

IMPACTOS REGIONALES DEL CAMBIO CLIMÁTICO. VALORACIÓN DE LA VULNERABILIDAD¹

*Francisco López Bermúdez*²

Universidad de Murcia

RESUMEN

El ser humano vive sumergido en la atmósfera y desarrolla sus actividades en el interior del sistema acoplado atmósfera-tierra, por ello, todo lo que ocurra en este sistema afectará a la humanidad. El cambio climático constituye una gran preocupación mundial desde principios de los años noventa y, previsiblemente lo seguirá siendo en las próximas décadas, por las repercusiones que puede tener en los sistemas naturales, económicos, sociales y políticos. Las regiones áridas, semiáridas y subhúmedas secas son señaladas como los escenarios más vulnerables por la conjunción de un conjunto de factores (astronómicos, meteorológicos, geomorfológicos, bióticos y humanos) que obedecen a diferentes procesos escalados en el tiempo y en el espacio, en diversos grados de magnitud. La convergencia de estos factores sobre unos sistemas biofísicos y antrópicos sensibles, puede acentuarse por el potencial efecto del cambio climático como señalan los modelos.

Palabras clave: Cambio climático, OMM, modelos, impactos regionales, regiones áridas, península Ibérica.

ABSTRACT

Regional Impacts of Climate Change. Valorization of the vulnerability. The human being lives submerged in the atmosphere and develops its activities inside the coupled atmosphere-earth system. In consequence all impacts in this system will affect to humanity. The climate change constitutes a great world worry since beginning of the 90's years and foreseeable will be in the next decades because of the repercussion in the natural, economics, socials and politics systems. The arid, semi-arid and subhumid dry regions are indicated like the most vulnerables scenarios by the conjunction of factors set (astronomics, meteorolo-

Fecha de Recepción: 28 de abril de 2000.

1 Este trabajo fue objeto de una conferencia impartida en el marco del ciclo «Cambio climático, recursos y procesos geológicos», en la Fundación Marcelino Botín. Santander, 13 Abril, 2000.

2 Departamento de Geografía Física, Humana y Análisis Regional. Facultad de Letras. Universidad de Murcia. Campus de La Merced. 30001 MURCIA (España). E-mail: lopber@um.es

gical, geomorphologics, biotiques and humans) that obey to different processes in the time and the espace scaled, in several greatness grades. The convergence of these factors about biophysics and humans sensitives systems may increase by the potencial effect of climate change as shown in the models.

Key words: Climate change, WMO, modelling, regional impacts, arid regions, Iberian peninsula.

1. INTRODUCCIÓN

La Tierra registra una larga historia de calentamientos y enfriamientos espectaculares a escalas temporales muy diversas, ya que los factores ambientales se amplifican mutuamente. Sin embargo, es desde principios de la década de los noventa cuando *Calentamiento Atmosférico*, *Cambio Climático* y *Cambio Global*, son expresiones que se vienen usando, cada vez con mayor frecuencia y preocupación, en el discurso científico, socio-económico y político. El calentamiento de la Tierra provocado por la civilización industrial es un fenómeno complejo, tanto en sus raíces como por su desarrollo y las consecuencias que puede tener. Se sabe que es inducido por el efecto invernadero a causa de las actividades humanas que modifican la composición de la atmósfera terrestre y se suma a la variabilidad natural del clima. El calentamiento desencadena el *Cambio Climático* y éste el *Cambio Global* que puede reflejarse en una serie de alteraciones planetarias: en las condiciones de los hábitats, en los ecosistemas, en los usos del suelo, en los procesos de erosión, en los sistemas demográficos, económicos y en las estructuras sociales. Es la dimensión humana del *Cambio Global* que amenaza la gestión sostenible de los recursos y del desarrollo.

El ser humano es el protagonista destacado de las profundas alteraciones que se están observando en el sistema climático y, al mismo tiempo, es y será la víctima de los cambios que empiezan a ser detectados, con tendencia a incrementarse, de modo acusado, en las próximas décadas. El *Cambio Climático*, la *pérdida de Diversidad Biológica* (o Biodiversidad) y la *Desertificación* son los tres grandes problemas ambientales «estrella» de finales del siglo XX y principios del XXI que tienen mucho de común. Corresponden a procesos biofísicos y antrópicos que están fuertemente relacionados por razones y principios ambientales, económicos, jurídicos y políticos; sus instrumentos pueden contribuir de manera importante a la consecución de los objetivos de los otros; además, los tres problemas también están ligados por soluciones comunes. Por ello, salvaguardar la diversidad biológica, luchar contra la desertificación y prevenir el cambio climático, albergan el mismo objetivo: asegura un desarrollo durable (López Bermúdez *et al.*, 1998). La biodiversidad y la desertificación, son quizás, los principales parámetros para detectar las modificaciones del clima y para medir los efectos directos e indirectos de las actividades humanas en los ecosistemas.

Los fundamentos del cambio climático y sus señales, son buscados en los comportamientos globales y, preferiblemente a través de variables integradoras de efectos (Balai-

rón, 1998), como las variaciones de las temperaturas en las superficies terrestre y marina, cambios en las precipitaciones, deterioro de la capa de ozono, y en las respuestas espaciales o regionales. Desde finales de los años setenta, hay ambiciosos programas científicos internacionales que abordan, con rigor, el Cambio Global, gestionados por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), los Programas Marcos de la Unión Europea, la Red Europea de Apoyo al Clima (patrocinada por los Servicios Meteorológicos Nacionales), las Comisiones Nacionales del Clima y prestigiosos centros como el Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA (USA), el Centro Hadley (Reino Unido) y el Instituto Max Planck de Meteorología (Alemania). El avance científico también contribuye al proceso de toma de conciencia mundial del problema.

El esfuerzo científico y los estudios derivados sobre el sistema climático tienen como objetivo básico el entendimiento de los procesos y transformaciones que se producen en la Tierra. Los desequilibrios estructurales inducidos por el cambio climático sitúan, a la población terrestre en un contexto ambiental, social y económico de dimensiones desconocidas hasta ahora. En los albores del siglo XXI, se constata que, no siempre, los sistemas políticos, económicos y sociales han sido capaces de reaccionar a tiempo y planificar adecuadamente respuestas integradas a los grandes restos planteados; los resultados están a la vista, tanto en la degradación ambiental que sufren múltiples áreas de la Tierra, como a las diferencias sociales y económicas entre los países desarrollados y los no desarrollados que, no sólo persisten, sino que tienden a ensancharse cada vez más.

2. PROGRAMAS DE LA ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL RELACIONADOS CON EL CAMBIO CLIMÁTICO

La importancia que tiene el clima sobre los ecosistemas, sobre el hombre y la mayoría de sus actividades es incuestionable. En los últimos 50 años, la sociedad ha tomado conciencia, de modo progresivo, que sus actividades y comportamientos pueden afectar de forma desfavorable al medio ambiente y al clima, causando daños que pueden ser catastróficos. Por este motivo, la preocupación ha ido creciendo en la población hasta llegar al 2000 en donde la aceptación del clima como un recurso mundial, valioso, variable y vulnerable es aceptada por todos. A esta apreciación y valoración del clima como parámetro vital para la vida, la OMM (2000) ha desempeñado una función primordial a través de programas científicos y técnicos específicos como:

(a) Programa de Vigilancia Meteorológica Mundial

Columna vertebral de las actividades de la OMM. Suministra a escala mundial información meteorológica de última hora a través de los sistemas de observación y enlaces de telecomunicación mediante una constelación de satélites (Fig. 1) y miles de estaciones de observación terrestres y marítimas. De ese modo, los científicos que investigan el cambio climático mundial, la contaminación del aire, los ciclones tropicales, los buques y aeronaves transoceánicos, los medios de comunicación y el público en general reciben constantemente información.

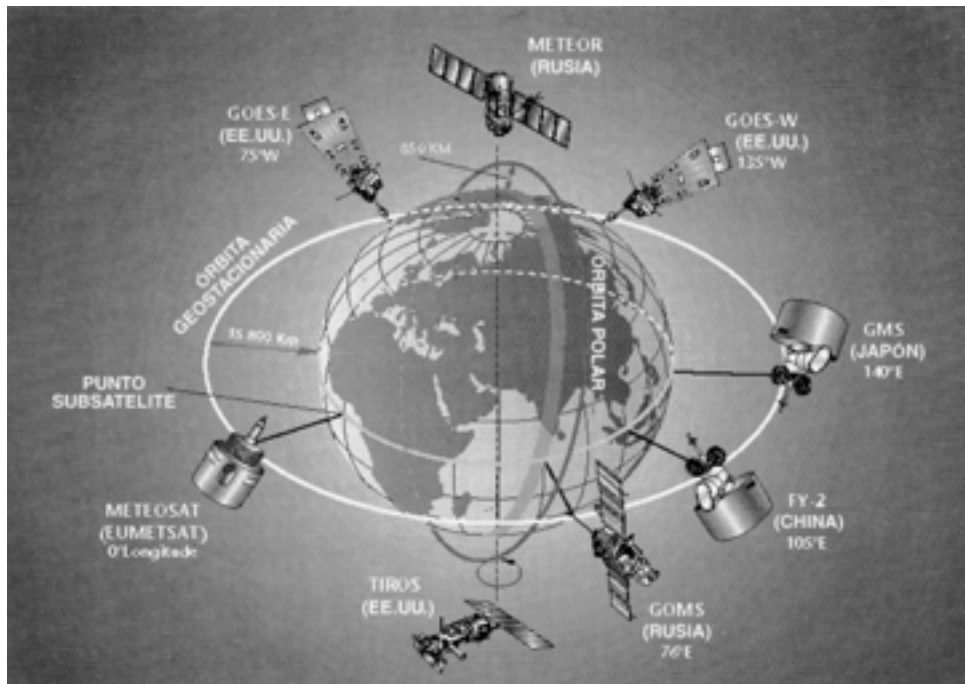


FIGURA 1. Red de satélites del Sistema Mundial de Observación Meteorológica. Organización Meteorológica Mundial (*Boletín de la OMM*, Vol. 49, N° 1. Enero 2000, p. 26).

(b) Programa Mundial sobre el Clima

Ayuda a los países a aplicar información y conocimientos sobre el clima para obtener beneficios económicos y sociales y lograr el desarrollo sostenible y la ejecución de la Agenda 21 de las Naciones Unidas. Suministra información exhaustiva sobre todo el sistema climático, abarcando los componentes del sistema: atmósfera, biosfera, criosfera y océanos. Tiene como objetivos: utilizar la información climática existente para mejorar la planificación económica y social; mejorar la comprensión de los procesos climáticos mediante la investigación, al objeto de determinar la predecibilidad del clima y las variaciones o cambios climáticos inminentes y a medio plazo, naturales o de origen humano, que pueden afectar considerablemente a actividades humanas esenciales: agricultura, urbanismo, turismo, industria, etc.

Las cuestiones relativas al *clima* y al *cambio climático* han sido una gran preocupación mundial en el decenio de 1990 y, previsiblemente seguirán siéndolo en las próximas décadas. La recogida y tratamiento de datos climáticos y la construcción de modelos predictivos pretenden ayudar a los gobiernos a diseñar políticas para hacer frente al cambio de la situación climática.

Para evaluar la información disponible sobre la ciencia, los efectos y la diversidad de problemas económicos, sociales, ecológicos y ambientales relacionados con el cambio cli-

mático y, en particular, sobre el calentamiento mundial inducido por las actividades humanas, la OMM y el PNUMA establecieron en 1988, el *Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático OMM/PNUMA* (IPCC). Este Grupo terminó en agosto de 1990 su primer informe de evaluación, que señalaba con certeza un aumento de la concentración de gases de efecto invernadero causado por la actividad humana. Dicho informe propició la aparición de un *Convenio Marco sobre el Cambio Climático*, firmado por 166 países en la *Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo* celebrada en Río de Janeiro en 1992. Entró en vigor el 21 de marzo de 1994.

(c) Programa de Investigación de la Atmósfera y el Medio Ambiente

Este programa tiene como objetivos la coordinación y fomento de la investigación sobre la estructura y composición de la atmósfera, la contaminación atmosférica, el agotamiento de la capa de ozono, la física y química de las nubes, la investigación de la modificación artificial del tiempo, la investigación de la meteorología tropical, la predicción meteorológica, los cambios climáticos y la difusión de la información científica.

(d) Programa de Aplicaciones de la Meteorología

Comprende importantes sectores de aplicación de la meteorología para el público, a la actividad agraria, a las navegaciones aéreas y marítima, así como fomentar la creación de infraestructuras y servicios que benefician las actividades económicas y sociales nacionales e internacionales. La oportuna y rápida información meteorológica puede disminuir considerablemente las pérdidas y otros impactos ambientales y sociales, causadas acontecimientos meteorológicos extremos como sequías, tormentas de granizo y lluvias de alta intensidad, así como las producidas por plagas y enfermedades.

(e) Programa de Hidrología y Recursos Hídricos

Se reconoce actualmente que la evaluación de los recursos hídricos a todas las escalas (mundial, nacional y regional) y la planificación adecuada para su conservación constituye un problema de dimensiones globales. El Informe del Consejo Mundial del Agua publicado bajo los auspicios de las Naciones Unidas y el Banco Mundial y el *II Foro Mundial del Agua*, recientemente (La Haya, 20-22 Marzo 2000), han hecho sonar todas las alarmas sobre la penuria de agua que se cierne sobre el planeta. El agua, no sólo es dramáticamente insuficiente en muchas zonas del mundo, sino que se perfila como uno de los recursos naturales capaces de desatar guerras en años venideros; el Cambio Climático puede acentuar la tensión hídrica y los desequilibrios en las regiones áridas, semiáridas y subhúmedas secas.

El programa trata de la evaluación cuantitativa y cualitativa de los recursos hídricos para satisfacer las necesidades de la sociedad, poder mitigar los riesgos relacionados con el agua, y mantener o mejorar las condiciones ambientales. Abarca la normalización de las observaciones hidrológicas y la transferencia de técnicas y métodos hidrológicos.

El programa está estrechamente relacionado con el *Programa de Hidrología Internacional* de la UNESCO, ambos concentran su acción en el fomento de la cooperación a

escala mundial en la evaluación de los recursos hídricos y la creación de redes y servicios hidrológicos, la concentración y proceso de datos, la predicción y avisos hidrológicos (avenidas y estiajes) y el suministro de datos meteorológicos e hidrológicos para la planificación hidrológica.

3. LOS DATOS REFUERZAN LA HIPÓTESIS DE LA INFLUENCIA HUMANA SOBRE EL CLIMA

El *Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático* (IPCC), reconocía en 1995 que los seres humanos influyen de modo apreciable sobre el clima global y que no eran conscientes en lo concerniente a la salud del planeta. Lo que no precisaba el grupo de expertos es cuándo, dónde y cuánto se ha notado y se notará esa influencia, cuestiones estas de amplio tratamiento mediático y que científicos, técnicos y políticos discuten con vehemencia y discrepancias.

Hasta ahora, los cambios climáticos presuntamente relacionados con las actividades humanas han sido muy modestos, sin embargo, las previsiones de un abultado número de organismos, programas y proyectos científicos sugieren que el cambio alcanzará una notoria intensidad hacia mediados del siglo XXI, sobrepasando todo lo constatado en los registros geológicos en los últimos 10.000 años. Las simulaciones de los modelos sugieren que algunas regiones pudieran beneficiarse durante cierto tiempo del calentamiento atmosférico, pero para el conjunto del planeta, las alteraciones del sistema climático resultarán perjudiciales e incluso catastróficas. Si la ciencia pudiera evaluar la cuantía en que ciertas actividades influyen sobre el clima, se encontraría en mejor situación a efectos de mitigar, prevenir y suministrar recomendaciones o soluciones para remediar los potenciales efectos del cambio climático. ¿Es posible tal cuantificación? La mayor parte del mundo científico cree que sí, la anhelada respuesta puede llegar hacia mediados del siglo XXI, pero sólo a condición de que este objetivo se convierta en prioridad internacional permanente y que las naciones se comprometan a una constante vigilancia (Karl & Trenberth, 2000).

Pese a que hasta ahora no ha sido posible lograr un cálculo fiable de la magnitud de las variaciones climáticas naturales, especialmente de la radiación solar, y de calibrar exactamente la proporción del impacto humano sobre el clima y, a pesar de los todavía escasos conocimientos sobre los ritmos e impactos locales del cambio climático, es patente que las actividades humanas influyen en la atmósfera de modo diverso y preocupante. Una serie de influencias, tanto naturales como artificiales, son la causa de la variación en la temperatura del planeta. Entre las naturales se incluyen los cambios en la radiación solar y los aerosoles que las erupciones volcánicas arrojan al aire y que enfrían la atmósfera al reflejar la luz del sol. La influencia humana se deriva, fundamentalmente, de las emisiones de gases como el dióxido de carbono que atrapan el calor de la atmósfera, y de los aerosoles de sulfatos procedentes de las chimeneas industriales.

El impacto combinado de los aerosoles y los gases de efecto invernadero crea unos patrones de temperatura complejos y característicos. El análisis de esos patrones llevó al Comité Intergubernamental sobre el Cambio Climático a abandonar su idea anterior de que el calentamiento global observado durante el siglo pasado podía ser tanto natural como el

inducido por el ser humano. Hasta 1995, les parecía que los factores humanos desempeñaban una influencia, pero no evaluaban si era grande, mediano o pequeño.

En la actualidad se tiene la certeza de que en la primera parte del siglo XX, el aumento de la temperatura se podía explicar por un incremento de la radiación solar o por la combinación de una radiación solar más fuerte y unos gases invernadero emitidos por las economías de los países industrializados. Pero desde mediados de los años setenta, cuando tuvo lugar prácticamente la mitad del calentamiento del siglo, éste se debía, en gran parte, a los gases de efecto invernadero (Stevens, 1999). La temperatura media de la Tierra es ahora 0,7°C más alta que hace un siglo; la década de los noventa ha sido la más cálida, globalmente, de los últimos 140 años, es decir, desde que se tienen registros. Mientras tanto, las pruebas y los datos sobre el calentamiento y sus efectos siguen acumulándose.

La quema de combustible fósiles expulsa partículas y gases que alteran la composición de la atmósfera; algunos de estos gases, como el dióxido de carbono, producen un impacto prolongado, superior al centenar de años. La velocidad y magnitud del aumento de la temperatura global están determinadas en primer lugar por el incremento de las cantidades de CO₂ o sus equivalentes, un 30% desde el comienzo de la era industrial (segunda mitad del siglo XVIII), mientras que la cantidad existente en la atmósfera antes de ese período, se cree que ha sido estable durante varios miles de años. Los análisis de las burbujas de aire atmosférico que se encuentran en cilindros de hielo extraídos en la Antártida, detectan que los niveles atmosféricos actuales de dióxido de carbono son los más altos que ha habido en los últimos 420.000 años. A 360 partes por millón, son un 20% más elevados que en cualquier otro período cálido entre glaciaciones, y el doble de las concentraciones específicas que se encontraron durante un período glacial.

Las previsiones estiman que si se continúa quemando combustibles fósiles a las velocidades actuales, las concentraciones de CO₂ se duplicarán en la segunda mitad del siglo XXI. Según el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), duplicar la concentración de CO₂ en la atmósfera haría que las temperaturas aumentaran entre 1,5 y 4,0°C. Aunque la «mejor estimación» que utilizan la mayoría de los gobiernos es de 2,5°C, el IPCC ha indicado que el modelo actual de cambio de temperatura se ajusta mejor a asumir 3,5°C. Como consecuencia del aumento térmico, el nivel del mar podría crecer a razón de 6 cm por decenio y casi un metro a finales del siglo XXI. Para mantenerse dentro de los límites ambientales aceptables y tomando una sensibilidad climática de 3,5°C como una aproximación prudente, los niveles de CO₂ en la atmósfera tendrían que estabilizarse en o por debajo de 350 partes por millón en volumen (ppmv) (Dwyer, 2000). Esto supone niveles de concentración por debajo de los actuales (358 ppmv) y haciendo la asunción optimista de que la destrucción de los bosques mundiales sea detenida.

Una vez que el CO₂ se estabilice podrían pasar varias décadas o incluso un siglo antes de que la temperatura atmosférica se estabilizara, por lo que la atmósfera terrestre haya sido ya empujada a un aumento de casi 1°C (Budyko, 1988; Linés Escardó, 1990; Fantechi *et al.*, 1991; N.U., 1992; Comisión Nacional del Clima, 1994, 1995; COP-3, 1997).

Los océanos y la vegetación ayudan a paliar la aportación de dióxido de carbono a la atmósfera, extraen del aire una parte importante, actúan como sumideros del gas, pero las concentraciones continúan aumentando por el continuo incremento de gases a la atmósfera y por la reducción de amplias zonas forestales. La deforestación puede ser responsa-

ble del 20% del CO₂ de origen antropogénico (Bautista, 1993). De la constante emisión de gases invernadero resulta, inevitablemente, el calentamiento global y a un incremento de la capacidad evaporante de la atmósfera. Al evaporar agua de los océanos, lagos, humedales, suelos y plantas, el ciclo hidrológico de amplios territorios se altera, los ecosistemas de muchas regiones del planeta se aridifican, se producen más frecuentes y prolongadas sequías en las regiones secas; mientras que la aportación de humedad adicional en la atmósfera desencadena grandes tempestades tropicales, intensas lluvias, temporales de nieve e inundaciones en las regiones húmedas.

Un amplio muestrario de tales fenómenos meteorológicos, muy probablemente provocados o intensificados por el calentamiento global y con efectos devastadores para bienes y vidas humanas, se han abatido sobre muchas regiones del mundo en el último decenio y primeros meses del 2000: Desbordamiento del río Yangtzé y grandes inundaciones que destruyeron millones de hectáreas de cultivo y afectaron a las vidas de 100 millones de personas; las peores inundaciones en los últimos 400 años que asolaron Veracruz, México (Octubre 1999); tifones e inundaciones en Corea, Filipinas, Camboya e India, que devastaron enormes áreas con consecuencias catastróficas. En el este de EE.UU., las peores olas de calor y sequías del siglo. En España, la grave sequía 1990-1995 y la nueva 1998-1999. La dramática sequía que sufre Etiopía (1999-2000). Los tornados Mitch (Oct.1998) que asoló Honduras, Nicaragua y Guatemala; los Georges (1998), Bret, Cindy, Dennis y Floyd (1999) que afectaron severamente a varios países del Caribe y al Sureste y Este de Estados Unidos; Irene a Cuba (1999); el ciclón 02A (1999) al Sureste de Pakistán y los el Eline y Gloria (Febrero-Marzo, 2000) que han ocasionado una catástrofe sin precedentes en Mozambique y, en menor cuantía a Madagascar, etcétera.

Con los datos meteorológicos de las series disponibles se constata, que los años más cálidos se han producido durante la década de los noventa, siendo los años 1997, 1998 y 1999 los que registraron las temperaturas más altas desde que comenzaron los registros instrumentales fiables en 1860. Se han registrado episodios cálidos relativamente frecuentes de El Niño/Oscilación Austral (ENOA), avalanchas de agua caliente del océano Pacífico tropical que calienta la atmósfera, trastoca los patrones del tiempo atmosférico y tiene importantes consecuencias en el clima y tiempo alrededor del globo. A este fenómeno se le achaca, en parte, el calentamiento de los últimos años. El fenómeno contrario, los episodios de fase fría (La Niña), se ha producido de modo muy poco frecuente y aislado. Condiciones extremadamente secas en muchos países, devastadores huracanes y graves inundaciones en otros, son fenómenos asociados a los fenómenos El Niño/La Niña (OMM, 1999). El océano Ártico se ha calentado de forma acusada en los últimos veinte años, los datos suministrados por el programa SCICEX (*Science Ice Expeditions*) de los Estados Unidos registran un aumento de un grado centígrado, el espesor de la capa de hielo sobre este océano ha disminuido una media de 1,3 metros, un 40%, desde los años sesenta y que la extensión del hielo ha retrocedido un 5% (Hodges, 2000).

Todo esto deja entrever el futuro en un mundo «recalentado» e ilustra vivamente las desastrosas consecuencias que incluso fluctuaciones menores en el sistema climático pueden ocasionar.

Los científicos advierten que la velocidad del cambio climático es probable que exceda cualquiera de las de los últimos 10.000 años, haciendo imposible para muchos ecosis-

temas su adaptación y supervivencia. Lo que parecen pequeños e insignificantes cambios pueden iniciar una reacción en cadena que impacte en los sistemas ecológicos, sociales y económicos. Retrasar la toma de medidas, no reaccionar a tiempo, significará que las futuras reducciones en gases invernadero tengan que ser mucho más rápidas y acusadas de lo que de otra forma habrían tenido que ser.

4. LOS ESCENARIOS DEL CAMBIO: VULNERABILIDAD E INCERTIDUMBRE EN EL ÁMBITO MEDITERRÁNEO Y EN ESPAÑA

4.1. La Circulación General Atmosférica y su repercusión en la península Ibérica

Para conocer el clima actual y predecir el clima del futuro, es necesario entender los mecanismos que lo mueven. Para comprender las características generales, regionales y locales de los climas, hay que considerar su situación en relación con la *Circulación General Atmosférica*, es decir, con el patrón de comportamiento de los flujos de aire a gran escala (Balairón, 1997). La circulación general es un mecanismo de redistribución de energía (radiaciones solares) y vapor de agua tendente a corregir los desequilibrios existentes en el planeta (entre las zonas polares y ecuatoriales) originados por diversos factores físicos como el movimiento de rotación de la Tierra, la inclinación de su eje de giro, la situación astronómica del territorio, la desigual distribución de tierras emergidas y océanos, las características radiativas de sus superficies, la configuración del relieve, etc. La circulación general se establece a través de circulaciones cerradas de menor entidad, meridianas y zonales, horizontales y verticales, que son conocidas como células de la circulación

Se suelen distinguir dos tipos de caracterizaciones de la Circulación General Atmosférica (Henderson-Sellers & Robinson, 1986): la «circulación primaria» global y regional, casi permanente en el tiempo, y la «circulación secundaria» que explica la distribución de las presiones atmosféricas (anticiclones y borrascas) y otras variables, que son las responsables del tiempo de cada día en los diversos lugares de la Tierra. El esquema de la Fig. 2 expresa, las tres células térmicas de la circulación, en el hemisferio Norte, la posición de las zonas de presión y el mecanismo de formación de los vientos. Las desviaciones introducidas por la aceleración de Coriolis completan el esquema de la distribución de los vientos. Las zonas de convergencia y divergencia separan las células y dan origen a los sistemas semipermanentes de presiones: Bajas presiones ecuatoriales, altas subtropicales, bajas de latitudes medias y altas polares (Balairón, 1987).

De lo anterior se desprende que cualquier variación en latitud de estas células dinámico-térmicas tiene amplias repercusiones en los territorios y, especialmente en las zonas áridas, en las mediterráneas y en la península Ibérica (entre los 36° y 43° 44' lat. N). La península Ibérica, por su posición (Fig. 3), participa más del cambio esperado en África que el resto del continente europeo, de ahí la especial vulnerabilidad respecto al cambio climático. Además, de la situación de frontera entre la circulación polar y subtropical, la cuenca mediterránea y la península Ibérica ofrecen una compleja configuración topográfica, con importantes barreras montañosas, que alteran los sistemas de presión acentuando la aridez en extensas zonas o potenciando las precipitaciones mediante fenómenos convectivos. La gran variabilidad climática constituye un acusado rasgo de las tierras medite-



FIGURA 2. Esquema simplificado de la circulación general atmosférica en el hemisferio norte (Balairón, 1997).

rráneas y, en particular en España, en particular, esta variabilidad se aprecia en la evolución pluviométrica (Fig. 4). La proximidad del desierto del Sahara y su dinámica atmosférica también tiene una notoria influencia como factor desecante de la atmósfera de la mayor parte de las regiones peninsulares. En España, las dos terceras partes, aproximadamente, corresponden a climas deficitarios en humedad como son el subhúmedo seco, semiárido y árido (MMA, 1999), dibujándose una diagonal de aridez con los extremos opuestos en el Noroeste y en el Sureste peninsular; este último ostenta el *record* de la aridez europea y, a la vez, un alto riesgo de desertificación (López Bermúdez, 1995, 1996a; 1999a; Barberá *et al.*, 1997; Rojo y López Bermúdez, 1998; Brandt & Thornes, 1996; Mairota & Thornes, 1998; MMA, 1999).

La península Ibérica es un escenario ideal para la detección del cambio climático por su situación astronómica de frontera en el borde meridional de las borrascas atlánticas y en el septentrional de la banda de altas presiones subtropicales. Un desplazamiento hacia el norte de unos 500 km de la trayectoria de las borrascas (como lo predicen casi todos los modelos climáticos), supondrá para la península recibir la mitad de la precipitación media actual. Además, esta precipitación estaría concentrada en unas pocas semanas, lo cual intensificaría el déficit hídrico e intensificaría la erosión del suelo. A ello habría que añadir un aumento de las temperaturas y de la evaporación, que intensificaría la tensión hídrica.



FIGURA 3. La península Ibérica, por su posición astronómica de frontera entre la circulación polar y subtropical, proximidad al Sahara y compleja configuración topográfica, constituye un territorio muy vulnerable al cambio climático y a la desertificación. Alberga las áreas más áridas de toda Europa. Imagen AVHRR-NOAA de los satélites Tiros-N y NOAA 6 y 9 a 70 km. de altitud.

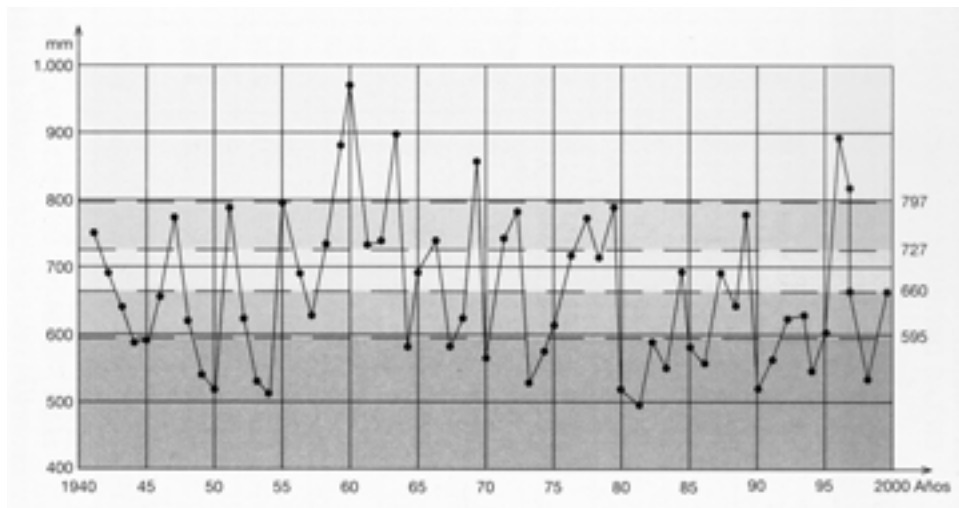


FIGURA 4. Precipitaciones anuales medias caídas en España peninsular en el período 1941-1999 (INM, 2001).

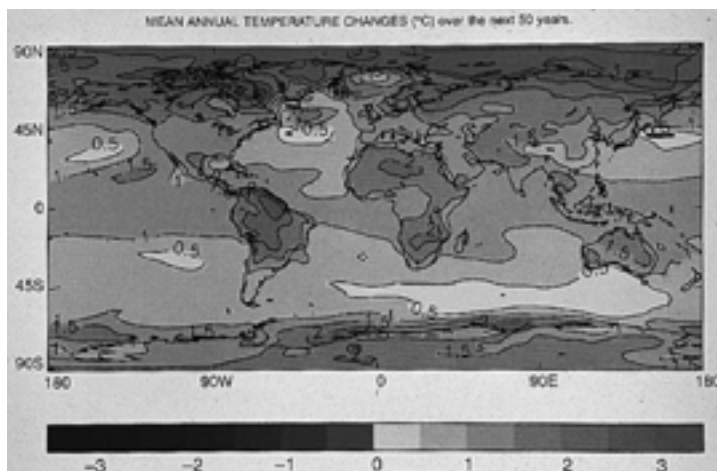


FIGURA 5. Calentamiento global estimado para mediados del siglo XXI según el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático. La península Ibérica puede ver incrementada su temperatura en unos 2,5 °C (Karl & Trenberth, 2000).

ca que registra la mayor parte del territorio. La mayor parte de las tierras mediterráneas y españolas se hallan, pues, en un marco climático vulnerable y poco favorable a las precipitaciones; el cambio climático puede aumentar esta vulnerabilidad.

4.2. Los escenarios del cambio: la predicción de los modelos

El sistema climático ocasiona una gran variedad de procesos escalados en el tiempo y en el espacio en diversos grados de magnitud que se superponen, interactúan y generan una aleatoriedad e incertidumbre en el clima y en el tiempo. Para simular el clima y sus cambios, así como los escenarios que registrarán las alteraciones climáticas, se recurre a la modelización. Sin embargo, la simulación del sistema climático actual y previsible es extraordinariamente compleja por la gran cantidad de escalas y variables que intervienen en la atmósfera, por las retroalimentaciones de signo y magnitud diferentes que se producen, por la extensión del período simulado y por el abultado número de perturbaciones que las características regionales introducen. En realidad, para la detección y predicción del cambio climático, se hace necesario analizar la interrelación entre las observaciones y los modelos de simulación (Fig. 6).

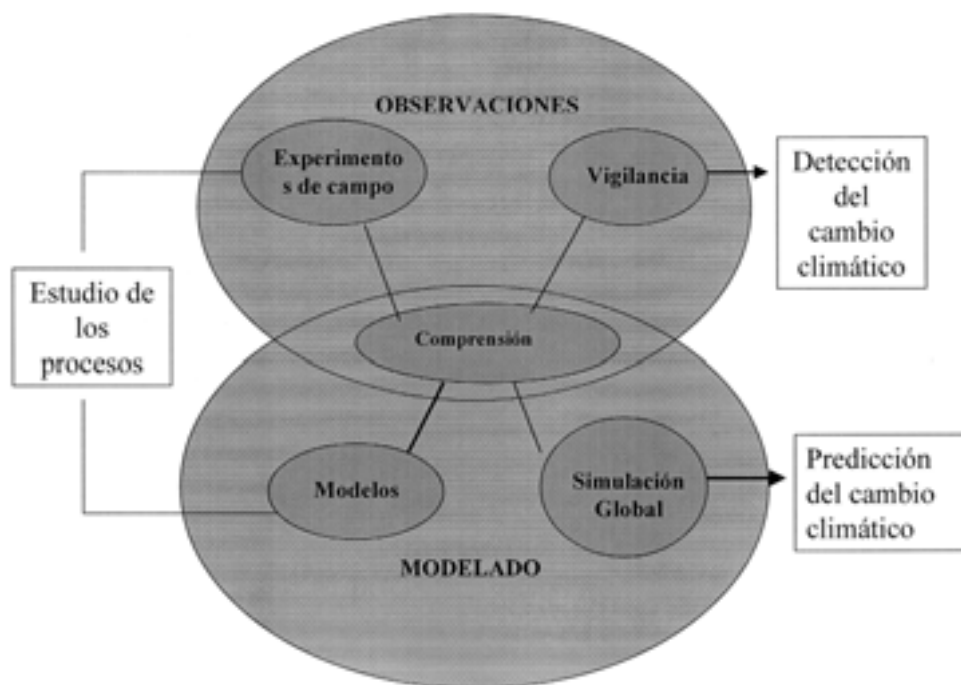


FIGURA 6. Interrelación entre observaciones y simulación del clima para la detección y predicción del cambio climático (Bautista, 1993).

Los resultados de complejos modelos físico-matemáticos que simulan el comportamiento del sistema climático, advierten que el aumento de la concentración atmosférica de los gases que producen el efecto invernadero, podría originar un cambio climático de consecuencias desconocidas hasta ahora. Así lo han indicado y afirman un gran número de investigaciones, reuniones, acuerdos internacionales e instituciones de prestigio, entre otros: la *Primera Conferencia Mundial sobre el Clima* (Ginebra, 1979), la *Conferencia de Villach* (Austria, 1985), la *Conferencia Internacional sobre los Cambios Atmosféricos y su Implicación en la Seguridad Mundial* (Toronto, 1988), la *Conferencia de Tata sobre el Calentamiento Global y el Cambio Climático* (Delhi, 1989), la *Conferencia Mundial sobre la Preparación frente a un Cambio Climático* (El Cairo, 1989), *Grupo Intergubernamental de expertos sobre los Cambios Climáticos* (N.U.: OMM y PNUMA, 1988), la *Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo: Agenda 21*, *Convención Marco sobre el Cambio Climático* (Río de Janeiro, 1992), la *Segunda y Tercera Conferencia Mundial sobre el Clima* (Ginebra, 1990, 1999), programas de la OMM (*Programa Mundial de Datos y Vigilancia Climáticos*, *Programa Mundial de evaluación del Impacto del Clima y de las estrategias de Respuesta*, *Programa Mundial de Investigaciones Climáticas*, *Vigilancia Meteorológica Mundial*, *Vigilancia Atmosférica Global*, *Sistema Mundial de Observación del Clima*), la *Red Europea de Apoyo al Clima* (1992), las *Conferencias Mundiales sobre Cambio Climático* (Kyoto, 1997) y La Haya (2000), Buenos Aires (1998) y en España la *Comisión Nacional del Clima* (1992).

En Europa los modelos elaborados por el *Centro Hadley* del Reino Unido, el *Instituto Max Planck* de Meteorología y la *Meteo-France*, y en Estados Unidos el *Instituto Goddard para Estudios del Espacio*. Los modelos, estadísticas, estimaciones y previsiones realizadas por la OMM y algunos proyectos de I + D de la Unión Europea, entre ellos: MEDALUS (*Mediterranean Desertification and Land Use*); EFEDA (*The ECHIVAL Field Experiment in Desertification-threatened Areas*); RICAMARE (Research in Global Change: A Mediterranean Region Network); *Remote Sensing of Mediterranean Desertification and Environmental Changes* (RESMEDES); *Modelling vegetation dynamics and degradation in Mediterranean Ecosystems* (MODMED) y *Restoration of degraded Ecosystems in Mediterranean Region* (REDMED), han evaluado los impactos potenciales que produciría el previsible clima del futuro o cambio climático inducido por el incremento de las concentraciones de CO₂ y otros gases invernadero, así como la obtención de escenarios futuros del comportamiento de actividades como la agricultura, silvicultura, pesca, turismo, etc.

Esto no implica que el estado de conocimientos actuales pueda proporcionar imágenes espaciales a gran escala, así como una evolución temporal exacta. La predicción climática, basada en modelos, no es una ciencia experimental, a pesar de todo, los modelos aún con las deficiencias que presentan son, actualmente, los instrumentos más idóneos de que se dispone para la obtención de los patrones de respuesta a diversos forzamientos específicos, y en especial los del efecto invernadero. Las simulaciones que realizan los científicos del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) y centros de prestigio dedicados al tema, son de alta garantía y sustentan el proceso del Cambio Climático. Los pronósticos que establecen no son exageraciones de los científicos ni obedecen a intereses ocultos. La Fig. 5 muestra algunos resultados obtenidos hasta ahora.

En todos ellos aparecen las regiones áridas, semiáridas y subhúmedas secas (en donde se incluyen la mayor parte de las tierras mediterráneas y las polares) como de las más vulnerables por el aumento de las temperaturas y disminución de las precipitaciones. En España, los últimos resultados de modelos y trabajos sobre clima y cambio climático, confirman que la situación va a tender a empeorar en el sentido de más calor, menos precipitaciones y menos humedad en el suelo, unido a un incremento de los fenómenos extremos como sequías más prolongadas y lluvias intensas y concentradas.

(a) Escenarios de temperaturas en la península Ibérica

La distribución regional del cambio de temperatura en respuesta a una duplicación del CO₂, sería (según el modelo acoplado océano-atmósfera del Centro Hadley, recogido por la Comisión Nacional del Clima, 1994; IPCC, 1999): la temperatura media anual podría aumentar unos 3,5°C antes de fin del siglo XXI, alcanzando entre 1,4°C y 2,6°C para la tercera y cuarta década del 2000 en más de la mitad meridional y oriental de la península. En las partes occidental y septentrional el calentamiento se prevé menor. Calentamientos estacionales de 1°C a 2°C en invierno (aumentando hacia el Sur) y de 2°C (Noroeste) hasta 4°C (en la parte oriental peninsular) en verano.

Un riesgo derivado de esta situación es el aumento de la temperatura del agua del mar en otoño y el consecuente aumento del riesgo de fenómenos tormentosos. Por otro lado, el cambio es más acusado en verano que en invierno, y se acelera a partir del año 2040.

(b) Escenarios de precipitación en la península Ibérica

La distribución regional del cambio de las precipitaciones, tanto para la media como para el invierno y el verano, es la siguiente (Hadley Center; Comisión Nacional del Clima, 1994): Se aprecia que el ritmo de descenso estival es cada vez mayor, desde un 2% en el 2010 hasta un 12% en la mitad sur de la península en el 2050 (sequías estivales más dilatadas). Para el invierno, sin embargo, se detecta un aumento en la mitad norte y un descenso en la mitad sur que se acelera con el paso de las décadas. El descenso de la precipitación media anual es del orden de 0 mm a 91 mm, con descenso más acusado al sur de los paralelos 40°-41° (latitud de Madrid o Tarragona).

En general, para mediados del siglo XXI se esperan descensos de los índices de precipitación entre el 5% y el 20% (incremento de las sequías), más acusados en verano que en invierno y afectando con mayor intensidad a la mitad sur de la península.

(c) Escenarios de humedad del suelo

Para España se observan las siguientes características (Hadley Center; Comisión Nacional del Clima, 1994): En la distribución anual el descenso oscila entre 2,5 y 7,5 mm, aumentando los valores de sur a norte. Para el verano el descenso puede ser de 10 mm con un máximo de 20 mm en los Pirineos occidentales. La distribución en invierno produce valores que oscilan entre 0 y 7 mm para la mitad norte peninsular, y entre 7 y 20 mm para

la mitad meridional. Esta potencial disminución de la humedad en el suelo, afectará seriamente a la cubierta vegetal y a los cultivos.

(d) Escenarios oceánicos

A medida que la Tierra se calienta, no todo el calor extra va a parar a la atmósfera, donde el efecto en el clima es más directo, sino que gran parte de este calor es absorbido por los océanos, que lo almacenan durante años antes de remitirlo a la atmósfera. Los océanos desempeñan una función relevante en el calentamiento global como sumideros de calor, esta capacidad de absorción de calor y su efecto retardador de calentamiento global es uno de los ejes del cambio climático. El calentamiento medio de los océanos es de 0,05°C en los tres kilómetros superiores de las aguas y algo más de 0,25°C en los 300 metros superficiales (Kerr, 2000). El rango de calentamiento atmosférico global de 1°C a 3,5°C para finales del siglo XXI ocasionará una expansión del agua, que unida al deshielo continental y ártico, acarreará una elevación de mares y océanos entre 15 y 95 cm (IPCC, 1999). Este ascenso del nivel del mar y la correlativa sumersión de las zonas costeras, respaldan el calentamiento global previsto.

5. CONCLUSIONES: LA INCERTIDUMBRE DEL FUTURO PRÓXIMO

El cambio climático probablemente ha empezado ya, se puede intervenir con buen sentido y criterio para frenarlo, pero hasta ahora sólo se han dado tímidos pasos. Se cuenta con buenas herramientas como son el Convenio Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (1992), firmado por 180 países, y el Protocolo de Kyoto (1997), firmado por 83 países pero sólo ratificado, hasta ahora, por una veintena de países, todos ellos en vías de desarrollo. La Unión Europea y Japón, entre otros muchos otros, manifestaron en la Conferencia del Clima de Bonn (noviembre de 1999), su interés en ratificarlo en el 2002 para que entre en vigor, pero Estados Unidos no asume el compromiso y el Congreso de ese país se manifestó en contra de hacerlo. Estos países son los máximos responsables del calentamiento global que está acentuando la severidad y frecuencia de fenómenos climáticos extremos. Hace poco fue el diluvio en Mozambique, ahora (primer trimestre del 2000), es la sequía extrema al norte, en Etiopía.

El Convenio de Naciones Unidas y el Protocolo, son instrumentos que obligan a los países a poner coto a las actividades que redunden en perjuicio del clima. El protocolo estableció en 1997 una reducción del 5,2% de los gases efecto invernadero (respecto al nivel de 1990) para los 38 países desarrollados en el plazo hasta el 2012. Sin embargo, el grado de cumplimiento y los sistemas de vigilancia continúan siendo, prácticamente, inapreciables; la Conferencia del Clima de Bonn, apremiaba a los países a que los acuerdos definitivos para el control de emisiones debería alcanzarse en el 2000 para que entrase en vigor en el 2002 como fecha límite. Mientas tanto, el IPCC sigue afirmando rotundamente que si no se reducen los gases de efecto invernadero, las concentraciones atmosféricas seguirán aumentando y calentando aún más la Tierra. Según recientes resultados del Proyecto de investigación TESHEO en el que participan la UE, Estados Unidos, Canadá, Rusia y Japón, aún si hoy se cortaran por completo las emisiones de gases dañinos para la

atmósfera, habría que esperar 50 años para que la capa de ozono, por ejemplo, se recuperara; en las últimas décadas se ha perdido un 15% del espesor global de la capa lo que hace más vulnerable al planeta frente a las radiaciones solares peligrosas.

La evolución más probable del clima peninsular se podría producir en el siguiente sentido: Aumento general de las temperaturas, mayor en verano, que supondría unos 2,5°C en la media anual, para el año 2050. Descensos generalizados de la precipitación y humedad del suelo, porcentualmente más acusados en verano, que supondría un 10% menos de precipitación media anual y casi un 30% en la humedad del suelo.

De cumplirse estos pronósticos surgirían serios problemas económicos y sociales, aumentarían los fenómenos tormentosos en el área mediterránea, y se agudizarían los procesos de degradación del suelo, desertificación y deterioro ambiental. No obstante, es necesario tener en cuenta que, si bien las simulaciones realizadas con los modelos son de alta garantía, todavía presentan muchas dudas, sobre todo, en las previsiones a escala regional, por ello, los resultados que ofrecen hay que tomarlos con cautela, a pesar de ser lo mejores disponibles en la actualidad.

España todavía produce poco dióxido de carbono, si se compara con los niveles de emisión de otros países industrializados. Pero ¿eso modifica en algo los riesgos a los que la población se halla expuesta y cuyos indicios comienzan a verse ya? El que España contamine poco la atmósfera no quiere decir que no afecte la contaminación de los demás a sus habitantes. El problema es global y las tímidas medidas que se están tomando son solamente frenos a la aceleración del problema, no a su velocidad. No disminuyen ni eliminan el problema.

Los quince países de la U.E. se comprometieron en Kyoto a reducir en un 8% las emisiones de gases efecto invernadero respecto a 1990. Esta cifra global se repartió entre todos los Estados miembros para acomodarla a las diferentes circunstancias de desarrollo económico. España podrá incrementar sus emisiones un 15% hasta el año 2010; también Portugal, Grecia e Irlanda. Pero la Comisión advierte que esto no les exime de tomar medidas reales para controlar el incremento de las emisiones.

Las emisiones de gases efecto invernadero aumentan en lugar de disminuir. Los valores varían según los Estados y muchos tienen dificultades para controlar sus emisiones, como Austria, Dinamarca, Holanda y Finlandia; en otros la situación es dramática, como Bélgica e Italia y, fuera de la U.E. en Estados Unidos y Japón. El Consejo de Ministros de Medio Ambiente de la Unión Europea del 30 de Marzo, advertía que si no se refuerzan las políticas medioambientales, los países de la U.E. no podrán cumplir, en 2010, el objetivo de reducción de emisiones del CO₂ fijado en el protocolo de Kyoto. Las emisiones aumentarán hasta un 6% de seguir la tendencia actual.

Por sus consecuencias en la agricultura, ganadería, ecosistemas naturales, recursos hídricos, usos del suelo, urbanismo, turismo, energía, transporte, desastres naturales, etc., los países (sobre todo los industrializados) deberían diseñar estrategias de respuesta frente al Cambio Climático y Cambio Global (incluye el cambio climático, los cambios en la composición de la atmósfera y el cambio en el uso del terreno a través del tiempo producido por el cambio climático y factores demográficos, económicos, sociales y tecnológicos) de acuerdo con los compromisos internacionales para hacer posible el desarrollo sostenible. Los esfuerzos internacionales, hasta ahora, se quedan lejos de este objetivo,

porque no afrontan el imperativo ambiental. Hasta que no lo hagan, los convenios, protocolos e intenciones están condenado al fracaso.

Finalmente, el comportamiento del clima en las próximas décadas, el desarrollo de modelos de predicción numérica y de circulación general, para la vigilancia y detección del Cambio Climático, la identificación de escenarios climáticos regionales, la elaboración de bases de datos georreferenciadas para el estudio del Cambio Global en el mundo y en España, el reducir las incertidumbres existentes sobre el comportamiento del clima, especialmente en las áreas más vulnerables como son las áridas... constituyen objetivos y trascendentales retos a abordar por la OMM, los centros de investigación, las organizaciones internacionales y los gobiernos.

6. REFERENCIAS

- BALAIRÓN, L., 1997: El clima mediterráneo y sus características en el contexto de la circulación general atmosférica. En *El paisaje mediterráneo a través del espacio y del tiempo. Implicaciones en la desertificación*. J.J. Ibáñez, B.L. Valero Garcés y C. Machado, Eds. Geoforma Ediciones. Logroño: 131-160.
- BALAIRÓN, L., 1998: Escenarios climáticos. En *Energía y Cambio Climático*. Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General del Instituto Nacional de Meteorología. Serie Monografías. Madrid: 39-56.
- BARBERÁ, G.G.; LÓPEZ BERMÚDEZ, F.; ROMERO DÍAZ, A., 1997: Cambios de uso del suelo y desertificación en el Mediterráneo: El caso del Sureste Ibérico. En *Acción humana y desertificación en ambientes mediterráneos*. J.M. García-Ruiz & López García, Eds. Instituto Pirenaico de Ecología. C.S.I.C., ISBN: 844-921842-2-1. Zaragoza: 9-39.
- BRANDT, C.J.; THORNES, J. (Eds); 1996: *Mediterranean Desertification and Land Use* (MEDALUS). Wiley & Sons. Chichester, Uk., 554 pp.
- BAUTISTA, M., 1993: El Cambio Climático. *Política Científica*, 35: 52-56.
- BUDYKO, M.I.; GOLITSYN, G.S.; IZRAEL, Y.A., 1988: *Global Climatic Catastrophes*. Springer-Verlag. Berlin, 99 pp.
- COMISIÓN NACIONAL DEL CLIMA, 1994, 1995: *Programa Nacional sobre el Clima*. Documentos de trabajo núms. 3 y 6. Instituto Nacional de Meteorología. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente. Madrid, 160 pp.
- COP-3 (The Conference of the Parties), 1997: *Kyoto Protocol to the Nations Framework Convention on Climate Change strengthens the international response to climate change*. The Kyoto Protocol was adopted at COP-3 in December 1997 and was opened for signature on 16 March 1998. See <http://www.unfccc.de/resource/iuckit/fact17.html>
- DWYER, G.S., 2000: Unraveling the Signals of Global Climate Change. *Science*, 287: 246-247.
- FANTECHI, R.; MARACCHI, G.; ALMEIDA-TEIXEIRA, M.E. (Edited), 1991: *Climatic change and impacts: A general introduction*. Commission of the European Communities. Report EUR 11943 EN. Directorate General Science, Research and Development. Brussels, 453 pp.
- HENDERSON-SELLERS, A.; ROBINSON, P.J., 1986: *Contemporary Climatology*. Longman Scientific & Technical. London.

- HODGES, G., 2000: La nueva guerra fría. Al acecho del Cambio Climático en el Ártico en submarino. *National Geographic*, Vol. 6, Nº 3: 30-41.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 1999: Regional Impacts of Climate Change. An Assessment of Vulnerability., 24 pp.
<http://www.usgcrp.gov/ipcc/html/RISPM.html>.
- INM, 2001: *Calendario Meteorológico 2001*. Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General del Instituto Nacional de Meteorología. Madrid, 279 p.
- KARL, T.R. & TRENBERTH, K.E., 2000: Influencia del hombre sobre el clima. *Investigación y Ciencia*, Enero: 54-59.
- KERR, R.A., 2000: Globe's «Missing Warming» Found in the Ocean. *Science*, 287: 2126-2127.
- LINÉS ESCARDÓ, A., 1990: *Cambios en el sistema climático*. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid, 125 pp.
- LÓPEZ BERMÚDEZ, F., 1995: «Murcia, un modelo de erosión hídrica en la España mediterránea». En *Agua y Futuro*. M. Senent y F. Cabezas, Eds., Asamblea Regional de Murcia. Murcia: 427-444.
- LÓPEZ BERMÚDEZ, F., 1996a: «Erosión y Desertificación: los problemas de las zonas áridas». En *Conservación de la Naturaleza*, H. Da Cruz, Director. Editorial Complutense. ISBN: 84-89365-71-7. Madrid: 97-113
- LÓPEZ BERMÚDEZ, F., 1999: El Sureste Ibérico, un territorio en la frontera de la Desertificación. Libro Homenaje al Prof. Vilà Valentí. Universitat de Barcelona. Col·lecció Homenatges. ISBN: 84-475-1967-8. Barcelona: 1047-1059.
- LÓPEZ BERMÚDEZ, F.; ROMERO DÍAZ, M.A., 1998: Erosión y Desertificación: Implicaciones ambientales y estrategias de investigación. *Papeles de Geografía*, 28: 77-89.
- MAIROTA, P.; THONES, J.; GEESON, N., (Eds), 1998: *Atlas of Mediterranean Environments in Europe. The Desertification Context*. Wiley & Sons. Chichester, U.K., 205 pp.
- MMA., 1999: *Programa de Acción Nacional contra la desertificación* (Borrador de trabajo). Secretaría General de Medio Ambiente. Dirección General de Conservación de la Naturaleza. Madrid., 119 pp. más anexos.
- N.U., 1992: *Acuerdo Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Cumbre de la Tierra. Río de Janeiro.
- N.U., 1997: *Kyoto protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Framework Convention on Climate Change. Conference of the Parties. Third session. Kyoto, 1-11 December 1997.
- OMM, 1999: El Sistema Climático Mundial en 1998. *Boletín*, Vol. 48, Nº 3: 309-313.
- OMM, 2000: Núm. extraordinario 50 Aniversario: 1950-2000. *Boletín* Vol. 49, Nº1: 130 pp.
- ROJO SERRANO, L.; LÓPEZ BERMÚDEZ, F., 1998: The Spanish Action Plan to Combat Desertification. *Proceeding of The First Meeting of the National Committees and the Focal Point of the Annex IV Countries of The United Nations Convention to Combat Desertification*. Greek National Committee for Combating Desertification. Athens May 28-30, 1998. Athens: 11-14.
- STEVENS, W.K., 1999: Los últimos datos refuerzan la hipótesis de la influencia humana sobre el clima. *El País*, 14/07/99.

