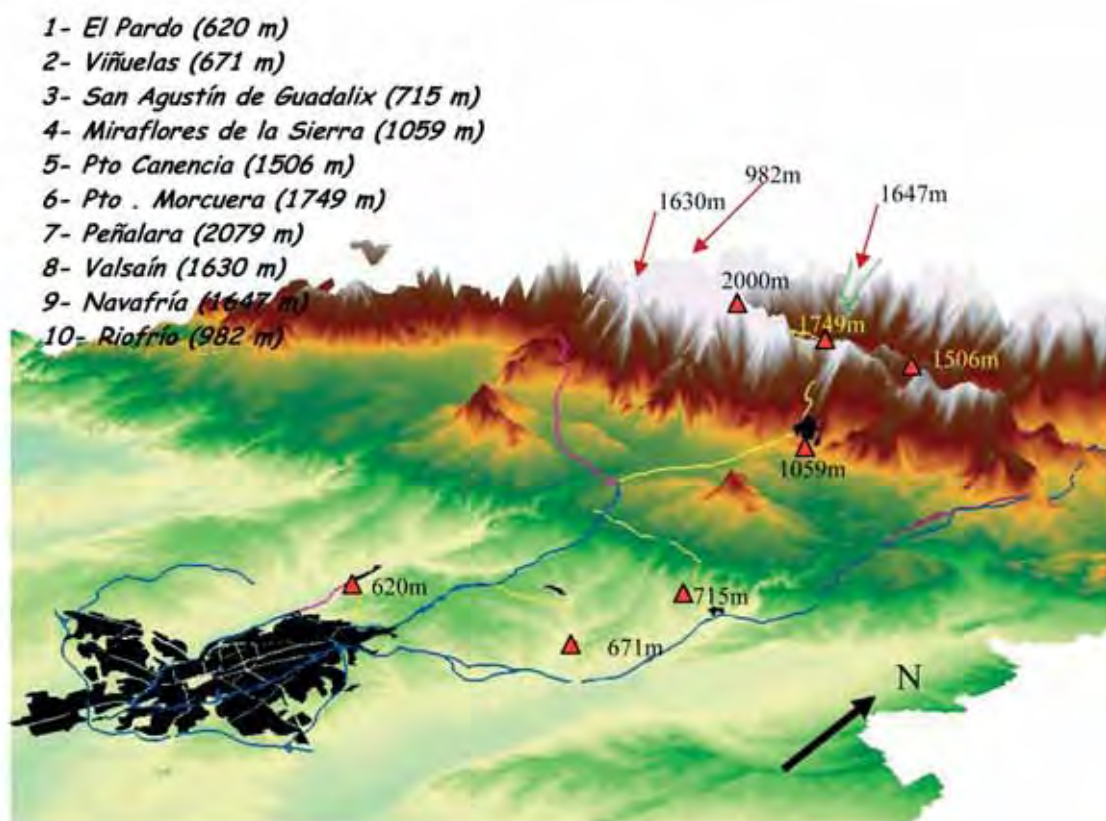


Figura 4. Localización de las parcelas de muestreo empleadas en el estudio, ubicadas a lo largo de un gradiente de altitud y distancia a la ciudad desde Madrid hacia la Sierra de Guadarrama.

dos de la lluvia y la radiación directa (Figura 5). Cada dosímetro consta de un cartucho adsorbente interno impregnado de un compuesto que reacciona específicamente con el contaminante a medir y un cuerpo difusor que permite el paso de aire hacia el cartucho. La composición específica del adsorbente de cada cartucho y los métodos de análisis en el laboratorio aprobados por la normativa europea pueden consultarse en la página web del fabricante (<http://www.radiello.com>). Esta técnica permite obtener los valores de concentración media de los contaminantes durante el período de exposición del dosímetro. Se utilizaron siempre dos réplicas de cada dosímetro y contaminante por parcela. Todas las parcelas fueron también equipadas con sensores de temperatura y humedad del aire tipo HOBO® (Onset Computer Corporation, Estados Unidos) (Figura 5).

El seguimiento de los contaminantes se realizó en dos periodos: entre junio de 2004 y octubre de 2005 con una periodicidad quincenal en el recambio los dosímetros; y entre abril del 2006 y septiembre de 2007, también con una periodicidad de recambio quincenal, excepto durante los meses de invierno (noviembre-marzo) que fue mensual. Las concentraciones de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) se analizaron sólo entre junio de 2004

y octubre de 2005, debido a los bajos niveles que se registraron en todas las parcelas.

Durante el tiempo de exposición de los dosímetros pasivos, se registraron además las concentraciones ambientales de  $\text{O}_3$  empleando monitores automáticos en continuo (SIRSA, España) que fueron ubicados en dos localidades de la sierra a distinta altitud: Cotos (1830 m) y Miraflores de la Sierra (1059 m). Estos registros han permitido estudiar de forma más detallada los perfiles diarios y estacionales de las concentraciones de  $\text{O}_3$  y se han empleado para el cálculo de los índices de exposición a  $\text{O}_3$  establecidos por la legislación europea y el Convenio de Ginebra para determinar el riesgo de daño para la vegetación y salud humana que requieren valores horarios de concentración. Estos monitores también se han empleado para la calibración de los dosímetros pasivos.

Se han empleado los datos de la estación de Buitrago del Lozoya, localizada al pie de la sierra madrileña (975 m), de la Red de Control de la Calidad del Aire de la CAM correspondientes al periodo 2004-2006 para compararlos con los valores registrados a mayor altitud en la estación de Cotos (1830 m).



Figura 5. Dosímetros pasivos para la medida de contaminantes atmosféricos y sensores meteorológicos empleados en cada una de las estaciones de muestreo ubicadas a lo largo del gradiente de estudio entre la ciudad de Madrid y la Sierra de Guadarrama. Izquierda-abajo: estación de San Agustín de Guadalix; derecha arriba y abajo: estación de Peñalara (Refugio Zabala).

## RESULTADOS

### *Gradiente de contaminación atmosférica desde la ciudad de Madrid hacia la sierra de Guadarrama.*

Los resultados obtenidos en el período de estudio desde junio de 2004 hasta agosto de 2007 empleando dosímetros pasivos confirman la existencia de un gradiente de contaminación atmosférica desde la ciudad de Madrid hacia la sierra de Guadarrama que varía con la distancia a la ciudad y con la altitud. Las concentraciones medias quincenales de  $O_3$  obtenidas con dosímetros pasivos variaron desde los  $18 \mu g m^{-3}$  registrados en El Pardo (el sitio más cercano a Madrid) en diciembre de 2006 hasta los  $135 \mu g m^{-3}$  registrados en Peñalara (refugio Zabala, el sitio de mayor elevación

a 2079 m) en julio de 2006. Los valores medios de  $O_3$  obtenidos desde junio de 2004 hasta julio de 2007 (Figura 6) se incrementaron con la distancia a Madrid y sobre todo con la altitud. El valor medio más elevado, considerando todo el período de estudio, se registró en la estación de Peñalara (refugio Zabala) alcanzando cerca de  $87 \mu g m^{-3}$ . Este gradiente de concentraciones varió estacionalmente, siendo más intenso en verano, cuando los niveles de  $O_3$  fueron más elevados, mientras que en otoño e invierno las concentraciones de  $O_3$  disminuyeron y se homogeneizaron a lo largo del gradiente. En la Figura 6 puede observarse como durante los meses de verano estudiados, la estación de Peñalara (refugio Zabala) registró una media de  $109 \mu g m^{-3}$ , mientras que la de El Pardo presentó unos valores medios de  $81 \mu g m^{-3}$ .

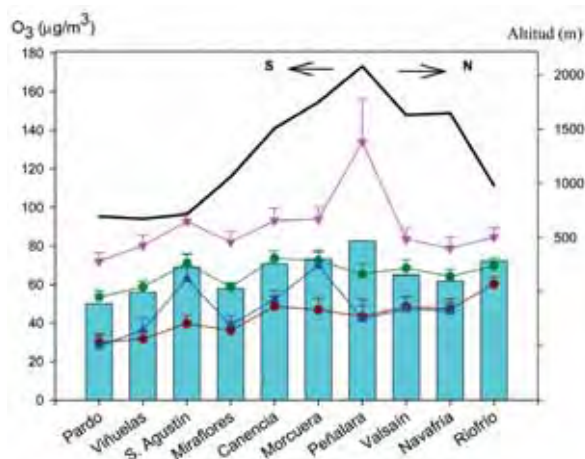


Figura 6. Promedio total y medias estacionales de las concentraciones de  $O_3$  ( $\mu g m^{-3}$ ) durante el período junio 2004 – julio 2007 obtenidos a partir de los dosímetros pasivos en las distintas estaciones de medida. ■ promedio total; — primavera; — verano; — otoño; — invierno. La línea negra continua indica la altitud.

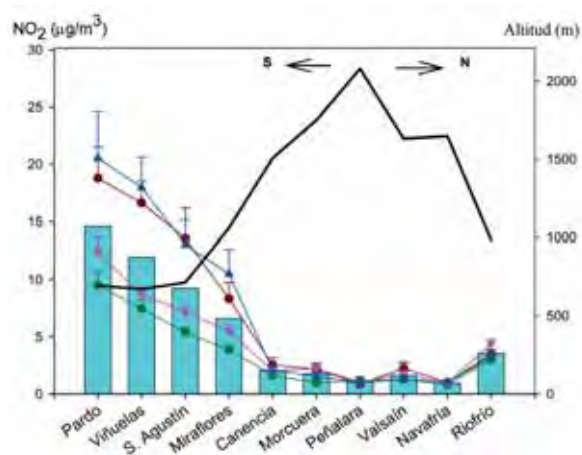


Figura 7. Promedio total y medias estacionales de  $NO_2$  ( $\mu g m^{-3}$ ) durante el período junio 2004 – julio 2007 obtenidos a partir de los dosímetros pasivos en las distintas estaciones de medida. ■ promedio total; — primavera; — verano; — otoño; — invierno. La línea negra continua indica la altitud.

El patrón de distribución de las concentraciones de dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) presentó un perfil contrario al observado para el  $O_3$ , disminuyendo con la distancia a la ciudad (Figura 7). La estación de El Pardo registró los valores medios totales más elevados, cercanos a los  $14 \mu g m^{-3}$  mientras que los valores en Peñalara (refugio Zabala) fueron cercanos a  $1 \mu g m^{-3}$ . La media quincenal más alta fue de  $43 \mu g m^{-3}$ , registrada en El Pardo, el lugar más cercano a Madrid, en noviembre de 2004.

Estacionalmente, los valores medios más elevados se registraron en otoño e invierno, disminuyendo durante la primavera y el verano. Los aumentos de  $NO_2$  observados en las cercanías de Madrid durante el otoño e invierno no se vieron reflejados en las parcelas situadas por encima de los 1500 m de altitud.

Las concentraciones de amoníaco ( $NH_3$ ) se analizaron sólo entre junio de 2004 y octubre de 2005 debido

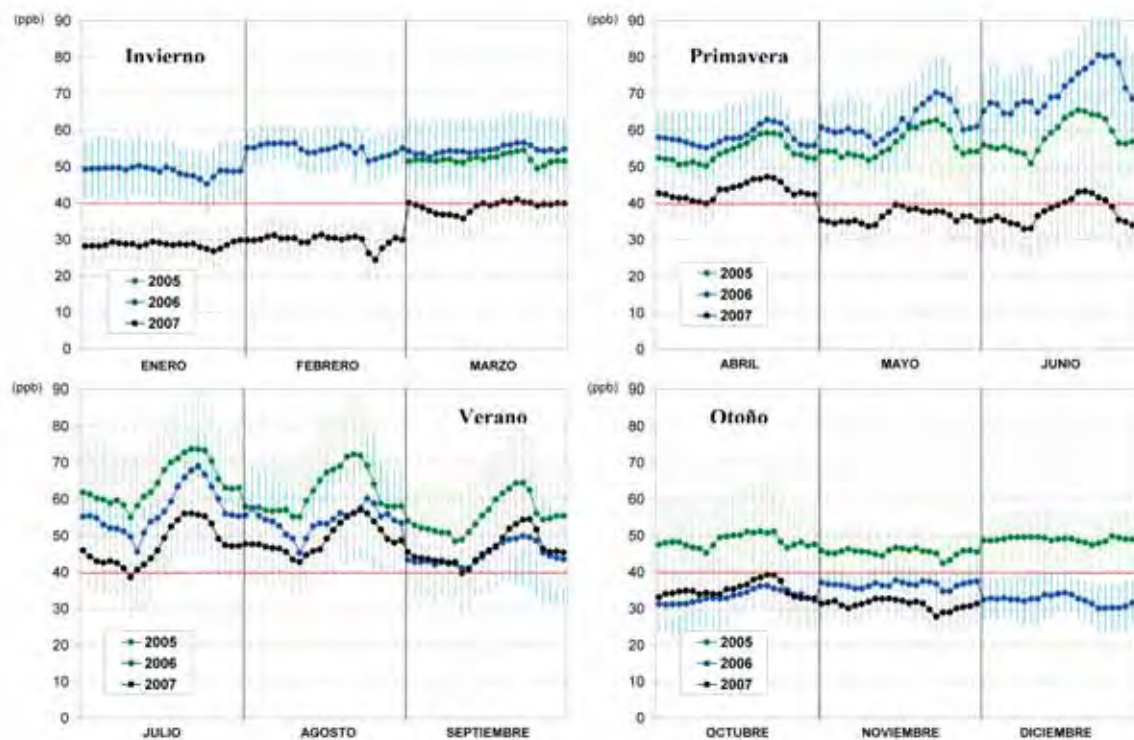


Figura 8. Perfil diario medio mensual de las concentraciones de  $O_3$  medidas en Cotos (1830 m) durante el período 2005-2007 (media horaria  $\pm$  desviación standard). La línea roja indica el valor de fondo natural de  $O_3$  considerado actualmente para el hemisferio Norte.



a los bajos niveles encontrados. Los valores registrados no mostraron un patrón claro de variación a lo largo del gradiente. El valor medio quincenal máximo fue de  $3.3 \mu\text{g m}^{-3}$  registrado en Miraflores en junio de 2005, una estación ubicada en una dehesa con una carga ganadera importante durante determinados periodos del año. En general las concentraciones de  $\text{NH}_3$  fueron más altas en primavera y verano que en otoño e invierno, aunque se mantuvieron siempre en unos valores que no representan ningún riesgo de efectos directos en la vegetación.

#### Variaciones interanuales, estacionales y diarias en las concentraciones de ozono

La Figura 8 muestra los perfiles diarios medios para los distintos meses durante el periodo de estudio (2005-2007) registrados en Cotos (1830 m). En los gráficos de la figura, organizados por estaciones, una línea roja marca el valor de 40 ppb que puede considerarse actualmente como el valor de fondo natural de  $\text{O}_3$  para el hemisferio norte. Los valores que superan este umbral durante las horas diurnas son los que se consideran para el cálculo del índice de exposición acumulada a  $\text{O}_3$  AOT40, en el que se basan los límites de riesgo de daño para la protección de la vegetación utilizados en el Convenio de Ginebra y en la legislación europea.

Las concentraciones medias de  $\text{O}_3$  en Cotos presentaron una importante variación interanual, siendo el año 2007 el de menor concentración de  $\text{O}_3$  respecto a los registros de 2005 y 2006. Estacionalmente, las concentraciones fueron mayores en primavera y verano disminuyendo en otoño e invierno. En los meses con mayores niveles de contaminante, se observó un marcado ciclo diario registrándose los valores máximos en las primeras horas de la tarde, entre las 11:00 y las 18:00 horas solares, mientras que los mínimos se produjeron durante la noche, principalmente en la madrugada. Este perfil diario se observó por encima de unos niveles de fondo elevados cercanos a las 40-50 ppb. Durante los meses de otoño e invierno se observó un perfil diario suavizado al disminuir la diferencia entre los valores diurnos y nocturnos, manteniéndose unos niveles de fondo de entre 30 y 50 ppb dependiendo del año.

Los perfiles diarios medios estacionales registrados en Cotos (1830 m) se compararon con los medidos a menor altitud en Buitrago de Lozoya (975 m) durante el período 2004-2006 (Figura 9). En ambas estaciones los valores de  $\text{O}_3$  más altos se han registrado durante la primavera y especialmente en verano, alcanzándose unas concentraciones máximas medias similares. Sin embargo, los perfiles diarios en Buitrago presentaron mayor rango de variación entre los valores diurnos y nocturnos

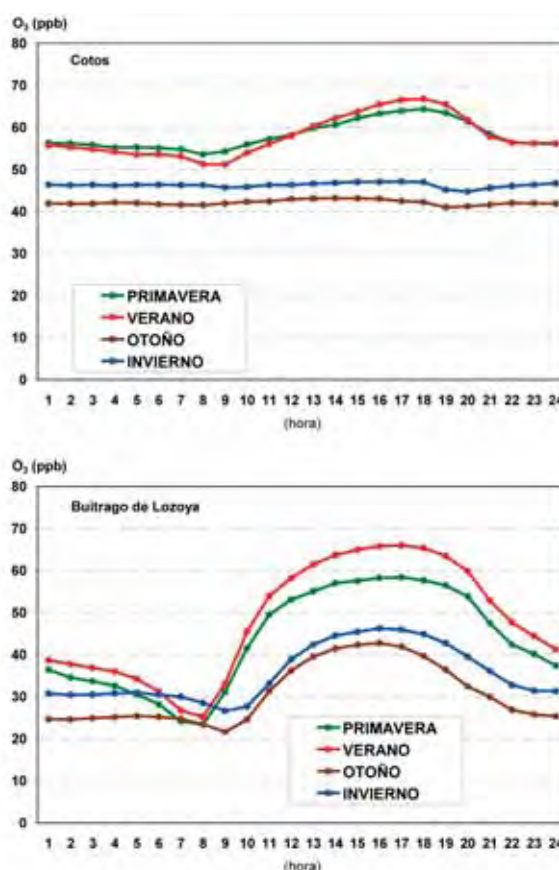


Figura 9. Perfil diario medio estacional de las concentraciones de  $\text{O}_3$  medidas en Cotos (1830 m) y Buitrago de Lozoya (975 m). Los valores de Cotos corresponden al periodo 2005-2006. Los datos de Buitrago proceden de la Red de Contaminación Atmosférica de la CAM para los años 2004-2006.

a lo largo de todo el año, registrándose valores más bajos durante la noche (20-40 ppb) respecto a Cotos.

#### Índices de exposición al ozono para la protección de la vegetación y la salud

La Figura 10 representa el valor del índice AOT40 acumulado mensualmente para la estación de Cotos a lo largo del periodo de estudio; en rojo se señalan los umbrales definidos por la Directiva Europea de la Calidad del Aire. En base a esta Directiva, el valor del índice AOT40 acumulado durante 3 meses (mayo-julio) no debe superar los 9000 ppb h (objetivo a cumplir corto plazo) o 3000 ppb h (objetivo a cumplir a largo plazo) para asegurar que no existe riesgo de daño para la vegetación sensible. El Convenio de Ginebra también establece el valor límite para asegurar la salud de los cultivos y la vegetación herbácea en el valor del índice 3-meses AOT40 de 3000 ppb h y considera el valor del índice 6-meses AOT40 de 5000 ppb h para la protección de los bosques.



**Tabla 3.** Exposición al O<sub>3</sub> expresada como AOT40 acumulada durante 3 y 6 meses en las estaciones de Cotos y Buitrago de Lozoya. Los datos de Buitrago proceden de la Red de Calidad del Aire de la Comunidad de Madrid. El valor límite del índice de exposición 3-meses AOT40 establecido en la Directiva 2008/50/EC para la protección de la vegetación es de 3000 ppb h (promedio de 5 años). El Convenio de Ginebra establece como límites el valor de 3000 ppb h acumulados durante 3 meses para la protección de especies herbáceas y cultivos y de 5000 ppb h acumulados durante 6 meses para la protección de las especies forestales (UN/ECE 2007).

Índice de exposición AOT40 (ppb h)		2005	2006
3-meses AOT40 (mayo-julio)	Cotos	26122	29911
	Buitrago	24680	21471
6-meses AOT40 (abril-septiembre)	Cotos	49180	45512
	Buitrago	44072	35432

Durante los años 2005 y 2006 los valores que alcanza el índice AOT40 acumulados durante un solo mes superan el valor de 3000 ppb h, esto sucede todos los meses durante el periodo comprendido entre marzo y septiembre de ambos años. Octubre y noviembre son los únicos meses en los que este umbral no se excede en ninguno de los dos años (Figura 10). Durante junio de 2006 y julio y agosto de 2005 se superó el valor de 9000 ppb h considerando solo un mes de exposición. Incluso considerando el año 2007 que registró los niveles de O<sub>3</sub> más bajos, el valor de 3000 ppb h se superó al considerar el índice AOT40 mes a mes entre julio y septiembre.

La Tabla 3 presenta los valores del índice acumulado AOT40 acumulado para 3 y 6 meses en Cotos y Buitrago de Lozoya para 2005 y 2006. Considerando ambas estaciones y años, el índice 3-meses AOT40 (mayo-julio) se encuentra en el rango de 21000 - 26000 ppb h; mientras que el índice 6-meses AOT40 (abril-septiembre) lo está en el de 31000-54000 ppb h. Ambos rangos sobrepasan ampliamente cualquiera de los valores umbrales considerados para la protección de la vegetación, tanto los definidos por el Convenio de Ginebra como los de la Directiva Europea.

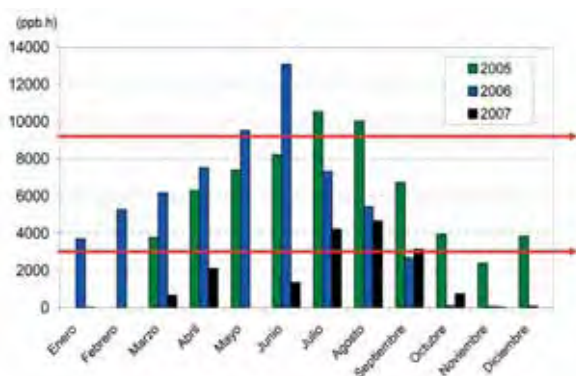


Figura 10. AOT40 mensuales en la estación de Cotos entre 2005-2007 calculadas siguiendo la Directiva Europea de Calidad del Aire (2008/50/EC). Las líneas rojas indican los valores límite para la protección de la vegetación, expresados mediante el índice acumulado 3-meses AOT40: objetivo a cumplir a corto plazo: 9000 ppb h, objetivo a cumplir a largo plazo: 3000 ppb h.

Dado el interés suscitado en el tema y aunque no se encuentra dentro de los objetivos del presente estudio, se ha calculado el índice de riesgo para la protección de la salud a partir de los niveles de O<sub>3</sub> registrados en la estación de Cotos entre 2005-2007. La Figura 11 representa las medias diarias máximas de 8 horas durante el periodo de estudio, el índice de exposición que emplea la Directiva Europea para definir los umbrales de riesgo para la salud humana. La línea roja del gráfico indica el valor que no debe superarse en más de 25 días al año (60 ppb = 120 µg m<sup>-3</sup>) para asegurar la calidad del aire en términos de salud. En los tres años analizados el número de días al año en que se excede este umbral sobrepasa los 25 días, incluso en 2006 esto sucede cuando se consideran los excesos que se registran en tan solo uno de los meses de primavera o principios de verano. El número de días al año que se excedió el umbral de salud en Cotos fue de 138, 153 y 28 para 2005, 2006 y 2007 respectivamente, que implica una media para los tres años de 106 días en los que el promedio horario máximo de 8 h supera el valor de 60 ppb. Puesto que la Directiva Europea requiere un promedio de 3 años para considerar que los límites definidos para la protección de la salud se han sobrepasado en una localidad, la extensión y resultados del presente estudio permite establecer que entre

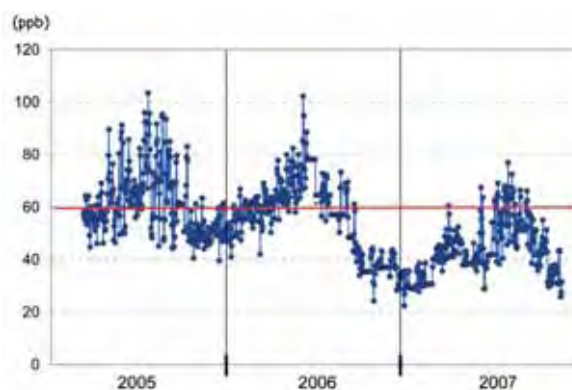


Figura 11. Concentración de ozono en Cotos expresada como media diaria máxima de 8 horas. Según la Directiva 2008/50/EC para cumplir con el objetivo a corto plazo (2010) para la protección de la salud humana, la media diaria máxima de 8 h, no debe sobrepasar el valor de 60 ppb (120 µg m<sup>-3</sup>) más de 25 días al año como promedio de 3 años.

2005-2007 en la localidad de Cotos se han excedido los umbrales de  $O_3$  para asegurar la protección de la salud humana de acuerdo a la legislación europea.

## DISCUSIÓN

El reconocimiento de que la contaminación atmosférica puede provocar efectos nocivos tanto para la salud humana como para los ecosistemas ha promovido desde mediados del siglo XX el establecimiento de redes de seguimiento de las concentraciones de contaminantes atmosféricos y el desarrollo de políticas y estrategias para controlar sus niveles. Estas redes de seguimiento de la calidad del aire se han localizado tradicionalmente en los núcleos de población, por lo que existe poca información sobre los niveles de contaminación atmosférica en las áreas rurales y especialmente en áreas de montaña. Este es el caso también de la sierra de Guadarrama situada al norte y oeste de la Comunidad de Madrid. Las nuevas técnicas de empleo de dosímetros pasivos están permitiendo realizar estudios más detallados sobre la distribución de los contaminantes atmosféricos en las áreas de montaña donde no se dispone de electricidad para utilizar los monitores en continuo.

El estudio realizado a lo largo de 3 años sobre los niveles de contaminantes atmosféricos a lo largo de un gradiente desde la ciudad de Madrid hasta la sierra de Guadarrama ha mostrado que las concentraciones de  $O_3$  aumentan con la distancia a Madrid y con la altitud, al contrario que los niveles de  $NO_x$  que son más altos en los puntos más cercanos a la ciudad.

Las concentraciones de  $NO_x$  a lo largo del gradiente se mantuvieron por debajo de los niveles críticos propuestos por el Convenio de Ginebra y por la Directiva Europea de Calidad del Aire para la protección de la salud humana y de la vegetación. Sin embargo, el depósito de compuestos nitrogenados de origen atmosférico podría estar representando una carga adicional de nitrógeno para los ecosistemas. Así, en el caso de bosques situados en el área de influencia de Barcelona, se han registrado depósitos de nitrógeno de origen atmosférico de hasta  $22 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  que se han asociado a cambios en el ciclo de nutrientes del ecosistema (Rodá *et al.*, 2002; Gimeno *et al.*, 2007). Sería muy interesante evaluar cuál es la contribución del depósito de nitrógeno de origen atmosférico en la región de Madrid y sus posibles efectos, especialmente en aquellos entornos naturales que se encuentran bajo diferentes figuras de protección.

Los niveles de  $O_3$  registrados durante el periodo 2004-2007 presentaron variaciones tanto interanuales como estacionales a lo largo del año. La variación

interanual es habitual cuando se estudian las concentraciones de  $O_3$  en una misma localidad. Por esta razón, cuando se pretende analizar el riesgo que supone la exposición al  $O_3$  para los seres vivos se requieren largos periodos de medida. La actual Directiva Europea de Calidad del Aire requiere que la superación de los límites establecidos se produzca como media de un periodo de 3 ó 5 años para considerar que la salud humana o la vegetación respectivamente están en riesgo de sufrir efectos provocados por el  $O_3$ .

La distribución de los niveles de  $O_3$  a lo largo del gradiente confirma las predicciones de los modelos de dispersión de los contaminantes en la cuenca de Madrid (Palacios *et al.*, 2002a,b, 2005) y coincide con estudios previos realizados con dosímetros pasivos que indicaban que las mayores concentraciones se registran en el oeste y noroeste de la región, en zonas alejadas de la ciudad y ubicadas en las laderas de la sierra por encima de los 1000 m de altitud (Galán-Madruga *et al.*, 2001; Sanz *et al.*, 2001). Los resultados obtenidos en el periodo 2004-2007 indican que las concentraciones de  $O_3$  aumentan con la distancia a Madrid y con la altitud.

Las altas concentraciones de  $O_3$  que habitualmente se registran en áreas rurales se deben a las emisiones de óxidos de nitrógeno e hidrocarburos (precursores del  $O_3$ ) que se emiten en las ciudades en las primeras horas de la mañana, coincidiendo con el inicio de la actividad diaria y con los picos de circulación de tráfico rodado, que son transportadas por los vientos dominantes hacia zonas rurales o forestales; hacia el norte en el caso de la cuenca de Madrid. En estas zonas, a mediodía se alcanzan los valores más elevados de producción de  $O_3$  cuando la temperatura y la radiación solar son elevadas. De forma similar las emisiones del tráfico al final de tarde se transportan por los vientos dominantes hacia las zonas rurales para contribuir a la formación de  $O_3$  durante el día siguiente (Lefhon, 1992). Esto hace que las zonas rurales presenten concentraciones de  $O_3$  más elevadas que las zonas urbanas productoras de los precursores. Además, en las zonas urbanas, las elevadas concentraciones de  $NO_x$  participan en el complejo ciclo de reacciones fotoquímicas pudiendo reaccionar con el  $O_3$  y destruirlo, contribuyendo a mantener bajas concentraciones de  $O_3$  en el interior de la ciudad.

El aumento del  $O_3$  con la altitud se ha descrito en numerosas áreas montañosas de Europa y Estados Unidos (Rennenberg *et al.*, 1997; revisión en Alonso y Bytnerowicz, 2003; Ribas y Peñuelas, 2006). Estas concentraciones altas en zonas de montaña se han relacionado con un aumento de la producción del contaminante debido a la mayor radiación solar que se recibe en estas áreas elevadas, con la disminución de los procesos de destrucción de  $O_3$ , con un aumento



de los niveles de fondo debido a la acumulación de  $O_3$  producido por procesos fotoquímicos que suceden a una escala regional y sinóptica y con la redistribución e intercambio entre la capa de mezcla atmosférica (la más cercana al suelo y en la que suceden los movimientos convectivos debidos al intercambio de calor y humedad con el suelo) y las capas más altas de la troposfera (Gerosa *et al.*, 1999; Ribas y Peñuelas, 2006). Sin embargo, aunque el aumento de las concentraciones de  $O_3$  con la altitud es el patrón más generalizado, no siempre se observa este comportamiento (Bytnerowicz *et al.*, 1999b). Algunos estudios realizados en los Alpes han encontrado que el  $O_3$  aumenta con la altitud hasta los 1700-1800 m, pero a partir de esa cota y hasta los 3000 m no se han detectado diferencias en los niveles del contaminante (Puxbaum *et al.*, 1991). De manera similar, empleando la técnica de dosímetros pasivos en las montañas de San Bernardino (California, Estados Unidos), aunque se ha observado un aumento de la concentración de  $O_3$  entre estaciones localizadas en el valle (400 m) y otras zonas de elevación media (1400 m), especialmente en los valores nocturnos (Miller *et al.*, 1986), este patrón de variación con la altitud desaparece al considerar un gradiente entre zonas localizadas a mayor altura (entre los 1200 m y 2700 m) (Alonso *et al.*, 2002); un comportamiento observado también en otras áreas montañosas (Ray, 2001; Bytnerowicz *et al.*, 2002 y 2003). Cuando se alcanzan cotas elevadas, el patrón de aumento de  $O_3$  con la altitud se diluiría al reducirse la formación de  $O_3$  por la disminución de las temperaturas, a la vez que se producen efectos de destrucción y absorción por parte de la vegetación.

Todos los estudios realizados en relación con la distribución del  $O_3$  en zonas de montaña, indican que la concentración de  $O_3$  en estas zonas está más relacionada con los procesos meteorológicos asociados a su relieve complejo, destacando entre éstos el régimen de vientos de ladera, que con la distancia geográfica a la fuente de emisión del contaminante o de sus precursores (Bytnerowicz *et al.*, 1999b; Sánchez *et al.*, 2005). Por ello, la determinación de los niveles de  $O_3$  en cada cordillera y área montañosa concreta requiere el desarrollo de estudios específicos al no poder aplicarse los modelos tradicionales que predicen la formación, transporte y distribución de contaminantes atmosféricos.

Los resultados encontrados a partir del análisis de los dosímetros pasivos localizados a lo largo del gradiente de altitud que se analiza en este estudio, indican que las concentraciones de los contaminantes analizados son similares en localidades situadas a una misma altitud pero en laderas de distinta orientación (norte/sur) de la sierra de Guadarrama. Este comportamiento indica que la contaminación atmosférica originada en la ciudad de

Madrid es capaz de atravesar la barrera geográfica de la sierra de Guadarrama y afectar a zonas de la meseta norte. En este mismo sentido, Sánchez *et al.* (2005, 2007) encontraron que los picos en los niveles de  $O_3$  registrados en una localidad a 1780 m en la vertiente sur de la sierra y en Segovia, se detectaban cuando los vientos predominantes soplaban desde el sur, indicando la relación con la contaminación procedente de la ciudad de Madrid.

Los niveles de  $O_3$  registrados en las zonas más elevadas del gradiente se encuentran en el mismo rango que los registrados durante el verano de 2002 en una localidad cercana a similar altitud (Sánchez *et al.* 2005). Se han registrado concentraciones de  $O_3$  semejantes durante el verano en el Pirineo catalán, aunque los niveles de otoño-invierno en esta zona fueron mayores que las detectadas en la sierra de Guadarrama (Ribas y Peñuelas, 2006). Algunas cadenas montañosas del centro y este de Europa y de Estados Unidos también presentan niveles ambientales de  $O_3$  similares a los registrados en la sierra de Guadarrama, o incluso más elevados en el caso de las montañas cercanas a la ciudad de Los Ángeles (revisión en Alonso y Bytnerowicz, 2003; Stockwell *et al.*, 1997; Bytnerowicz *et al.*, 2004; Wieser *et al.*, 2006).

Otra característica de los niveles de  $O_3$  en zonas de montaña es el patrón que presenta su perfil diario medio que difiere del de zonas de menor altitud. Generalmente en zonas bajas, los niveles de  $O_3$  aumentan durante la mañana con el incremento de la temperatura y la radiación solar que favorecen su formación, y presentan los valores máximos al mediodía y primeras horas de la tarde. Por la tarde las concentraciones disminuyen hasta alcanzar los valores mínimos nocturnos que se deben al cese de formación de nuevo  $O_3$  durante la noche, junto con su destrucción en presencia de  $NO_x$  en el complejo ciclo de reacciones fotoquímicas de formación-destrucción de  $O_3$ . En las áreas rurales y zonas de montaña donde no hay fuentes locales de  $NO_x$ , los procesos de destrucción de  $O_3$  durante la noche se encuentran limitados, por ello sus ciclos diarios presentan un perfil más suave, con una menor diferencia entre valores diurnos y nocturnos, ya que se mantienen concentraciones elevadas de  $O_3$  también durante la noche. Este fue el comportamiento observado en Cotos, con una característica ausencia de oscilaciones diarias sobre todo en otoño e invierno, manteniendo a lo largo de todo el día un nivel de fondo de  $O_3$  elevado, entre 30 y 50 ppb, tanto durante las horas diurnas como las nocturnas. En la primavera tardía y sobre todo en el verano, la oscilación diaria de las concentraciones de  $O_3$  se hace más evidente, con valores elevados durante las horas del día, entre 70-80 ppb, y descendiendo hasta 50 ppb en las horas nocturnas, un valor de fondo cercano al encontrado en invierno. Las medidas registradas por Sánchez *et al.* (2005)

en una ladera del Guadarrama a 1780 m coinciden en señalar un perfil diario de  $O_3$  aplanado para los meses de junio y julio, pero la oscilación diaria encontrada fue menor que la registrada en Cotos entre los años 2005-2007 durante los mismos meses. Los perfiles diarios de Buitrago de Lozoya (975 m) situada al pie de la sierra, muestran por el contrario unas variaciones diarias más acusadas a lo largo de todo el año, con unos máximos diarios similares a los encontrados en Cotos, pero con unas concentraciones más bajas durante la noche. Este perfil diario explica que los valores medios obtenidos con dosímetros pasivos sean menores en las zonas del gradiente situadas a cotas de altitud más bajas.

Las concentraciones de contaminantes atmosféricos registradas y la extensión temporal del trabajo a lo largo de tres años, permiten afirmar que las formaciones vegetales que se localizan en la base y laderas de la cara sur de la sierra de Guadarrama soportan de forma crónica valores elevados de  $O_3$ , principalmente durante las estaciones de primavera y verano, mientras que las que se localizan más cercanas a la ciudad soportarían entradas elevadas de compuestos nitrogenados. En principio, podrían considerarse potencialmente más perjudiciales para la vegetación los niveles elevados de  $O_3$  que se registran durante la primavera, ya que coinciden con el periodo de máximo crecimiento y actividad fisiológica de la vegetación, tanto en especies leñosas como herbáceas, provocando una mayor absorción del contaminante (Elvira *et al.*, 2004, 2007; Alonso *et al.*, 2007).

La exposición a concentraciones elevadas de  $O_3$  durante la primavera temprana puede ser especialmente importante para las especies herbáceas anuales adaptadas a las condiciones de clima mediterráneo, debido a que estas especies suelen aprovechar las primeras etapas de crecimiento para almacenar los productos de reserva que serán empleados posteriormente durante la etapa de floración y producción de semillas al finalizar la primavera, cuando las condiciones climatológicas y especialmente la escasez de agua, no permiten la adquisición de nutrientes (Aers *et al.*, 1991). Por ello cualquier alteración en el metabolismo y crecimiento durante la etapa temprana de estas especies puede tener consecuencias en el desarrollo posterior, fundamentalmente en la floración y producción de semillas. Se han realizado estudios previos en condiciones experimentales utilizando especies de tréboles anuales característicos de las comunidades de pastizales que crecen al pie de la sierra madrileña, que señalan una reducción notable de flores y semillas cuando las plantas se expusieron durante la etapa vegetativa (antes de la floración) a concentraciones de  $O_3$  semejantes a las registradas en el presente estudio (Gimeno *et al.*, 2004; Sanz *et al.*, 2005 y 2007). Puesto que las comunidades de pastizales anuales situadas al pie de la sierra madrileña están compuestas de un gran número de especies con distinta

sensibilidad al  $O_3$  (Bermejo *et al.*, 2003; Gimeno *et al.*, 2004), la exposición crónica a este contaminante también podría estar favoreciendo el desarrollo de las especies más resistentes frente a las sensibles, pudiendo derivar potencialmente hacia una alteración de la estructura y diversidad del ecosistema.

Las altas concentraciones de  $O_3$  que se registran durante el verano supondrían menor riesgo para las comunidades vegetales que viven al pie de la sierra, ya que se producen en un periodo en el que las comunidades de especies anuales han completado su ciclo de crecimiento y el estrés hídrico limita la actividad fisiológica de la vegetación leñosa y con ello una menor absorción de los contaminantes atmosféricos. Sin embargo, los altos niveles de  $O_3$  estivales sí representan un riesgo importante para la vegetación de montaña cuya actividad se intensifica durante el verano. Los pastizales de altura formados por especies perennes que mantienen una actividad relativamente estable durante el periodo en el que desaparece la cubierta de nieve (Elvira *et al.*, en preparación), junto con las especies forestales que crecen a media altura, podrían encontrarse entre la vegetación más sensible a los valores elevados de  $O_3$  que se registran en la sierra madrileña durante el verano. Aunque no se han realizado estudios específicos con las poblaciones de las especies montañas del Guadarrama, muchas de las especies forestales que se desarrollan en sus bosques están actualmente catalogadas como especies europeas sensibles al  $O_3$ , entre ellas el pino silvestre (*Pinus sylvestris*) que constituye la masa forestal del Parque de Peñalara (<http://www.gva.es/ceam/ICP-forests/>).

Estos resultados permiten considerar a toda la zona comprendida entre las laderas y el pie de sierra madrileña como una zona cuya vegetación se encuentra en riesgo de sufrir daños por las concentraciones elevadas de  $O_3$  de acuerdo a los criterios del Convenio de Ginebra. Si durante los próximos años el patrón de concentración de  $O_3$  en la zona se mantiene y la media de 5 años sobrepasa los valores límite establecidos en la Directiva 2008/50/EC, tal y como ha sucedido durante los años del presente estudio, podrían considerarse estas zonas como áreas de riesgo para la vegetación por los niveles de  $O_3$  elevados de acuerdo a la legislación europea actual.

## CONCLUSIONES

La contaminación atmosférica originada por la ciudad de Madrid alcanza las zonas rurales y de montaña situadas al norte de la región. Las concentraciones de los contaminantes varían a lo largo de un gradiente determinado por la altitud y la distancia a la ciudad. Los niveles ambientales de  $O_3$  aumentaron con la





distancia a la ciudad y con la altitud, alcanzándose los valores más altos en la estación de medida ubicada en el Refugio Zabala, el punto muestreado de mayor altitud (Parque de Peñalara, 2079 m.). Por el contrario, la concentración de dióxido de nitrógeno a lo largo del gradiente mostró un patrón inverso al del O<sub>3</sub>, siendo mayores los valores en las localidades más cercanas a la ciudad de Madrid.

Las comunidades vegetales de las laderas y el pie de sierra madrileña se encuentran sometidas a un problema de contaminación crónica por O<sub>3</sub>, debido a que las concentraciones registradas son suficientemente elevadas para ser consideradas un factor de riesgo para la vegetación. Durante el periodo de medida en continuo de O<sub>3</sub> en la estación de Cotos que se presenta en este trabajo (2005-2007), el valor del índice AOT40 sobrepasó ampliamente los valores umbrales definidos en el Convenio de Ginebra para la protección de especies leñosas y herbáceas. Si los resultados se repiten en los próximos años manteniéndose el valor del índice 3-meses AOT40 dentro del rango registrado durante el periodo 2005-2007, la media de 5 años sobrepasaría los límites establecidos por la Directiva Europea (2008/50/EC) para la protección de la vegetación, considerándose entonces que el O<sub>3</sub> supone un riesgo de daño para las comunidades vegetales del área de acuerdo a la legislación vigente.

Los niveles de O<sub>3</sub> registrados en Cotos a lo largo de tres años (2005-2007) permiten considerar que en esta localidad se ha excedido durante este periodo los umbrales definidos en la Directiva Europea para la protección de la salud humana.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren transmitir su agradecimiento a todas las instituciones que facilitaron el paso a fincas de uso público o privado para la instalación y seguimiento de las estaciones de medida: Patrimonio Nacional, Castillo de Viñuelas, La Cristalera (Universidad Autónoma de Madrid), Universidad Complutense de Madrid, Parque Natural de la Cumbre, Circo y Lagunas de Peñalara (Comunidad Autónoma de Madrid), Ayuntamiento de Miraflores de la Sierra. Muy especialmente agradecen el apoyo de Isidro Fernández que de forma desinteresada pero entusiasta permitió el acceso y uso de su finca, a Borja Valls y Jesús Yago por su participación en los trabajos de campo y a la guardería del Parque de Peñalara por su interés y permanente colaboración en el estudio. Este estudio ha sido financiado a través del proyecto MONTES (CONSOLIDER-INGENIO CSD2008-00040) y del Acuerdo de Colaboración entre el CIEMAT y el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino para la "Determinación de Cargas y Niveles Críticos de los contaminantes atmosféricos en el marco del Convenio de Ginebra".

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AERS R, BOOT RGA, VAN DER AART PJM (1991). The relation between above- and below-ground biomass allocation patterns and competitive ability. *Oecologia* 87: 551-559.
- ALONSO R, ELVIRA S, CASTILLO FJ, GIMENO BS (2001). Interactive effects of ozone and drought stress on pigments and activities of antioxidative enzymes in *Pinus halepensis* Mill. *Plant Cell and Environment* 24(9):905-916.
- ALONSO R, BYTNEROWICZ A, ARBAUGH M (2002). Vertical distribution of ozone and nitrogenous pollutants in an air quality Class I area, the San Gorgonio Wilderness, southern California. *TheScientificWorld* 2: 10-26.
- ALONSO R, ELVIRA S, INCLÁN R, BERMEJO V, CASTILLO FJ, GIMENO BS (2003). Effects of ozone on *Pinus halepensis* seedlings grown in open-top chambers En: *Air Pollution, Global Change and Forests in the New Millenium*. Karnosky DF, Percy KE, Chappelka AH and Simpson CJ (eds). Elsevier Science Ltd. Pp: 211-230.
- ALONSO R, ELVIRA S, BERMEJO V, GIMENO BS (2005). Does drought stress protect *Quercus ilex* from ozone effects? Different response of subsp. *ilex* and subsp. *ballota*. Proceedings of the workshop: Critical levels of ozone: further applying and developing the flux-based concept, Obergurgl, Austria, November 2005, pp. 1-7 of Poster volume.
- ALONSO R, BERMEJO V, SANZ J, VALLS B, ELVIRA S, GIMENO BS (2007). Stomatal conductance of semi-natural Mediterranean grasslands: Implications for the development of critical levels. *Environmental Pollution* 146: 692-698.
- ALONSO R, ELVIRA S, SANZ MJ, GEROSA G, EMBERSON L, BERMEJO V, GIMENO BS (2008). Sensitivity analysis of a parameterization of the stomatal component of the DO<sub>3</sub>SE model for *Quercus ilex* to estimate ozone fluxes. *Environmental Pollution* 155: 473-480.
- ASHMORE MR (2005). Assessing the future global impacts of ozone on vegetation. *Plant, Cell and Environment* 28: 949-964.



- ÁVILA A, RODÁ F (2002) Assessing decadal changes in rainwater alkalinity at a rural Mediterranean site in the Montseny Mountains (NE Spain). *Atmospheric Environment* 36: 2881-2890.
- BASSIN S, VOLK M, FUHRER J (2007). Factors affecting the ozone sensitivity of temperate European grasslands: An overview. *Environmental Pollution* 146: 678-691.
- BENTON J, FUHRER J, GIMENO BS, SKÄRBY L, PALMER-BROWN D, BALL G, ROADKNIGHT C, MILLS G (2000). An international cooperative programme indicates the widespread occurrence of ozone injury on crops. *Agriculture Ecosystems and Environment* 78: 19-30.
- BERMEJO V, ALONSO R, ELVIRA S, SALLERAS JM<sup>a</sup>, GIMENO BS (1994). Ozone effects on two bean cultivars at the Ebro Delta. En: *Resource capture by crops*. Monteith JL, Scott RK, Unsworth MH (Eds.). Nottingham University Press, Loughborough, Leicestershire, UK. pp: 393-395.
- BERMEJO V, GIMENO BS, GRANADOS I, SANTAMARÍA J, IRIGOYEN JJ, PORCUNA JL, MILLS G (2002). Investigating indices to explain the impacts of ozone on the biomass of white clover (*Trifolium repens* L. cv. Regal) at inland and coastal sites in Spain. *New Phytologist* 156: 43-55.
- BERMEJO V, GIMENO BS, SANZ J, DE LA TORRE D, GIL JM (2003). Assessment of the ozone sensitivity of 22 native plant species from Mediterranean annual pastures based on visible injury. *Atmospheric Environment* 37: 4667-4677.
- BUSSOTTI F, FERRETTI M (1998). Air pollution, forest condition and forest declines in southern Europe. An overview. *Environmental Pollution* 101: 49-65.
- BYTNEROWICZ A, DUECK T, GODZIK S (1998). Nitric oxide, nitrogen dioxide, nitric acid vapor and ammonia. En: Flagler R (Ed.), *Recognition of Air Pollution Injury to Vegetation: a Pictorial Atlas*. Air & Waste Management Association, Pittsburg, PA, pp. 5.1-5.17.
- BYTNEROWICZ A, PADGETT P, PERCY K, KRYWULT M, RIECHERS G, HOM J (1999a). Direct effects of nitric acid on forest trees. En: Miller PR, McBride JR (eds.), *Oxidant Air Pollution Impacts in the Montane Forests of Southern California: The San Bernardino Mountains Case Study*. Springer-Verlag, Ecological Series, New York, pp. 270-287.
- BYTNEROWICZ A, FENN ME, MILLER PR, ARBAUGH MJ (1999b). Wet and dry pollutant deposition to the mixed conifer forest. En: Miller PR, McBride JR (eds.), *Oxidant air pollution impacts in the montane forests of southern California*. Springer, Ecological Series, Vol. 134, New York, 235-269.
- BYTNEROWICZ A, TAUSZ M, ALONSO R, JONES D, JOHNSON R, GRULKE N (2002). Summertime distribution of air pollutants in the Sequoia National Park, California. *Environmental Pollution* 118: 187-203.
- BYTNEROWICZ A, ARBAUGH M, ALONSO R, editores. (2003) *Ozone Air Pollution in the Sierra Nevada – Distribution and Effects on Forests*. Elsevier Science Ltd.
- BYTNEROWICZ A, GODZIK B, GRODZINSKA K, FRACZEK W, MUSSELMANN R, MANNING W, BADEA O, POPESCU F, FLEISCHER P (2004). Ambient ozone in forests of the Central and Eastern European mountains. *Environmental Pollution* 130: 5-16.
- CALATAYUD V, CERVERÓ J (2007). Foliar, physiological and growth responses of four maple species exposed to ozone. *Water, Air and Soil Pollution* 185: 239-254.
- CALVO E, MARTÍN C, SANZ MJ (2007). Ozone sensitivity differences in five tomato cultivars: visible injury and effects on biomass and fruits. *Water, Air and Soil Pollution* 186: 167-181.
- CANO I, CALATAYUD V, CERVERÓ J, SANZ MJ (2007). Ozone effects on three *Sambucus* species. *Environmental Monitoring and Assessment* 128: 83-91.
- CHAPPELKA AH, SAMUELSON LJ (1998). Ambient ozone effects on forest trees of the eastern United States: a review. *New Phytologist* 139: 91-108.
- DAVISON AW, VELISSARIOU D, BARNES JD, INCLÁN R, GIMENO BS (1995). The use of Aleppo pine, *Pinus halepensis* Mill. as a bioindicator of ozone stress in Greece and Spain. En: *Bioindicators of Environmental Health*. Munavar M. ed. S.P.B. Academic Publishing. Ecovision World Monograph Series.
- ELVIRA S, ALONSO R, CASTILLO FJ, GIMENO BS (1998). On the response of pigments and antioxidants of *Pinus halepensis* seedlings to Mediterranean climatic factors and long-term ozone exposure. *New Phytologist* 138: 419-432.



- ELVIRA S, BERMEJO V, MANRIQUE E, GIMENO BS (2004). On the response of two populations of *Quercus coccifera* to ozone and its relationship with ozone uptake. *Atmospheric Environment* 38: 2305-2311.
- ELVIRA BS, ALONSO R, GIMENO BS (2007). Simulation of stomatal conductance for Aleppo pine to estimate its ozone uptake. *Environmental Pollution* 146: 617-623.
- FENN ME, POTH MA, ABER JD, BARON JS, BORMANN BT, JOHNSON DW, LEMLY AD, MCNULTY SG, RYAN DF, STOTTLEMYER R (1998). Nitrogen excess in North American ecosystems: Predisposing factors, ecosystem responses, and management strategies. *Ecological Applications* 8: 706-733.
- FENN ME, DE BAUER LI, HERNÁNDEZ-TEJEDA T, eds. (2002). Urban Air Pollution and Forests: Resources at Risk in the Mexico City Air Basin. Ecological Studies Series, vol. 156. Springer-Verlag, New York.
- FENN ME, BARON JS, ALLEN EB, RUETH HM, NYDICK KR, GEISER L, BOWMAN WD, SICKMAN JO, MEIXNER T, JOHNSON DW, NEITLICH P (2003). Ecological effects of nitrogen deposition in the western United States. *BioScience* 53: 404-420.
- FUMAGALLI I, GIMENO BS, VELISSARIOU D, MILLS G, DE TEMMERMAN L, FUHRER J. (2001) Evidence of ozone-induced adverse effects on Mediterranean vegetation. *Atmospheric Environment* 35: 2583-2587.
- GALÁN MADRUGA R, FERNÁNDEZ PATIER R, DÍAZ RAMIRO E, HERCE GARRALETA MD (2001) Estudio de las concentraciones de ozono superficial en la atmósfera de la Comunidad de Madrid usando muestreadores pasivos. *Revista de Salud Ambiental* 1: 20-29.
- GALÁN MADRUGA R (2004). Evaluación de los niveles de dióxido de nitrógeno en la atmósfera de Madrid mediante sistemas pasivos (Proyecto *Life Resolution*). Facultad de Farmacia, Universidad Complutense, Madrid.
- GEROSA G, SPINAZZI F, BALLARIN DENTI A (1999). Tropospheric ozone in alpine forest sites: air quality monitoring and statistical data analysis. *Water Air and Soil Pollution* 116: 345-350.
- GIMENO BS, VELISSARIOU D, BARNES JD, INCLÁN R, PEÑA JM, DAVISON AW (1992). Daños visibles por ozono en acículas de *Pinus halepensis* Mill. en Grecia y España. *Ecología* 6: 131-134.
- GIMENO BS, BERMEJO V, SALLERAS JM<sup>a</sup>, TARRUEL A, REINERT R (1993). Ozone effects on the yield of watermelon and two bean cultivars grown at the Ebro delta. En: *Effects of air pollution on agricultural crops in Europe. Results of the European Open Top Chamber Project*. Jäger HJ, Unsworth M, De Temmerman L, Mathy P (Eds.). CEC Air Pollution Research Report, 46. Brussels. Bélgica. pp:515-518.
- GIMENO BS, PEÑUELAS J, PORCUNA JL, REINERT RA (1995). **Biomonitoring ozone phytotoxicity** in eastern Spain. *Water, Air and Soil Pollution*. 85: 1521-1526.
- GIMENO BS, BERMEJO V, REINERT R, ZHENG Y, BARNES J (1999). Adverse effects of ambient ozone on watermelon yield and physiology at a rural site in Eastern Spain. *New phytologist* 144: 245-260.
- GIMENO BS, BERMEJO V, SANZ J, DE LA TORRE D, GIL JM (2004a). Assessment of the effects of ozone exposure and plant competition on the reproductive ability of three therophytic clover species from Iberian pastures. *Atmospheric Environment* 38: 2295-2303.
- GIMENO BS, BERMEJO V, SANZ J, DE LA TORRE D, ELVIRA S (2004b). Growth response to ozone of annual species from Mediterranean pastures. *Environmental Pollution* 132: 297-306.
- GIMENO BS, DELGADO JA, ZORRILLA JM, SANZ J, PEÑUELAS J, ÀVILA A (2007). Evidences of nutrient impairment in Catalonian forests as affected by their distance to anthropogenic sources. Presentación en el Air Pollution Workshop, Guadalajara, México.
- GIMENO BS, YUAN F, FENN ME, MEIXNER T (2009). Management Options for Mitigating Nitrogen (N) Losses from N-Saturated Mixed-Conifer Forests in California. En: Bytnerowicz A, Arbaugh M, Andersen C, Riebau A, eds. *Wildland Fires and Air Pollution. Developments in Environmental Science*. Elsevier Publishers, The Hague, Netherlands, pp. 425-455.



- 
- GRUBER N, GALLOWAY JN (2008). An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. *Nature* 451: 293-296.
  - GRULKE NE, ANDERSEN CP, FENN MF, MILLER PR (1998). Ozone exposure and nitrogen deposition lowers root biomass of ponderosa pine in the San Bernardino Mountains. *Environmental Pollution* 103: 63-73.
  - GRULKE NE, BALDUMAN L (1999). Deciduous conifers: high nitrogen deposition and ozone exposure effects on ponderosa pine. *Water Air and Soil Pollution* 116:235-248.
  - HEATH RL (2008). Modification of the biochemical pathways of plants induced by ozone: what are the varied routes to change? *Atmospheric Environment* 155: 453-463.
  - HECK WW, TAYLOR OC, TINGEY DT, eds. (1988). *Assessment of crop loss from air pollutants*. New York, USA: Elsevier Applied Science.
  - INCLÁN R, GIMENO BS, DIZENGREMEL P, SÁNCHEZ M (2005). Compensation processes of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) to ozone exposure and drought stress. *Environmental Pollution* 137: 517-524.
  - JONSON JE, SIMPSON D, FAGERLI H, SOLBERG S (2006). Can we explain the trends in European ozone levels? *Atmospheric Chemistry and Physics* 6: 51-66.
  - KALABOKAS PD, VIRAS LG, BARTZIS JG, REPAPIS CC (2000). Mediterranean rural ozone characteristics around the urban area of Athens. *Atmospheric Environment* 34: 5199-5208.
  - KRUPA SV (2003). Effects of atmospheric ammonia (NH<sub>3</sub>) on terrestrial vegetation: a review. *Environmental Pollution* 124: 179-221.
  - LANGNER L, BERGSTRÖM R, FOLTESCU V (2005). Impact of climate change on surface ozone and deposition of sulphur and nitrogen in Europe. *Atmospheric Environment* 39 (6): 1129-1141.
  - LEFOHN A.S (Ed.) (1992). *Surface Level Ozone Exposures and Their Effects on Vegetation*. Lewis Publishers, Chelsea, MI.
  - LOIBL W, WINIWARTER W, KOPSCAA, ZUEGER J, BAUMANN R (1994) Estimating the spatial distribution of ozone concentrations in complex terrain. *Atmospheric Environment* 28: 2557-2566.
  - LORENZINI G (1993). Towards an ozone climatology over the Mediterranean basin: Environmental aspects. *Medit* 2: 53-59.
  - MANNING WJ, KRUPA SV (1992). Experimental Methodology for Studying the Effects of Ozone on Crops and Trees. En: *Surface Level Ozone Exposures and Their Effects on Vegetation*. Lefohn AS, ed. Lewis Publ, pp. 93-156.
  - MCLAUGHLIN SB, WULLSCHLEGER SD, SUN G, NOSAL M (2007). Interactive effects of ozone and climate on water use, soil moisture content and streamflow in a southern Appalachian forest in the USA. *New Phytologist* 174: 125-136.
  - MELEUX F, SOLMON F, GIORGI F (2007). Increase in summer European ozone amounts due to climate change. *Atmospheric Environment* 41: 7577-7587.
  - MIDDLETON JT (1956). Response of plants to air pollution. *JAPCA* 6: 7-9.
  - MILLÁN MM, SALVADOR R, MANTILLA E, ARTIÑANO B (1996). Meteorology and photochemical air pollution in southern Europe: Experimental results from EC research projects. *Atmospheric Environment* 30: 1909-1924.
  - MILLÁN MM, MANTILLA E, SALVADOR R, CARRATALA A, SANZ MJ, ALONSO L, GANGOITI G, NAVAZO M (2000). Ozone cycles in the western Mediterranean basin: Interpretation of monitoring data in complex coastal terrain. *Journal of Applied Meteorology* 39: 487-508.
  - MILLER PR, PARMETER JRJR, TAYLOR OC, CARDIFF EA (1963). Ozone injury to the foliage of *Pinus ponderosa*. *Phytopathology* 53: 1072-1076.
  - MILLER PR, TAYLOR OC, POE MP (1986). Spatial variation of summer ozone concentrations in the San Bernardino Mountains. Presented at the 79<sup>th</sup> annual meeting of the Air Pollution Control Association, Minneapolis, MN.
  - MILLER PR, MCBRIDE JR, eds. (1999). *Oxidant Air Pollution Impacts in the Montane Forests of Southern California: a case study of the San Bernardino Mountains*. Ecological Series 134. Springer-Verlag, New York.
  - MONN C, FIEBIGER A, WANNER HU (1990). Measurements of ozone and nitrogen dioxide at different altitudes at Eggbergen (Swiss Alps) with passive sampling devices and continuous monitors. *Environmental Technology* 11: 867-876.



- NALI C, PUCCIARIELLO C, LORENZINI G (2002). Title: Ozone distribution in central Italy and its effect on crop productivity. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 90: 277-289.
- NAVEH Z, STEINBERGER EH, CHAIM S, ROTMANN A (1980). Photochemical oxidants- A threat to Mediterranean forest and upland ecosystems. *Environmental Conservation* 7: 301-309.
- NOLLE M, ELLUL R, HEINRICH G, GÜSTEN H (2002). A long-term study of background ozone concentrations in the central Mediterranean—diurnal and seasonal variations on the island of Gozo. *Atmospheric Environment* 36: 1391-1402.
- PALACIOS M, MARTILLI A, KIRCHNER F, CLAPPIER A, MARTÍN F, RODRÍGUEZ ME (2002a): Photochemical modelling of summer ozone episodes in the Greater Madrid Area. *International Journal of Environment and Pollution* 18, No. 3.
- PALACIOS M, KIRCHNER F, MARTILLI A, CLAPPIER A, MARTÍN F, RODRÍGUEZ ME (2002b). Summer Ozone Episodes in the Greater Madrid Area: Analysis of the Ozone Response to Abatement Strategies by Modelling. *Atmospheric Environment* 36: 5323-5333.
- PALACIOS M, MARTIN F, ACENA B (2005). Estimate of potentially high ozone concentration areas in the centre of the Iberian Peninsula. *International Journal of Environment and Pollution* 24: 260-271.
- PLAZA J, PUJADAS M, ARTIÑAANO B (1997). Formation and transport of the Madrid ozone plume. *Air and Waste Management Association* 47: 766-774.
- PAOLETTI E (2006). Impacts of ozone on Mediterranean forest: a review. *Environmental Pollution* 144: 463-474.
- PEÑUELAS J, RIBAS A, GIEMNO BS, FILELLA I (1999). Dependence of ozone biomonitoring on meteorological conditions of different sites in Catalonia. *Environmental Monitoring and Assessment* 56: 221-224.
- PEÑUELAS J, FILELLA I (2001). Herbaria century record of increasing eutrophication in Spanish terrestrial ecosystems. *Global Change Biology* 7: 427-433.
- PERCY KE, LEGGE AH, KRUPA SV (2000). Tropospheric ozone: A continuing threat to global forests? En: *Air Pollution, Global Change and Forests in the New Millennium*. Karnosky DF, Percy KE, Chappelka AH and Simpson CJ (eds). Elsevier Science Ltd., pp. 85-139.
- PORCUNA JL, SANZ MJ, JIMÉNEZ A, ESCRIBA C, CALVO I, MARTÍN C, VEGA JM, ORTEGA MG, MORERA B, MONTES F, PÁEZ J (2002). Los fotooxidantes y los daños en patata en la cuenca mediterránea occidental. *PHYTOMA España* 141: 20-25.
- PUXBAUM H, GABLER K, SMIDT S, GLATTES F (1991). A one year record of ozone profiles in an Alpine valley. *Atmospheric Environment* 25A: 1759-1765.
- RAY JD (2001). Spatial distribution of tropospheric ozone in national parks of California: interpretation of passive-sampler data. *The Scientific World* 1, 483-497.
- REIG-ARMIÑANA J, CALATAYUD V, CERVERÓ J, GARCÍA-BREIJOA FJ, IBARS A, SANZ MJ (2004). Effects of ozone on the foliar histology of the mastic plant (*Pistacia lentiscus L.*). *Environmental Pollution* 132: 321-331.
- RENNENBERGH, POLLEA, REUTHER M (1997). Role of ozone in forest decline on Wank Mountain (Alps). En: Sanderman H, Wellburn AR, Heath RL, eds. *Forest decline and ozone: a comparison of controlled chamber and field experiments*. Ecological Studies, Vol. 127, Springer, Berlin, 135-162.
- RIBAS A, PEÑUELAS J (2003). Biomonitoring of tropospheric ozone phytotoxicity in rural Catalonia. *Atmospheric Environment* 37: 63-71.
- RIBAS A, PEÑUELAS J (2004). Temporal patterns of surface ozone levels in different habitats of the North Western Mediterranean basin. *Atmospheric Environment* 38: 985-992.
- RIBAS A, PEÑUELAS J, ELVIRA S, GIMENO BS (2005a). Contrasting effects of ozone under different water supplies in two Mediterranean tree species. *Atmospheric Environment* 39: 685-693.
- RIBAS A, PEÑUELAS J, ELVIRA S, GIMENO BS (2005b). Ozone exposure induces the activation of leaf senescence-related processes and morphological and growth changes in seedlings of Mediterranean tree species. *Environmental Pollution* 134: 291-300.

- RIBAS A, PEÑUELAS J (2006). Surface ozone mixing ratio increase with altitude in a transect in the Catalan Pyrenees. *Atmospheric Environment* 40: 7308-7315
- RODÁ F, AVILA A, RODRIGO A (2002). Nitrogen deposition in Mediterranean forests. *Environmental Pollution* 118: 205-213.
- RONECKLES VC, CHEVONE BI (1992). Crop Responses to Ozone. En: *Surface Level Ozone Exposures and Their Effects on Vegetation*. Lefohn AS ed. Lewis Publ, pp. 189-270.
- SÁNCHEZ ML, DE TORRE B, GARCÍA MA, PÉREZ I (2005) Ozone concentrations at a high altitude station in the Central Massif (Spain). *Chemosphere* 60: 576-584.
- SÁNCHEZ ML, DE TORRE B, GARCÍA MA, PÉREZ I (2007). Ground-level ozone vertical profile measurements close to the foothills of the Guadarrama mountain range (Spain). *Atmospheric Environment* 41: 1302-1314.
- SANZ J, MUNTIFERING RB, BERMEJO V, GIMENO BS, ELVIRA S (2005). Ozone and increased nitrogen supply effects on the yield and nutritive quality of *Trifolium subterraneum*. *Atmospheric Environment* 39: 5899–5907.
- SANZ J, BERMEJO V, BENJAMÍN BS, ELVIRA S, ALONSO R (2007). Ozone sensitivity of the Mediterranean terophyte *Trifolium striatum* is modulated by soil nitrogen content. *Atmospheric Environment* 41: 8952–8962.
- SANZ MJ, CALATAYUD V, CALVO E (2000). Spatial pattern of ozone injury in Aleppo pine related to air pollution dynamics in a coastal-mountain region of eastern Spain. *Environmental Pollution* 108: 239-247.
- SANZ MJ, SANZ F, SÁNCHEZ G (2001). Spatial and annual temporal distribution of ozone concentrations in the Madrid basin using passive samplers. *The Scientific World* 1: 785-795.
- SANZ MJ, PORCUNA JL, CALVO E, MARTÍN C (2002). Artichoke cultivars (var. “Blanca de Tudela”) under elevated ozone concentrations. *The Scientific World* 2: 811-817.
- SANZ MJ, CALATAYUD V, SÁNCHEZ PEÑA G (2007). Measures of ozone concentrations using passive sampling in forests of South Western Europe. *Environmental Pollution* 145: 620-628.
- SKÄRBY L, RO-POULSEN H, WELLBURN FAM, SHEPPARD LJ, (1998). Impacts of ozone on forests: a European perspective. *New Phytologist* 139: 109-122.
- STOCKWELL WR, KRAMM G, SCHEEL H-E, MOHNEN VA, SEILER W (1997). Ozone formation, destruction and exposure in Europe and the United States. En: Sandermann H, Wellburn AR, Heath RL (Eds.), *Forest Decline and Ozone*. Springer, Berlin, pp. 1–38.
- TAYLOR GE, JOHNSON DW, ANDERSEN CP (1994). Air pollution and forest ecosystems: a regional to global perspective. *Ecological Applications* 4 (4): 662-689.
- UN/ECE (2007). Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads & levels and air pollution effects, risks and trends. Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. <http://www.icpmapping.org>.
- VINGARZAN R (2004). A review of surface ozone background levels and trends. *Atmospheric Environment* 38: 3431-3442.
- VOLK M, BUNGENER P, CONTAT F, MONTAMI M, FUHRER J (2005). Grassland declined by a quarter in 5 years of free-air ozone fumigation. *Global Change biology* 12: 74-83.
- WIESER G, MANNING WJ, TAUSZ M, BYTNEROWICZ A (2006). Evidence for potential impacts on *Pinus cembra* L., at mountain sites in Europe: an overview. *Environmental Pollution* 139: 53–58.





# RECONSTRUCCIÓN PALEOAMBIENTAL Y PALEOCLIMÁTICA EN EL ENTORNO DEL VALLE DEL LOZOYA: VALORACIÓN DEL IMPACTO HUMANO

M. BLANCA RUIZ ZAPATA<sup>1</sup>, CLEMENCIA GÓMEZ GONZÁLEZ<sup>1</sup>, JUAN I. SANTISTEBAN<sup>2</sup>, ROSA MEDIAVILLA<sup>3</sup>, FERNANDO DOMINGUEZ<sup>3</sup>, MARIA JOSÉ GIL GARCÍA<sup>1</sup>, JOSÉ ANTONIO LÓPEZ SÁEZ<sup>4</sup> Y MARÍA SOLEDAD VERA<sup>5</sup>.

<sup>1</sup>Dpto. Geología. Edificio de Ciencias. Universidad de Alcalá. 28871 Alcalá de Henares. blanca.ruiz@uah.es

<sup>2</sup>Departamento de Estratigrafía. Universidad Complutense de Madrid. 28040 Madrid. juancho@geo.ucm.es

<sup>3</sup>Instituto Geológico y Minero de España. Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid. r.medivilla@igme.es

<sup>4</sup>Laboratorio de Arqueobiología, CSIC, Calle Albasanz, 26-28, 28037, Madrid. alopez@ih.csic.es

<sup>5</sup>Departamento de Química Analítica. Edificio de Ciencias. Universidad de Alcalá. 28871 Alcalá de Henares. soledad.vera@uah.es

## RESUMEN

Se presentan los datos palinológicos, procedentes de un testigo obtenido en el depósito higroturboso RAS, situado en el término municipal de Rascafría (Valle del Lozoya, Madrid), y cuya formación es posterior a los 2.455±35 BP (670-410 BC). Los resultados obtenidos se explican como consecuencia de la interacción del clima y del hombre en el área de estudio. Se trata de un paisaje vegetal abierto, dominado por herbáceas tipo Cichorioideae, Asteraceae, Chenopodiaceae, Poaceae y *Plantago lanceolata*, acompañado de un pobre cortejo arbustivo (*Erica arborea*, Rosaceae, *Juniperus* y Cistaceae) y arbóreo (*Pinus sylvestris*, en menor proporción *P. pinaster* y *Quercus*, y algunas presencias de *Betula*, y *Corylus*). De los microfósiles no polínicos destacan *Pseudoschizaea circula* y *Glomus*, relacionados con procesos erosivos *in situ* favorecidos por fenómenos de sobrepastoreo así como los que definen las condiciones tróficas de la turbera. Esta información pone de manifiesto la presencia de un paisaje de carácter mediterráneo, abierto y antropizado, dominado por zonas de pastizal dedicadas al ganado, según se deduce en el diagrama polínico a través de las proporciones de los componentes nitrófilos de carácter zoógeno y antropozoógeno. La presencia de taxones de ribera (*Alnus* y *Fraxinus*) y las variaciones de Cyperaceae, representante mayoritario de los taxones higro-hidrófilos, se infieren fluctuaciones en la tasa de humedad. La información proporcionada por los valores de MS (3-12), del pH (5,4-6,2) y de la conductividad (10-160 µS/cm) del sedimento, constatan los cambios detectados en la vegetación y en los usos del suelo.

## INTRODUCCIÓN

Se pretende explicar la evolución de la vegetación en el entorno del valle del Lozoya, desde la perspectiva del clima y de la actividad antrópica, durante el Holoceno Reciente, a partir de los datos polínicos procedentes de una turbera (RAS) localizada en el término municipal de Rascafría (entre la carretera M-604 y la urbanización los Grifos; coordenadas UTM X: 427300, Y: 4529336) a una altitud de 1180 msnm (Figura, 1). En este entorno afloran arcosas y sedimentos silíceos paleocenos sobre los que se depositaron limos, arenas y conglomerados cuaternarios. Desde el punto de vista de la vegetación y de acuerdo a las características de zonación biogeográfica (Rivas-Martínez, 2007), la zona de estudio se encuentra enmarcada en el reino Holártico, distrito Guadarramense y piso bioclimático Supramediterráneo medio. En el mapa de series de vegetación del Valle del Paular (Fernández, 1988), el área de estudio se localiza dentro de la serie *Luzulo*

*forsteri-Querceto pyrenaicae* correspondiente a bosques climatófilos de roble melojo (*Quercus pyrenaica*) que se desarrollan sobre suelos silíceos. La vegetación del entorno está constituida por formaciones dominadas por árboles y arbustos planocaducifolios, entre los que se encuentran abedules, fresnos, melojos, sauces, avellanos, madreselvas, entre otros; en las laderas de la sierra y hacia el fondo del valle, se extienden melojares y pinares de *P. sylvestris* (Franco, 1995) y en el propio valle, donde se localiza la turbera objeto de este trabajo, se desarrollan pastizales dedicados al ganado. La temperatura media anual está entre 8° y 13° C, la media de las mínimas del mes mas frío entre -4° y -1° C, y la media de las máximas del mes mas frío entre 2° y 9° C. El índice de termicidad está entre 60 y 120 (Peinado Lorca & Rivas-Martínez, 1987).







Figura 3. Situación geográfica de la turbera RAS (Rascafría, Madrid. Spain).

## MATERIAL Y MÉTODOS

El testigo analizado (RAS) se obtuvo con una sonda manual tipo Rusa, alcanzando una profundidad de 60 cm. Para la extracción de los granos de polen se utilizó la metodología clásica (Faegri *et al.*, 1989) y el residuo fue sometido a técnicas de enriquecimiento, mediante la concentración del polen por flotación en licor de Thoulet (densidad 2).

La lectura y recuento del contenido polínico se llevó a cabo de acuerdo al método propuesto por Cambón (1981). Para la determinación de los tipos polínicos se tomó como referencia la palinoteca de la Universidad de Alcalá y se realizó de acuerdo a Valdés *et al.* (1987), Moore *et al.* (1991) y Reille (1992). La diferenciación de *Pinus pinaster* se basó en Arobba (1979), Díaz-Laviada (1989) y Mateus (1992).

Los datos de polen se presentan como frecuencia relativa de polen de cada taxón en un diagrama polínico elaborado mediante los programas informáticos TILIA-TILIA GRAPH y TGView 1.6.2 (Grimm, 1987).

Con el fin de facilitar la lectura del diagrama, los taxones identificados se han agrupado de acuerdo a su procedencia arbórea, arbustiva y herbácea y su ordenación en cada grupo responde a la similitud de las exigencias ecológicas, al conocimiento de la vegetación del entorno estudiado y a su lluvia polínica actual (Gómez, 2007), con objeto de facilitar la

interpretación de los datos; bajo esta perspectiva se utilizan los términos: bosque ripario (*Alnus*, *Fraxinus* y *Corylus*); taxones nitrófilos antrópicos (Cichorioideae, Papaveraceae, Boraginaceae, *Rumex* y *Artemisia*); taxones nitrófilos antrópozoógenos (*Urtica dioica* tipo, *Plantago lanceolata*, Rubiaceae, Chenopodiaceae/ Amaranthaceae), pastizales vivaces de origen antropozoógeno o pastos de siega, procedentes generalmente de pastizales anuales por pastoreo: Poaceae, Fabaceae, Caryophyllaceae, Brassicaceae, y taxones ubiquistas (*Saxifraga*, *Sanguisorba*, Solanaceae, Valerianaceae, entre otros). Los tipos esporales y microfósiles no polínicos también se han agrupado de acuerdo con sus afinidades ecológicas en coprófilos: 55 A, 113, 165; tipos Eutróficos: 140, 181, 182, 332D y tipo Oligotrófico: 170 (López-Sáez *et al.*, 2000, 2005; Galop y López-Sáez, 2002; Cugny, 2004; Prager *et al.*, 2006; Riera *et al.*, 2006; Van Gel y Aptroot, 2006). Además se han señalado con presencias los taxones con valores menores al 1% y para los que su valor oscila entre el 1% y el 5%, se ha utilizado una exageración del 5%.

Las medidas de MS (suceptibilidad magnética) se han realizado en los laboratorios del IGME (Madrid) directamente sobre la columna del sondeo; el pH y conductividad se llevaron a cabo en el Laboratorio de Química Analítica de la Universidad de Alcalá, de acuerdo con la norma ISO 10390:2005 (se prepararon suspensiones de suelo en agua (1:5), agitando vigorosamente durante 10 minutos, a continuación se dejaron en reposo para llevar a cabo las medidas de pH con un pH-metro Inolab y en el sobrenadante se midió la

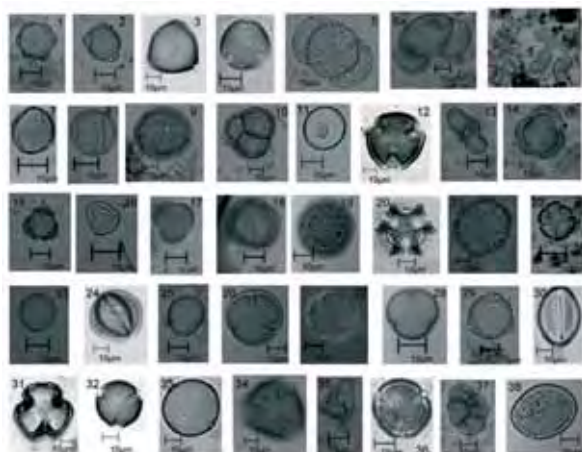


Lámina-1: 1. *Alnus*. 2. *Betula*. 3. *Corylus*. 4. *Fraxinus*. 5. *Juglans*. 6. *Pinus pinaster*. 6a-b. *Pinus sylvestris* tipo. 7. *Quercus ilex-coccifera* tipo. 8. *Quercus pyrenaica* tipo. 9. *Cistus ladanifer* tipo. 10. *Erica arborea* tipo. 11. *Juniperus* tipo. 12. Rosaceae. 13. Apiaceae. 14. *Artemisia*. 15. *Aster* tipo. 16. Boraginaceae. 17. Brassicaceae. 18. Caryophyllaceae. 19. Chenopodiaceae / Amaranthaceae. 20. Cichorioideae. 21. *Fumaria officinalis* tipo. 22. Lamiaceae. 23. *Plantago lanceolata* tipo. 24. *Papaver rhoeas* tipo. 26. Poaceae. 26. Polygonaceae. 27. Rubiaceae. 28. *Rumex acetosa* tipo. 29. *Sanguisorba*. 30. *Saxifraga*. 31. Scrophulariaceae. 32. Solanaceae. 33. *Urtica dioica* tipo. 34. Violaceae. 35. Cyperaceae. 36. Ranunculaceae. 37. *Typha latifolia* tipo. 38. *Typha angustifolia* tipo

conductividad, utilizando un conductímetro Crison. En todo momento, la temperatura de trabajo fue de 25±1°C.

Se han realizado tres dataciones (Tabla 1). Dos en Beta Analytic Inc. y la tercera en Gliwice Radiocarbon Laboratory. Los datos han sido calibrados usando OxCal version 3.10 (Bronk-Ramsey, 1995, 2001).

## RESULTADOS

Se han identificado un total de 43 taxones de los que 10 son arbóreos, 4 arbustivos y 23 herbáceos (Lámina 1), además de 6 taxones acuáticos y 25 microfósiles no polínicos (Lámina 2) y esporas.

Los datos se presentan tanto en el Diagrama polínico detallado (Figura 2), como en el diagrama polínico sin-



Lámina 2- Principales Microfósiles No Polínicos de carácter: Oligotrófico: a. *Rivularia* tipo (Tipo 170). Meso-eutrofitas: b. Tipo 140. c. Tipo 181. d. Tipo 182. e. *Cosmarium* cf. *sportella* (Tipo 332D). f. Tipo 731. g1-g2. *Spirogyra*. Coprofilos: h1-h2. *Sordaria* sp (Tipo 55A). i1-i2. *Sporormiella* sp. (Tipo 113). j. *Riccia* cf. *sorocarpa* (Tipo 165). k. *Podospora* sp (Tipo 368). Few cattle: l1-l2-l3. Nematode. Procesos erosivos: m. *Pseudoschizaea circula*. n. *Glomus* cf. *fasciculatum* (Tipo 207)

tético (Figura 3), en el que los taxones quedan agrupados de acuerdo a sus exigencias ecológicas, facilitando así la lectura del mismo; destaca en primer lugar, el dominio del polen herbáceo, debido al desarrollo alcanzado por los taxones nitrófilos antrópicos (principalmente de Cichorioideae, Asteraceae y Papaveraceae), los pastizales vivaces de origen antropozoógeno (Poaceae, Fabaceae y Brassicaceae) y los taxones nitrófilos antropozoógenos (*Plantago lanceolata*, *Urtica dioica* y Chenopodiaceae/Amaranthaceae). El componente arbustivo, poco representativo lo conforman Ericaceae, Rosaceae, *Juniperus* y Cistaceae; en el estrato arbóreo domina *Pinus*, de carácter regional (Gil, 1992; Franco, 1995; Franco *et al.*, 1998; Uzquiano, 2002), acompañado de *Quercus* y en menor proporción *Betula*, y taxones de ribera (*Alnus*, *Fraxinus* y *Corylus*). Los taxones higró-hidrófilos están representados por Cyperaceae, Ranunculaceae, Nymphaeaceae, *Polygonum* y *Typha*. Dentro de los palinomorfos no polínicos destacan *Pseudoschizaea circula* y el tipo 207 (asociado a procesos erosivos) y los tipos 368 (coprófilos), 140, 181 y 731 (eutróficos), 170 (oligotróficos) y 351 (ocupación humana). Los valores de MS varían de 3 a 12 y definen

Tabla 1. Dataciones <sup>14</sup>C de la turbera RAS

Muestra	Lab. No.	Prof. (cm)	<sup>14</sup> C (BP)	Material datado	cal. BC/AD (2 σ) 95.4%
RAS-1	Beta-219292	15-20	50 ± 40	sedimento orgánico	1680AD - 1730AD (23.3%)
					1800AD - 1930AD (68.8%)
					1950AD - 1960AD (3.3%)
RAS-2	Beta-219293	30-33	920 ± 50	sedimento orgánico	1020AD - 1220AD (95.4%)
RAS-3	GdA-844	58-61	2455 ± 35	sedimento orgánico	760BC - 680BC (24.6%)
					670BC - 410BC (70.8%)
RAS-4	Beta-229292	42-43	2230 ± 40	sedimento orgánico	390BC - 200BC (95.4%)



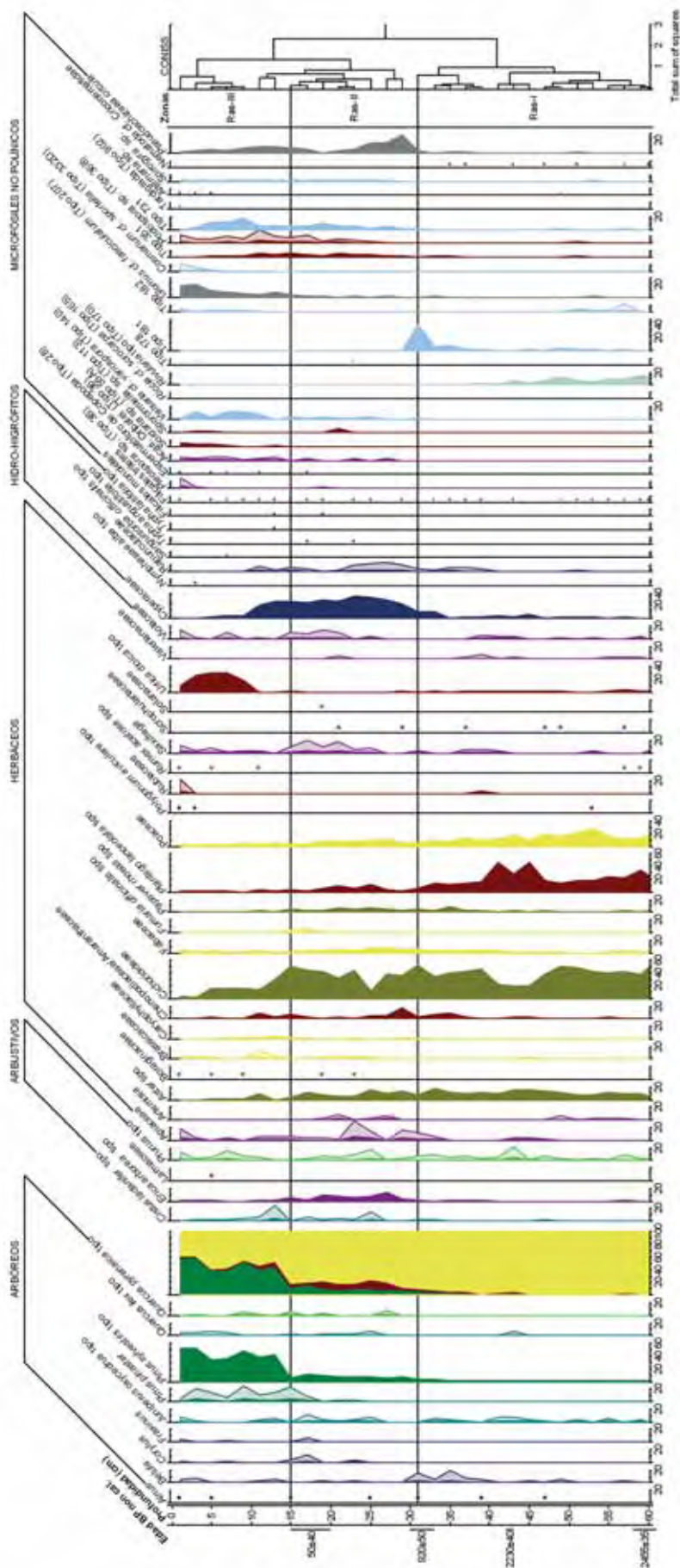


Figura 2.- Diagrama políptico detallado de la turbera RAS



los cambios en la naturaleza litológica del sedimento, que a su vez puede relacionarse con una mayor o menor erosión del suelo; así a valores más bajos, menor erosión y/o mayor concentración de materia orgánica. Los valores del pH y de la conductividad del sedimento (Figura 4) están comprendidos entre 5,4 y 6,2 y entre 10 y 160  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , respectivamente, mostrando un cierto grado de acidez en el suelo así como el reflejo de la mayor o menor cantidad de iones disueltos en el medio.

Del comportamiento, tanto cuantitativo como cualitativo de la vegetación, de los microfósiles no polínicos y de las curvas de MS, Ph y conductividad, se han definido tres zonas polínicas:

**ZONA I:** se define para el intervalo de 31 a 60 cm, y su formación tiene lugar entre los 2455 $\pm$ 50 BP y 920 $\pm$ 50 BP. Litológicamente (arcosas rojizas con motas verdes) es bastante homogénea, y en cuanto a la vegetación, se identifica como la fase de mayor deforestación; dominan los taxones nitrófilos antrópicos y antropozoógenos y en menor medida los pastizales vivaces. Los microfósiles no polínicos definen condiciones oligotróficas y el *Phyllum* Nematoda, aunque en este caso se trata sólo de presencias puntuales, se relaciona con la poca presión

pastoral. *Pinus sylvestris* es el taxón más abundante del estrato arbóreo, y *Betula*, con tan sólo un 5%, refleja los mayores porcentajes del diagrama así como un aumento progresivo hacia techo. Los valores de Ph y de la conductividad son, los más bajos del perfil; en cuanto a los de MS, oscila de 5 a 8.

**ZONA II:** corresponde a la parte media del diagrama polínico (31-15 cm), y está datada entre 920 $\pm$ 50 BP y 50 $\pm$ 40 BP. Litológicamente se define como unos limos arenosos de color verde oscuro en tránsito a materia orgánica. Se caracteriza por el aumento del estrato arbóreo debido a la expansión de *Pinus sylvestris* tipo y en menor medida a los taxones de ribera (*Alnus*, *Fraxinus* y *Corylus*), a *Betula*, *Quercus ilex* y *Q. pyrenaica*. También se detecta la expansión del estrato arbustivo (*Erica arborea*), el incremento de los taxones higro-hidrófilos (Cyperaceae, llega a alcanzar valores cercanos al 40%), y la primera expansión de los microfósiles no polínicos de condiciones meso-eutróficas, de ocupación humana, de afinidad coprófila así como los asociados a procesos erosivos (*Pseudoschizaea circula*). Los valores de Ph y de conductividad aumentan progresivamente y MS alcanza los valores más altos del perfil (12).

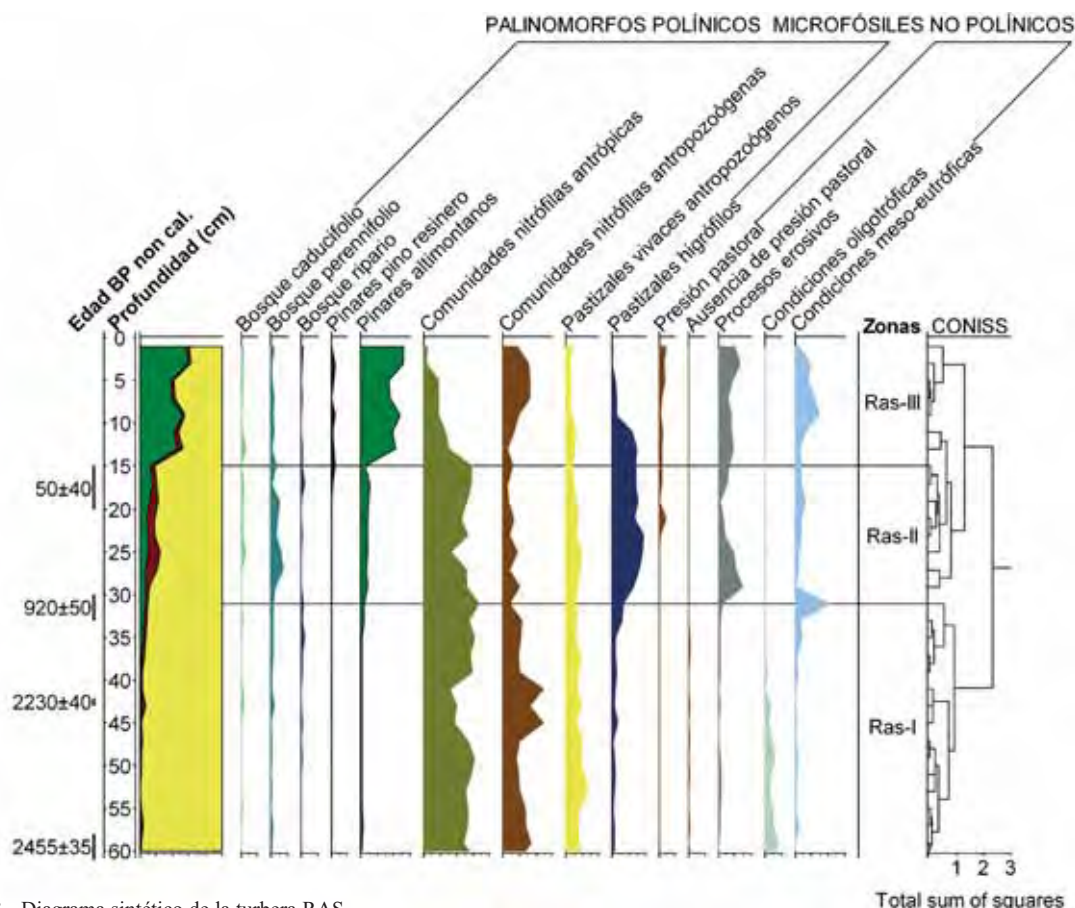


Figura 3.- Diagrama sintético de la turbera RAS



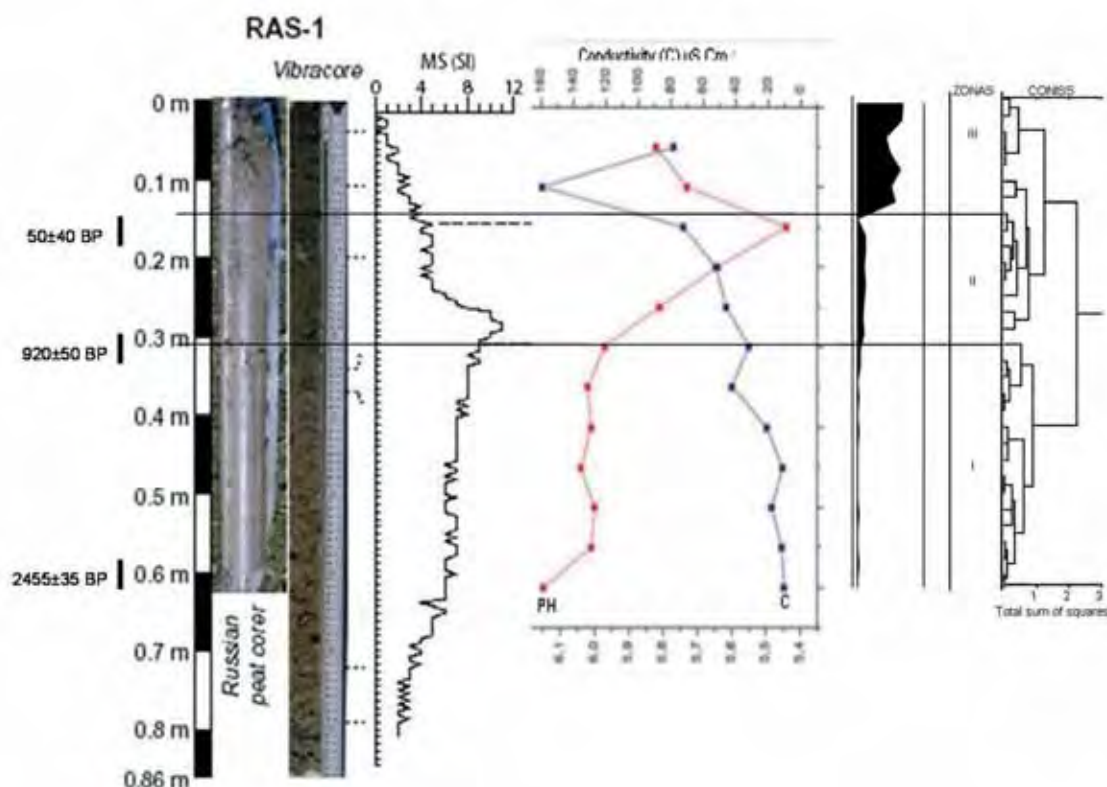


Figura 4.- Relación entre los valores de pH y conductividad con la vegetación en la turbera RAS

**ZONA III:** comprende los 15 cm superiores y está caracterizada por la naturaleza orgánica de su sedimento; su formación tiene lugar a partir de los 50±40 BP hasta la actualidad. Destaca en primer lugar, el incremento del componente arbóreo regional, constituido básicamente por *Pinus sylvestris* y *P. pinaster* y en menor proporción por *Quercus ilex*. Disminuye el componente herbáceo, debido al descenso de los taxones nitrófilos antrópicos y de los pastizales vivaces, al tiempo que aumentan los taxones nitrófilos antropozoógenos (*Urtica dioica*). Los taxones higró-hidrófilos (Cyperaceae), disminuyen alcanzando porcentajes inferiores al 5%. Los microfósiles no polínicos de condiciones meso-eutroficadas, coprófilos y los asociados a procesos erosivos (*Pseudoschizaea circula*), aumentan frente al descenso de los asociados a ocupación humana. Los valores de MS descienden progresivamente, alcanzando valores próximos a 0, y tanto el Ph como la conductividad varían bruscamente hacia los valores de origen.

## INTERPRETACIÓN

La información obtenida revela la instalación de unas condiciones climática de carácter mediterráneo, fundamentalmente seco, acordes con las características generales del Holoceno reciente (Desprat *et al.*, 2003; Rubio y del Valle, 2005; Domínguez Castro *et al.*,

2006), y con fluctuaciones en la tasa de humedad, evidenciada a través del comportamiento de los taxones de ribera y acuáticos. El desarrollo de *Betula*, junto a las dataciones numéricas, permiten detectar el evento climático de la PEG (Font Tullot, 2000; Desprat *et al.*, 2003; Rubio y del Valle, 2005; Gil *et al.*, 2006); la caída porcentual del mismo junto a la pérdida de formaciones arbóreas más húmedas y frescas, y al desarrollo de ambos tipos de *Quercus* y de Ericaceae, definen la recuperación térmica posterior.

Bajo estas condiciones climáticas se detecta una fuerte antropización en el área, puesta de manifiesto a través del desarrollo de los taxones herbáceos de carácter nitrófilo antrópico y antropozoógeno y de los pastizales vivaces, así como por la existencia y comportamiento de los microfósiles no polínicos que definen las variaciones en las condiciones tróficas de la turbera y su relación con la presencia de organismos, de ocupación humana y de los procesos de erosión asociados a las prácticas de ocupación/deforestación del entorno.

Combinando esta información con la evolución observada en la secuencia polínica se pueden establecer los cambios y modalidad e intensidad de los usos del suelo. Así en la zona polínica I (2455±50 BP y los 920±50 BP), el área presenta el proceso de mayor deforestación, en parte como respuesta a un paisaje vegetal heredado típico del Holoceno reciente; en cuanto al

impacto antrópico detectado, los valores alcanzados por los taxones nitrófilos antrópicos y antropozoógenos y en menor proporción de los pastizales vivaces, abogan por un uso ganadero del suelo, si bien la presencia del tipo polínico 170, que permite sugerir unas condiciones meso-oligotróficas para este intervalo y la existencia de Nematoda, cuyo desarrollo requiere aguas relativamente limpias, con pocos nutrientes y escasa o nula presión ganadera, definen a ese uso un carácter esporádico, pudiendo estar relacionado con la trashumancia estival. En la zona polínica II ( $920\pm 50$  BP y  $50\pm 40$  BP), se aprecian cambios significativos tanto en la vegetación arbórea, que muestra los primeros síntomas de recuperación, debidos tanto a *Pinus*, como a *Quercus* y a los taxones de ribera, cuyos desarrollos alternan con *Betula*, reflejando unas condiciones de carácter más cálido así como fluctuaciones en la tasa de humedad; la expansión mostrada por los taxones acuáticos, fundamentalmente Cyperaceae, refleja la pérdida de área encharcada que favorece la colonización de su ribera, y por tanto puede ser interpretada como un síntoma de pérdida de humedad tal y como se constata en el desarrollo de *Artemisia* y de Chenopodiaceae. Otro hecho importante en esta zona es el referente al desarrollo de los microfósiles no polínicos relacionados con condiciones meso-eutróficas en detrimento de los indicadores de carácter oligotrófico y la desaparición de Nematodos. Estos cambios responden a un aumento de residuos naturales y/o antrópicos ricos en fosfatos y nitratos, es decir de los nutrientes en el medio y que pueden interpretarse bajo la óptica de un uso ganadero más continuado, lo cual queda avalado por la aparición de microfósiles no polínicos de afinidades coprófilas y de ocupación humana.

Al mismo tiempo se aprecian cambios significativos en los valores de MS, del Ph y de la conductividad; MS aumenta progresivamente como respuesta a un aumento de la erosión, alcanzando su máximo en la zona-II. El pH en líneas generales muestra el predominio de unas condiciones ácidas, en principio relacionadas con el tipo de suelo, proveniente de la degradación de las rocas del entorno (gneis), sin embargo el aumento de acidez que experimenta en esta zona puede ser explicado por la acidificación del suelo producida por la acumulación de acículas de pino en el nivel más superficial del suelo, coincidente con el aumento de los procesos erosivos, manifestados en el desarrollo de los microfósiles no polínicos *Pseudoschizaeae circula* y del tipo 207. El aumento de la conductividad, probablemente esté relacionada con el incremento de iones disueltos en el medio favorecido por la presión ganadera.

En cuanto a la zona III ( $50\pm 40$  BP), refleja la culminación de los hechos detectados en la zona anterior, en cuanto a la presión pastoral, a través del comportamien-

to tanto del polen como de los microfósiles no polínicos y sus efectos en el medio, asociados a los cambios en los valores de la conductividad, el Ph, y MS. Sin embargo el hecho más destacable durante este intervalo radica en el aumento progresivo del componente arbóreo de carácter regional (*Pinus*); esta expansión del pinar puede estar relacionada con las campañas de repoblación iniciadas a raíz de la implementación de la Ley de 1877, de siembras y plantaciones, que propició la extensión antrópica de los pinares en el área (Bauer, 1991) y que al igual que en el área de estudio han sido puestas de manifiesto en otros puntos de la sierra (Gil, 1992; Vázquez, 1992; Franco Múgica, 1995; Gil *et al.*, 1995; Franco Múgica *et al.*, 1998).

Con todo ello podemos resumir la evolución de la actividad antrópica en la zona de estudio desde los  $2455\pm 50$  BP- $920\pm 50$  BP (Zona I), momento definido por una presión ganadera esporádica, posiblemente relacionada con la trashumancia estival. La mayor antropización, tiene lugar a partir de  $920\pm 50$  BP (Zonas II y III), cuando de un modo progresivo se detecta la presencia del ganado a lo largo de todo el año y no únicamente en el verano; este incremento del pastoreo representa un aprovechamiento mayor del uso del suelo (Galop *et al.*, 2003) así como una acentuación de los procesos erosivos. Hechos similares se quedan igualmente constatados en áreas próximas, como es el caso de la Tolla de El Berrueco (Ruiz *et al.*, 2006; Gómez 2007) situado a 25 kilómetros al oeste de la zona de estudio.

## AGRADECIMIENTOS

Nuestro más sincero agradecimiento al Parque Natural de Peñalara por las facilidades que nos han proporcionado en nuestras campañas de campo. A la familia Bartolomé por permitirnos el acceso a la finca de su propiedad donde se realizó el sondeo. Este trabajo se ha podido realizar gracias a los proyectos de investigación CAM-UAH2005/041 y CCG06-UAH-AMB-0614.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AROBBA, D. 1979. Determinazione di “*Pinus halepensis*” Miller e “*Pinus pinaster*” Aiton sulla base di differenze palinologiche. *Archivio Botanico e Biogeografico Italiano*, 55 (3), 83-92.
- BAUER, 1991. *Los montes de España en la historia*. Servicio de Publicaciones Agrarias. Ministerio de Agricultura, Madrid, 610 pp.
- BRONK-RAMSEY, C. 1995. Radiocarbon Calibration and Analysis of Stratigraphy: The OxCal Program. *Radiocarbon*, 37 (2), 425-430.
- BRONK-RAMSEY, C. 2001. Development of the Radiocarbon Program OxCal. *Radiocarbon*, 43 (2A), 355-363.
- CAMBÓN, G. 1981. *Relations entre le contenu pollinique de l’atmosphère et le couvert vegetal méditerranée occidentale a Montpellier (France), Valencia (Espagne) et Oran (algerie)*. Tesis Doctoral. Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 105 pp. (inédita).
- CUGNY, C. 2004. *L’apport des microfósiles non-polliniques à l’histoire de l’environnement Pyrénéen. Entre référentiel actuel et reconstitution paléoenvironnementale. Une nouvelle approche appliquée à la reconstitution paléoenvironnementale du massif d’Iraty (Pays Basque)*. DEA Université de Toulouse-Le mirail, 186 pp. (Inédito).
- DESPRAT, S., SANCHEZ GONI, M.F. & LOUTRE, M.F. 2003. Revealing climatic variability of the last three millennia in northwestern Iberia using pollen influx data. *Earth and Planetary Science*, 21, 63-78.
- DÍAZ-LAVIADA, T. 1989. *Variabilidad del grano de polen en especies ibéricas del género Pinus*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 140 pp. (inédita).
- DOMÍNGUEZ CASTRO, F., SANTISTEBAN, J.I., MEDIAVILLA, R., DEAN, W., LÓPEZ-PAMO, E., GIL, M.J., & RUIZ ZAPATA, M.B. 2006. Environmental and geochemical record of human-induced changes in C storage during the last millennium in a temperate wetland (Las Tablas de Daimiel National Park, central Spain). *Tellus*, 58, 573-585.
- FAEGRI, K., KALAND, P.E. & KRZYWINSKI, K.J. 1989. *Textbook of Pollen Analysis*. John Wiley and Sons, New York, 328 pp.
- FERNÁNDEZ, F. 1988. *Estudio florístico y fitosociológico del Valle del Paular (Madrid)*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, 759 pp. (inédita).
- FONT TULLOT, I. 2000. *Climatología de España y Portugal*. Instituto Nacional de Meteorología, Madrid.
- FRANCO MÚGICA, F. 1995. *Estudio palinológico de turberas holocenas en el Sistema Central: reconstrucción paisajística y acción antrópica*. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid, 391 pp. (inédita).
- FRANCO MÚGICA, F., GARCÍA ANTÓN, M. & SAINZ OLLERO, H. 1998. Vegetation dynamics and human impact in the Sierra de Guadarrama, Central System, Spain. *The Holocene*, 8 (1), 69-82.
- GALOP, D & LÓPEZ SÁEZ, J.A. 2002. Histoire agraire et paléoenvironnement: les apports de la palynologie et des microfósiles non-polliniques. *Trabajos de Antropología e Etnología*, 42 (1-2), 161-164.
- GALOP, D., MAZIER, F., LÓPEZ SÁEZ, J.A. & VANNIÈRE, B. 2003. Palynologie et histoire des activités humaines en milieu montagnard. Bilan provisoire des recherches et nouvelles orientations méthodologiques sur le versant nord des Pyrénées. *Archéologie du Midi Médiéval*, 21, 159-170.
- GIL, M.J. 1992. *Dinámica de la paleovegetación en el sector oriental del Sistema Central español durante el Holoceno, en base al análisis polínico. Implicaciones climáticas*. Tesis Doctoral. Universidad de Alcalá de Henares, 211 pp. (inédita).
- GIL, M.J., RUIZ ZAPATA, M.B., SANTISTEBAN, J.I., MEDIAVILLA, R., LÓPEZ PAMO, E. & DABRIO, C.J. 2006. Late Holocene environments in Las Tablas de Daimiel (South central Iberian Peninsula, Spain). *Vegetation History and Archaeobotany*. 16 (4), 241-250.
- GIL, M.J., TOMÁS LAS HERAS, R. & RUIZ ZAPATA, M.B. 1995. Degradación antropogénica de la vegetación, en base al análisis polínico, en la Sierra de Guadarrama: Altos de Hontanar (Madrid). *Lazaroa*, 15: 151-163.
- GÓMEZ, C. 2007. *Actividad antrópica y vegetación en el Valle del Lozoya (Madrid) durante el Holoceno*



- reciente. Tesis Doctoral. Universidad de Alcalá de Henares, 461 pp. (inédita).
- GRIMM, E.C. 1987. CONISS: a FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares. *Computers & Geosciences*, 13 (1), 13-35.
  - LÓPEZ SÁEZ, J.A., LÓPEZ MERINO, L., CUGNY, C. & GALOP, D. 2005. Paleocología de medios húmedos: el aporte de los microfósiles no polínicos. *Nuestra Tierra*, 3, 13-15.
  - LÓPEZ SÁEZ, J.A., VAN GEEL, B., FARBOSTEXIER, S. & DIOT, M.F. 2000. Aplicación de los microfósiles no polínicos en Palinología Arqueológica. In: *Contributos das Ciências e das Tecnologias para a Arqueologia da Península Ibérica* (Ed. Jorge Oliveira). Adecap, Porto, 11-20.
  - MATEUS, J.E. 1992. *Holocene and present-day ecosystems of the Carvalhal Region, Southwest Portugal*. Tesis doctoral. Universidade de Utreque, 184 pp. (inédita).
  - MOORE, P.D., WEBB, J.A. & COLLISON, M.E. 1991. *Pollen analysis*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 216 pp.
  - PEINADO LORCA, M. & RIVAS-MARTÍNEZ, S. 1987. *La Vegetación de España*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alcalá, Madrid, 544 pp.
  - PRAGER, A., BARTHELMES, A., THEUERKAUF, M. & JOOSTEN, H. 2006. Non-pollen palynomorphs from modern Alder carrs and their potential for interpreting microfossil data from peat. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 141, 7-31.
  - REILLE, M. 1992. *Pollen et Spores d'Europe et d'Afrique du Nord*. Laboratoire de botanique historique et palynologie, Marseille, 520 pp.
  - RIERA, S., LOPEZ-SAEZ, J.A & JULIA, R. 2006. Lake responses to historical land use changes in northern Spain: the contribution of non-pollen palynomorphs in a multiproxy study. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 141, 127-137.
  - RIVAS MARTÍNEZ, S. 2007. Mapa de series, Geoseries y geopermaseries de vegetación de España. (memoria del mapa de vegetación potencial de España. parte 1. *Itinera Geobotanica*, 17, 1436.
  - RUBIO, J.C. & DEL VALLE J. 2005. Estudio de la evolución de régimen Hidrológico en zonas húmedas drenadas: los humedales del cañizar (Provincia de Teruel, España). *Investigaciones geográficas*, 38, 47-63.
  - RUIZ, B., GÓMEZ, C., LÓPEZ, J.A., DORADO, M., VALDEOLMILLOS, A., & GIL, M.J. 2006. Paleoambiente y usos del suelo durante el Holoceno reciente en la Tolla Collado de el Berrueco (Sierra de Guadarrama Madrid). *Geogaceta*, 40, 227-230.
  - UZQUIANO, P. 2002. Vegetation and firewood management at Cueva de la Vaquera (Segovia, Spain) between 6 and 3.7 Kyr. BP: anthracological contribution to the landscape archaeology of the Spanish Central Mountains. In: *Charcoal análisis methodological approaches, palaeoecological results and Word uses*. (Ed. S. Thiébault). Bar internacional series, Paris, 109-112.
  - VALDÉS, B., DÍEZ, M.J. & FERNÁNDEZ, I. 1987. *Atlas Polínico de Andalucía Occidental*. Instituto de Desarrollo Regional de la Universidad de Sevilla, Excm. Diputación de Cádiz, Cádiz, 450 pp.
  - VAN GEEL, B. & APTROOT, A. 2006. Fossil ascomycetes in Quaternary deposits. *Nova Hedwigia*, 82, 313-329.
  - VÁZQUEZ, R. 1992. *Evolución del paisaje vegetal durante el Cuaternario reciente en la zona central y oriental de la Sierra de Guadarrama a partir del análisis palinológico*. Tesis Doctoral (Inédita), Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares.







## LA SILLERÍA DEL CORO DE PADRES PROFESOS DEL MONASTERIO DE EL PAULAR

ANTONIO GÓMEZ IRUELA

*Historiador*

Las sillerías de El Paular salieron para Madrid, en carros de bueyes, en 1885, sabemos que en 1883 se había comisionado a Amador de los Ríos para levantar planos de su ubicación en la Iglesia, con el fin de colocarlas en San Francisco el Grande; el coste del traslado fueron 2.620 pesetas y la restauración y reinstalación en San Francisco costó más de 50.000 pesetas; en 1886 Velázquez Bosco notificó al Ministerio de Fomento la conclusión de las obras de instalación de las tres sillerías en el templo madrileño.

Posteriormente, en 1937, las sillerías volvieron a ser desmontadas ante el riesgo de que San Francisco fuera bombardeado durante la guerra y se trasladaron al Museo Arqueológico Nacional. Podemos imaginar los deterioros que sufrirían con ambos traslados y posteriores reubicaciones. Estos avatares han sido documentados en un excelente artículo por D. José Antonio Buces Aguado, precisamente el responsable de la restauración y reubicación en El Paular de las sillerías por parte del Instituto de Patrimonio Histórico.(1)

Se han recuperado las sillerías del coro de padres profesos y de legos.

Mi intervención se centrará en la iconografía de la sillería del coro de padres profesos, al final me permitiré compartir con vds algunas dudas, de momento voy a hacer una pequeña introducción sobre como se distribuían las dependencias de una cartuja, que eso fue El Paular, para entender la disposición de las sillerías.

Todas las cartujas son muy similares, la Iglesia es de planta basilical, muy alargada, de una nave y con el espacio interior muy compartimentado por muretes o

pantallas ópticas, como la reja o incluso algún retablo de separación entre los espacios reservados a los monjes y a los conversos; en El Paular estaba donde hoy se encuentran las pinturas de Luis Feito.

El templo es el centro de la vida espiritual de la comunidad, en él se reúnen para celebrar parte de los oficios divinos.

Curiosamente en las cartujas el Sagrario no está a la vista, siempre está situado entre los muros absidiales y el retablo mayor, el jesuita D. Alfonso Gutiérrez Rodríguez de Ceballos mantiene que esta estructura tan original parte de una norma cartujana de 1621, en realidad los cartujos pretenden construir “*una celda para Jesús entre los monjes*” (2) en el caso de El Paular, como saben, lo que debió ser un interesante sagrario con pinturas de Antonio Lanchares, construido entre 1619 y 1621, se deshizo en 1719 para construir el que hoy vemos, con proyecto de Francisco Hurtado izquierdo y realización de Teodosio Sánchez de Rueda.

El refectorio cuenta con un púlpito desde donde se realiza la lectura sacra, originalmente también esta sala estaba dividida por un muro de separación entre monjes y frailes, las mesas son estrechas, fijas al suelo, los monjes se sientan contra la pared y dejan el lado interior libre para servir las mesas. El prior preside las comidas sentado en el testero. Por supuesto solo se usa el refectorio para la comida de los domingos.

Normalmente los monasterios cartujos cuentan con dos salas capitulares y dos claustros con las celdas alrededor de los mismos, sin embargo el Paular sólo tiene una sala capítular.



Otras dependencias son las llamadas “obediencias” u “oficinas”, donde se desarrollan los oficios del monasterio: herrería, carpintería, lavadero, sastrería, fábrica de vidrio, de papel en nuestro monasterio, etc.

Pero vamos a hablar de nuestra sillería; quizá la mejor manera sea recurrir a las descripciones de quienes pasaron por aquí: las primeras referencias son de Antonio Ponz (3) se las leo textualmente:

*“En la coronación de las sillas de este coro (se refiere al de legos) se ven labores de figurillas humanas, medallas, avechuchillos, y otros, como los hay también en la sillería de los Sacerdotes, más rica de labores, todo ello conforme al estilo de la portada del Templo, respetable por su antigüedad, que debe deducirse a la edad de D. Juan el Segundo.*

*En los respaldos de la sillería hay de baxo relieve figuras de diferentes Santos; pero al facistol, mueble muy alabado, le falta buena forma, y seriedad, y estos defectos se hacen más visibles con los embutidos de nácar, y con los bronces que hay en él. Yo, si fuera de los padres, lo apartaría de la vista, por lo mismo que, según dicen, ha costado mucho, y así nadie diría que había sido gasto sin elección.*

*el antepecho está lleno de garambaynas modernas que executó no se quién de Valladolid.”*

En fin, no parece que le gustara mucho a Ponz, en 1787, nuestra sillería, y no nos da muchos datos sobre los autores, excepto que los relieves frontales de los atriles deben ser del siglo XVIII.

Jose M<sup>a</sup> Quadrado y Vicente de la Fuente ( 1853) (4) hacen una pequeña referencia que tampoco nos aclara mucho:

*“La sillería del coro de legos pertenece ya al Renacimiento, y las minuciosas labores de sus brazos y de su friso llevan ventaja a las esculturas de su respaldo y sobre todo a las del reclinatorio; ... las esculturas de esta otra sillería ( las del coro de profesos) no proceden de más diestra mano que las de la primera, ni son de fecha más remota; si bien corre por cima de ellas un calado guardapolvo, describiendo arcos con colgadizos, é intermediano con delgadas agujas sus góticos arabescos que marcan ya la decadencia del estilo. Más riqueza y elegancia presenta al extremo derecho el esbelto pináculo de la silla prelacial....”*

Francisco Villegas en 1915 (5) da cuenta del informe en contra del traslado que hace la Academia, el 24 de Abril de 1883

*“que la sillería del coro de sacerdotes, siendo como era, gótica, desdeciría del estilo grecorromano del templo de San Francisco el Grande, y que arrancada de la Iglesia del Paular la dejaría como desmantelada y sin compensación alguna por el daño causado con tan inestético despojo”*

Tampoco aquí encontramos detalles sobre el autor de la sillería.

Pelayo Quintero Atauri en sus “Sillerías de coro en las Iglesias españolas” (1928) (6), describe el coro de monjes con 17 sillas, además de dos siales de mayor importancia, el del Prior y el del preste oficiante (sólo se ha recuperado el primero), fecha la sillería en los comienzos del siglo XVI y la atribuye con dudas a Bartolomé Fernández basándose en la del Monasterio del Parral de Segovia. Suponemos que se debe referir al coro de legos que José Calabuig en 1919 y recogiendo los datos de Amador de los Ríos, cifra en 18 sillas. (7)

En 1932, Sánchez Corona (8) que fue propietario de El Paular, hace referencia a la sillería diciendo que era de nogal y

*“finamente tallada con escenas del Juicio final y de la historia de David”*

En la actualidad no conocemos las tallas del Juicio Final.

Brans, en 1956 (9), hace una descripción más amplia de la sillería que sin duda ha admirado en San Francisco el Grande

Y por fin Cayetano Enriquez de Salamanca en su conocida guía de El Paular de 1986 (10), nos cuenta también su traslado, aportando además que fue restaurada por el tallista Guirao cuando llegó a San Francisco el Grande, sin embargo también habla de los relieves relativos al Juicio Final que no conocemos por lo que podemos deducir su desaparición entre 1986 y la actualidad.

También disponemos de un documento original del siglo XVIII que se refiere a la sillería de la Sala Capitular, se trata del contrato entre fray Basilio Bravo, prior de la real Cartuja de El Paular en 1702 y José de la Torre, para realizar la sillería de la Sala Capitular ( 11).

No me resisto a transcribirlo:



(v)

*“Dezimos nos fr. Basilio Bravo Prior de la / Real Cartuja del Paular de la una parte y/ Joseph de la Torre vecino de la Villa de Madrid / Maestro en Arquitectura, de la otra que oy dia / de la fecha desta nos conbenimos y ajustamos / en que yo fr. Basilio Bravo Prior desta Real Cartuja / tengo de Pagar a dicho Joseph de la torre Setecientos / Reales de Vellon por cada una de las sillas que hiciere / Para el Capitulo en esta forma: que dicha silla a de / tener seis dedos de mas ancho que la que se a echo / de muestra y asi mismo a de tener de mas alto, mas de / medio pie que la muestra = Itten que las Fig./ ras o labores an de salir de la misma tabla Y no / Pegadas ni dañadas = Yten que el tablón de los Asientos a de tener tres dedos de grueso y dos dedos / mas angosto que el de la muestra = Yten que toda / la silleria a de ser de nogal con rrespaldo de Pino / Y la a de dar echa y sentada a su costa trayen-/ dola el conbento por quenta de Casa desde Madrid / y la a de dar armada y sentada para mediados / de Septiembre deste año Y si en esto faltare a de / perder quatro mill Reales = Yten que dicha Silleria a de / tener Cincuenta y seis sillas una mas o menos / y los escudos de la coronación unos de la Religión con niños y / otros de Armas Reales con aquilas y leones //*

(r)

*Conforme Arte y Hermosura = / Y es condicion se le an de dar para empezar la obra / ocho Mill Reales de mas de los mil que tiene recivi / dos Y después desde primeros de Febrero se le a de ir dando dos Mill Reales cada mes entregando / el acavadas seis u ocho sillas = advirtiend / que a de poner dicho Maestro toda la madera de no/gal y pino que llevare toda la sicha Silleria = Ytem / que la a de dar echa y sentada a satisfacion / y vista de Maestros Peritos en el Arte = Y se le / an de dar Cavallerias para traer y llevar los oficia/ les y se les a de dar camas = Ytem que dicho Joseph de / la torre a de otorgar escriptura con fianzas a voluntad / del Conbento y por que uno y otro nos obli/ gamos a lo dicho lo firmamos en esta Real Cartuja / del Paular a Doze dias del mes de Henero de mil / setecientos y dos dias”*

Por último, el Libro Becerro de El Paular (12 ) recoge el testimonio de tiempos de Juan II valorando la construcción de veintiséis sillas en nogal para el coro de padres, con sus correspondientes respaldos y atriles en ocho mil maravedís y tasando en mil maravedís el costo del traslado y asentamiento de las dieciséis sillas de pino que debía haber en el coro de monjes al de frailes.

En resumen y para terminar, nos podemos quedar con estos datos generales:

La sillería del coro de padres profesos constaba de 44 estalos, gótico ojivales, de finales del reinado de Juan II. Constaba además de dos sillas especiales, la del preste oficiante o silla cátedra, de más importancia y situada en el presbiterio, lado de la epístola, y una silla presidencial situada en el lado del evangelio, de espaldas al murete de separación con la sillería de legos.

La sillería del coro de legos tenía 18 estalos según la documentación, aunque se han recuperado 20, todos de la misma mano y cuyos atriles no se han recuperado, además tenía 8 medias sillas situadas ante la reja, a ambos lados de la puerta. Son de estilo plateresco, como muy tempranas del segundo cuarto del siglo XVI ya que aparece representado San Bruno, canonizado en 1515, y aunque en principio son anónimas se atribuyen a Bartolomé Fernández, autor de la sillería de El Parral de Segovia que también se halla en San Francisco el Grande.

La sillería de la Sala Capitular es de José de la Torre, de 1702. Se conserva en la sala Capitular de San Francisco el Grande.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) José Antonio Buces Aguado “*Las sillerías de la iglesia de la Real Cartuja de Santa María de El Paular*”. Bienes Culturales. *Revista del Instituto de Patrimonio Histórico* nº 6 – 2006
- (2) A. Rodríguez y Gutiérrez de Ceballos “*Lectura iconográfica del Sagrario de la Cartuja de Granada*” Estudios sobre literatura y arte dedicados al profesor Emilio Orozco Díaz. Univ. De Granada. 1979. Vol III, pp 95-112.
- (3) Antonio Ponz “*Viage de España*” Tomo Décimo. Madrid MDCCLXXXVII (1787) pp 76-77
- (4) Jose M<sup>a</sup> Quadrado y Vicente de la Fuente “*Madrid y su provincia*” Cap. VII – Madrid 1977 (reedición de la 1<sup>a</sup> de 1853 – 1885) pp. 319 -320
- (5) Francisco F. Villegas (Zeda) “*La Cartuja del Paular*” Ed. Renacimiento, Madrid, 1915; pp 76-77
- (6) Pelayo Quintero Atauri “*Sillas de Coro en las Iglesias Españolas*” Cádiz, 1928
- (7) José Calabuig Revert “*El Real Templo Basílica de San Francisco el Grande en la Historia y en las Artes*” Imprenta “La Gutemberg”, Valencia, 1919
- (8) M. Sánchez Corona “*Monasterio de Santa María de El Paular*” Ed. Gráficas Marinas, Madrid, 1932 ; pp 28
- (9) J.V.L. Brans “*El Real Monasterio de Santa María de el Paular*” Ed. El Paular, Madrid, 1956; pp.50
- (10) Cayetano Enríquez de Salamanca “*Santa María de el Paular*” Las Rozas, Madrid, 1986. pp. 66-67
- (11) Archivo Regional de Madrid “*Expediente de obras menores en el suelo y sillería de la sacristía y del capítulo de la Cartuja, realizadas por Juan de Viera, cantero, y por José de la Torre, arquitecto y tallador*” 1701 – 1702
- (12) *Memoria de la Fundación y dotación de El Paular (Libro Becerro)*. Manuscrito de Bernardo de Castro fechado en 1565 aunque probablemente copia del siglo XVIII. Archivo Monasterio de El Paular

---

## UN RECORRIDO POR LA SILLERÍA

Voy a mostrarles algunos de los sitiales, si nos da tiempo haremos una visita virtual, empezaré por el lado del evangelio y daremos toda la vuelta hasta llegar al lado de la epístola.

---

Hay que comenzar lógicamente por la puerta de la sacristía, enmarcada en un marco trilobulado de caliza que aún mantiene algún pequeño resto de policromía, la puerta de la sacristía está tallada en nogal y consta de dos hojas en las que, en tres calles, están talladas las virtudes teologales y cardinales en marcos platerescos, desde luego parecen de la misma mano que ha tallado el coro de legos, hace juego con él, no con la sillería del coro de padres.

Las tallas superiores representan dos virtudes teologales, la Fe y la Caridad; las siguientes las cuatro virtudes cardinales: Justicia, Templanza, Prudencia y Fortaleza, por este orden. Todas están representadas con la iconografía que se va extendiendo por Italia a mediados del siglo XIV como alegorías con los mismos atributos, cuestión que cuaja definitivamente en el siglo XV y encajaría perfectamente con el supuesto autor de la sillería situada ahora en el coro de legos, Bartolomé Fernández.



---

### *Atril del Evangelio*

Se trata de un atril exento que no figura en ninguna de las referencias a la sillería con que contamos, desde luego no es el facistol de que nos habla Antonio Ponz, quizá alguien le hizo caso y lo escondió en su casa para que no se viera...

Está tallado en madera de nogal y tiene en su frente una buena talla que representa a San Pedro, como primer Papa, revestido de pontifical con la triple tiara y la cruz de Lorena en su mano izquierda, en actitud de bendecir y bajo la cúpula.

En el tablero inferior figura tallado su atributo: las llaves de la Iglesia.

En los laterales tiene tallados escudos cartujos rodeados de cabezas de ángeles y en la parte posterior un calvario con los símbolos de la pasión.



---

### *Entablamento superior*

Es un delicado encaje gótico - isabelino rematado por pináculos y por una crestería en la que aparecen escudos con los símbolos de la pasión de Cristo repetidos y las estrellas cartujas.

---

---

**Respaldos de la sillería**

---

***Evan-1: San Vicente de Zaragoza.***

Identificable por la dalmática y el azote, sin embargo parece que sostiene una paloma, siendo el atributo del Santo es un cuervo que defendió su tumba, no está representada la rueda de molino o la parrilla con travesaños de sierra, símbolos de su martirio.

***Evan-2: San Andrés.***

El hermano mayor de San Pedro porta su atributo mas conocido, la cruz en aspa o cruz de Borgoña. Obviamente la talla no es de la misma mano que la anterior y, curiosamente, San Andrés aparece otra vez representado en la silla nº 15 de este mismo lado del Evangelio, aunque por distinto tallista.

***Evan-3: Santa Catalina de Siena.***

La hermosa talla es fácilmente identificable porque reúne la casi totalidad de los atributos de la santa: azucena, corona de espinas, libro e incluso el diablo bajo sus pies.

***Evan-4: Santa Elena.***

Solamente la cruz que lleva parece identificar a la madre de Constantino el Grande; no hay referencias a la corona y a la maqueta de la Iglesia del Santo Sepulcro, atributos con los que se la identifica generalmente. La talla es del mismo autor que la anterior.

***Evan-5: San Benito de Nursia.***

Aunque no lleva barba como es habitual si tiene el libro y la maqueta de la Abadía de Monte Casino que fundó en 528: tampoco lleva el báculo ni la mitra que suelen ser habituales, por ejemplo en el coro de legos de este mismo Monasterio. La talla parece más arcaica, como la mayoría de los sitiales de este coro.

**Evan-6: San Francisco de Asís.**

El fundador de los franciscanos es fácilmente identificable por su hábito con el cordón de tres nudos que representan los votos de pobreza, castidad y obediencia, y por su postura mostrando las palmas con los estigmas de la pasión. También en el tablero inferior aparece la cruz flanqueada por dos cordones franciscanos.



**Evan-7: Obispo Cartujo.**

Uno de los fundadores de la Orden, parece lógico encontrarlo en el Monasterio, sin embargo solamente la traba en su hábito lo identifica como cartujo, podría tratarse de San Hugo de Lincoln, que aparece en el coro de legos con su cisne, o San Antelmo. Hay una talla gemela justo enfrente en el lado de la Epístola.

**Evan-8: San Cosme o San Damián.**

Identificado con la túnica de los médicos y el gorro, el santo porta una redoma con sus remedios, estos médicos, hermanos gemelos, eran los patronos de los Médicis de Florencia y de médicos y boticarios. Por supuesto su talla gemela está enfrente.



**Evan-9: San Pedro mártir.**

El inquisidor dominico del siglo XIII, también llamado San Pedro de Verona, aparece con su atributo principal, el machete con el que le atacaron, además de la palma del martirio con tres coronas y un libro.

**Evan-10: San Edmundo.**

Edmundo de East Anglia fue rey entre 855 y 890, en guerra con los daneses fue atado a un árbol y asaeteado, luego lo decapitaron; según la leyenda su cabeza seguía gritando en latín (hic, hic) para guiar a quienes buscaban su cuerpo. Está representado con sus atributos, la flecha en la mano y la corona de rey. Quizá el relieve inferior pueda interpretarse como una representación del conocido tema de la *lingua palpitans*.



**Evan-11: San Esteban.**

El diácono se convirtió en el primer mártir cristiano, aquí está representado como es costumbre, como un joven imberbe con dalmática, sosteniendo las piedras de su martirio en un pliegue de la misma.





**Evan-12: San Judas Tadeo. Apóstol.**

El “otro Judas” según San Juan, hermano de Santiago el menor, aparece aquí identificado por la alabarda, aunque su atributo habitual era la maza de su martirio; el patrón de las causas perdidas lleva en su mano izquierda el evangelio que predicó en los países próximos a Palestina.

**Evan-13: Santiago el menor. Apóstol.**

El “hermano del Señor” del que habla San Pablo (*Gal. 1.19*) está aquí identificado por el palo de batanero con el que según la Leyenda Dorada le golpearon la cabeza. No aparece con la indumentaria episcopal que le corresponde como primer obispo de Jerusalén. Como es habitual se le representa al lado de San Felipe, cuya fiesta se celebra el mismo día (*3 de Mayo*).

**Evan-14: San Felipe. Apóstol.**

Aparece representado con el evangelio que predicó a los escitas y la cruz, aunque en este caso no es *immissa*, de doble o triple tamaño.

**Evan-15: San Andrés. Apóstol.**

El hermano de San Pedro aparece representado con su atributo principal, la cruz en aspa. Recordemos que está repetido en Evan-2, aunque esta talla parece de mejor calidad.

**Evan-16: San Marcos. Evangelista.**

El patrón de Venecia aparece representado con la pluma en la mano y su atributo, el león alado, en el tablero inferior. Aparentemente está repetido en Epis-2.

**Evan-17: San Mateo. Apóstol y Evangelista.**

El autor del primer evangelio es representado aquí con la bolsa en la mano que delata su antiguo oficio de recaudador y una lanza, en sustitución de las habituales hacha o alabarda con las que se le suele representar. En el tablero inferior está su atributo como evangelista, el ángel.



**Evan-18: San Pablo. Apóstol.**

Pablo de Tarso aparece representado con la espada de su ejecución y un libro que alude a sus epístolas. La espada aparece también en el tablero inferior.

**Evan-19: Profeta.**

Identificado por la filacteria que lleva en la mano pertenece al grupo de figuras de buena talla.



**Evan-20: Profeta**

También del grupo de buenas tallas, quizá del s. XVIII, y con filacteria en la mano.



**Evan-21: San Miguel Arcángel**

En esta excelente talla el arcángel aparece con todos sus atributos: la armadura, la balanza para pesar las almas y el dragón vencido.

**Evan-22: Cristo Salvador**

En su representación clásica del Renacimiento meridional, con un orbe coronado por la cruz y haciendo el signo de bendecir.



Vamos ahora otra vez a la cabecera para hacer el recorrido por el lado de la epístola y comenzamos por la silla cátedra.

#### **Silla cátedra**

Consta de dos cuerpos rematados por un gran doselete apiramidado, gótico, con calados, follajes, pináculos y demás elementos del periodo isabelino.

En el respaldo hay dos tableros: el superior representa al Padre Eterno presentando a Cristo y el inferior al beato cartujo Landuino, martirizado por los herejes.



#### **Epis-1: San Lorenzo**

El diácono mártir de origen hispano aparece representado con su dalmática y la parrilla que simboliza su martirio, en la otra mano sostiene una caja con el dinero que Sixto II le ordenó distribuir entre los pobres. El patrón de Florencia, nacido en Huesca, es una talla casi gemela de la que se sitúa enfrente, el también diácono Vicente de Zaragoza.



#### **Epis-2: San Marcos. Evangelista**

Parece extraño que el evangelista esté representado dos veces (Evan-16) en este caso también aparece con el libro y una pluma en su mano aunque el león a sus pies no tiene alas, este dato lo podría identificar con San Adrián que, sin embargo, debería estar representado con armadura de capitán romano o con el yunque de su martirio. Quizá la repetición se deba a que es de distinto tallista.

#### **Epis-3: Alegoría del silencio**

Parece lógico pensar que este personaje, de talla más arcaica, que se lleva el dedo a los labios haga referencia a una de las más conocidas reglas de la cartuja.

#### **Epis-4: Santa Apolonia**

Esta excelente talla representa a la patrona de los dentistas con las tenazas y un diente en la mano. La santa era hermana de San Lorenzo.



**Epis-5: Santo Domingo de Guzmán.**

La talla lo representa vestido con el hábito de su orden, túnica blanca y manto negro símbolos de pureza y austeridad, y sin el lirio habitual pero sí aparece el perro a sus pies haciendo referencia al que su madre viera en sueños antes de su nacimiento.



**Epis-6: San Antonio Abad.**

El ermitaño considerado el fundador del monacato aparece representado con la mayoría de sus atributos: el cerdo, la campanilla e incluso en el tablero inferior el “fuego de San Antonio” como se llamó a la erisipela desde que en el siglo XI una epidemia en Europa se curó con la intercesión del Santo.

**Epis-7: Obispo Cartujo.**

Haciendo pareja con el que tiene enfrente (Evan-7).

**Epis-8: San Cosme o San Damián.**

También haciendo pareja con la talla que tiene enfrente, el médico aparece aquí con un tarro de unguentos en la mano.



**Epis-9: Santo Tomás. Apóstol.**

Quien puso en duda la resurrección del Señor no puede ser identificado en esta arcaica talla por los instrumentos de su martirio, la lanza o el puñal. Podemos identificarlo por el cartabón que lleva como constructor.

**Epis-10: San Lázaro.**

El leproso Lázaro del evangelio de Lucas aparece representado con la carraca en la mano y los perros a sus pies lamiéndole las llagas.



**Epis-11: San Vicente de Zaragoza ( ζ - ζ )**

Se trata evidentemente de un diácono mártir con su palma y aparentemente un incensario, aunque no lleva el azote ni el cuervo, de ser éste, estaría repetido en Evan-1.

**Epis-12: San Matías. Apóstol.**

Aunque en esta talla no aparecen atributos que nos sirvan para identificarla, recojo la advocación que le atribuye el equipo de trabajo del señor Buces. San Matías fue el apóstol “sustituto” de Judas.

**Epis-13: San Simón Celote. Apóstol.**

La Leyenda dorada nos cuenta que su martirio consistió en ser aserrado; el compañero de San Judas Tadeo aparece aquí con el instrumento de su martirio.

**Epis-14: San Bartolomé. Apóstol.**

Aunque el santo no aparece aquí en su representación más conocida con la piel en la mano, en la talla figura con la palma del martirio y sujetando a un demonio encadenado, en la tradición de la pintura española. Sin embargo en el tablero inferior aparecen las cuchillas o tijeras alusivas a su martirio mediante desollamiento.

**Epis-15: Santiago el mayor. Apóstol.**

En su representación más conocida como peregrino con el bastón y venera, que se repite también en el tablero inferior.

**Epis-16: San Juan Evangelista. Apóstol.**

El hermano de Santiago y autor del cuarto evangelio aparece con el cáliz en la mano y con su atributo, el águila, tallado en el tablero inferior.



**Epis-17: San Lucas. Evangelista.**

El llamado por la tradición “pintor de la Virgen” aparece con los evangelios en la mano y lo que podría ser un pincel. Lo identificamos gracias a su atributo como evangelista, el toro, tallado en el tablero inferior.



**Epis-18: San Pedro. Apóstol.**

El pescador de Galilea, hermano de Andrés y primero de los apóstoles aparece con su atributo más conocido, la llave, y un libro. A sus pies un pez, símbolo a la vez de su oficio y de la cristiandad.

**Epis-19: Profeta.**

También identificado por la filacteria y situado simétricamente a los del lado del evangelio.



**Epis-20: Profeta.**

También con filacteria en la mano.

**Epis-21: San Juan Bautista.**

Representado a la derecha del Salvador, como es habitual, quien es considerado el último de los profetas del antiguo testamento sostiene en sus manos un cordero “*este es el cordero de Dios...*” (Marcos 1:36) no lleva sus atributos habituales: báculo, manto de pieles, panal, etc. Recordemos que San Juan es también el patrón de esta Cartuja.



Epis-22: Cristo Salvador.

En representación simétrica al del lado del Evangelio (Evan-22). El Salvador aparece también aquí con el orbe en la mano y en actitud de bendecir, la talla es más arcaica. En el tablero inferior están representados los símbolos de la pasión.



En cuanto a los tableros delanteros de los pupitres, parecen ser del siglo XVIII y representan la historia de David según lo descrito en los Libros I y II de Samuel que podemos seguir paso a paso como si fueran ilustraciones en madera; sin embargo, parece que no todos los tableros están en su sitio y desde luego dos de ellos, los situados en los pupitres correspondientes a los pies de la epístola, son de distinta mano y están fuera de lugar. Desconocemos los criterios que se han seguido para su colocación.

Por último no me resisto a llamar su atención sobre los elementos tallados en los laterales de los pupitres, ángeles músicos, o lectores, guerreros, orantes, etc.

También son muy interesantes las tallas de los brazales y elementos de separación, muy altos en la tradición cartuja, no todos están tallados y en general no tienen relación con el santo titular del sitio, sin embargo todos son de muy buena talla, animales mitológicos, hombrecillos, algún elemento vegetal, guerreros, dragones de diversos tipos, un unicornio sobre el que monta un hombrecillo al revés, un mono con caracteres humanos, centauros...

Según Emilio Orduña los adornos de los sitiales se deberían a Pedro Martín Galíndez (1548 – 1584), pero no hemos encontrado constancia documental de ello.

Si me gustaría por último compartir con ustedes algunas dudas que se me plantean examinando la sillería:

Efectivamente faltan los pupitres con el Juicio Final que al parecer vio Enríquez de Salamanca en los años ochenta atribuyéndolos a esta sillería, si la atribución es correcta no debería ser muy difícil localizarlos, sin embargo lo recuperado nos permite apreciar lo que debió ser esta Iglesia en sus mejores tiempos aunque nos extrañen algunos detalles; por ejemplo, en la sillería de padres profesos no aparece San Bruno, fundador de los cartujos que sí está en la sillería de legos, la razón es que su canonización tiene lugar en 1515 y la sillería es anterior; no aparece tampoco la Virgen, protectora de la Orden que también está en la sillería de legos, por otro lado hay varios santos repetidos, algo difícil de entender aunque haya intervenido la mano de al menos dos tallistas diferentes, y también la imagen del Salvador aparece repetida en el lugar que correspondería a la silla principal y la silla del prior, del lado del Evangelio y la Epístola respectivamente, de espaldas al murete de entrecoros. Además, los apóstoles no están situados según el orden que recoge el evangelio de San Lucas, cap. VI, que se respeta en todas las sillerías.

En todo caso lo anterior no tiene importancia en el contexto general del excelente trabajo realizado por el Instituto de Patrimonio Histórico recuperando una parte tan importante de nuestro patrimonio disperso. Estamos seguros de que se seguirá en esta línea de trabajo.

Por último, convendrán conmigo que es de justicia agradecer a la comunidad benedictina de El Paular su esfuerzo de los últimos cincuenta años para mantener en las mejores condiciones posibles el conjunto del monumento que hoy podemos disfrutar.

## **EL MOLINO DE PAPEL DE EL PAULAR. UN RETO ANTE EL FUTURO**

**MARÍA DEL CARMEN HIDALGO BRINQUIS  
JOSÉ MARÍA GONZÁLEZ LASTRA**

*Instituto del Patrimonio Cultural de España*

### **INTRODUCCIÓN**

Con este breve trabajo sólo queremos hacer una llamada de atención sobre el molino papelero más importante que tuvo Castilla durante los siglos XVI, XVII y XVIII del cual, a pesar de haberse conservado muy pocos vestigios arqueológico, tenemos una documentación tan rica y exhaustiva que podríamos reconstruir cómo era la elaboración de esta manufactura durante varios siglos, la terminología papelera castellana, la vida cotidiana dentro de un molino, al igual que el aprovechamiento hidráulico del río, a través de la historia, e importantísimos datos etnográficos del valle del Lozoya. Estamos convencidos que su estudio pondría en valor este importante foco de arqueología industrial, revalorizando los intereses histórico-culturales de la zona además de poder crear un centro de turismo rural con la rehabilitación de una industria perdida que podría dar lugar a la creación de nuevos puestos de trabajo.

### **HISTORIA DEL MOLINO PAPELERO DEL MONASTERIO DE EL PAULAR**

El valle del río Lozoya es uno de los más importantes recursos naturales con los que cuenta en la actualidad la Comunidad de Madrid; el aprovechamiento de sus aguas, procedentes de los glaciares formados en las cumbres, sus terrenos de pastoreo y cultivo, así como de sus abundantes bosques, lo han convertido en un importante enclave natural a lo largo de su historia. Hasta la canalización de sus aguas para el abastecimiento de Madrid, el río fue utilizado como fuerza motriz en numerosas fábricas e ingenios hidráulicos desde tiempos remotos, siendo el molino papelero de la Cartuja de El Paular una de sus más poderosas industrias.

La vida de la cartuja de El Paular se desarrolla entre 1390 y 1835 (en 1954 se vuelve a abrir a la vida bene-

dictina). Fue fundado por los reyes Enrique II (1368-1372) y sus sucesores, Juan I (1379-1390), Enrique III (1390-1406) y Juan II (1406-1454) siendo, cronológicamente, la sexta fundación cartuja en España y, sin duda, la más importante que tuvo Castilla.

Enrique II, atormentado por la culpa de haber destruido un monasterio cartujo en Francia durante las campañas en aquel país, dispuso, antes de su muerte, que se construyera un monasterio de esta orden en tierras de Castilla, siendo Juan I fue el encargado de asumir la promesa hecha por su padre. Pasado diez años, los monjes cartujos de Scala Dei en Tarragona, le instaron a que la llevase a cabo y el rey les donó, en 1390, unas tierras de su propiedad situadas en el valle de Lozoya, cerca de Rascafría, donde se erigían los Palacios del Poblal, utilizados como refugio de caza, y la ermita de Santa María. Los trabajos comenzaron en los dos meses siguientes, recayendo el encargo en Rodrigo Alonso, Maestro Mayor de la catedral de Toledo.

La muerte de Juan I paralizó el proceso de fundación. Su sucesor, Enrique III, amplió las concesiones de su padre, al otorgar las tercias del Arciprestazgo de Uceda y 16.000 maravedíes, y en la primavera de 1392 se reanudaron las obras. Al poco tiempo llegaban cinco cartujos enviados desde la Cartuja de Scala Dei, quedando constituida la comunidad con siete miembros, los cinco hermanos recién llegados, el prior, Lope Martínez, y un procurador.

En 1406 mandó Enrique III levantar, junto al Monasterio, un palacio, para hospedarse en las frecuentes visitas que solía hacer a los cartujos. Posteriormente, todos los reyes castellanos le dieron grandes dádivas y lo visitaron con frecuencia y Carlos V le concedió numerosos privilegios.





El florecimiento que alcanzó la Cartuja le permitió, además, fundar o intervenir en la creación de las Cuevas de Sevilla (1400), Aniago (1441), Miraflores (1442) y Granada (1506). Cuando en 1442 se establece la provincia cartujana de Castilla, su prior será elegido primer vicario general de congregación nacional de los cartujos españoles.

En cuanto al origen del molino papelero, según un documento fechado en 1396, éste es anterior a la fundación del Monasterio. En él se nos dice que, Martín Fernández, vecino de Alameda y otros de Rascafría vendieron al monasterio un molino próximo a su emplazamiento. Parece ser que este molino se utilizó, en un principio, para serrar y preparar la madera para la construcción del monasterio, hasta que, avanzadas las obras de la cartuja, pasará a ser utilizado como molino papelero.

La importancia que adquirió este molino se debe a una serie de factores. Pero, en sus inicios, su gran desarrollo se debió a que los primeros monjes procedían de la cartuja de Scala Dei de Tarragona, centro de reconocido prestigio entre los papeleros medievales catalanes y a la presencia de una pequeña población morisca en la zona.

Debido a la invasión árabe y la posterior reconquista la creación de estos monasterios fue muy importante, fundándose o incrementándose muchos de ellos con monjes procedentes del territorio ocupado por los árabes, quienes aportaban la gran cultura que floreció el Al-Andalus, siendo la más elevada de su época. Con ella también entran, como trabajadores, moriscos cautivos o siervos, herederos de los introductores del arte de hacer papel en la España Cristiana.

El molino papelero de El Paular está situado frente al monasterio, al otro lado de la carretera comarcal, en la finca "Los Batanes", en el término municipal de Rascafría y dentro del polígono catastral 9, parcela 140. Se encuentra en el extremo norte de la finca recorrida de un extremo a otro por el río Lozoya. Los duros estiajes que el río experimentaba periódicamente, lo supieron superar con la construcción de estanques capaces de retener el agua necesaria para no tener que interrumpir la fabricación en verano.

A través la documentación consultada parece ser que hubo dos molinos papeleros y según algunas fuentes, pudieron llegar a ser tres, pero esta afirmación no lo podemos confirmar ya que sería necesario hacer una prospección mucho más profunda y extensa de los restos arqueológicos conservados.

La calidad y abundancia de las aguas del río Lozoya, la situación geográfica estratégica, en un punto de la Sierra a dos vertientes entre Segovia y Madrid, óptimo para el acopio de trapo y para el transporte del papel una vez elaborado, hizo del molino papelero de El Paular el más importante de Castilla, cuya producción abastecía la impresión de libros y sobre todo bulas en la capital del reino, gozando entre los editores y libreros de Madrid, de un prestigio superior al de las otras industrias castellanas. Estas ventas proporcionaron grandes beneficios al monasterio, tal como podemos ver en los libros de cuentas.

Esta preferencia, seguramente, se debía a que a pesar de ser un papel de muy baja calidad, su precio era muy asequible y que además, su adquisición resultaba fácil, ya que los monjes de San Bruno tenían casa en la capital, donde depositaban el papel.

Este protagonismo se mantuvo durante todo el siglo XVI, XVII y XVIII ya que a principios del siglo XVI, encontramos un privilegio de la reina Doña Juana de Castilla, en la que hace referencia al molino y, a partir de mediados del siglo XVI, en numerosos contratos de impresores se especifica que el papel utilizado debe ser de este molino, dada su calidad y precio.

Este molino encierra unas características que le dan una configuración específica y sumamente interesante.

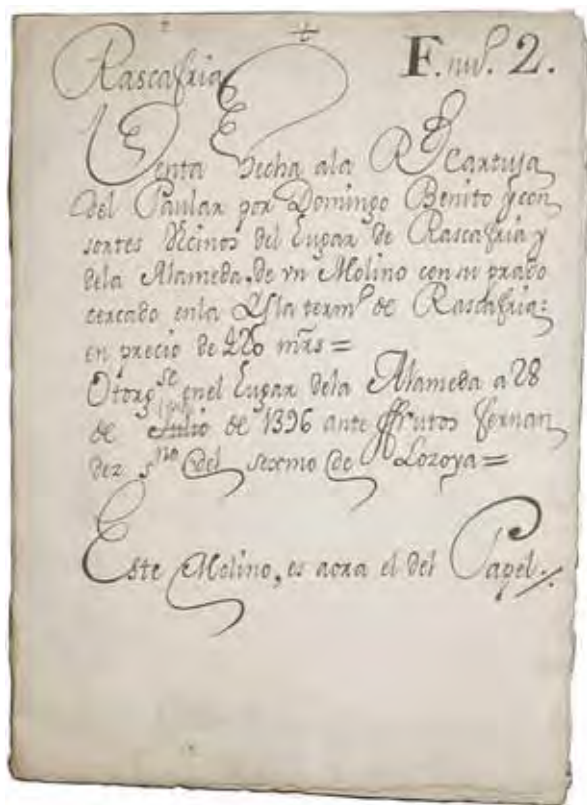


Figura 1.- Contrato de compraventa del molino custodiado en la Sección de Clero del A.H.N.

No solamente por tratarse de una industria dependiente de una orden religiosa sino, además, por tener los cartujos unas normas muy rígidas que los mantenían apartados de la vida cotidiana civil.

Las cartujas tienen una clara separación en la distribución de las funciones espirituales y materiales en dos lugares apartados. Las funciones de la casa alta, “domus alta”, destinada al rezo era donde vivían los padres y los legos, y correspondía al aspecto eremítico de los cartujos. Las funciones materiales se realizaban en la casa baja “domus inferior”. Era el lugar destinado a la administración de las tierras, los bienes materiales, los almacenes y las caballerizas.

Los legos eran los encargados de la explotación del molino, así como de las distintas granjas que poseía el monasterio y de los rebaños de ganado que explotaban. Ellos eran los responsables de organizar el trabajo, contabilizar y apuntar todas las partidas de ingresos y gastos en notas individuales, que al final del año pasaban aun libro único para presentar ante sus superiores, como modo de rendir cuentas. Esta división del trabajo se registra desde los inicios del molino y sabemos que en 1603 el “gerente” era el hermano Gil del Río, lego cartujo, designado por el prior para entenderse con el público en los asuntos comerciales.

Como otros bienes de la iglesia, el molino de papel fue vendido, en subasta pública, tras la segunda desamortización en 1835. Tenemos un protocolo conservado en Archivo de Protocolos de Madrid, fechado en 1842 en la que se segrega parte de la finca de Los Batanes en la que se hace la siguiente descripción: “*Un molino para fabricar papel, que contiene ochenta y un mazos y un martinete para batir papel. Veinte y siete pilas útiles, dos tinas y otros varios pertrechos a dicha manufactura, comprendiendo el edificio setenta y ocho mil doscientos setenta y cuatro pies cuadrados superficiales con inclusión de la huerta. Sin contar con el gran estanque que surte de agua a las ruedas que dan movimiento a los mazos.*”

Esta venta supone el fin de la fabricación tradicional de papel y la conversión en una moderna fábrica de papel continuo, bajo el nombre de “Sociedad Anónima Fábrica de Papel Continuo de Rascafría”, cuya producción se mantendrá hasta el año de 1927, cuando se canaliza el río Lozoya para llevar agua a Madrid.

## CARACTERÍSTICAS DEL PAPEL Y SUS FILIGRANAS

A través de la observación de la gran cantidad de papel que tenemos en los numerosísimos documentos manuscritos y, sobre todo, impresos en los que aparece la filigrana del molino, éste nunca fue de buena calidad y muestra una fabricación muy rústica con grades irregularidades y de color pardo. En cuanto a las formas o moldes utilizados eran muy defectuosas: los pontzones se ven casi siempre curvos, los corondeles están mal tensados y a veces desaparecen bajo la capa del encolado. Esto se debe fundamentalmente a la falta buenos profesionales y al uso de lino procedente de tejidos bastos y groseros. Los otros dos componentes para obtener un buen papel sí los tenía el molino, ya que las aguas del río Lozoya eran óptimas y el clima seco y frío ayudaba a un correcto secado del papel.

Tanto Oriol Valls<sup>1</sup> como Gayoso<sup>2</sup> lo describen así: “*papel moreno, mal refinado, con muchas motas, poros grandes, grumos gruesos y grandes diferencias de calibre*”.

Sobre papel elaborado en este molino se imprimió la primera edición de El Quijote. Es un papel de baja calidad y descuidada elaboración en el cual se aprecian múltiples impurezas e irregularidades y que lleva la filigrana del Monasterio. Ésta es difícil de ver por tratarse de una encuadernación en cuarto coincidiendo con el lomo del libro.

A través del análisis de las filigranas vemos dos momentos en que hay un deseo de mejora de la técnica de fabricación del papel: uno, a principios del siglo XVII en que, según una anotación en los libros de cuentas nos dice que el 1605 se fabricaba papel “a la genovesa”, de calidad y precio más elevado del corriente. Y un segundo momento, en el siglo XVIII, con la llegada de papeleros franceses y belgas para mejorar la calidad del papel e implantar técnicas más innovadoras en su fabricación. A partir de entonces, encontramos unas filigranas más perfectas y el papel sin grumos y sin las manchas de agua que tanto le afeaban.

El diseño de las filigranas, más o menos rústica, dependiendo de la habilidad del maestro formero, evoluciona según los gustos de la artes menores, pasando de una enorme sencillez de las primeras a una mayor complicación en las pertenecientes a finales del XVIII, donde aparecen completo el nombre de El Paular con un diseño más rico y no el simple anagrama de la M de María. Esta característica de la filigrana comienza

- 1 Valls y Subirá, Oriol: “Historia del Papel en España”, Tomo III (Madrid, 1982) dedica un capítulo entero a este molino (págs 79-79)
- 2 Gayoso Carreira, Gonzalo: “Historia del papel en España”. Tomo I (págs 98-99)



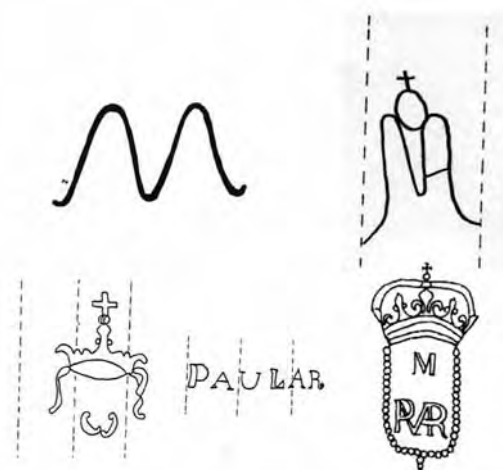


Figura 2.- Evolución del diseño de la filigrana papelera que va desde la sencilla M de María y el símbolo de los cartujos sobre la M a las mucho más complejas y elaboradas del siglo XVIII.

a mediados del siglo XVII incluyendo el nombre del fabricante o su anagrama y el nombre la población donde se fabricó el papel y además su símbolo, pudiéndose conocer ya con toda certeza la procedencia del papel.

El símbolo protagonista de la filigrana de El Paular es el anagrama de María y el escudo de la orden cartuja, ya que los patronos de la orden eran la Madre de Dios, San Juan bautista y San Bruno y el escudo es un globo surmontado por una cruz y siete estrellas y el lema: *stat crux, dum vulvitur orbis* (se mantiene firme la cruz, mientras gira la tierra).

## FUENTES HISTÓRICAS Y BIBLIOGRÁFICAS

El molino de El Paular está ampliamente citado en toda la bibliografía técnica de los siglos XVIII y XIX.

El beneditino Padre Martín Sarmiento, en 1743<sup>3</sup> considerando la gran utilidad de la instalación de fábricas de papel en España nos dice: “El ejemplo de los monjes cartujos de El Paular, que tienen sus fábricas de papel decentes y que venden a un precio moderado, me excitó la idea de que las fábricas de papel en Galicia serían mas seguras y perpetuas si las tuviesen los monasterios de despoblados, como algunos tiene las fábricas de hierro y yo propuse que todos tuvieran la fábrica de seda en bruto. El secular que pone una fábrica, el primero cumple, por lo común, y se utiliza. Pero esta economía no llega a la tercera generación y se arruina, como dice la experiencia. Al contrario, los monasterios no mueren”.

3 “Fábricas y distinción del papel”, manuscrito incluido en el vol. VII que comprende los tomos 4º y 5º folios 234v a 237v de la colección Franco Dávila. Biblioteca Nacional.

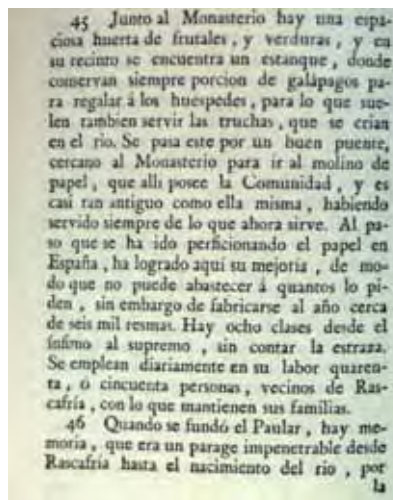


Figura 3.- Texto de Ponz

En 1752 el Catastro del Marqués de la Ensenada lo describe así: “Un molino de papel que tiene tres tinajas, las dos para la fábrica de papel de imprenta y la otra para lo de estraza. También tiene seis ruedas de cinco pilas cada una .... del mirador tres para prensas y el taller de carpintero, calderas de cola, cocina para los oficiales, también tiene un estanque para el recogimiento de aguas y todo el tiene de frontis treinta y tres varas y de fondo setenta y cinco y produce mil trescientos reales anualmente”<sup>4</sup>.

Según Lalande<sup>5</sup> en 1763 se fabricaron 4.680 resmas de primera suerte, de segunda y de imprenta y 170.000 de estraza y estracilla. El de segunda suerte era de excelente calidad.

Ponz en su “Viage de España”<sup>6</sup>, nos dice: “Junto al Monasterio hay una espaciosa huerta de frutales y verduras y en su recinto se encuentra un estanque, donde se conservan siempre porción de galápagos para regalar a los huéspedes, para lo que suelen servir las truchas que se crían en el río. Se pasa este por un buen puente, cercano al Monasterio, para ir al molino de papel que allí posee la comunidad y es casi tan

4 El cuestionario enviado por el Marqués de la Ensenada a los diferentes municipios nos muestra la importancia que tenía, en ese momento, para la economía española que de entre la nº 17 dice: “si hay algunas minas, salinas, molinos harineros o de papel, u otros artefactos en el término, distinguiéndose de qué metales y de qué uso, explicando sus dueños lo que se regula produce cada uno de utilidad al año”. En 1756 se habían concluido las averiguaciones para las 22 provincias castellanas, con la elaboración y cumplimiento de los cuestionarios entregados a los declarantes, que informaban sobre actividades mercantiles y profesionales. Los diversos tipos documentales del Catastro como las respuestas generales, respuestas particulares, libros, averiguaciones, relaciones juradas de oficios y mapas, entre otros, se pueden localizar en los Archivos Históricos Provinciales

5 La Lande, Jerónimo: “Arte de hacer papel” traducido por Jerónimo Suárez, Madrid 1968.

6 Tomo X, carta IV párrafo 45. Madrid, 1781

*antiguo como ella misma, habiendo servido siempre de los que ahora sirve...*

*Al paso que se ha ido perfeccionando el papel en España ha logrado aquí su mejoría de modo que no pueden abastecer a cuantos lo piden, sin embargo de fabricarse al año cerca de seis mil resmas. Hay ocho clases, desde el infimo al supremo, sin contar la estraza. Se emplean cuarenta o cincuenta personas, vecinos de Rascafría con las que se mantienen sus familias”*

Cuarenta personas trabajaban en este molino en 1783 y elaboraron 2.000 resmas de primera calidad, 2.900 de segunda y 1.300 de tercera. Contaba con una tina para el papel fino y otra para estraza y las aguas utilizadas eran más puras que las de Segovia.

Eugenio Larruga en sus Memorias Político Económicas<sup>7</sup> reflejan la evolución de la producción de molinos que forman esta fábrica que elaboró, el 1758, 5.800 resmas: 50 de florete, 1.500 de extrafino, ambos para escribir y las restantes de papel ordinario.

Entre 1787 y 1789 se fabricaba papel de primera, segunda y tercera suerte y el número total de resmas realizadas cada año pasó de 11.8000 en 1787 a 13.000 en 1789. Del mismo modo esta fuente informa sobre el precio de cada uno de estos tipos de papel siendo de 40, 32 y 24 reales, respectivamente, trabajando unos 60 obreros.

Larruga, en la misma obra, también nos proporciona interesantes datos sobre el acopio de trapos para la fabricación de papel en la ciudad de Madrid:

*“Merece alguna atención aquí la desidia o falta de economía que se advierte en Madrid con el trapo. La mayor y mejor se desperdicia en hacer yesca, encender fuego y otros usos, que podían suplirse con mejores y menos costosos equivalentes.*

*Para la recolección de trapos se reconocen en Madrid dos clases de gentes: unos se llaman trapeiros o agavilladores de trapo; y otros acopiadores. Los primeros forman gremio. En cuanto al trapo, ellos lo recogen como pueden y lo revenden a los segundos que tienen almacenes o repuestos en las calles de Madrid. Los fabricantes se valen de estos para hacer sus provisiones. De estos acopiadores hay unas cuarenta casas en Madrid. Antes se toleraba vender en ella el comestible. Para evitarlo, por un Real Decreto, en 1783, se determinó que debían establecerse en las afueras de la ciudad con*

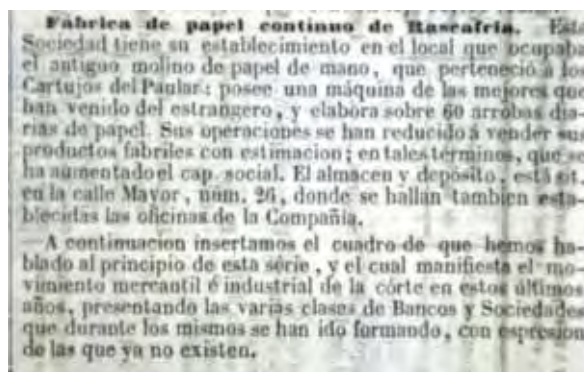


Figura 4.- Texto del diccionario de Miñano

*el objeto de evitar daños a la salud pública derivados de las condiciones de almacenaje de trapo.”*

Según el “Almanak Mercantil o guía de Comerciantes para el año 1795”, el papel de El Paular se vendía al público en Madrid, en la Lonja de las Cuatro Calles.

A partir de estas fechas y tras la desamortización ya aparece como fábrica de papel continuo, así es citado por Miñano como fábrica de papel continuo en su “Diccionario geográfico estadístico de España y Portugal” (1826-1829)

Según la “Revista enciclopédica de la Biblioteca Popular Económica”, era una de las 14 fábricas de papel continuo que existían en España en 1847.

Madoz<sup>8</sup>, en 1847, en su “Diccionario” nos informa:

*“La sociedad Fábrica de Papel continuo de Rascafría se fundó en julio de 1842 con un capital de 1.800.000 reales de vellón representado por 18 acciones nominales de 100.000 reales de vellón cada una totalmente desembolsado.*

*Tiene su establecimiento en el local que ocupaba el antiguo molino de papel a mano que perteneció a los cartujos de El Paular. Posee una de las máquinas mejores que han venido del extranjero y elabora sobre 60 arrobas diarias de papel. Sus operaciones se han reducido a vender sus productos fabriles con estimación, en tales términos, que se han aumentado su capital social. El almacén y depósito está situado en la calle mayor nº 26, donde se hallan también establecidas las oficinas de la Compañía”. Este cambio dio lugar a un cambio del sistema de fabricación y por lo tanto de la maquinaria cambiándose el sistema de trituración tradicional de mazos por seis pilas holandesas y, por supuesto una máquina de hacer papel continuo.*

7 Larruga, Eugenio: Memoria político económica sobre los frutos, fábricas y minas de España” Tomo 3º Madrid, 1788-1800...

8 Tomo X dedicado a Madrid, págs. 955 y 956



En el tomo XIII, 1849, en Rascafría, dice:

*“Una fábrica de seis cilindros, la cual tira por lo común 68 resmas diarias, pero el río Lozoya escasea tanto en verano que hay necesidad de suspender dos meses la fabricación por falta de agua. Sin embargo de los grandes estanques o depósitos que se han construido para prevenir este caso. Esta industria sostiene de 30 a 40 operarios de ambos sexos”.*

Según el “Indicador de España” de Viñas y Campi, 1864 era propiedad de la compañía titulada “Fábrica de papel continuo de Rascafría”. En 1880, según el Bailly-Bailliere pertenece a José Campos.

El “Anuario de Fábricas de papel de todas las Naciones”, Londres 1891-2, la cita como de la viuda e hijos de Fernández Iglesias y dice que tenía una máquina que fabricaba papeles de impresión y para periódicos.

En 1928, esta fábrica se cerró al canalizarse el río Lozoya para abastecer de agua Madrid.

## FUENTES DOCUMENTALES

La historia del molino de El Paular está ampliamente atestiguada a través de los documentos conservados en la propia biblioteca del monasterio, en la Sección Clero del Archivo Histórico Nacional, en la Biblioteca Nacional, el archivo de Protocolos de Madrid, el archivo de la Comunidad de Madrid y en menor cantidad en otros como en el Archivo Histórico Provincial de Segovia, Archivo General de Simancas, etc. Estos fondos son amplísimos y aquí sólo pretendemos hacer unas anotaciones sobre sus contenidos.

De entre los libros pertenecientes a la biblioteca del propio monasterio se encuentra el Libro Becerro de la Cartuja. Este libro, transcrito por D. Bernardo de Castro en 1565, es fundamental para entender la Historia de El Paular en sus primeras décadas de su andadura, pues abarca los años desde su fundación en 1390 hasta 1474. Recoge datos de la vida útil del molino, sus necesidades de abastecimiento y la producción que en él se llevaba a cabo, pero apenas hacen referencia a su construcción, características y dimensiones.

La desamortización obligó a los monjes a abandonar el monasterio, llevándose aquellos libros que creían de más valor, entregándolos a familias amigas para su custodia o bien reteniéndolos. En la actualidad, se sabe la existencia de documentos en manos de particulares aunque la mayoría se encuentra en la sección de Clero del Archivo Histórico Nacional.

El fondo de la Sección de Clero del Archivo Histórico Nacional del Monasterio de El Paular procede de la desamortización de Mendizábal de 1869 y 1875 y está dividido en tres grandes series:

- Serie legajos: Hay 83 cajas con fechas extremas 1400-1868 y con las siguientes signaturas: CLERO-SECULAR-REGULAR, 4251-4333.
- Serie pergaminos: hay 6 pergaminos, con fechas extremas s. XIV-1468 y signaturas CLERO-SECULAR-REGULAR Car. 1395, 13-18.
- Serie Libros con fechas extremas 1395 a s. XIX y signaturas CLERO-SECULAR-REGULAR, L. 6716-6733, 8088-8090, 8152-8153, 8457-8467, 18902-18903, 19668, 19777-19846, 19878, 20265.

En toda esta documentación aparecen datos referentes al molino pero aquellos que tratan específicamente de él son:

- Libro 19835 “Papel de nuestro molino vendido en Madrid y trapo allí comprado desde el año 1640 a 1644”.
- Libro 19785: “Papel de nuestro molino vendido en Madrid y trapo allí comprado desde el año 1649 a 1664”.
- “Libro de las cuentas del hospicio de Madrid donde en nombre de El Paular se compraba trapo y se negociaba la venta del papel”.
- “Libro de cuentas del molino de 1757 a 1824”.
- Legajo 4256 “Compra de trapo”.
- Legajo 5405 “Testimonio del papel”.

Otro fondo interesante sobre el molino se encuentra en la Biblioteca Nacional. Son dos libros de cuentas adquiridos por el Estado, que creemos que deberían estar en el Archivo Histórico ya que a pesar de tratarse de “libros” en realidad son volúmenes pertenecientes a archivos y que formaron parte de la documentación incautada por Mendizábal. Estos libros son:

- Manuscrito 19143 “Libro de cuentas del molino de papel propio de la Cartuja de El Paular”. Abarca los años de 1596 y 1597.
- Manuscrito 22848: “Libros de cuentas del molino del papel. Siglos XVII y XVIII (años 1641 a 1756)”, comprado por el estado español para la biblioteca Nacional en la Sala de Subastas Fernando Durán en 1997



Figura 5.- Documento firmado por Juana de Castilla sobre concesiones al molino papelero (A.H.N)

Otra fuente donde encontramos gran documentación sobre el molino de El Paular es el Archivo de Protocolos de Madrid ya que habiendo sido esta ciudad el centro literario de mayor movimiento en estos siglos y la sede de la Corte, en ella tuvieron lugar la contratación de compra venta de grandes cantidades de papel.

La nota mas antigua es del año 1575 y dice así: “*Mil quinientas resmas de papel, de la suerte e manera que se suele gastar para imprimir bulas, el cual papel ha de ser de la marca y manera y tamaño que se suele gastar para dicho efecto de bulas y ha de ser del papel que se hace en los molinos de Rascafría y Segovia, a precio de ocho reales cada resma*”.

En este archivo se recogen innumerables contratos adquiriendo especial relevancia los efectuados por Francisco de Robles y Juan de la Cuesta en los primeros años del siglo XVIII para la compra de papel para la impresión de El Quijote.

### DATOS MÁS SOBRESALIENTES QUE OBTENEMOS DE ESTA DOCUMENTACIÓN

Como hemos visto, esta documentación nos ofrece innumerables datos no sólo de los tipos de papeles fabricados, sus precios, su terminología, sino muchísima información de todas las actividades que corrían paralelas al trabajo del molino: comida de los operarios, de carpintería, abastecimientos de materia prima, etc.

Dado el espacio de esta comunicación, sólo vamos a hacer mención de aquellos que consideramos más sobresalientes con el fin mostrar el enorme valor y las posibilidades de estudio.

En toda la documentación no se ha encontrado referencia de que en el molino trabajasen mujeres, como era costumbre en casi todos. Seguramente la severa regla cartuja impedía su presencia aunque fuese fuera



Figura 6.- Diferentes libros de cuentas del molino conservado en el A.H.N.



del ámbito del convento. No hallamos, por consiguiente, ni esquinzadoras, ni tendedoras del papel.

Existe una relación muy detallada, fechada en 1623, sobre los días trabajados y festivos que nos ayuda a comprender la vida cotidiana en el molino y poder hacer un estudio comparativo con otras instalaciones no dependientes de órdenes religiosas. En ese año no se trabajó en mes de septiembre. Los molinos castellanos trabajaban según los encargos que tenían, pero este molino se ajustaba al calendario eclesiástico respetando los domingos, el día del santo patrón y el del patrón de los papeleros.

La venta se realizaba en su mayoría en Madrid, gestionada por la Casa del Hospicio, propiedad del monasterio y situada en las cercanías de Atocha; desde allí se firmaban contratos con impresores, particulares y congregaciones. También se realizan ventas y se recogen encargos para el Colegio Imperial, así como algunas partidas que van al Estanco de Tabacos en el siglo XVIII; y una pequeña cantidad de papel se vendía directamente en la propia fábrica, donde quedaban apuntadas junto con las que se abastecía la propia Cartuja.

El trapo para la fabricación se adquiría en Segovia y Madrid, siendo de mejor calidad los de la capital. Los precios eran bajos, lo que nos hace comprender la también baja calidad del papel.

Muchos de sus trabajadores procedían del cercano pueblo de Rascafría, aunque había otros de lugares más lejanos e incluso de Segovia. Entre ellos, además de los papeleros y aprendices, había un carpintero que reparaba las formas, la prensa y las ponedoras y seguramente se encargaba de reparar todos los desperfectos que pudiera producirse en el molino, reparar las ruedas, cambiar las ruedas de los árboles que movían los mazos, etc. En las cuentas de 1623 figuran las partidas necesarias para reparaciones. En las mismas cuentas figuran los gastos de alimentación y vestimenta del personal, así como el suministro de trapos para la fabricación de papel.

El molino sufrió un incendio en 1625. Parece ser que debido a este accidente Felipe IV concede al Monasterio un privilegio para que dicho molino no pague alcabalas y así pueda reconstruirse.

En 1715 se paga a papeleros franceses por elaborar 2.559 resmas de papel de imprenta, 135 resmas de papel fino, dándole el trapo como se compra y ellos a punto para encolar y, a través de otras muchas notas se refleja la presencia de papeleros franceses y sabemos que en 1756 el molino fue dirigido por un catalán.

En 1758 se pagaron 689 reales por seis formas que se han traído de Francia y se pagaron a Manuel Bartolomé, carpintero de molino, 300 reales para que hiciese cuatro formas “a la francesa”.

A través de esta documentación también sabemos que los obreros se alojaban en el molino, o cuando menos, hacían allí las comidas más importantes. Algunos estaban contratados por largos periodos de tiempo, proporcionándoles lo mas necesario, incluso, tal y como era costumbre, la ropa de vestir. Los aprendices recibían la suya, por valor de cuarenta reales. No hemos encontrado ninguna referencia al calzado.

También tenemos abundantes datos sobre el tipo de comida que se consumía ya que vemos que se procuraba que la despensa estuviera provista de bacalao de salazón, carne y “demás comestibles”. No faltaba el pan en hogazas. Éste era de centeno, el de la clase humilde, bien rociado con aceite, debía de llenar el estómago de los obreros. Suponemos que a estas viandas hay que añadir las truchas del que el río Lozoya era un buen y gratuito proveedor, y los productos de la feraz huerta con que contaba el monasterio. Se citan los garbanzos y no faltarían tampoco las judías.

#### RESTOS ARQUEOLÓGICOS:

Desgraciadamente, a pesar de esta abundante documentación no contamos con ningún plano del molino. Quizá aparezca consultando nuevos fondos, pero hasta ahora sólo lo podemos imaginar a través pocos restos arqueológicos que se conservan y con la ayuda de otros planos de molinos papeleros, que suponemos que tuvieron iguales características.

En una excavación arqueológica llevada a cabo por la Consejería de Educación y Cultura de la Comunidad de Madrid se han hallado restos del suelo original, de sillares y lo que parece ser el espacio dedicado al pudridero. Previa a esta excavación, se realizó un estudio, sumamente exhaustivo y riguroso sobre el molino llevado a cabo por los arqueólogos Juan José Cano y M<sup>a</sup> José Mendoza.

Observando estos restos podemos establecer las siguientes características del conjunto industrial: Parece ser que el molino papelerero tuvo una canalización especial en el río, con una serie de embalses y presas que aún hoy se conservan, para su aprovechamiento continuo sin tener que estar a expensas de las diferencias de nivel de agua durante las distintas estaciones del año.

Dada la larga vida del molino y la evolución de la tecnología de la fabricación del papel, la edificación y los ingenios para su funcionamiento han debido de



sufrir, a lo largo de la historia muchas modificaciones. En los restos que actualmente se conservan (que pueden ser los más antiguos de los siglos XVII y XVIII) vemos que el molino pudo tener dos o tres ruedas. Por la morfología de la presa y por la existencia de dos pequeños edificios en sus extremos, parece indicar la existencia de sendas ruedas.

También vemos una apertura para la entrada del agua que se produce en el fondo del embalse para aprovechar al máximo la energía motriz del agua. Se puede observar la estructura de dos vanos con bajamar central y arquivadros para el accionamiento de las compuertas que llevan el agua hasta la rueda. El canal de salida discurriría paralelo al muro y se reincorporaba por el norte del cauce del río Lozoya. Este pozo está desfigurado por la construcción de una piscina.

Del resto de las construcciones de la fábrica de papel desconocemos todo, ya que sólo quedan los arranques de los muros y el trasdós de antiguos canales de desagüe.

La organización urbanística del complejo está marcada por un eje norte-sur que va desde la escalinata de acceso al muro de la presa, desde donde se manipularían las compuertas, hasta una puerta próxima al puente, que desde tiempos remotos se cita como entrada y comunicación de la fábrica al otro lado del río Lozoya. El pavimento de las calles formado con canto rodado del río muy semejante al que se ha descubierto, recientemente, junto a la puerta de Gil de Hontanón en el Monasterio.

La escalera de acceso del embalse principal nos sorprende por su magnitud, que sobrepasa lo meramente utilitario y que parece un elemento barroco para la contemplación del paisaje del embalse en el que se refleja el valle.

Sólo quedan algunos pequeños vestigios de lo que pudo ser la residencia y comedores para los sesenta



Figura 7.- El río Lozoya a su paso por el molino

operarios que, documentalmente, tuvo la fábrica, ya que sobre los restos se construyó, en la segunda mitad del siglo XX, el Colegio de San Benito que posteriormente fue demolido lo que hace aún más confusa la interpretación de estos vestigios arqueológicos.

## PROYECTO FUTURO

La protección del patrimonio etnográfico está ampliamente recogida en la Ley del Patrimonio Español de 1985 y en la de la Comunidad de Madrid. Esta protección está basada en la documentación, investigación, conservación y difusión del bien cultural.

Con la puesta en valor de estos restos arqueológicos y el estudio de la abundante documentación que hay sobre ellos, se alcanzarían, entre otros, los siguientes objetivos:

1. Recuperación de una importante manufactura que fue pionera para la orden Cartuja, no sólo para España sino con repercusiones en Ibero-América a través de la imprenta y del impuesto del papel sellado.

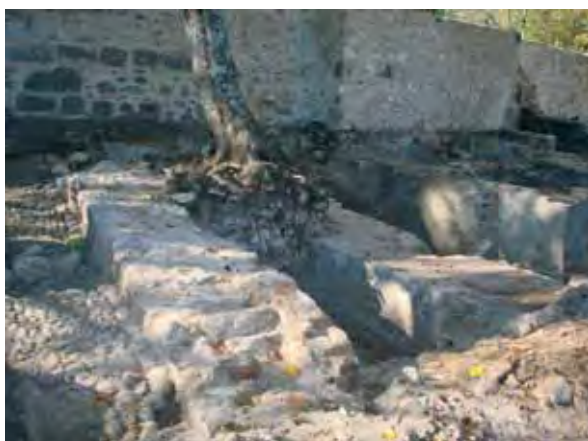


Figura 8.- Restos arqueológicos del molino papelero de El Paular



2. Recuperación y puesta en valor de un importante vestigio de arqueología industrial papelera y de aprovechamiento hidráulico del río Lozoya.
3. Creación una biblioteca y centro de documentación de la fabricación del papel en España, centrándose en el Molino de El Paular y sus conexiones con otros molinos de la provincia de Madrid y de la orden cartuja.
4. Creación de un centro didáctico promocionando e incentivando la visita de escolares para que se familiaricen con esta manufactura a través de talleres y material pedagógico, en el cual se pondría en valor las siguientes actividades:
  - Recuperación de una artesanía en peligro de extinción.
  - Aprendizaje y transmisión de un oficio característico de la zona.
  - Recuperación de productos, utillaje e instalaciones y sistemas de producción de actividades extinguidas, pero autóctonas.
  - Recuperación patrimonio etnológico de carácter inmaterial.
5. Creación de un centro de investigación y fabricación de papel a mano.

Este Centro del papel de El Paular centraría sus estudios, además de la historia del propio molino en los siguientes temas:

  - Las órdenes monásticas y sus aportaciones a las obras de ingeniería hidráulica.
  - Los cartujos y la fabricación del papel.
  - El papel y la imprenta: El Quijote.
  - El Estado y el papel: Legislación papelera.
- Terminología castellana en la fabricación del papel.
6. Este centro de estudios del papel sería complementario a los existentes Museo-Molí Paperer de Capellades (Barcelona) y Museo-Molí Paperer de Banyeres de Mariola (Alicante). El primero está enmarcado dentro del Museo de la Ciencia y la Técnica de Cataluña, centrado en la importancia que tuvo la industria papelera catalana en el siglo XVIII. El segundo está especialmente dedicado a la fabricación del papel de fumar en la comarca de Alcoy.
7. Este centro se enmarcaría dentro de la Red de Molinos Papeleros Europeos creada a raíz del Proyecto Rafael 1999: "The Watermark Route".

Para la consecución de estos fines y dar a conocer la importancia de esta manufactura del valle del Lozoya se han realizado una serie de actuaciones llevadas a cabo por el Ayuntamiento de Rascafría, de la Consejería de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid y la Asociación Hispánica de Historiadores del Papel entre las que cabe destacar:

  - Preacuerdo con ASPAPEL (Asociación Nacional de fabricantes de Pasta Papel y Cartón) para su participación en el proyecto.
  - Visita a los restos arqueológicos durante la celebración del XXVII Congreso del IPH (International Association of Paper Historians). 2006.
  - Celebración del VII Congreso de Historiadores del Papel en España de la Asociación Hispánica de Historiadores del Papel (junio 2007).

Creemos que este periodo que estamos atravesando dificultades económicas es bueno para establecer unos criterios para la realización de estudios y proyectos para llevarlos a cabo cuando las condiciones presupuestarias nos permitan realizar un inversión perfectamente consensuada.

# LA GESTIÓN DE ESPACIOS NATURALES PROTEGIDOS EN UNA ERA DE VALORES AMBIENTALES EN CONFLICTO

JOSÉ ANTONIO CORRALIZA RODRÍGUEZ

*Departamento de Psicología Social y Metodología  
Universidad Autónoma de Madrid  
28049 Madrid.  
josea.corraliza@uam.es*

## INTRODUCCIÓN

Los espacios naturales protegidos constituyen en la actualidad uno de los recursos básicos de la política ambiental para la conservación y puesta en valor del patrimonio natural. La conservación de espacios naturales representa uno de los ejes de la política ambiental, con especial relevancia para la conservación de la diversidad biológica y como uno de los recursos básicos para promover la integración territorial y el desarrollo sostenible. En diversos estudios, se muestra la gran contribución que la política de protección de espacios naturales ha realizado para la conservación y mantenimiento del patrimonio natural, hecho éste sobre el que existe un gran consenso social. Sin embargo, la implantación de espacios naturales protegidos, desde sus orígenes a finales del siglo XIX, no ha estado exenta de polémica y, en efecto, ha dado lugar a la existencia de conflictos sociales ligados tanto a la declaración de estos espacios como al impacto social de los modelos de gestión de los mismos. La tendencia actual es a que esta superficie se incremente progresivamente. Por ejemplo, según las más recientes previsiones de aplicación de la Directiva Hábitat realizadas por la Dirección General de Conservación de la Naturaleza (Ministerio de Medio Ambiente) van a quedar declarados por Lugares de Interés Comunitario (LICs), un total aproximado de 11,6 millones de hectáreas (casi 11 millones de hectáreas de superficie terrestre, y aproximadamente 600.000 hectáreas de espacios marinos). En conjunto, casi el 22% del territorio nacional, en cumplimiento de las exigencias derivadas de la aplicación de la Directiva Hábitat (92/43/CEE) va a ser declarado LIC.

Los espacios naturales protegidos en España constituyen, pues, uno de los hechos históricos de mayor importancia para la conservación de espacios y el mantenimiento de la diversidad biológica. Así es reconocido, por ejemplo, en la *Estrategia Española para la Conservación de la Diversidad Biológica* (Ministerio de Medio Ambiente, 1999), entre otros documentos. Son pues un hito en el conservacionismo español. Pero su relevancia va más allá de la conservación misma.

Los espacios naturales constituyen, además, un hecho de gran relevancia social. Según los datos recopilados en distintos trabajos (véase, por ejemplo, Europarc 2002 y Corraliza, García y Valero, 2002), una población superior a los diez millones de personas viven en áreas influidas y afectadas por la gestión de los espacios naturales protegidos. Y casi treinta millones de personas visitan alguno de los más de 600 espacios naturales protegidos a lo largo del año. A estas consideraciones hay que sumar la progresivamente cada vez mayor superficie del territorio nacional que se ve afectada por la declaración de alguna figura de protección de espacios naturales. El territorio protegido incluye, además, de propiedades de dominio público, terrenos de los que son titulares propietarios privados. Los usos de estos territorios son igualmente diversos y muy variados.

Estos datos, entre otros muchos que pudieran añadirse, permiten confirmar que los espacios naturales protegidos deben considerarse escenarios sociales, en la medida en que en su interior pueden identificarse



metas, aspiraciones, valores y expectativas diferentes, cuando no explícitamente encontradas entre sí. En efecto, si algo está claro en lo que concierne a la gestión de los espacios naturales protegidos es, precisamente, el hecho de que, como se ha escrito en otra ocasión (Corraliza, 2000), “ordenar” recursos naturales y “planificar” la gestión de los espacios naturales consiste en ordenar y planificar el desarrollo de actividades humanas y las transacción entre éstas y los valores naturales que caracterizan un determinado espacio. De esta forma, y en línea con lo que se argumenta en uno de los más importantes documentos internacionales sobre este tema (*Parques para la Vida*, UICN, 1994) se ha roto la visión de los espacios naturales como “islas” de biodiversidad y, se hace necesario definir modelos de gestión que incorporen la búsqueda de equilibrio entre lo natural y lo cultural, teniendo en cuenta que la conservación de la diversidad biológica requiere controlar el impacto de las transacciones entre la realidad ecológica, económica, perceptiva y social del entorno y la dinámica natural del ecosistema objeto de protección (Castro, 1994).

## LOS ESPACIOS NATURALES PROTEGIDOS

En España, resulta especialmente necesario reflexionar y profundizar en las exigencias derivadas de este enfoque múltiple de la gestión de los parques naturales. Y ello por las características específicas que posee el territorio donde se localizan los parques naturales. No se trata de entornos típicos de “naturaleza salvaje”, sino más bien de territorios que son resultado de siglos de interacción entre las comunidades (y los usos que en ellos se han planificado) y los recursos de la naturaleza. Se trata de espacios que, dentro de su diversidad poseen una serie de rasgos comunes. Entre ellos pueden destacarse los siguientes:

- a) Se trata de espacios de carácter rural, en la mayor parte de los casos. En efecto, estos espacios se encuentran en torno a comunidades de pequeño tamaño y donde se realizan actividades, más o menos regladas, pero con una tendencia a no ser usos intensivos.
- b) Se trata de territorios caracterizados por la escasez de servicios básicos, y, en gran medida, por situarse en entornos territorialmente aislados, y con déficits en los sistemas de intercambio y flujo con el entorno
- c) Son territorios caracterizados por las dificultades de promoción social y cultural, debido tanto a razones de falta de integración en la dinámica económica, como también a causas psicosociales del clima social (baja autoestima, ausencia de expectativas

de futuro, etc.), que conducen a un cierto desánimo compartido.

Estas características plantean la necesidad de un enfoque de la gestión multisectorial. Este enfoque debe combinar las metas y aspiraciones que se proyectan sobre la naturaleza, en general, y los espacios protegidos en particular. Al menos son tres las dimensiones que la gestión debe tener en cuenta. En primer lugar, el hecho de que la implantación de figuras de protección de espacios naturales debe constituir un instrumento de conservación de la diversidad biológica (especies de fauna, flora, paisaje, recursos naturales, etc.). En segundo lugar, la creación de espacios naturales protegidos debe ser un instrumento para promover el desarrollo de las comunidades locales y del territorio sobre el que ambas, comunidades y vida natural, se asientan. Y, en tercer lugar, debe gestionarse con la orientación de facilitar el acceso y disfrute de los valores naturales que justifican la protección del espacios (el espacio natural es un espacio de uso público) (figura, 1; para más ampliación, véase Corraliza, García y Vlero, 2002).

En suma, en muchas situaciones la existencia del parque natural (y la infraestructura administrativa que ello conlleva) es uno de los (únicos) modos de intervención social en las zonas de influencia de los parques naturales. Al mismo tiempo, la existencia del parque natural puede ser la oportunidad que facilite una cierta recuperación de la estima por el territorio y por la propia comunidad. Con frecuencia, el gestor y el planificador pierde de vista la incidencia que su labor puede tener en otras esferas de la dinámica del territorio y de la propia comunidad local sobre la que se asienta el parque natural. Esto ha permitido afirmar a E. Zube (1995), después de haber realizado un estudio sobre doce parques nacionales norteamericanos, una de las más claras paradojas que caracterizan la imagen social de los parques:

*“Las poblaciones locales han considerado los parques como una maldición y una bendición al mismo tiempo”* (Zube, 1995, 14)

Se asume, pues, una perspectiva sensible al gran cambio producido en la gestión de las áreas protegidas en los últimos cuarenta años. Este cambio, lento pero progresivo, ha consistido en desplazar los conflictos en la gestión de los parques desde la discusión sobre lo que “ocurre dentro de los límites del parque”, a la discusión sobre los que “ocurre fuera e influye necesariamente sobre lo que ocurre dentro del parque”. En este sentido, la perspectiva asumida puede definirse con tres supuestos básicos, que afectan a la dinámica de los espacios protegidos.

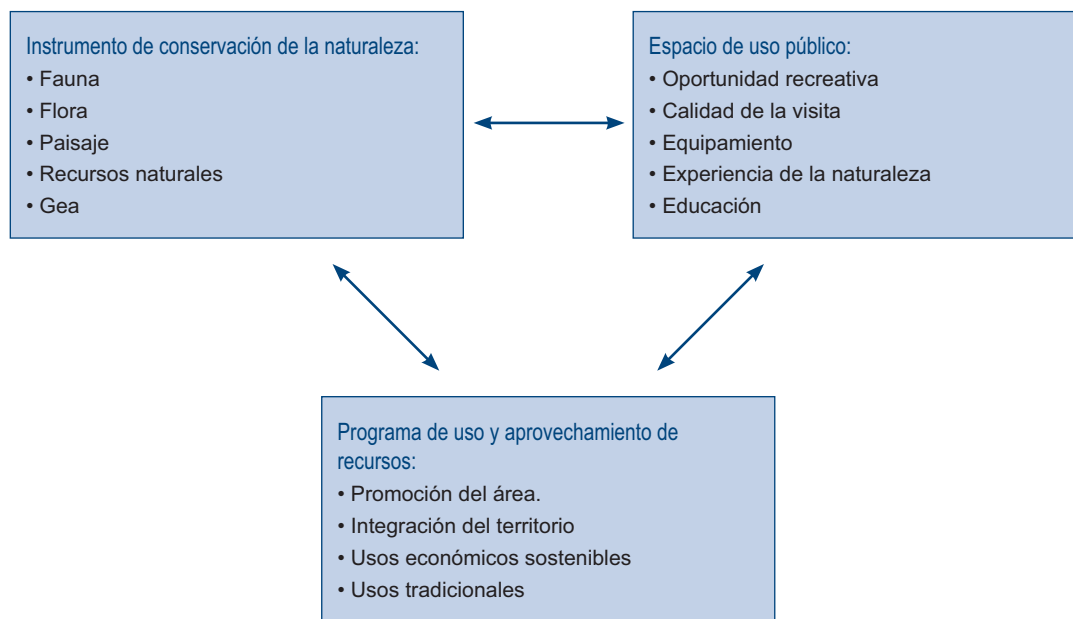


Figura 1. Esquema de objetivos y áreas de gestión en un parque natural.

El primero de los supuestos es que se considera el espacio protegido (y, especialmente, los parques naturales) como partes integrantes de las relaciones económicas, sociales y ecológicas de la región en la que se encuentra. Esta afirmación requiere, en principio, un enfoque integral de la gestión del parque natural, y, no sólo una gestión unidimensional por muy alto que sea su nivel de competencia.

El segundo supuesto básico, se refiere a la necesidad de desarrollar enfoques cooperativos de la gestión, frente a enfoques centrados en el tratamiento aislado de los problemas. La necesidad de desarrollar enfoques cooperativos de la gestión de los espacios naturales protegidos está siendo subrayada en todos los foros de discusión, actualmente abiertos, sobre la gestión (el más relevante sin duda es el abierto con motivo de la discusión del *Plan de Acción para los espacios naturales protegidos del Estado Español (Europarc España)*.

El tercero de los supuestos hace referencia al reto que actualmente tienen planteado los gestores y planificadores de los parques naturales. Este no es otro que gestionar conflictos entre los valores sociales que se proyectan sobre los espacios protegidos, y los agentes sociales que los representan. El equipo de trabajo de este proyecto es especialmente sensible al cambio ocurrido en el perfil del gestor de un parque natural, que de ser un gestor de conflictos de valores y soluciones técnicas a problemas dentro del parque, se ha convertido en un agente social que ocupa una posición clave en las relaciones entre el parque (y lo que éste significa) y las comunidades circundantes o que acuden a él. Las exigencias de este nuevo perfil del gestor aún no han sido desarrolladas completamente, pero afectan no

sólo al director-conservador del espacio, sino a todo el personal de apoyo a la gestión.

## NATURALEZA, PARQUES Y VIDA HUMANA

La naturaleza, cualquiera que sea la definición que asumamos de ella, constituye una referencia explicativa del comportamiento humano. Pitt y Zube (1987) plantean las dificultades para asumir en nuestro tiempo un concepto radical de “naturaleza”. De acuerdo con la definición que estos autores plantean la naturaleza estaría formada por “el vasto dominio de materia orgánica e inorgánica que no es producto de la actividad o intervención humana”. Esta definición resulta en extremo artificiosa, y, llevada a un cierto extremo, podría llegar a afirmarse que, en efecto, no existe la naturaleza como tal (“naturaleza virgen”). En general, se asume que el medio natural se define por oposición al medio construido, y que, en consecuencia la naturaleza carece de elementos o artefactos de humanización visible. Debe, pues, entenderse esta distinción como los dos polos de un *continuum*, más que como una realidad esencialmente diferente.

La política ambiental centrada en la protección de espacios naturales refleja las ideas, valores y referentes normativos en relación con la naturaleza. Pitt y Zube (1987) han diferenciado distintos períodos en los últimos doscientos años que definen los ejes de valoración de los espacios naturales. Estos autores llegan a diferenciar entre ocho etapas diferentes en relación con la valoración social de los espacios naturales. Desde la etapa previa (“libre disposición de los territorios y recursos que contienen), hasta etapas de preservación



y conservación e incluso etapas en las que los espacios naturales se convertían en escenarios de reivindicación de calidad ambiental. En cualquier caso, la política de conservación de espacios naturales, tal y como Pitt y Zube afirman en el trabajo antes mencionado, “expresa valores normativos de los actores concernidos e implicados con relación a recursos o sistemas presentes en el medio natural” (1010).

De esta experiencia histórica pueden deducirse dos rasgos característicos, con frecuencia olvidados en la gestión de espacios naturales protegidos. El primero de ellos, es la consideración del medio natural como un ámbito que, aunque contiene recursos de flujo renovable, el territorio como tal (como ámbito para la actividad humana) entraría en la categoría de recurso en stock finito y limitado, y su reemplazamiento resulta costoso y difícil de garantizar. Esta idea está en la base del nacimiento de la idea de “parque” como propuesta para la protección de un patrimonio natural. Se trata, pues, de preservar los valores de un determinado territorio porque la desaparición del territorio mismo produciría la extinción de los valores naturales del mismo. A los espacios naturales se puede aplicar lo que Kaplan y Kaplan (1989) escriben sobre el paisaje: es más que la enumeración de los elementos que componen la escena. Un espacio implica una organización de estos componentes. En ese caso, se trata de preservar la trama de relaciones ecológicas y de uso del territorio que han asegurado la pervivencia del mismo.

El segundo de los elementos que ha caracterizado la evolución reciente de la idea protectora de parque se refiere a los cambios de uso de los espacios protegidos. En un primer momento, la creación de parques norteamericanos respondían a la necesidad de asegurar la disponibilidad de recursos naturales para el futuro (fundamentalmente, madera, pastos y recursos hídricos), hecho éste que dio lugar a lo que Runte denominaba los valores mercantiles de los espacios naturales. El espacio natural es considerado como una reserva (podría decirse mejor, como una “despensa”) de recursos naturales cuya pervivencia contribuye a la de la especie humana. Paralelamente, los valores asociados a los espacios naturales y los criterios que justifican su aprecio se desplazan hacia una esfera menos mercantil, destacando los valores estéticos, simbólicos y recreativos. Desde la implantación de la figura de parque en Estados Unidos, este conflicto entre valores mercantiles y no mercantiles han estado permanentemente presente, y polémicas de una contextura similar han aparecido en España (véase Fernández y Pradas, 1998). El resultado es que el perfil psicosocial de los usuarios de los parques ha ido cambiando a lo largo de los años. En efecto, podría decirse que se ha pasado de una gestión en la que los usuarios predominantes estaban orientados por la actividad forestal, la ganadería,

la pesca, etc., a una gestión que ha de tener en cuenta a los deportistas, los paseantes, los naturalistas, los arqueólogos, etc. Es decir, los visitantes.

A estas polémicas que han acompañado la evolución histórica de la gestión de los espacios naturales protegidos, hay que sumar un conjunto de ideas fuerzas que caracterizan los esquemas de gestión. Una relación apreciable de estas ideas se encuentra en el texto de Zube (1995), publicado con motivo de su visita para participar en el III Congreso Nacional de Psicología Ambiental. Zube sintetiza las limitaciones de los modelos de gestión de los espacios naturales protegidos en los siguientes puntos:

- a) Los parques no deben ser considerados como reservas aisladas, sino como partes integrales de las complejas relaciones económicas, sociales y ecológicas de la región en la que existen. Los espacios naturales y su gestión deben estar estrechamente vinculados a los recursos culturales y sociales que les rodean. Y, Zube concluye diciendo que “aún no sabemos manejar eficientemente las implicaciones de este argumento” (p. 20).
- b) El enfoque dominante en la gestión de los espacios naturales protegidos ha estado caracterizado, según las épocas, por criterios habitualmente excluyentes. Así, por ejemplo, en la época de dominancia de los valores utilitaristas la gestión estaba dominada por el criterio de eficiencia técnica en la explotación sostenida de los recursos que alberga el espacio natural. En la época dominada por la orientación recreativa la gestión se ha enfocado hacia la promoción de la visita y el equipamiento consecuente. Propone E. Zube una gestión basada en el enfoque cooperativo, que contemple los múltiples usos y la multiplicidad de usuarios del espacio natural.
- c) Se hace necesario cambiar el perfil del gestor, asumiendo el hecho de que el gestor tiene que enfrentarse a conflictos en el interior del parque (intra-parque), así como a situaciones de conflicto provocadas por la gestión del parque y las expectativas de las comunidades circundantes.

Estas ideas de E. Zube, fallecido a principios del año 2002, coinciden con los resultados recogidos en uno de los más importantes documentos para orientar la gestión de Espacios Protegidos (Europarc, 2002), y que se ha presentado como el resultado de un amplio proceso de discusión en nuestro país. Uno de los aspectos claves deriva en la necesidad de evaluar la gestión de los espacios naturales, y hacer esto teniendo en cuenta la multiplicidad de aspectos implicados en la gestión de un espacio natural que es también un escenario social.



## LA GESTIÓN DE ESPACIOS NATURALES PROTEGIDOS: PARÁMETROS DE EVALUACIÓN

Tal y como se ha dicho, las figuras de protección de espacios naturales supone que la gestión de los mismos está relacionada y vinculada a campos de actividad extraordinariamente diversos. Se trata de establecer los criterios de actuación en relación con múltiples amenazas que puedan surgir. Además, se registran enormes dificultades y limitaciones de la gestión de los espacios naturales protegidos, en general, y de los parques naturales, en particular. En este apartado, basado en datos recogidos en un estudio sobre la imagen social de los parques naturales en España (Corraliza, García y Valero, 2002) se presentan algunos resultados indicativos de los criterios de evaluación de la gestión de espacios protegidos.

Los resultados descriptivos de este estudio muestra que, probablemente debido a las dificultades de articulación de la gestión, así como de los déficits formales (inexistencia de planes rectores de uso y gestión, inexistencia de funcionamiento en redes de parques naturales, etc.), la valoración de la gestión no es muy positiva, en términos generales.

De hecho, ante una pregunta directa (*en general, estoy satisfecho con la gestión que se realiza en el Parque Natural*) se registran tasas que podemos considerar elevadas de insatisfacción. La tabla 1 nos permite estimar la tasa general de insatisfacción en más de un 63% del total de entrevistados. Este dato parece reflejar, ante todo, la opinión general sobre el papel de los gestores y entes administrativos relacionados con la dinámica del parque natural. Los datos permiten detectar igualmente notables diferencias en la estructura de las respuestas entre el grupo de residentes y el grupo de visitantes. Llama, especialmente, la atención el hecho de que en el caso de la muestra de residentes el porcentaje de personas que están en extremo insatisfecho (“nada o casi nada satisfecho con la gestión”), es del 25%. Mientras que, entre los visitantes, este porcentaje se reduce al 10%. Es decir, en la muestra de residentes se registra un porcentaje mayor de opiniones radicalizadas, mientras que en la de visitantes, la opinión es bastante radical.

Una parte importante de esta crítica opinión puede estar relacionada con la (mala) imagen de los gestores públicos de los espacios naturales protegidos. La razón de esta ‘mala imagen’ de los gestores de los parques naturales puede ser muy diferente según los casos. En unos, se ve afectada por el estilo de liderazgo del Director-Conservador; en otras, por las dificultades inherentes a la situación. En otras, en fin, por uno de los vectores de conflictos en parques naturales que con mayor frecuencia aparecen: el vector de ‘los de dentro’

Tabla 1. En general, estoy satisfecho con la gestión que se realiza en el Parque Natural (N=1007)

	Frecuencia	Porcentaje
nada o casi nada	179	17,8
algo satisfecho	463	46,0
Bastante satisfecho	280	27,8
muy satisfecho	40	4,0
NS	45	4,5

frente al vector ‘de los de fuera’, con capacidad de decisión. Los gestores, en este sentido, forman parte, mayoritariamente, del sector de los de fuera, e, incluso, muchos de ellos viven fuera del Parque Natural, y están integrados en estructuras administrativas especialmente alejadas de la zona de protección.

Esta respuesta general de valoración de la gestión no permite valorar con optimismo el impacto social de la gestión de los espacios naturales objeto de estudio. Sin embargo, se hace necesario establecer las causas de esta mala imagen de la gestión de los parques naturales. En particular, merece la pena detener la atención en explicar las causas que expliquen la tan negativa opinión, en particular de la población residente. Como se recordará, uno de cada cuatro entrevistados está extremadamente insatisfecho con la gestión realizada en los espacios naturales estudiados. Para ello, se ha recurrido a un análisis específico para esta submuestra; se ha adoptado como variable criterios la satisfacción con la gestión, y se ha realizado un análisis de regresión múltiple. Este análisis permite ordenar las variables que explicarían el modelo de gestión ideal para los residentes, y por tanto, permite definir las variables que podrían ser tenidas en cuenta con el fin de mejorar la imagen de la gestión de los parques naturales.

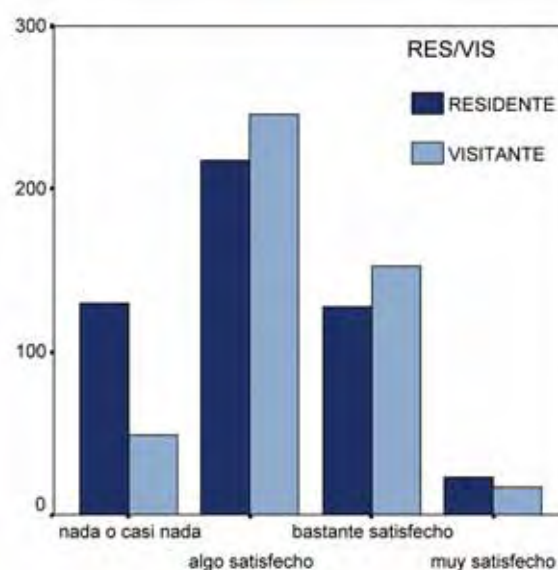


Figura 2. Distribución comparada de las respuestas que expresan grado de satisfacción con la gestión de los parques naturales (residentes-visitantes)



Los resultados reflejados en la tabla 2 (que explica el 57,5% de la varianza de la respuesta de satisfacción con la gestión), permite definir un modelo de gestión en el que se destacan las variables predictoras siguientes:

- a) En primer lugar, que la gestión tenga en cuenta los beneficios para los habitantes de la zona (la puntuación beta negativa es consecuencia de la formulación de los ítems, y quiere decir que a mayor beneficio para los habitantes de la zona, mayor satisfacción; en efecto, los ítems de respuesta están invertidos: la satisfacción con la gestión se mide en una escala de 1-muy insatisfecho- a 4-muy satisfecho-; mientras que el juicio sobre los beneficios para la zona se mide en una escala de 1-muy beneficioso- a 4-muy perjudicial para los habitantes de la zona).
- b) En segundo lugar, que se tenga en cuenta la opinión de la gente y que la información sobre el parque sea clara y llegue a tiempo.
- c) En tercer lugar, se valora especialmente la gestión dedicada a mejorar el nivel de calidad y mantenimiento del parque natural (limpieza y reducción de la contaminación).

Estos resultados contrastan con los obtenidos en la muestra de visitantes del mencionado estudio (véase Corraliza, García y Valero, 2002). En el caso de los visitantes, el modelo ideal de gestión se centra en reforzar la atención a los visitantes, el cuidado escénico del parque natural y los medios de información e interpretación. En el caso de los residentes, una gestión que, junto a la preservación del espacio, contribuya a la mejora de la situación de los habitantes. Con frecuen-

cia, pueden detectarse conflictos entre estos dos modelos de gestión, y, en ocasiones, aparece un sentimiento de falta de equidad y percepción de injusticia en el trato como consecuencia de los esquemas de gestión, tal y como se verá más adelante.

Estos son los elementos de los modelos de gestión que, según los datos obtenidos, proporcionaría una mejora de los niveles de satisfacción de la población residente. Estos datos, además, subrayan el hecho de que hay esferas de la gestión de los espacios naturales que pasan desapercibidos para la población residente y visitante, sin que ello tenga justificación; es conveniente, en este sentido, que los gestores asuman su papel explicando las exigencias de esta gestión a aquéllos que se van a ver afectados en primer lugar. Sin duda, lo que estos datos están demostrando es la necesidad de que los gestores y responsables de las políticas públicas de gestión de espacios naturales protegidos tengan en cuenta el impacto en la población residente de estas políticas de protección de espacios naturales y, al mismo tiempo, que los criterios y programas de actuación y gestión se basen en el establecimiento de unos adecuados niveles de comunicación y flujo de información que permitan la obtención de un óptimo consenso social. Sin este consenso social, resulta difícil legitimar la gestión misma (e, incluso, llevarla a cabo con eficacia).

### ASPECTOS (POSITIVOS/NEGATIVOS) DE LA GESTIÓN EN LOS ESPACIOS NATURALES

Los datos obtenidos permiten también registrar el juicio de los entrevistados sobre el funcionamiento de algunos de los aspectos específicos de la gestión de los parques naturales. Este contenido del trabajo del gestor ha sido estructurado en tres grupos de variables, teniendo en cuenta las distintas áreas de gestión: (1) conservación y mantenimiento del espacio, (2) aspectos sociales de la gestión y (3) dirección de equipamientos y servicios del parque. En este apartado, vamos a presentar los aspectos de la gestión más estrechamente relacionados con el nivel de conservación y mantenimiento del espacio mismo.

En primer lugar, conviene decir que se registra una tendencia a una evaluación positiva de la relación de distintos aspectos de gestión considerados en este estudio. La tabla 3 recoge aquellos aspectos que más de un cincuenta por ciento de la muestra estudiada considera que están funcionando adecuadamente.

Como puede observarse en esa tabla 3, aquéllas variables en las que, en general, se concentra una mayor tasa de aceptación de la gestión tienen que ver con tres aspectos básicos de la misma: el primero

**Tabla 2.** Análisis de regresión múltiple sobre la variable criterio de nivel de satisfacción con la gestión del Parque en la muestra de residentes

	Beta	Cambio en R <sup>2</sup>
Grado de beneficio para los habitantes de la zona por la declaración de Parque Natural. (Más a menos beneficio)	-.327**	.345
Grado de acuerdo con que los gestores y los representantes del Parque tienen en cuenta la opinión de la gente del pueblo.	.333**	.135
Valoración de la limpieza de basuras y la reducción de la contaminación.	.178**	.054
Grado de acuerdo con que la información que interesa llega claramente y a tiempo.	.182*	.026
Grado de acuerdo con que todos hemos salido ganando con la declaración de Parque Natural.	.150**	.016

R=.758; R<sup>2</sup>=.575; \*p<.05; \*\*p<.01



de ellos, se refiere al hecho de que el parque natural (probablemente, en sí mismo) constituye un factor de atracción de visitantes (la categoría promoción del turismo y la construcción de lugares para visitantes). En segundo lugar, la satisfacción con aquéllos aspectos de conservación estrictamente hablando, tales como las estrategias para mantener la calidad escénica de los paisajes, la prevención de incendios, la recuperación de especies (de fauna y de flora). Y, en tercer lugar, actividades de recuperación y/o rehabilitación del territorio del parque natural, tales como la repoblación, la limpieza o la restauración de elementos emblemáticos del patrimonio histórico del lugar. Esta evaluación mayoritariamente satisfactoria refleja aquellas áreas de gestión en las que el trabajo de los gestores ha resultado ser más positivo.

Como en un juego de contrastes visuales, la tabla 4 establece la relación de aspectos de la gestión sobre los cuales el juicio negativo sobre el funcionamiento recaba una tasa mayor de entrevistados. No es evidente que dentro de las funciones de la gestión de un parque natural, sea prioritario atender a estos intereses. Pero, sin duda, la existencia de un parque natural en una zona (normalmente ruralizada y, en muchos casos, aislada territorialmente) supone la presencia de una iniciativa institucional sobre la cual los ciudadanos depositan muchas expectativas (a veces, excesivas), que convierten de hecho a la figura del parque natural (en la mente de muchas personas, particularmente residentes en la zona) en un motor y agente del cambio social y de mejora de las condiciones de vida. De esta forma, en la relación de aspectos cuyo funcionamiento es considerado inadecuado aparecen dos tipos de variables. En primer lugar, aquéllas acciones relacionadas con el equipamiento (deportiva, educativo, recreativo, de investigación en la zona), y, en segundo lugar, aquéllas otras variables relacionadas con la articulación de la relación social con los habitantes de la zona (contribuir al mantenimiento de las tradiciones, ofrecer posibilidades de trabajo y mejora de los caminos rurales).

**Tabla 3.** Aspectos de la gestión de los parques naturales que funcionan adecuadamente (para un porcentaje superior al 50% de la muestra)

Promover el turismo en la zona	77,5%
Evitar los incendios	69,9%
Mantener y preservar el paisaje	67,8%
La construcción de lugares para visitantes	58,3%
Mejora de recuperación de especies amenazadas	57,8%
Recuperar el patrimonio histórico-artístico	56,9%
Mantenimiento de actividades selvicultoras	56,1%
Limpieza de basuras y reducción contaminación	55,1%

Resulta lógico pensar que la evaluación de la gestión específica, así como de los problemas en ella implicados (que aparecen en las dos tablas precedentes), es muy diferente de un parque natural a otro. En efecto, los datos obtenidos muestran que existen diferencias notables de un espacio a otro. No es el objeto más importante de este trabajo el análisis y la evaluación de cada uno de los parques, sino de los principios orientadores comunes a la gestión de todos ellos. Además, en España, tanto por las diferencias normativas como por las diferencias en los perfiles profesionales de los gestores, los contenidos de la gestión son muy variables. Además, existen notables diferencias en la historia y tradiciones de cada lugar relacionadas con la conservación de espacios.

## CONCLUSIÓN

Los espacios naturales son escenarios sociales, además de territorios de gran valor emocional. La gestión de los mismos debe asumir las exigencias derivadas de esta conclusión. Para ello, se hace necesario introducir en la gestión de los espacios naturales protegidos tres instrumentos básicos, en los cuales la colaboración del psicólogo ambiental, resulta especialmente conveniente: la gestión de la información, la promoción de la participación en la gestión y el establecimiento de programas de mediación en los conflictos.

Estos tres recursos actualmente no pueden ser considerados un lujo o un adorno de la gestión, sino, por el contrario, instrumentos decisivos para aumentar el consenso social que requiere una política efectiva de conservación de la diversidad biológica a través de la conservación de espacios naturales.

**Tabla 4.** Aspectos de la gestión de los parques naturales que funcionan inadecuadamente (para un porcentaje superior al 50% de la muestra)

Crear equipamientos para actividades deportivas	83,2%
Mantenimiento de las tradiciones culturales de la zona	64,6%
Ofrecer posibilidades de trabajo en la zona	63,7%
Promover equipamientos de educación ambiental	59,2%
Rehacer y mantener los caminos rurales	54,9%
Promover investigaciones sobre la naturaleza en la zona	53,8%
Construir equipamientos para uso recreativo	52,7%





## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CASTRO, R. de (1990). Los espacios naturales y el hombre. En R. de Castro, J.I. Aragonés y J.A. Corraliza (eds.), *La conservación del entorno. Programas de intervención en Psicología Ambiental*. Sevilla: Agencia de Medio Ambiente.
- COMISIÓN DE UICN SOBRE PARQUES NACIONALES Y ESPACIOS PROTEGIDOS (1994). *Parques para la vida: Plan de acción para las áreas protegidas de Europa*. Gland, Suiza: UICN.
- CORRALIZA, J. A. (2000). Percepción y gestión del medio natural. Nuevas perspectivas. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Actas)*, 97, 35-44.
- CORRALIZA, J. A.; FERNÁNDEZ, B.; OCEJA, L. Y BERENQUER, J. (1999). Imagen de los espacios naturales protegidos: El caso del Parque Natural de Peñalara. En Varios Autores, *Primeros Encuentros Científicos del Parque Natural de Peñalara y del Valle de El Paular*. Madrid: Comunidad de Madrid (Consejería de Medio Ambiente).
- CORRALIZA, J.A.; GARCÍA, J. Y VALERO, E. (2002), *Los Parques Naturales en España: Conservación y disfrute*. Madrid: Mundiprensa.
- KAPLAN, R. Y KAPLAN, S. (1989). *The experience of nature. A Psychological perspective*. N. York: Cambridge University Press.
- EUROPARC-España (2002). *Plan de Acción para los Espacios Naturales Protegidos del Estado Español*. Madrid: Fundación Fernando González Bernáldez (accesible en la página web de EUROPARC-España, <http://www.europarc-es.org>).
- FERNÁNDEZ, J. Y PRADAS, R. (2000). *Historia de los Parques Nacionales Españoles. La Administración conservacionista (1896-2000)*. Madrid: Organismo Autónomo Parques Nacionales.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE (1999). *Estrategia Española para la conservación y el uso sostenible de la diversidad biológica*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente
- PIGRAM, J. J. (1993). Human-Nature relationship: Leisure environments and natural settings. En T. Gärling, R. G. Golledge (eds.), *Behavior and Environment. Psychological and Geographical Approaches*. Amsterdam: North Holland.
- PITT, O. G. Y ZUBE, E. H. (1987). Management of natural environments. En D. Stokols y I. Altman (eds.), *Handbook of Environmental Psychology (Vol.2)*. N. York: Wiley.
- RUNTE, A. (1979). *National Parks: The American Experience*. Lincoln, N.B.; University of Nebraska Press.
- ZUBE, E.H. (1995). Aspectos sociales en la planificación y dirección de parques nacionales y espacios protegidos. En R. de Castro (comp.), *Problemas ambientales. Perspectivas desde la Psicología Ambiental*. Sevilla. Ed. Repiso (pp.9-32).