

**EL CAMBIO CLIMÁTICO EN ANDALUCÍA:
EVOLUCIÓN Y CONSECUENCIAS
MEDIOAMBIENTALES**

**CLIMATE CHANGE IN ANDALUSIA:
TRENDS AND ENVIRONMENTAL
CONSEQUENCES**

**EL CAMBIO CLIMÁTICO EN ANDALUCÍA:
EVOLUCIÓN Y CONSECUENCIAS
MEDIOAMBIENTALES**

**CLIMATE CHANGE IN ANDALUSIA:
TRENDS AND ENVIRONMENTAL
CONSEQUENCES**

**Coordinación editorial:
Sousa A., García-Barrón L., Jurado V.**

Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía

Noviembre de 2007



**Colegio Oficial de
Biólogos de Andalucía**



EL CAMBIO CLIMÁTICO EN ANDALUCÍA: evolución y consecuencias medioambientales =
CLIMATE CHANGE IN ANDALUSIA: trends and environmental consequences. Coordinadores: Sousa
A., García-Barrón L., & Jurado V. Edita Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
Sevilla. 2007.
ISBN: 978-84-96 776-40-1. 332 páginas, incluyendo tablas y figuras.

*La Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía no ha de compartir necesariamente las
opiniones y comentarios que aparecen en los diferentes capítulos de esta publicación.*

Coordinadores de la edición:

Sousa A., García-Barrón L. & Jurado V.

Edita:

Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía

© Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía

© Los Autores (de cada capítulo)

Reservados todos los derechos.

Maquetación: Antonio Prieto Delgado

Impresión: ALFECAT IMPRESORES S.L.

Diseño de la Cubierta: Antonio Prieto Delgado

a partir de una idea original de Daniel Revilla

Agradecimientos colaboración: Daniel Jiménez López, Fátima Andrade Macho

Impreso en Sevilla (España)

*Papel FSC. La fibra virgen empleada procede de masas forestales aprovechadas con unos
criterios estrictos en cuanto a protección medioambiental y con especial cuidado con los aspectos
sociales*

Entidades Colaboradoras:

Colegio Oficial de Doctores y Licenciados en Filosofía y Letras y Ciencias de Sevilla y Huelva

Colegio Oficial de Biólogos de Andalucía

ISBN: 978-84-96 776-40-1

D.L.: SE - 6771 - 07

Editorial Coordinators / Coordinadores de la edición

Arturo Sousa Martín¹, Leoncio García Barrón² &

Vicente Jurado Doña³

1. Departamento de Biología Vegetal y Ecología. Universidad de Sevilla

2. Departamento de Física Aplicada II. Universidad de Sevilla

3. Dirección General de Educación Ambiental y Sostenibilidad. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía

Editorial Coordinators / Coordinadores de la edición

Arturo Sousa Martín, Leoncio García Barrón & Vicente Jurado Doña.

Authors List / Lista de Autores

- Aguilar Alba, Mónica.** Departamento de Geografía Física y A.G.R. Universidad de Sevilla
- Álvarez Cobelas, Miguel.** Instituto de Recursos Naturales (CSIC)
- Álvarez Francoso, José Ignacio.** Departamento de Geografía Física y A.G.R. Universidad de Sevilla
- Barriendos Vallvé, Mariano.** Departamento de Historia Moderna. Universidad de Barcelona
- Camarillo Naranjo, Juan Mariano.** Departamento de Geografía Física y A.G.R. Universidad de Sevilla
- Cano Sánchez, Esperanza.** Departamento de Fisiología y Zoología. Universidad de Sevilla
- Castro-Díez, Yolanda.** Departamento de Física Aplicada. Universidad de Granada
- Cordero Martínez, Amalia.** Oficina Española de Cambio Climático (OECC). Madrid
- Corzo Toscano, Mariano.** Empresa de Gestión Medioambiental, S. A (E.G.M.A.S.A)
- Custodio Gimena, Emilio.** Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña
- Escaler Puigoriol, Isabel.** CETaqua (AGBAR, UPC, CSIC). Barcelona
- Esteban-Parra, María Jesús.** Departamento de Física Aplicada. Universidad de Granada
- Fernández Zamudio, Rocío.** Departamento de Biología Vegetal y Ecología. Universidad de Sevilla
- Gámiz-Fortis, Sonia Raquel.** Departamento de Física Aplicada. Universidad de Granada
- García Barrón, Leoncio.** Departamento de Física Aplicada II. Universidad de Sevilla
- García Murillo, Pablo.** Departamento de Biología Vegetal y Ecología. Universidad de Sevilla
- Jurado Doña, Vicente.** Dirección General de Educación Ambiental y Sostenibilidad. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía
- López Cotín, Luis Fernando.** Instituto Nacional de Meteorología
- López-González, Pablo J.** Departamento de Fisiología y Zoología. Universidad de Sevilla
- Manzano Arellano, Marisol.** Departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Topográfica, Universidad Politécnica de Cartagena
- Martín Vide, Javier.** Grupo de Climatología, Facultad de Geografía e Historia. Universidad de Barcelona
- Morales González, Julia.** Departamento de Biología Vegetal y Ecología. Facultad de Farmacia. Universidad de Sevilla
- Pita López, María Fernanda.** Departamento de Geografía Física y A.G.R. Universidad de Sevilla
- Rodrigo, Fernando S.** Departamento de Física Aplicada. Universidad de Almería
- Sahin, Sükran.** Departamento de Arquitectura del Paisaje. Universidad de Ankara
- Sánchez Hernández, Andrés.** Secretaría General de Sostenibilidad. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía
- Sousa Martín, Arturo.** Departamento de Biología Vegetal y Ecología. Universidad de Sevilla
- Staudt, Matthias.** Departamento de Física Aplicada. Universidad de Granada

*Climate Change in Andalusia:
trends and environmental consequences*

**El cambio climático en Andalucía:
evolución y consecuencias medioambientales**

CONTENTS / ÍNDICE

PRESENTATION / PRESENTACIÓN

1

Javier Martín Vide

Departamento de Geografía Física y AGR. Universidad de Barcelona. Barcelona

PROLOGUE / PRÓLOGO

13

Leoncio García Barrón, Vicente Jurado Doña & Arturo Sousa

Coordinadores de la edición/ Editorial Coordinators

TEMPORAL CLIMATE VARIABILITY

EVOLUCIÓN DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS

CHAPTER 1 / CAPÍTULO 1

23

The andalusian climate through historical records

El clima de Andalucía a través de los registros históricos

Fernando S. Rodrigo

Departamento de Física Aplicada. Universidad de Almería. Almería

CHAPTER 2 / CAPÍTULO 2

43

Climatic Variability on Spain for past centuries. Reconstruction from historical documentary source

Variabilidad climática en España a escala plurisecular. Reconstrucción a partir de fuentes documentales históricas

Mariano Barriendos

Departamento de Historia Moderna. Universidad de Barcelona. Barcelona

CHAPTER 3 / CAPÍTULO 3

55

*Temperature and Precipitation Changes in Andalusia in the Iberian Peninsula and Northern Hemisphere context***Cambios climáticos observados en la temperatura y la precipitación en Andalucía, en el contexto de la Península Ibérica y hemisférico****Yolanda Castro-Díez, María Jesús Esteban-Parra, Matthias Staudt, Sonia Raquel Gámiz-Fortis**

Departamento de Física Aplicada. Universidad de Granada. Granada

CHAPTER 4 / CAPÍTULO 4

79

*Climate evolution of the Southwest of the Iberian Peninsula according to instrumental records***La evolución climática del Suroeste de la Península Ibérica basada en registros instrumentales****Leoncio García Barrón**

Departamento de Física Aplicada II. Universidad de Sevilla. Sevilla

CHAPTER 5 / CAPÍTULO 5

97

*Recent changes in precipitation series in Andalusia***Cambios y tendencias recientes en las precipitaciones de Andalucía****Mónica Aguilar Alba**

Departamento de Geografía Física y A.G.R. Universidad de Sevilla. Sevilla

ENVIRONMENTAL IMPACTS**CONSECUENCIAS MEDIOAMBIENTALES****CHAPTER 6 / CAPÍTULO 6**

119

*Aquifer recharge and global change: application to Doñana***Recarga a los acuíferos y cambio global: aplicación a Doñana****Emilio Custodio⁽¹⁾, Marisol Manzano⁽²⁾, Isabel Escaler⁽³⁾**¹ Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona² Departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Topográfica, Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena³ CETaqua (AGBAR, UPC, CSIC). Barcelona

CHAPTER 7 / CAPÍTULO 7

141

*Climate change and inland aquatic ecosystems in Andalusia***Cambio climático y ecosistemas acuáticos continentales en Andalucía****Miguel Álvarez Cobelas**

Instituto de Recursos Naturales (CSIC). Madrid

CHAPTER 8 / CAPÍTULO 8

153

*Flora, vegetation and climatic changes***Flora, vegetación y cambios climáticos****Pablo García Murillo**

Departamento de Biología Vegetal y Ecología. Universidad de Sevilla. Sevilla

CHAPTER 9 / CAPÍTULO 9

167

*Pycnogonids and the possible effect of the climatic change in the andalusian fauna***Los Picnogónidos y el posible efecto del cambio climático en la fauna andaluza****Esperanza Cano Sánchez y Pablo J. López-González**

Departamento de Fisiología y Zoología. Universidad de Sevilla. Sevilla

CHAPTER 10 / CAPÍTULO 10

179

*Wetlands as the indicators for the detection of the climatic points of inflection. Application to SW Andalusia (environment of Doñana, Spain)***Los humedales como sensores para detectar los puntos de inflexión climática.****Aplicación metodológica al SW de Andalucía (entorno de Doñana, España)****Arturo Sousa¹, Rocío Fernández Zamudio¹ & Sükran Sahin²**¹Departamento de Biología Vegetal y Ecología. Universidad de Sevilla. Sevilla²Departamento de Arquitectura del Paisaje. Universidad de Ankara. Ankara**CHAPTER 11 / CAPÍTULO 11**

209

*Possible effects of the climate change on human health: allergy and malaria***Posibles efectos del cambio climático sobre la salud: alergia y malaria****Julia Morales González**

Departamento de Biología Vegetal y Ecología. Universidad de Sevilla. Sevilla

MITIGATION AND ADAPTATION
ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN

CHAPTER 12 / CAPÍTULO 12

227

Scenarios and climate model forecasting for 21st century

Escenarios y predicción de los modelos climáticos para el siglo XXI

Luis Fernando López Cotín

Instituto Nacional de Meteorología. Sevilla

CHAPTER 13 / CAPÍTULO 13

247

Information systems climatology: the CLIMA (Andalusian Information Subsystem for environmental Climatology)

Los sistemas de información climatológica: el CLIMA (sistema de información de climatología ambiental de Andalucía)

María Fernanda Pita López¹, Juan Mariano Camarillo Naranjo¹, Mariano Corzo Toscano² y José Ignacio Álvarez Francoso¹

¹Departamento de Geografía Física y A.G.R. Universidad de Sevilla. Sevilla

²Empresa de Gestión Medioambiental, S. A (E.G.M.A.S.A). Sevilla

CHAPTER 14 / CAPÍTULO 14

265

Introduction to the international climate change regime

Introducción al régimen jurídico internacional de cambio climático

Amalia Cordero Martínez

Oficina Española de Cambio Climático (OECC). Madrid

CHAPTER 15 / CAPÍTULO 15

281

Forest and environmental education campaigns about climate change

Bosques y educación ambiental ante el cambio climático

Vicente Jurado Doña

Dirección General de Educación Ambiental y Sostenibilidad. Consejería de Medio Ambiente de la Junta d Andalucía. Sevilla

CHAPTER 16 / CAPÍTULO 16

293

Andalusian Climate Action Plan: 140 measures to fight climate change in Andalusia

Plan de Acción por el Clima: 140 medidas para combatir el cambio climático desde Andalucía

Andrés Sánchez Hernández

Secretaría General de Sostenibilidad. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. Sevilla

EPILOGUE / EPÍLOGO

303

Climate change in Andalusia from a multidisciplinary standpoint

El Cambio Climático en Andalucía desde una perspectiva multidisciplinar

Arturo Sousa¹, Vicente Jurado Doña² & Leoncio García Barrón³

¹Departamento de Biología Vegetal y Ecología. Universidad de Sevilla. Sevilla

²Dirección General de Educación Ambiental y Sostenibilidad. Consejería de Medio Ambiente de la Junta d Andalucía. Sevilla. Sevilla

³Departamento de Física Aplicada II. Universidad de Sevilla. Sevilla

Presentation

Javier Martín Vide

Group of Climatology, Facultad de Geografía e Historia, Universidad de Barcelona, Montalegre, 6. 08001 Barcelona. jmartinvide@ub.edu, www.ub.es/gc/menu.htm

A NEW REALITY: GLOBAL WARMING

Only 30 years ago, in the mid-1970s, many climatologists, asked about changes in the climate of the planet, answered that it was stable, with the usual recurrent sequences of cold and warm, dry and wet years, which we call the natural variability of the climate. Some, looking a little deeper, forecast a “nearing” glaciation that would arrive in a few thousand years, because, in terms of the long history of the planet, we are now living in an interglacial period, after the end of the last ice age little more than 10,000 years ago. Thus, there had been no signs of warming for the immediate or distant future. However, at that time -three decades ago- the air temperature at the surface began to increase noticeably over much of the planet, although, at first, this could be explained as natural variability of the climate. It should be stressed that all the climatic variables (temperature, precipitation, atmospheric pressure, etc.) always show a marked temporal variability, which is denominated natural, coming essentially from fluctuations in the activity of the sun (the main energy source) and of volcanoes. Thus, at whatever time scale -whether minutes, days, months, years, centuries, millennia, etc.- the temperature and the other variables are continually fluctuating, although this is not, in any way, climate change (Martín Vide, 2007).

However, the initial warming persisted (the recent IPCC Fourth Assessment Report calculates the increase in mean global surface temperature in the period 1906-2005 to be

0.74 °C), repeatedly beating the record for the warmest year at planetary level, at least since the long series of reliable instrumental records started in the mid-19th century. The concentration of years with record high mean temperature began to be difficult to explain as natural variability (11 of the 12 warmest years after the mid-19th century are clustered in the period 1995-2006). The hypothesis then began to be devised of a human, or anthropic, effect on the climate. Scientifically, a new concept was resorted to -that of anthropic or induced variability- which, superimposed on the normal, natural one, began to alter the planetary climate, specifically towards a warming. That is, it began to be assumed that the behaviour of the temperature now depended not only on the natural variability, but also on the anthropic one. Moreover, there were reasons to take into account human participation in the global climate, because planetary warming could be primarily the direct expression of the increase in the atmosphere of the so-called greenhouse gases, mainly CO₂, demonstrated with reliable instrumental data, from the mid-20th century (it had gone from 315 ppmv in 1958 to more than 381 at the close of the present work). The increase in CO₂ resulted, above all, from the massive burning of fossil fuels -coal, oil, and natural gas- upon which industrial development and the generation of energy had been based.

Apart from records gathered by terrestrial weather stations, those from satellites, and numerous observations and oceanographic, biological, glaciological, sedimentological, phenomena etc. in the last fifteen years,

have provided a great deal of varied evidence and debate on the warming of the earth's surface. This is accepted today even by those most resistant to accept climate change. We were all sceptical at first about the reality of global warming, but now the evidence allows it to be regarded as certain. We live, therefore, in a world -and an Andalusia- warmer than a quarter of a century ago.

A different, and very important, matter is the attribution of causes- that is, whether a climatic change or anomaly is natural or is of human origin. Improved climatic models, which are the most powerful tool for understanding the climate and its evolution, have provided in recent years the definitive proof for most in the international community of climatologists of the new (because of its cause) nature of the current climate change. Climatic models are used to forecast the temperature increase that will occur in 25 or 50 years from now, or in 2100. However, they can also be used retrospectively for the last century, verifying whether predicted values coincide with those actually measured. The values they provide show an excellent fit with observed data until the 1970s, considering the natural variability of the climate. From then on, the models are unable to reproduce well the temperatures actually recorded, which systematically exceed predictions. That is, the last three decades should have been appreciably cooler, according to the influence of the factors causing natural variability -solar radiation and volcanic activity. Only when we input the variability of anthropic origin to such models -basically that derived from greenhouse gases, aerosols, or suspended pollutant particles- the results from the models again fit the observed values. The anthropic factor, or "potentiation", is therefore necessary to obtain results coinciding with those already observed.

Therefore, most climatologists recognise an evident "footprint" of human activities that cause atmospheric pollution in the climate at planetary scale (Martín Vide, 2007).

In brief, using just four adjectives – three of them taken from the Fourth IPCC - the current warming is unequivocal, unusual, anthropic, and (with a glimpse of its future effects) worrying.

SOME PECULIARITIES OF THE IBERIAN PENINSULA AND ANDALUSIA IN THE CONTEXT OF CLIMATE CHANGE

Faced by this new reality of global warming, what can be said about our closest spatial and territorial sphere: the Iberian Peninsula and Andalusia?. The geographic complexity of these regions does not make the analysis any easier. On one hand, the latitude, midway between the temperate oceanic climate zone to the north, and the warm tropical one to the south, produces atmospheric behaviour of transition between two climates that sometimes contrast markedly. Andalusia is climatically mediterranean, which is technically equivalent to saying that the climate is subtropical of western façade (the region is western in the Eurasian context), and thus involved in certain tropical influences, but also in others typical of the planetary temperate zone of middle latitudes.

On the other hand, the geographic diversity of the territory, with varying altitude, exposure of the relief, maritime influence, etc., creates a complex jigsaw of climatic subtypes and microclimates. The whole of Andalusia is mediterranean, but with multiple touches derived from a very broad range of altitudes (the largest in the Iberian zone) and different locations - fully open to the Atlantic through the Gulf of Cádiz,

and, in opposition to the grand ocean, facing eastwards in the *Levante* of Almería; a coastline of more than 900 km; Sub-Betic, Penibetic, and Marianic mountains; continental depressions, such as the Intrabetic depression; or equidistant of the sea and of the center of the Peninsula, as at Los Pedroches. Andalusia is an extremely rich geographic reality, which the “foreign” popular imagination diminishes and simplifies, often impoverishing it. Its climates -the plural is obligatory, although strictly the category is Mediterranean- are, consequently, markedly varied.

If the Iberian and Andalusian climatic reality is complex, the permanence of the geographic factors mentioned will give rise to complex future climatic scenarios at fine spatial scale, apart from the rise in temperature, seen as inevitable in the coming decades. This has already been demonstrated, as is done precisely in one of the chapters of the present work. Spain and Andalusia are warmer today than 30 years ago, and will be even more so in the coming decades and at the end of the century, although the impact will differ somewhat, depending on the region. Recent trends and, above all, the future of other climatic variables, in particular precipitation, a key factor in the socio-economic development of the country, are the subject of vigorous analysis and debates. It appears certain that the rise in temperature and the probable reduction in rainfall will cause a decrease in the region’s water resources. This leads us to stress that climate change is not only the main environmental challenge facing the planet -and Andalusia- in the 21st century, but is also a problem that affects almost all socio-economic spheres and sectors. Climate change is a global problem because it affects the whole planet, and because almost all fields of human activity are agents of such change, and -over time- possible receptors of its unwanted effects.

THE RISKS AND NEW OPPORTUNITIES OF CLIMATE CHANGE IN ANDALUSIA

Andalusian society, which through the ages has shown proof of an extraordinary cultural vitality and a striking versatility in accepting all types of change, and adapting well to them, will certainly be ethically committed to adopting the best means for reducing global warming. It is true that only a little over one in a thousand inhabitants of the planet live in Andalusia (1.2 per thousand), and the mitigatory actions of the 8 million individuals who do live in the region will not change the climatic fate of the planet, but any thorough, collective, and ethical action in the face of a real global problem involves agreement and the putting into practice of mitigatory means and actions by everyone. At the scale of the citizen, this means cultivating a wide range of good habits, actions, and everyday measures enabling the saving of energy and water. The famous ‘r’s - reduce, recover, reuse, recycle, restore...- must guide our everyday practices and foment another ‘r’ -reflection (Figuroa et al., 2006).

All the inhabitants of Andalusia, and Andalusians throughout the world, like all the inhabitants of the planet, are to some extent agents of climate change (because we all consume fossil fuels) and could become victims of its effects. The increase in sea level, the progressive loss of water resources in subtropical zones (the mainstay of the country) and, above all, the increased climatic risk, are worrying forecasts. With regard to the latter, the increased frequency and intensity of risks and extreme meteorological events makes measures of adaptation essential, to minimise the financial costs and the number of possible human victims. Andalusia is equipped to bear very high temperatures, above 40 °C, because they are part of the pre-existing climatic reality

(up to 47 °C has been recorded officially in Seville, Córdoba, and other populations of the Guadalquivir valley on several occasions), but they could rise even more or remain very high during long periods in the summers of impending decades. This will require the development of new warning and protection systems for the population, particularly the most disfavoured or vulnerable. The drought has also been an inseparable component of the Andalusian climates, from Ayamonte to Huerca Overa and from Tarifa to Belalcázar, but (although with a degree of uncertainty) everything indicates they could be even longer and more severe in the present century. The measures taken for adaptation to conditions of extreme water shortage must be structural and forward-looking, both technologically and in terms of good everyday habits on the part of the citizen, rather than being interim ones merely for sporadic saving.

Such adaptation consists of adjusting as well as possible to the new climatic conditions and the general ones arising, seeking, above all, to reduce the effects of the growing climatic risks and dodge or rise above the unfavourable situations. However, to adapt is also to take advantage of the new opportunities arising from the imminent climatic scenarios. This positive thought has to be a stimulant, which we can now illustrate in some economic activities and territorial spheres. For example, in some regions with cold winters the lower frequency of frosts could permit certain thermophilic crops to be grown with guaranteed profitability. Similarly, excessively cold middle-mountain land could become suitable for growing the vine, which, in contrast, will be forced from the low terrain.

Another noteworthy example is tourism. Although the climatic-touristic potential of certain Andalusian areas, such as the south-mediterranean coast, is high in much of the year (because of the thermic bonanza and good sunshine), other regions will see their period of mildness and tourist attraction much lengthened, practically from late Easter to well into the autumn. It is equally true that the increasingly frequent torrid summers will not be attractive for tourists from central and northern Europe. This could lead to a breakdown in the seasonality of tourism, beneficial in terms of quality and optimisation of the offer.

The highlands -Sierra Nevada in the case of Andalusia- which often are valued only for the presence or not of snow, will still offer good seasons for lovers of winter sports, but it is true that the snowline will continue to rise, so that the space and time for the enjoyment of skiing will be substantially reduced through the century, even taking into account the use of artificial snow canons. Why not reconvert the ski resorts into mountain resorts now, stressing the marvellous offer of scenery, clean air, contact with nature, hiking, etc., and a practically unrestricted timetable?

Warming is already a reality in Andalusia, with some intensification, in coming decades, opening up future scenarios that are of concern because of the risks. Nevertheless, there is still time, with studies such as that of the present work -exemplary in its objective and in the contributions of the authors- and with mitigatory actions, good practices, and thorough, positive measures of adaptation for progress, on the part of everyone.

REFERENCES

- Figueroa, M. E.(Dtor.), R. Gavira, J. Castillo, D. Miquel Mena, T. Luque, S. Redondo, C. Luque Palomo & L. M. Suárez-Inclán (2006). *Guía universitaria de buenas maneras ante el cambio climático. Cómo cuidar del medioambiente y luchar contra el cambio climático en nuestra vida cotidiana*. Ayuntamiento de Sevilla, Universidad de Sevilla y Unión Fenosa, Sevilla. 165 p.
- Martín Vide, J. (Coord.), J. E. Llebot, E. Padilla & V. Alcántara (2007). *Aspectos económicos del cambio climático en España*. Caixa Catalunya, Barcelona. 83 p.

Presentación

Javier Martín Vide

Grupo de Climatología, Facultad de Geografía e Historia, Universidad de Barcelona, Montalegre, 6. 08001 Barcelona. jmartinvide@ub.edu, www.ub.es/gc/menu.htm

UNA NUEVA REALIDAD: EL CALENTAMIENTO GLOBAL

Hace tan sólo 30 años, a mediados de la década de los 70 del siglo pasado, gran parte de los climatólogos, preguntados sobre la evolución del clima del planeta, respondían que era estable, con las normales secuencias de años fríos y cálidos, y secos y lluviosos, que siempre se han producido, y que llamamos variabilidad natural del clima. Algunos, con horizontes más lejanos, anunciaban una “próxima” glaciación, que debía de llegar en unos pocos miles de años, porque, al fin y al cabo, en la larga historia del planeta ahora estamos viviendo un periodo interglacial, tras la finalización de la última glaciación hace poco más de 10.000 años. Por tanto, no había ningún indicio de calentamiento en el horizonte inmediato o lejano. Pero a partir de ese momento -hace tres décadas- la temperatura del aire en superficie comenzó a experimentar un aumento claro en gran parte del planeta, aunque, en un principio, podía ser explicado por la propia variabilidad natural del clima. Conviene insistir en que todas las variables climáticas (temperatura, precipitación, presión atmosférica, etc.) muestran siempre una notable variabilidad temporal, que se denomina natural, y que proviene, fundamentalmente, de las fluctuaciones en la actividad del sol, fuente primera de energía, y en la de los volcanes. Así, a cualquier escala de tiempo que se considere, sean minutos, días, meses, años, siglos, milenios, etc., la temperatura y las restantes variables están continuamente

fluctuando, sin que por ello pueda, en absoluto, hablarse de cambio climático (Martín Vide, 2007).

Sin embargo, el calentamiento inicial persistió (el reciente Cuarto Informe IPCC cifra en 0,74 °C el incremento de la temperatura media global en superficie en el periodo 1906-2005), batiéndose repetidamente el récord del año más cálido a nivel planetario, al menos desde que existen registros instrumentales largos y fiables, a partir de mediados del siglo XIX. La concentración de años récord por su elevada temperatura media empezó a ser difícil de explicar mediante la variabilidad natural (once de los 12 años más cálidos desde mediados del siglo XIX se concentran en el periodo 1995-2006). Comenzó entonces a gestarse la hipótesis de un efecto humano, o antrópico, en el clima. Científicamente, se recurrió a un concepto nuevo, el de la variabilidad antrópica o inducida, que, superpuesta a la de siempre, la natural, empezaba a alterar el clima del planeta, en concreto, hacia un calentamiento. Es decir, comenzó a suponerse que el comportamiento de la temperatura ya no sólo dependía de la variabilidad natural, sino también de la antrópica. Y había razones para considerar la participación humana en el clima global, porque el calentamiento del planeta podía ser, ante todo, la expresión directa del aumento en la atmósfera de los llamados gases de efecto invernadero, principalmente el CO₂, constatada instrumentalmente, con datos fiables, desde mediados del siglo XX (se ha pasado de 315 ppmv en 1958 a

más de 381 al cierre de la presente obra). Aumento del CO₂ fruto, sobre todo, de la ingente quema de los combustibles fósiles -carbón, petróleo y gas natural-, sobre los que se ha basado el desarrollo industrial y la generación de energía.

Otros registros, diferentes de los de los observatorios meteorológicos en tierra, como los que recogen los satélites, y numerosas observaciones y fenómenos oceanográficos, biológicos, glaciológicos, sedimentológicos, etc. en los últimos tres lustros han acumulado muchas y variadas evidencias y argumentos sobre el calentamiento de la superficie terrestre. Éste es asumido hoy incluso por los más reacios y escépticos ante el cambio climático. Todos fuimos escépticos en un principio sobre la realidad de un calentamiento del planeta, pero hoy en día las evidencias permiten considerarlo como cierto. Vivimos, así, en un mundo y en una Andalucía más cálidos que un cuarto de siglo atrás.

Asunto diferente, y muy importante, es la atribución de causas, esto es, si se trata de un cambio o anomalía climática natural o es de origen humano. El perfeccionamiento de los modelos climáticos, que son la herramienta más potente para la comprensión del clima y su evolución, ha dado en los últimos años la prueba definitiva para la mayor parte de la comunidad internacional de climatólogos sobre la naturaleza nueva, por su causa, del cambio climático actual. Los modelos climáticos se utilizan para prever el aumento de temperatura que se producirá de aquí a 25 ó 50 años, o en 2100. Pero también pueden usarse hacia atrás y, de esta manera, verificar si los valores pronosticados coinciden con los efectivamente medidos en el último siglo. Pues bien, los valores que suministran se ajustan notablemente a los observados hasta la década de los años 70 del siglo XX sin más que contemplar la variabilidad natural del clima. A partir de esa década los modelos son incapaces de reproducir bien

las temperaturas realmente medidas, que quedan sistemáticamente por encima de las pronosticadas. Es decir, las últimas tres décadas tendrían que haber sido apreciablemente más frías, según la influencia de los factores que causan la variabilidad natural, la radiación solar y la actividad volcánica. Sólo cuando en esos modelos añadimos la variabilidad de origen antrópico, es decir, fundamentalmente la derivada de los gases de efecto invernadero y de los aerosoles o partículas contaminantes en suspensión, los resultados de los modelos vuelven a ajustarse a los valores observados. Necesitan, por tanto, del factor o “forzamiento” antrópico para dar resultados coincidentes con los ya observados. Está, por tanto, clara para la mayoría de la comunidad de climatólogos la huella humana, o de las actividades que comportan contaminación atmosférica, en el clima a escala planetaria (Martín Vide, 2007).

De este modo, como resumen, y usando cuatro adjetivos –tres de ellos extraídos del Cuarto IPCC-, el calentamiento actual es inequívoco, inusual, antrópico y, atisbando sus efectos futuros, inquietante.

ALGUNAS SINGULARIDADES DE LA PENÍNSULA IBÉRICA Y ANDALUCÍA EN EL CONTEXTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Ante esta nueva realidad, la del calentamiento global, ¿qué puede decirse en nuestro ámbito espacial y territorial más próximo, el de la Península Ibérica y Andalucía? La complejidad geográfica de estos espacios no facilita los análisis. Por una parte, la situación latitudinal, a caballo entre la zona de clima templado oceánico, al norte, y la tropical cálida, al sur, produce comportamientos atmosféricos de transición entre los de ambos climas, a veces, notablemente contrastados. Andalucía es climáticamente

mediterránea, lo que técnicamente es equivalente a decir que posee un clima subtropical de fachada occidental (es un país occidental en el conjunto de Eurasia); y por subtropical participa de algunas influencias del mundo tropical, pero también de otras típicas de la zona templada planetaria o de latitudes medias.

Por otra, la diversidad geográfica del territorio, con variadas altitudes, exposiciones del relieve, influencias marítimas, etc. crea un complejo rompecabezas de subtipos climáticos y microclimas. Toda Andalucía es mediterránea, pero con múltiples matices derivados de un abanico muy amplio de altitudes —el más grande en el ámbito ibérico—, de localizaciones diversas, abiertas plenamente al Atlántico en el golfo de Cádiz y, opuestas al gran océano, mirando al este en el Levante almeriense; localizaciones litorales a lo largo de más de 900 km; serranas subbéticas, penibéticas y mariánicas; en hoyas continentales, como en el surco intrabético; o equidistante del mar y del centro de la Península, como en Los Pedroches. Andalucía constituye una realidad geográfica riquísima, que el imaginario popular exterior reduce y simplifica, a menudo de forma empobrecedora. Y sus climas —es obligado el plural, aunque su filiación estricta sea sólo mediterránea— son, en consecuencia, de una notable variedad.

Si la realidad climática ibérica y andaluza es compleja, la permanencia de los citados factores geográficos dará lugar también a escenarios climáticos futuros complejos a escalas espaciales finas, al margen de que la elevación de temperatura se entrevé como inevitable en las próximas décadas, como ya se ha puesto de manifiesto, y se hace de forma precisa en alguno de los capítulos de la presente obra. España y Andalucía son hoy más cálidas que 30 años atrás y lo serán aún más en las décadas próximas y en el horizonte finisecular, aunque con impactos algo diferentes dependiendo de la

comarca. Las tendencias recientes y, sobre todo, las futuras de otras variables climáticas, en especial, la precipitación, clave en el desarrollo socioeconómico del país, son objeto de apasionantes análisis y debates. Sí que parece segura la consecuencia de que la elevación térmica y la probable mengua pluviométrica producirá un descenso de los recursos hídricos en el conjunto de nuestro territorio. Y ello nos lleva a recalcar que el cambio climático no sólo es el principal reto ambiental al que se enfrenta el planeta y Andalucía en el siglo XXI, sino, además, un problema que afecta a casi todas las esferas y sectores socioeconómicos. El cambio climático es un problema global, por el espacio afectado, el planeta entero, y por las esferas de actividad humana, casi todas, que son agentes del cambio y, al tiempo, posibles receptoras de sus efectos indeseados.

LOS RIESGOS Y LAS NUEVAS OPORTUNIDADES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN ANDALUCÍA

La sociedad andaluza, que ha dado secularmente muestras de una extraordinaria vitalidad cultural y de una notable versatilidad para asumir cambios de todo tipo, y adaptarse del mejor modo a ellos, seguro que adoptará, por compromiso ético, las medidas de mitigación más convenientes para rebajar el calentamiento global. Es cierto que sólo poco más de uno entre cada mil habitantes del planeta vive en Andalucía (1,2 por mil), y las acciones de mitigación de los 8 millones de almas que habitan la región no cambiarán el destino climático del planeta, pero cualquier acción cabal, solidaria y ética con la realidad de un problema global pasa por el acuerdo y la puesta en práctica de medidas y acciones de mitigación por parte de todos. Esto se traduce a la escala del ciudadano de a pie en el fomento de una amplia lista de buenos

hábitos, acciones y medidas cotidianas que permiten ahorrar energía y agua. Las famosas ‘r’ –reducir, recuperar, reutilizar, reciclar, restaurar...- han de guiar nuestras prácticas cotidianas y fomentar otra ‘r’ más, la reflexión (Figueroa et al., 2006). Todos los habitantes de Andalucía y los andaluces del mundo, como todos los habitantes del planeta, somos agentes, en alguna medida, del cambio climático, porque todos consumimos combustibles fósiles, y, al tiempo, podemos ser víctimas de sus efectos. El aumento del nivel del mar, la pérdida progresiva de recursos hídricos en las zonas subtropicales, donde se encuadra el país, y, sobre todo, el aumento de los riesgos climáticos constituyen previsiones inquietantes. En cuanto a lo último, el incremento de la frecuencia de los riesgos y sucesos meteorológicos extremos, así como su intensificación, obliga, para minimizar sus costes económicos y las posibles víctimas humanas, a medidas de adaptación. Andalucía está preparada para aguantar temperaturas muy altas, superiores a 40 °C, porque han formado parte de la realidad climática preexistente (hasta 47 °C son admitidos como registros oficiales en Sevilla, Córdoba y otras poblaciones del valle del Guadalquivir en varias ocasiones), pero pueden elevarse aún más o mantenerse muy altas durante períodos largos en los veranos de las próximas décadas, lo que obligará a desarrollar nuevos sistemas de alerta y de protección de la población, en especial, de la más desfavorecida o vulnerable. La sequía ha sido también consustancial a los climas andaluces, desde Ayamonte hasta Huerca Overa y desde Tarifa hasta Belalcázar, pero, aunque con algún grado de incertidumbre, todo apunta a que puedan ser aún más largas y severas en el presente siglo. La adaptación a condiciones de escasez hídrica extrema debe afrontarse con medidas estructurales y visión de futuro, tanto tecnológicas

como de una buena práctica cotidiana del ciudadano, y no sólo coyunturales, de mero ahorro episódico.

La adaptación consiste en ajustarse del mejor modo a las nuevas condiciones climáticas y generales derivadas, buscando, sobre todo, disminuir los efectos de los crecientes riesgos climáticos y capear o sobreponerse a las situaciones desfavorables. Pero adaptarse es, también, aprovechar las nuevas oportunidades, que habrá, de los escenarios climáticos venideros. Esta idea positiva ha de constituir un estimulante, que ahora podemos ejemplificar en algunas actividades económicas y ámbitos territoriales. Así, por ejemplo, la menor frecuencia de heladas en ciertas comarcas con inviernos fríos puede permitir extender a ellas con garantías de rentabilidad ciertos cultivos termófilos. Del mismo modo, tierras de media montaña excesivamente frías pueden resultar aptas para el cultivo de la vid, que, por el contrario, reculará de las bajas.

Otro ejemplo notable lo suministra el turismo. Aunque las potencialidades climático-turísticas de algunos ámbitos andaluces, como la costa surmediterránea, son altas en gran parte del año, dada la bonanza térmica y la buena insolación, otras comarcas verán aumentar su período de templanza y atractivo turístico en este sentido a calendarios muy amplios, desde prácticamente Semanas Santas tardías hasta avanzado el otoño. Es cierto, como contrapartida, que los tórridos veranos, que cada vez serán más frecuentes, no apeteecerán a los turistas del centro y norte de Europa. Todo ello puede producir la desestacionalización del turismo, beneficiosa desde un punto de vista de calidad y optimización de la oferta.

La alta montaña, Sierra Nevada en el caso de Andalucía, que a menudo sólo se valora por la existencia o no de nieve, aún ofrecerá buenas temporadas para los amantes de los deportes blancos, pero es cierto que la cota de nieve irá subiendo, con lo que el espacio

para el disfrute del esquí y el período de tiempo recularán sustancialmente a lo largo del siglo, aun considerando el apoyo de los cañones para la producción de nieve artificial. ¿Por qué no reconvertir ya las estaciones de esquí en estaciones de montaña, donde el énfasis hay que ponerlo en la maravillosa oferta de paisajes, aire puro, contacto con la naturaleza, excursionismo, etc. a lo largo de un calendario prácticamente sin restricción?.

El calentamiento es ya una realidad en Andalucía, con un reforzamiento, en alguna medida, inevitable en las próximas décadas, y abriendo unos escenarios futuros que inquietan, por sus riesgos, pero aún estamos a tiempo, con estudios como los que ofrece la presente obra -modélica en su dirección y en las contribuciones de los autores- y con acciones de mitigación, buenas prácticas y medidas de adaptación cabales y positivas, por parte de todos, de salir adelante.

BIBLIOGRAFÍA

Figueroa, M. E. (Dtor.), R. Gavira, J. Castillo, D. Miquel Mena, T. Luque, S. Redondo, C. Luque Palomo & L. M. Suárez-Inclán (2006). *Guía universitaria de buenas maneras ante el cambio climático. Cómo cuidar del medioambiente y luchar contra el cambio climático en*

nuestra vida cotidiana. Ayuntamiento de Sevilla, Universidad de Sevilla y Unión Fenosa, Sevilla. 165 p.

Martín Vide, J. (Coord.), J. E. Llebot, E. Padilla & V. Alcántara (2007). *Aspectos económicos del cambio climático en España*. Caixa Catalunya, Barcelona. 83 p.

PROLOGUE

Leoncio García-Barrón, Vicente Jurado Doña & Arturo Sousa

Editorial coordinators

Among nowadays' scientific subjects with more social diffusion are included those related with the climate change and its impacts. Mass media are permanently transferring to the public opinion summaries of reports elaborated by administrative institutions. Sometimes, scientists' statements are selected in order to support striking headlines. This provokes a social alarm, not always accompanied by calm and comprehensive work of spreading that would generate medium-term environmental responsibility.

The average reader knows there is consensus among climatologists about the process of global warming that, due to human activity, is currently taking place –independently of the climate's natural variability. Nevertheless, given the complexity of the interactions in the climate system, and the various future scenarios to which the decisions of social behaviour may lead, official predictions are adequately exposed in probabilistic terms. In addition to this, official predictions are presented with a range of possible states in climatic evolution. It is the wrong dogmatic conception of science –generalised in our society- that leads to the perception of the formulated uncertainties like plain ignorance by broad sectors of the population. As a consequence, the goal of producing commitment to adopt personal and collective measures is not achieved.

On the other hand, the scientific bibliography about the subject gathers the results of investigations in different fields but -apart from some official reports- the journals with more international spreading tend to offer a detailed but biased vision, with little integration in the plural aspects related to the

climate change. By this, we mean that there is a general spreading about the subject of climate change that frequently lacks explanatory accuracy. There is also specialised scientific spreading, but it is not integrated enough in a multidisciplinary context.

Our aim is to execute a publication that incorporates the virtues of the different means of scientific communication, overcoming its limitations at the same time.

The experience of organising interdepartmental courses of different levels (Ph. D., free configuration credits...) in the University of Seville and in the International University of Andalusia about the effects of climate change raised us the possibility of publishing this book, presenting an overview of the environmental manifestations and consequences of the same. It was at this point that we specified the purpose of this publication: contributing to the environmental training, academically supported on the basis of the last studies about climate. Additionally, it is the authors themselves who present these studies.

We presented the proposal to the Environmental Council of the Andalusian Government, which received it favourably. The initial approach already anticipated a marked multidisciplinary character; because of this, professors from different University departments and professional specialists from institutions related to the topics to be developed, would have to contribute. Moreover, a geographic limitation was established, by means of which the general frame of reference was associated to Andalusia. These premises have marked the criteria of selection that have enabled the edition of this monography.

Andalusia is constituted by a broad and diverse territory. Broadly speaking, it is characterized by a Mediterranean climate, but there is a distinguishable western area with Atlantic influence. This area is subjected to Southwest low pressure systems, with warm, wet winds. The other area is markedly Mediterranean, being its main characteristics rainfall shortage and a higher pluviometric irregularity. The presence of mountain ranges and their orientation also contributes to the configuration of an important internal heterogeneity derived from its relief. The counterpoint of these mountain territories are vast areas of countryside in which human activity has modelled the landscape. All this justifies one of the highest vegetal biodiversities in the continent. The great deal of endemisms that appear are explained as traces of its geological history, sanctuary of the last major climate events, together with its peculiar biogeographic location.

The book is, thus, a miscellany in which recent climate changes in Andalusia form the core. It is not an experts' report, nor a comprehensive revision on the topic. Instead, it intends to be a first contribution to gather—from a multidisciplinary perspective—the issues surrounding climate change. Consequently, the intention has been to integrate the results of a diverse group of technicians and researchers on the matter from a scientific perspective.

Various authoritative specialists of different domains were contacted, and invited to send their originals. The initial selection included researchers and technicians that we knew had worked in some of the areas included in the publication, with direct or indirect relation to Andalusia. Once the texts were received, two specialists revised them; and after the appropriate observations and modifications had been made, the edition coordinators accepted the collaborations as they are published now.

The range of institutions and University departments to which these collaborators belong allows the reader to see the diversity of scopes brought: Spanish National Institute of Meteorology, Spanish National Research Council (CSIC is the acronym in Spanish), Environmental Council of the Andalusian Government as well as the departments of History, Physical Geography, Applied Physics, Zoology, Plant Biology and Ecology and Landscape Architecture from the Universities of Almeria, Barcelona, Granada, Seville and Ankara.

It is obvious that there not appear all the researchers who could have enriched the content of this monograph with their knowledge. Despite this, we can assert that, according to our criterion, the result obtained by the contributions of the different authors is very relevant. Not only because they come from qualified representatives of different disciplines, but also because of the elevated scientific level of each one of the chapters. The combination of all of them—from complementary perspectives—produces an accumulative affection that, in our opinion, makes this printed work an important contribution to the scientific knowledge of environmental climatology in Spain. It is not common to find works like the one we present. Therefore, we suggest to researchers from other autonomous regions to consider the possibility of editing similar publications to achieve a general vision of the climate effects regionalised in the different geographic areas.

Three modules have been established in the distribution of the subject matters:

- Temporal climate variability

In order to link the climate change with the incidence of the antropoc activity, previous knowledge about the climate temporal variability in geologic and historic epochs is necessary. Apart from this, it would be necessary to embody results from studies about the reported evolution of the instru-

mental records in Andalusian observatories. The first report of Intergovernmental Panel on Climate Change, in 1990, about the climate change detection indicated that we can examine the natural variability of the climate and look for traces of possible changes in the temporal series.

- Environmental impacts

The environmental consequences of climate change can be analysed from different fields: aquatic and land ecosystems, flora, fauna, hydric resources and wetlands, hydrogeology or health, among others. This central module constitutes an interconnected joint of chapters about predictable environmental impacts. The exposition of these effects triggered by antropic activity –the alteration of the components of the climate system in particular- is also based on impacts that have already been detected.

- Mitigation and adaptation

This third module was conceptualised with a more technical character in the sense that it comprehends, apart from reports, the measures and proposals catered for by agencies and administrations with reference to climate change. We consider that, basing us on the scenarios and climate model predictions for the 21st century, it is suitable that institutional responsables pronounce themselves by exposing, among other issues, the Spanish implication in the Kyoto Protocol, Andalusian Information Subsystem for environmental Climatology, the Andalusian strategy for climate change, the role of forests as CO₂ drains... And all this should be framed within an environmental education plan.

We wish to express our sincere gratitude to each one of the authors for their willingness to dedicate time and knowledge to contribute to this group work, with the confidence that the observation of the results that we present now be satisfactory for you –and a compensation for previous efforts.

We are conscious that it is not possible to cover all the topics connected to global change in a single volume of these characteristics. Some subjects have been left out, like those referred to climate change and sustainability. Sustainable development presents such a variety of scopes from different fields that its incorporation could divert too much from the initial approach, to the detriment of environmental impacts. Aspects like economic consequences in Andalusia (tourism, public works...), alternative models for the production of energy, and the optimization in the use of energetic resources (transport, bioclimatic architecture), pollution and industrial systems, etc. Although we grant these matters high importance, we have not developed them. Maybe we will be able to approach these aspects and similar ones, related in medium or long-term to the effects of social behaviour on global change.

Hence, our intention has been to expose a selected series of works in order to contribute, from a multidisciplinary perspective, to offer a present and scientific vision of the implications of climate change and its environmental repercussions in Andalusia. It is the reader now who has to judge whether the selection of topics that constitute this publication are appropriate, as a whole, for the proposed objectives. Checking that we have accomplished the goal of spreading multidisciplinary knowledge will be our satisfaction. We have also provided a means to profound in relevant and current issues for the environmental training from scientific methodologies.

We manifest our gratitude to the Department of the Environment of the Junta de Andalusia/ Environmental Council of the Andalusian Government, specially to the General Direction of Environmental Education for welcoming the proposal and for their support in the edition of this book.

PRÓLOGO

Leoncio García Barrón, Vicente Jurado Doña & Arturo Sousa

Coordinadores de la edición

Actualmente entre los temas científicos de mayor difusión social se incluyen los relacionados con el cambio climático y sus impactos. Permanentemente los medios de comunicación trasladan a la opinión pública resúmenes sobre informes elaborados por instituciones administrativas y declaraciones de científicos. En ocasiones, la selección de titulares llamativos provoca una alarma, que no siempre va acompañada de una labor de divulgación serena y rigurosa, que a medio plazo genere actitudes de responsabilidad ambiental. El lector medio conoce el consenso entre los climatólogos acerca de que, con independencia de la variabilidad natural del clima, se está produciendo actualmente un proceso de calentamiento atmosférico debido a la actividad humana. Sin embargo, dada la complejidad de las interacciones del sistema climático y de distintos escenarios de futuro a que conducen las decisiones del comportamiento social, las predicciones oficiales se exponen adecuadamente en términos probabilísticos y se presenta con un abanico de estados posibles en la evolución climática. La errónea concepción dogmática de la ciencia, generalizada en nuestra sociedad, conlleva a que las incertidumbres formuladas sean percibidas –por amplios sectores– como simple desconocimiento, y consecuentemente, no provoca el compromiso de adoptar medidas personales y colectivas ante el cambio climático.

Por otra parte, la bibliografía científica recoge los resultados de investigaciones en los diversos campos pero, salvo algunos informes oficiales, las revistas de mayor

difusión internacional ofrecen cada una de ellas, en general, una visión detallada pero parcial y poco integrada en los aspectos plurales relacionados con el cambio climático. Es decir, consideramos que en relación con el cambio climático, existe una divulgación general que frecuentemente no va acompañada de rigor explicativo, y una difusión científica especializada pero no suficientemente integrada en un contexto multidisciplinar. Nuestra pretensión es realizar una publicación en que se incorporen las virtudes de distintos medios de comunicación científica y, simultáneamente, se superen sus limitaciones.

La experiencia de organizar en la Universidad de Sevilla y en la Universidad Internacional de Andalucía cursos interdepartamentales, de distinto nivel (doctorado, libre configuración, ...) sobre efectos de cambio climático nos planteó la posibilidad de publicar un libro que, con el mayor nivel científico, presentara una visión conjunta de las manifestaciones y consecuencias ambientales del mismo. Ya entonces, precisamos la finalidad de la publicación: contribuir a la formación ambiental, académicamente fundamentada sobre la base de los últimos estudios relativos al clima, expuestos, en su caso, por los propios autores.

Presentamos la propuesta a la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía que la acogió favorablemente. En el planteamiento inicial ya se preveía un marcado carácter multidisciplinar por lo que deberían contribuir profesores de distintos departamentos universitarios y profesionales especialistas de instituciones

relacionadas con los temas a desarrollar. Además se establecía una limitación geográfica, por lo que el marco de referencia general se asociaba a Andalucía. Estas premisas han marcado las líneas de selección que han permitido la edición de la presente monografía.

La comunidad autónoma andaluza conforma un territorio amplio y diverso. Aunque a grandes rasgos se puede caracterizar por un clima de tipo mediterráneo, es posible distinguir un área occidental de influencia atlántica, sometidas a las borrascas del suroeste que aportan vientos cálidos y húmedos, y otra área marcadamente mediterránea cuya característica fundamental es la escasez de precipitaciones y mayor irregularidad pluviométrica. La presencia y orientación de los sistemas montañosos configuran también una importante heterogeneidad interna derivada del relieve. Como contrapunto de estos territorios montañosos destacan extensas zonas de campiñas donde la actividad humana ha modelado secularmente el paisaje. Todo ello justifica una biodiversidad vegetal de las más elevadas del continente, donde aparecen gran cantidad de endemismos, explicable como residuos de la historia geológica, refugio de los últimos grandes eventos climáticos, así como por su peculiar situación biogeográfica.

El libro es, pues, una miscelánea que tiene como eje principal los cambios climáticos recientes en Andalucía. No se trata de un informe de expertos, ni tampoco de una revisión exhaustiva sobre esta materia. Más bien pretende ser una primera aportación que agrupe –desde una perspectiva pluridisciplinar– la problemática del cambio climático. Por tanto, se procura integrar los resultados de un grupo diverso de investigadores y técnicos sobre la materia desde una perspectiva científica.

Se contactó con diversos profesionales de distintos ámbitos, especialistas de reconocido prestigio, a los que se invitó a que enviaran sus originales. La selección inicial comprendía investigadores y técnicos de los que teníamos conocimiento de su producción en alguna de las áreas incluidas en la publicación, y con incidencia directa o indirecta en Andalucía. Una vez recibidos los textos, para su admisión se pasó a la revisión por dos especialistas; tras las oportunas observaciones los coordinadores de la edición aceptaron las colaboraciones como ahora se publican.

La relación de instituciones y departamentos universitarios a que pertenecen los autores permite detectar la diversidad de enfoques aportados: Instituto Nacional de Meteorología, Oficina Española para el Cambio Climático, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía y los departamentos de Historia, Geografía Física, Física Aplicada, Zoología, Biología Vegetal y Ecología, Arquitectura Paisajística de las universidades de Almería, Barcelona, Granada, Sevilla y Ankara.

Es evidente que no están todos los investigadores que con su colaboración hubieran enriquecido el contenido de la monografía. Sin embargo, podemos afirmar que, según nuestro criterio, el resultado obtenido por la aportación de los distintos autores es muy relevante, no sólo por provenir de cualificados representantes de diferentes disciplinas, sino también por el destacado nivel científico de cada uno de los capítulos. La conjunción de todos ellos, desde perspectivas complementarias, produce un afecto acumulativo que, creemos, hace de la monografía una importante contribución al conocimiento científico de la climatología ambiental en España. No es frecuente en la bibliografía encontrar obras como la que presentamos,

ya que suponen una perspectiva regional que necesita de otras monografías similares a la misma escala para alcanzar una visión general de los efectos climáticos en los distintos ámbitos geográficos.

En la distribución de las materias se han establecido tres módulos:

- La variabilidad temporal del clima

Para poder relacionar el cambio climático con la incidencia de la actividad antrópica es necesario conocer previamente a variabilidad temporal del clima en épocas geológicas e históricas e incorporar resultados de estudios acerca de la evolución que se manifiesta en los registros instrumentales de observatorios andaluces. Ya el primer informe del Panel Intergubernamental de Expertos para el Cambio Climático, editado en 1990, sobre detección del cambio climático, indicó que en las series temporales podemos examinar la variabilidad natural del clima y buscar indicios de posibles cambios.

- Efectos ambientales

Las consecuencias medioambientales del cambio climático pueden analizarse desde distintos campos: ecosistemas acuáticos y terrestres, la flora, la fauna, los recursos hídricos y humedales, la hidrogeología o la salud, entre otros. Este módulo central constituye un conjunto interconectado de capítulos acerca de los previsible efectos ambientales. La exposición de estos efectos ocasionados por la actividad antrópica, y en particular por la alteración de los componentes del sistema climático, se basa también en impactos ya detectados.

- Mitigación y adaptación

Este tercer módulo se planteó con un carácter más técnico en cuanto que comprende, además de informes, las medidas y propuestas contempladas por organismos y administraciones ante el cambio climático. Consideramos que basándonos en los escenarios y predicción de modelos climáticos para el siglo XXI, es conveniente que responsables institucionales expongan y

se pronuncien, entre otras cuestiones, sobre la implicación española en el Protocolo de Kioto, el sistema de información de climatología ambiental de Andalucía y la estrategia andaluza ante el cambio climático, así como el papel de los bosques como sumideros de CO₂... Todo ello, enmarcado en un plan de educación ambiental.

Deseamos expresar nuestro sincero agradecimiento a cada uno de los autores por su disposición a dedicar tiempo y conocimientos para contribuir a esta obra colectiva, en la confianza que la observación de los resultados que ahora presentamos les sea satisfactoria y compense anteriores esfuerzos.

Somos conscientes que no es posible abarcar en un solo volumen de las características del que presentamos todos los temas conectados con el cambio climático. Han quedado fuera algunas materias, como las referidas a cambio climático y sostenibilidad. El desarrollo sostenible presenta tal variedad de enfoques desde diversos campos que su incorporación podría sesgar en exceso el planteamiento inicial, en detrimento de los impactos ambientales. Aspectos como las consecuencias económicas en Andalucía (turismo, obras públicas, ...), modelos alternativos de producción de energía y de la optimización en el aprovechamiento de los recursos energéticos (transporte, arquitectura bioclimática, ...), contaminación y sistemas industriales, etc., no han sido desarrollados a pesar de la importancia que les concedemos. Tal vez, en otra publicación futura podamos plantear estas y similares cuestiones relacionadas a medio o largo plazo con los efectos del comportamiento social sobre cambio global.

Por tanto, nuestra pretensión ha sido exponer una serie seleccionada de trabajos que, desde una perspectiva multidisciplinar, contribuyan a ofrecer una visión actual y científica de las implicaciones del cambio climático y de sus repercusiones ambientales en Andalucía.

Corresponde a los lectores juzgar si la selección de los temas que constituyen esta publicación se adecua, en su conjunto, a los objetivos propuestos. Nuestra satisfacción será el comprobar que hemos contribuido a la difusión del conocimiento multidisciplinar y hemos aportado un medio que profundiza en aspectos de actualidad y relevancia para

la formación ambiental desde metodologías científicas.

Manifestamos el agradecimiento a la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, y en especial a la Dirección General de Educación Ambiental, por acoger la propuesta y por el apoyo prestado en la edición de este libro.

TEMPORAL CLIMATE VARIABILITY

**EVOLUCIÓN DE LAS VARIABLES
CLIMÁTICAS**

CHAPTER 1 / CAPÍTULO 1

The Andalusian Climate Through Historical Records

El clima de Andalucía a través de los registros históricos

El cambio climático en Andalucía: evolución y consecuencias medioambientales
Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía): 25-41 (2007)
© Los autores. Sevilla. España. ISBN: 978-84-96 776-40-1

The Andalusian Climate Through Historical Records

F. S. Rodrigo

Departamento de Física Aplicada. Universidad de Almería. La Cañada de San Urbano, s/n, 04120, Almería. frodrigo@ual.es

ABSTRACT

The anthropogenic influence on climate overlaps a background of natural climate variability that may diminish or increase it. Paleoclimatic studies are useful in understanding the nature and possible reasons for present climate variations, because they allow the analysis of changes in the relatively short instrumental period in longer-scale perspectives. In this work, the reconstruction of climatic characteristics in Andalusia from the 16th century to the present is presented. This reconstruction is based on the analysis of a wide variety of documentary data. Weather information was taken from original documentary sources in different Andalusian localities, basically from the Guadalquivir river Valley. Main observations correspond to the rainfall regime, due to its influence on agriculture. Different types of data are described (qualitative informations, economical series, early instrumental data), as well as the methodology appropriate to analyse them. Results obtained to date are summarized. Finally, scientific challenges for future research are outlined.

Key words: *historical climatology, historical documents, Andalucía, climate, extreme events.*

El clima de Andalucía a través de los registros históricos

F. S. Rodrigo

Departamento de Física Aplicada. Universidad de Almería. La Cañada de San Urbano, s/n, 04120, Almería. frodrigo@ual.es

RESUMEN

La influencia antropogénica sobre el clima se superpone a un fondo de variabilidad climática natural, a la cual puede atenuar o amplificar. Los estudios paleoclimáticos son útiles para la comprensión de la naturaleza y posibles causas de las actuales variaciones climáticas, ya que permiten el análisis de los cambios en el relativamente breve periodo instrumental desde una perspectiva temporal más amplia. En este trabajo se describe la reconstrucción de las características climáticas de Andalucía desde el siglo XVI hasta el presente. Esta reconstrucción se basa en el análisis de una amplia variedad de fuentes documentales. La información meteorológica fue obtenida de documentos originales de diferentes localidades andaluzas, básicamente del Valle del Guadalquivir. Las principales observaciones corresponden al régimen de lluvias, debido a su influencia en la agricultura. Se describen distintos tipos de datos (informaciones cualitativas, series económicas, primeros datos instrumentales), así como la metodología apropiada para analizarlos, y se exponen algunos de los resultados obtenidos hasta la fecha. Finalmente, se indican algunos de los retos científicos para futuras investigaciones.

Palabras clave: *climatología histórica, documentos históricos, Andalucía, clima, fenómenos extremos.*

INTRODUCCIÓN

Según el último informe publicado del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2007), es necesario ampliar la base de datos climáticos existentes para conseguir dilucidar los procesos que gobiernan fenómenos climáticos tales como sequías e inundaciones, e identificar las causas de las variaciones climáticas a largo plazo. Se subraya la necesidad de recopilar sistemáticamente observaciones climáticas tanto de datos instrumentales como de otros tipos de datos climáticos (denominados datos “proxy”). Ello se debe a que la magnitud de la señal asociada con

la variabilidad climática “natural”, es decir, la variabilidad no inducida por la acción del hombre, es todavía una incertidumbre. La falta de una completa comprensión de la variabilidad climática en escalas temporales interanuales, por décadas o siglos, hace difícil interpretar los cambios climáticos ocurridos durante el último siglo. En este contexto, ha alcanzado un importante desarrollo en los últimos años la climatología histórica, rama de la climatología que pretende describir la evolución climática en el periodo histórico, incluyendo aquellos periodos previos a la recopilación sistemática de datos meteorológicos instrumentales (Brázdil et al., 2005).

Durante los últimos 500 años, el periodo conocido como “Pequeña Edad de Hielo” (aproximadamente entre 1450 y 1850) proporciona la mejor oportunidad para investigar los mecanismos naturales que pueden afectar al clima en escalas temporales entre la década y el siglo. Aunque no hay evidencias de un largo periodo frío sincrónico en todo el globo (Bradley & Jones, 1992), la Pequeña Edad de Hielo fue el periodo más significativo de desarrollo glacial de los últimos dos mil años. Por otra parte, las estimaciones de la composición atmosférica obtenidas a partir del análisis químico de burbujas de aire contenidas en núcleos de hielo, permiten establecer unas concentraciones de gases como el CO₂ o el CH₄ prácticamente constantes, e inferiores a los niveles actuales (Wahlen et al., 1991). Ello destaca el interés de este periodo, ya que el mecanismo antropogénico queda descartado, y ello posibilita investigar las fluctuaciones climáticas de origen natural.

Entre los diferentes datos “proxy” que pueden aportar información sobre los fenómenos climáticos en periodos pre-instrumentales, merecen especial atención los documentos históricos. En general, los diferentes documentos que pueden encontrarse en los archivos (libros de actas capitulares, crónicas, relaciones, correspondencia, etc.) recogen una variedad de informaciones, entre las que destacan anomalías y extremos meteorológicos tales como sequías, inundaciones, heladas, tormentas, etc., junto con su impacto en el medio ambiente y en la sociedad. Cuando los registros de tales sucesos son compilados junto a la descripción de algunos de sus efectos, los resultados pueden transformarse en índices numéricos de severidad (Pfister et al., 1999). Además podemos encontrar una variedad de informaciones sobre aspectos relacionados directa o indirectamente con el clima, que pueden aportar una serie larga, continua y homogénea de información. Son los datos que podemos denominar datos

indirectos, entre los cuales podemos destacar los datos de producción agraria, fechas de la vendimia, o, en la Península Ibérica, informaciones sobre el comercio de la nieve (Rodrigo et al., 1996).

La metodología apropiada para analizar la evolución climática a partir de esta amplia variedad de informaciones se basa en el establecimiento de una codificación por grado de severidad (basada en las descripciones contenidas en los textos) para los datos directos, mientras que los datos indirectos suelen mostrar una mayor complejidad en cuanto a las vinculaciones entre las variables meteorológicas y el dato analizado. Ello obliga a un cuidadoso proceso de calibración y contrastación entre los diferentes tipos de datos. Los datos directos, por un lado, pueden estar sesgados por la subjetividad propia de los documentos escritos; en los datos indirectos, por otra parte, influyen factores no climáticos que es preciso tener en cuenta. Así por ejemplo, la anchura de los anillos de árboles (que constituye un dato “proxy” de origen natural) está influida no sólo por factores climáticos, sino también por el propio desarrollo vital del árbol en los años precedentes.

El principal objetivo de este trabajo es presentar diversos tipos de fuentes documentales útiles para realizar reconstrucciones climáticas y exponer la metodología empleada, así como algunos de los resultados obtenidos. Finalmente, se establecen algunas conclusiones, así como posibles líneas de investigación en el futuro.

DATOS DOCUMENTALES

Los datos documentales sobre la evolución climática del pasado pueden obtenerse a partir de la exploración y análisis de numerosos archivos diseminados por toda la geografía peninsular, como archivos estatales, provinciales, militares, notariales, monacales, catedralicios, parroquiales, municipales,

etc. (Barriendos, 2000). La tipología de los documentos es muy variada: actas de resoluciones, correspondencia privada, anales urbanos, crónicas locales y de órdenes eclesiásticas, relaciones de sucesos excepcionales, como grandes tormentas o inundaciones, etc. Así, por ejemplo, la documentación administrativa de los archivos catedralicios y municipales es uno de los mejores fondos documentales a efectos climáticos, tanto por su densidad como por la calidad de la información contenida. La celebración de las ceremonias de rogativas por motivaciones ambientales (rogativas *pro pluvia* en caso de sequías, *pro serenitate* en caso de fuertes lluvias y tormentas) era competencia de las autoridades municipales, por lo que aparecen registradas en los libros de actas o resoluciones de sus órganos de gobierno. Uno de los aspectos más interesantes del sistema de rogativas es la existencia de una tipología de ceremonias de formato diferente en atención a la gravedad de la situación ambiental que las provoca, lo cual permite su clasificación por orden de severidad de los fenómenos a escala al menos estacional (Martín-Vide & Barriendos, 1995). Además, pueden encontrarse descripciones detalladas de las condiciones ambientales en numerosos relatos que se imprimían bajo el título genérico de *Relaciones*, y que solían ser obra de testigos presenciales de los sucesos, lo que les confiere un alto grado de fiabilidad (por ejemplo, la *Relacion del admirable huracán y espantoso terremoto de agua, y viento que por secretos juicios de Nuestro Señor vino sobre la ciudad de Granada en este año de 1629*, obra de un autor anónimo). Algunas órdenes eclesiásticas, como los jesuitas, establecieron una tupida red de correspondencias por todo el país y las colonias de América, con continuos intercambios de información en forma de correspondencia privada (Rodrigo et al., 1998). Otra fuente importante de información climática son los anales urbanos, como los *Anales de Sevilla*,

publicados en 1677 por Ortiz de Zúñiga, que reflejan los fenómenos de interés en la ciudad durante el tiempo de vida del autor. En términos generales, el mayor volumen de información encontrada en Andalucía se refiere al régimen de precipitaciones, siendo las informaciones relativas a la temperatura muy escasas. Esto se debe principalmente a la influencia de la pluviometría en la agricultura y las infraestructuras de la sociedad en tiempos históricos previos a la Revolución Industrial, a mediados del siglo XIX. También puede ser un indicio de que los fenómenos de cambio climático en Andalucía en los siglos precedentes se manifiestan más en el régimen de precipitaciones que en el régimen térmico.

Una fuente importante de datos viene proporcionada por la producción agrícola, dadas las vinculaciones entre los fenómenos meteorológicos y los resultados de las cosechas. La influencia de los factores meteorológicos en la coyuntura agrícola era en periodos históricos mayor que hoy en día, pues eran menores los recursos de la técnica, más reducida el área de regadío y menos diversificados los cultivos. Los cereales constituían el cultivo más extendido, y, por tanto, el más sensible a las fluctuaciones climáticas (Domínguez Ortiz, 1988). Las cifras de diezmos suponen el mejor método disponible para aproximarse a las fluctuaciones agrícolas (Sebastián Amarilla, 1991). El diezmo era un impuesto ejercido sobre la producción agrícola, correspondiente en la mayoría de los casos a la décima parte de la cosecha (Vincent, 1985). Al representar un porcentaje fijo de las cosechas obtenidas, constituye un barómetro ideal de las oscilaciones de la producción, el mejor índice para analizar las fluctuaciones de las cosechas, y por tanto, las fluctuaciones climáticas que las provocaron (Anés Alvarez, 1970; Anés Alvarez et al., 1979). Ahora bien, el uso de datos de tipo económico (como fechas de la vendimia, o diezmos del trigo) a efectos de

reconstrucciones climáticas debe realizarse con las necesarias cautelas, dadas las relaciones no lineales entre clima y cultivos, y la influencia de factores socioeconómicos, de naturaleza no-climática, en la producción final (Rodrigo, 2001a).

En España, la primera red de estaciones meteorológicas, coordinada por el Real Observatorio Astronómico de Madrid, se crea en 1850 (Font Tullot, 1988), aunque con numerosos problemas iniciales debidos a la calidad y conservación de los instrumentos utilizados, por lo que no es hasta una década después cuando se inicia la observación sistemática de las variables meteorológicas en todo el país (Almarza et al., 1996). El periodo anterior se caracteriza básicamente por esfuerzos individuales que, desde campos como la medicina, la agricultura o la navegación, intentan introducir la ciencia meteorológica en España. Ya en el siglo XVIII la Real Academia de Medicina de Madrid intenta realizar a escala nacional un plan de observaciones meteorológicas, cuyo principal exponente son las “efemérides barométrico-médicas”, registros de presión atmosférica y temperatura en Madrid, de Marzo a Diciembre de 1737, realizados por Francisco Fernández Navarrete (Font Tullot, 1988). En Barcelona, podemos destacar las observaciones meteorológicas que realiza el médico, físico e ingeniero Francesc Salvá y Campillo desde 1780 (Barriendos et al., 2000). En Andalucía existen registros instrumentales diarios en Cádiz desde finales del XVIII (Wheeler, 1995), así como diversos textos, que desde el campo de la medicina, intentaban vincular la aparición y desarrollo de epidemias con condiciones ambientales y climáticas (como por ejemplo, la *Memoria de las enfermedades que se experimentaron en la ciudad de Sevilla en el año 1785*, publicada por el doctor Nieto de Piña en 1786, o la *Breve descripción de la fiebre amarilla padecida en Cádiz* publicada por el doctor Juan Manuel de Arejula en 1806).

La necesidad de contar con registros meteorológicos fiables para la navegación llevó a oficiales de la marina a realizar estudios meteorológicos y oceanográficos, como las observaciones de Sánchez Buitrago sobre el régimen de vientos en la bahía de Cádiz, o los datos sobre temperatura en Cádiz registrados por Tofiño y Varela en 1777 (Wheeler, 1995). Paralelamente a estas iniciativas individuales que, desde el campo de la observación o desde el mundo académico intentan introducir las nuevas concepciones y métodos científicos relacionados con la meteorología, el periodo comprendido entre finales del XVIII y comienzos del XIX se caracteriza por la aparición de los primeros periódicos, editados por intelectuales ilustrados. Así podemos citar ejemplos como *El Mensajero Económico y Erudito*, publicado en Granada entre 1796 y 1797 (Rodrigo et al., 2000a), o el *Semanario Erudito y Curioso de Málaga*, publicado en Málaga entre 1797 y 1800 (Rodrigo, 2001b). Estos periódicos solían incluir datos meteorológicos diarios en forma de tablas, artículos con la descripción de instrumentos meteorológicos, breves ensayos meteorológicos, etc.

El primer investigador que merece un lugar destacado en la climatología histórica española es Manuel Rico Sinobas, que desarrolló una intensa recopilación de datos históricos, así como de datos instrumentales desde 1800 hasta 1855 (Rico Sinobas, 1851). Los manuscritos resultado de esta actividad se conservan en el archivo de la Real Academia de Medicina de Madrid. El siglo XIX termina con una importante obra de recopilación de episodios meteorológicos extremos, realizada por el ingeniero de minas Horacio Bentabol (1900). Posteriormente, ya en el siglo XX, destacan los trabajos de Fontana Tarrats, quien, a lo largo de las décadas de los 60 y los 70, recopiló una gran cantidad de información, gran parte de ella inédita, y sólo parcialmente conocida gracias a Font Tullot (1988).

MÉTODOS

Una aproximación inicial al estudio de los acontecimientos climáticos del pasado consiste en elaborar cronologías de determinados fenómenos como sequías o inundaciones, y en analizar, por ejemplo, la frecuencia por décadas de estos fenómenos (Barriendos & Rodrigo, 2006). Sin embargo, el objetivo básico es encontrar valores cuantitativos de las variables climáticas del pasado, con el objeto de poder construir series temporales que se prolonguen hasta el presente. Para ello, la metodología usual de reconstrucción consiste en derivar índices ordinales de intensidad a partir de las informaciones contenidas en los documentos históricos. Estos índices pueden asignarse en diferentes escalas temporales (mensuales, estacionales, anuales), local o regionalmente. Para las precipitaciones, los datos documentales pueden indexarse (con resolución estacional) de la siguiente forma: periodos muy secos (ausencia de lluvia junto a información sobre descenso del caudal de agua de los ríos, pozos que se secan, etc.), -2; periodos secos (ausencia de lluvia sin información adicional), -1; periodos normales (sin información específica, sin comentarios sobre impactos), 0; periodos húmedos (lluvias intensas y/o continuadas), +1; periodos muy húmedos (lluvias intensas y/o continuas con riadas e inundaciones), +2. Si la resolución es mensual (estacional), el correspondiente índice estacional (anual) se obtiene simplemente sumando los índices obtenidos. Este esquema es coherente con la clasificación tradicional de las categorías climáticas usadas en España para el estudio de las lluvias estacionales y es muy similar a los índices propuestos por Pfister (1992), aunque menos detallado, principalmente por el volumen de informaciones encontradas, menor que en los países centroeuropeos.

El siguiente paso consiste en obtener funciones de transferencia por regresión frente a los datos instrumentales correspondientes a un periodo de solapamiento entre datos cualitativos y datos instrumentales. El periodo de solapamiento se divide en dos subperiodos, uno para obtener las funciones de transferencia (denominado periodo de calibración), y otro para validar las funciones obtenidas (periodo de validación). Si el periodo de solapamiento es demasiado breve, puede utilizarse un procedimiento de correlación cruzada. Si la validación resulta satisfactoria desde un punto de vista estadístico (por ejemplo, mediante un coeficiente de correlación significativo al 95% de nivel de confianza entre la serie instrumental y la serie reconstruida para este periodo), se aplican estas funciones de transferencia a las series de índices correspondientes al periodo pre-instrumental para obtener la serie reconstruida. Los coeficientes de correlación encontrados entre los índices documentales y las medidas instrumentales son del orden de 0.5 (Rodrigo et al., 1999; Pauling et al., 2006). Como consecuencia, hay una pérdida de varianza en la serie reconstruida. Una solución a este problema de pérdida de varianza consiste en reescalar las reconstrucciones mediante un factor de inflación, que puede obtenerse mediante el cociente entre las desviaciones típicas de la serie instrumental y de la serie inicialmente reconstruida (Rodrigo et al., 1999; Rutherford et al., 2005). Sin embargo, el método expuesto puede aplicarse rara vez en climatología histórica. La razón es que en la mayoría de los casos es difícil encontrar un periodo de solapamiento entre datos instrumentales y datos documentales (Luterbacher et al., 2004; Brázdil et al., 2005; Xoplaki et al., 2005; Jones y Briffa, 2006; Pauling et al., 2006). Este problema se vuelve crucial cuando se buscan reconstrucciones a resolución mensual o estacional, principalmente por la falta

de datos suficientes. Cuando un periodo de solapamiento no está disponible, una aproximación alternativa consiste en indexar la serie instrumental. Así, para mantener un esquema coherente con los índices ordinales asignados a los datos documentales, se asigna el valor -2 si la estación es muy seca (lluvias menores al percentil 10 del periodo de referencia 1961-1990); -1 si la estación es seca (lluvias entre el percentil 10 y el 25); 0 si la estación es normal (lluvias entre el percentil 25 y el 75); +1 si es húmeda (lluvias entre el percentil 75 y el 90); +2 si es muy húmeda (lluvias superiores al percentil 90). Posteriormente se encuentran las funciones de transferencia mediante correlación entre la serie instrumental original y la serie de índices derivada de ella. En este caso, cuando los datos instrumentales se transforman a índices ordinales, la pérdida de varianza es pequeña (Brázdil et al., 1995), pero surgen problemas similares cuando estas funciones de transferencia intentan aplicarse a la serie de índices históricos, ya que, mientras que en la serie instrumental existen valores que cubren todo el intervalo o clase definida para cada valor del índice, el proceso de reconstrucción asigna un solo valor compatible con diferentes valores instrumentales dentro de este intervalo. Como consecuencia, la varianza de la serie reconstruida será menor que la de la serie instrumental, y será preciso de nuevo reescalar la serie obtenida.

El tratamiento de los datos indirectos, como los registros de producción agrícola o las series de diezmos, debe ser distinto, dada la naturaleza de este tipo de datos, donde los factores socioeconómicos (es decir, no-climáticos) pueden jugar un importante papel en el comportamiento de las series. Así, en un estudio preliminar sobre la serie de diezmos del cereal en Sevilla publicada por Ponsot (1986) se intentó delimitar este problema mediante el siguiente procedimiento (Rodrigo, 2001a): en primer lugar

se calcularon los parámetros estadísticos básicos de la serie completa de diezmos desde 1587 hasta 1729. Estos estadísticos pueden considerarse como representativos de las condiciones generales de la producción cereal en la época de estudio, es decir, como las “condiciones de contorno” impuestas por los factores socioeconómicos, independientes de factores climáticos. Posteriormente, a partir de la serie original completa se establecen los límites fijados por el primer y tercer cuartil, como parámetros válidos para la selección de los años de interés. En efecto, atendiendo al significado estadístico de estos dos parámetros, el 50% de los datos comprendidos entre el primer y el tercer cuartil pueden considerarse como “normales”, frente al 25% de los datos inferiores al primer cuartil, y el restante 25% de los datos superiores al tercer cuartil. Así, las malas cosechas se asocian a años con valores del diezmo inferiores al primer cuartil; las cosechas que podemos catalogar como “normales” poseen valores del diezmo comprendidos en el intervalo intercuartil, y, por último, las cosechas “excelentes” poseen valores superiores al tercer cuartil. El estudio de la producción cereal, dadas sus condiciones fenológicas, sirve básicamente como indicador del régimen de precipitaciones y de la posible aparición de fenómenos extremos. Los años de buenas cosechas, entonces, han de interpretarse como años con una pluviometría “normal” y con ausencia de fenómenos meteorológicos extremos. Los años de malas cosechas presentan una interpretación más difícil, o bien situaciones de sequía, o bien lluvias excesivas, o bien heladas y granizos. De ahí que la utilidad de este tipo de datos se cifre en su valor a efectos de validación de las informaciones de tipo cualitativo obtenidas de otras fuentes, al menos cuando se analizan series locales.

Las primeras series instrumentales presentan varios problemas de tipo metodoló-

gico, principalmente debidos a la brevedad de las series y la ausencia de una completa información sobre los instrumentos utilizados, ubicación, sistemas de unidades empleados, momento del día de la lectura de datos, etc. (lo que se denomina el meta-data). El primer problema (series de varios meses, o pocos años) restringe la utilidad de estos datos al no permitir la construcción de una serie temporal larga y continua. El segundo problema se refiere al propio dato en sí, en cuanto a su fiabilidad como registro climático. Sólo la comparación entre distintas series contemporáneas y la comparación con un periodo moderno de referencia (que suele ser el 1961-1990) permite una calibración adecuada de estos datos. Existen técnicas de homogeneización de datos que pueden ayudar al estudio de estas series. El establecimiento de una base de datos instrumentales para el periodo anterior al establecimiento de una red institucional de observación meteorológica es uno de los principales objetivos de la investigación climática hoy en día.

RESULTADOS

Aunque una visión completa de la variabilidad climática en épocas históricas no es todavía posible, sí pueden presentarse algunos resultados que ofrecen indicios del comportamiento del clima al menos desde el año 1500. La Figura 1 muestra una cronología de la frecuencia de inundaciones por década del río Guadalquivir en Sevilla desde el 1500 hasta el 1900. Esta cronología se obtuvo a partir del análisis de diversas fuentes documentales, fundamentalmente registros de las rogativas organizadas en la ciudad con motivo de estos sucesos (Barriandos & Rodrigo, 2006). Aunque existen registros previos, hasta el siglo XII, las primeras décadas pueden contener una considerable cantidad de datos perdidos (por las dificultades en la conservación de los documentos), por lo que no se han incluido en esta cronología. La serie termina en 1900 puesto que a partir del siglo XX modificaciones en la infraestructura fluvial (canales de regadío, presas, cambios en el curso del

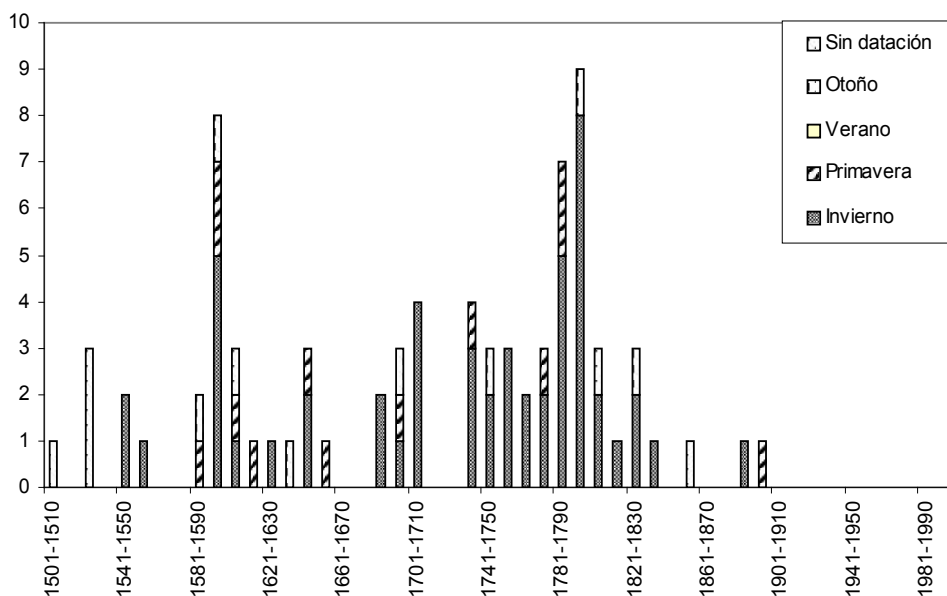


Figura 1. Número de inundaciones por década del Guadalquivir en Sevilla.

río, etc.) pueden influir de manera decisiva en la aparición de este fenómeno.

Puede apreciarse que la mayor frecuencia de inundaciones se registra a finales del siglo XVI y finales del siglo XVIII y que la mayoría ocurrieron en los meses de invierno (de Diciembre a Febrero).

La combinación de las informaciones relativas a inundaciones, junto a otras que describen la aparición de sequías, permite establecer índices ordinales de severidad y reconstruir la evolución pluviométrica de Andalucía desde al menos el siglo XVI, según la metodología expuesta en la sección anterior. En este caso, en lugar de centrarse en una sola localidad, se buscó obtener una serie regional, en base a informaciones procedentes de diversas localidades. El mayor volumen de informaciones corresponde a ciudades del valle del Guadalquivir, como Sevilla, Córdoba, Jaén, Loja y Granada, aunque también se cuenta con informaciones procedentes de Málaga y Cádiz. El objetivo fue establecer una serie temporal de anomalías pluviométricas anuales, utilizando el periodo 1951-1980 como periodo de referencia. La calibración se realizó utilizando datos instrumentales de lluvia anual acumulada en Gibraltar, utilizando como periodo de calibración el 1791-1820. El coeficiente de correlación entre los índices ordinales y la serie instrumental fue 0.56, estadísticamente significativo al 95% de nivel de confianza. Para la validación se utilizó el periodo 1821-1850. La comparación durante el periodo de validación se realizó mediante diferentes tests estadísticos: el coeficiente de correlación de Pearson fue de 0.55, se calculó además el coeficiente de correlación de rango no paramétrico de Spearman, con un valor de 0.52, así como el test t de comparación de medias y el test t de comparación de dos muestras. Todos los resultados fueron estadísticamente significativos al nivel de confianza del 95%, indicando buenas correlaciones y que no existen

diferencias significativas entre las muestras y sus valores medios. Posteriormente se aplicó la ecuación de regresión obtenida para el periodo de calibración a la serie de índices completa desde el 1500. La pérdida de varianza fue corregida mediante la aplicación de un factor multiplicador consistente en el cociente de las desviaciones típicas de la serie instrumental y la serie reconstruida. El resultado final se muestra en la Figura 2, donde se recogen las anomalías pluviométricas anuales en la región, expresadas como desviaciones respecto a la media del periodo de referencia 1951-1980, junto con la media móvil de 10 años (Rodrigo et al., 1999).

Los aspectos más relevantes pueden resumirse de la siguiente forma: después de algunos años de condiciones predominantemente secas durante el siglo XVI, con un mínimo alrededor de 1540, comienza un periodo húmedo a finales del XVI, que se extiende hasta mediados del siglo XVII. Los años más húmedos corresponden a las décadas de 1591-1600, 1631-1640 y 1641-1650. El siglo XVIII es claramente más seco, con un mínimo alrededor de 1750. A finales del XVIII y comienzos del XIX las precipitaciones aumentan con un máximo a mediados del XIX. Desde este momento, tiene lugar un progresivo descenso en las precipitaciones, sólo interrumpido por las precipitaciones de la década de 1960, que incluso llegaron a provocar nuevas inundaciones en Sevilla (Font Tullot, 1988).

Entre los principales mecanismos responsables de la variabilidad de las precipitaciones en Andalucía, y fundamentalmente durante los meses de invierno, se encuentra la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), que puede llegar a explicar hasta un 40% de la varianza de las series pluviométricas andaluzas (Muñoz-Díaz & Rodrigo, 2003). De hecho, este mecanismo afecta a gran parte de la Península Ibérica, básicamente el área central y occidental, y se ha encon-

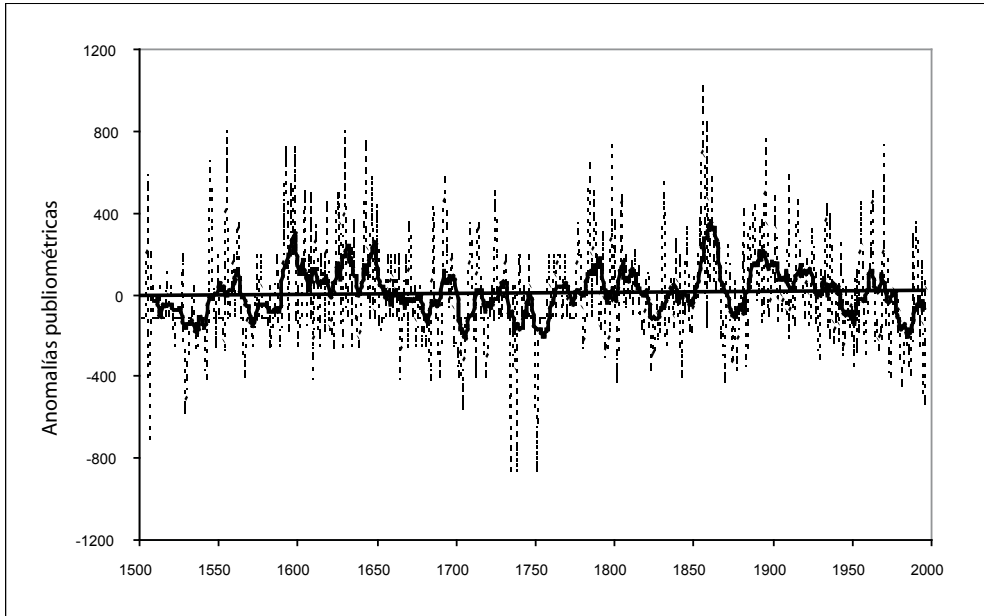


Figura 2. Anomalías pluviométricas anuales en Andalucía 1500-2000. Línea continua: media móvil de 10 años. Valores expresados como desviaciones respecto a la media del periodo de referencia 1951-1980.

trado que está directamente relacionado con la variabilidad en los cursos fluviales de los ríos Duero, Tajo y Guadiana durante el siglo XX (Trigo et al., 2004). La relación con el patrón NAO se debe a que la fase positiva de la NAO está asociada a una intensificación del Anticiclón de las Azores, que produce un bloqueo de los vientos del Oeste sobre la Península Ibérica, y su desvío hacia latitudes más septentrionales, mientras que en la fase opuesta la trayectoria de las borrascas atlánticas se desplaza hacia el sur, causando intensas precipitaciones en la Península. Así, periodos húmedos pueden relacionarse con un predominio de la fase negativa de la NAO, mientras que los periodos secos pueden relacionarse con el predominio de la fase positiva. De hecho, la precipitación de invierno durante los últimos 500 años en el Sur de España y Marruecos se cree que está principalmente determinada por el estado de la NAO (Luterbacher et al., 2002). Esta relación directa entre las precipitaciones en Andalucía y el estado de la NAO ha sido utilizada para reconstrucciones del campo

de presión a nivel del mar y la NAO hasta comienzos del siglo XVI (Luterbacher et al., 2001; Rodrigo et al., 2001; Luterbacher et al., 2002).

Otros posibles mecanismos causales de variabilidad climática son las fluctuaciones en la actividad solar y la actividad volcánica. Respecto a la primera, se ha asociado la aparición de la Pequeña Edad de Hielo con la presencia de dos mínimos en la actividad solar (determinados mediante el estudio del número de manchas solares y la frecuencia de auroras boreales), los denominados Mínimo Maunder, de 1645 a 1715, y Mínimo Dalton, de 1790 a 1820. En nuestro caso, el Mínimo Maunder no parece excepcional dentro de la serie completa, aunque la evolución de las lluvias es muy variable, con severas sequías los años 1664, 1683, 1689, 1704 y 1711, alternando con intensas precipitaciones e inundaciones en 1646, 1649, 1684 y 1692 (Rodrigo et al., 2000b). Esta alta variabilidad ha sido detectada en otras partes de la Europa Mediterránea, como en Italia (Camuffo & Enzi, 1994). En cuanto

al Mínimo Dalton, que parece corresponder a un periodo húmedo en Andalucía, también se ha asociado con un periodo de alta variabilidad en Cataluña (Barriendos & Llasat, 2003). Por otra parte, se cree que la frecuencia y magnitud de las erupciones volcánicas contribuyeron significativamente a la variabilidad climática durante la Pequeña Edad de Hielo (Mann et al., 1998; Pfister & Brázdil, 1999; Crowley, 2000), y en particular durante el Mínimo Maunder, con frecuentes erupciones volcánicas en las décadas de 1670 y 1690 (Luterbacher et al., 2001). Nuestros resultados demuestran una variabilidad similar a la detectada en la temperatura media anual del Hemisferio Norte (Mann et al., 1998; Crowley, 2000): periodos fríos durante mediados del siglo XVII y el siglo XIX, e intervalos algo más cálidos durante mediados del siglo XVI y el siglo XVIII, con un claro aumento de las temperaturas durante el siglo XX. Por tanto, parece que periodos húmedos (secos) en Andalucía estarían relacionados con periodos fríos (cálidos) en el Hemisferio Norte. No obstante, la discusión sobre la influencia de diferentes mecanismos causales en la variabilidad climática, y en particular en la variabilidad de las precipitaciones de Andalucía, es un tema abierto, que debe ser objeto de futuras investigaciones.

Los resultados expuestos en la Figura 2 muestran una evolución fluctuante, con alternancia de periodos secos y húmedos a escala temporal interdecada. Sin embargo, estas fluctuaciones también aparecen a escalas temporales interanuales, con periodos de gran variabilidad de un año a otro, como ocurre por ejemplo durante el periodo 1645-1715. Las informaciones de tipo indirecto son las que pueden ofrecernos una imagen más clara de esta variabilidad de alta frecuencia. La Tabla 1 muestra el análisis resultante del estudio de los diezmos del cereal en Sevilla durante el periodo 1587-1729 (Rodrigo, 2001a).

Los años de malas cosechas fueron determinados mediante el método descrito en la sección anterior, y la atribución a las posibles causas climáticas mediante el análisis de las informaciones de tipo cualitativo encontradas en otras fuentes documentales (Rodrigo, 2001a). Llama la atención el predominio de las situaciones de lluvias intensas y persistentes (muchas veces acompañadas de riadas e inundaciones) sobre las situaciones de sequía. De los 30 años con malas cosechas, 7 corresponden a situaciones de sequía, y 16 a lluvias intensas. Además, se destacan los años con tormentas de verano y granizadas, y los casos de heladas invernales y primaverales. A la hora de analizar los años de malas cosechas, es preciso tener en cuenta otros factores de índole no-climática que podrían haber influido en la agricultura. Así, por ejemplo, otras causas posibles de malas cosechas son la plaga de langosta que perjudicó a la cosecha en la primavera de 1686/87, o las epidemias de peste de los años 1601/02, 1650/51 y 1652/53. Los años 1658/59, 1681/82 y 1684/85 (para los que no se ha detectado presencia de extremos meteorológicos), son años que probablemente se verían afectados por los malos resultados de las cosechas en años anteriores (lluvias en 1657/58, sequía en 1679/80 y en 1683), indicando así la escasa capacidad de recuperación de la agricultura de la época. Como indicábamos en la sección anterior, el tratamiento de los primeros datos instrumentales es una tarea de investigación que se encuentra hoy por hoy lejos de estar completada, pero al menos sí se pueden presentar algunos resultados parciales. Así, por ejemplo, la Figura 3 muestra el número anual de días de lluvia en Sevilla durante el periodo 1778-1785, según se recoge en la *Memoria de los enfermedades que se experimentaron en la ciudad de Sevilla en el año 1785*, texto publicado en 1786 por el médico Nieto de Piña, en el que se intentan relacionar aspectos médicos de

Causas	Otoño	Invierno	Primavera	Verano
Sequías	1604	1604/05 1677/78 1679/80	1589 1605 1610 1635 1678 1683	
Lluvias	1590 1592 1605 1642 1646 1649 1656 1691	1590/91 1592/93 1596/97 1605/06 1607/08 1634/35 1642/43 1645/46 1646/47 1676/77 1683/84 1691/92 1707/08	1591 1597 1608 1643 1647 1649 1658 1692 1708	
Tormentas				1646 1649 1678 1684 1685 1692
Heladas		1588/89 1604/05 1605/06 1609/10 1656/57 1657/58 1658/59	1647 1649 1650	

Tabla 1. Cosechas con producción inferior al primer cuartil según los datos de diezmo del trigo, y posibles causas climáticas.

higiene y salud pública con los fenómenos meteorológicos (Rodrigo et al., 2007).

Los datos presentados en la Figura 3 indican un menor número de días lluviosos desde 1778 hasta 1782, periodo que el autor califica como seco, y un aumento apreciable desde 1783, coincidiendo con la inundación de la ciudad entre Diciembre de 1783 y Enero de 1784.

Parte del interés de los primeros datos instrumentales recopilados es que ofrecen información sobre otras variables distintas de las precipitaciones, como la temperatura, la presión o la dirección del viento. Así, la Figura 4 muestra el ciclo anual de temperatura en Granada durante los años 1796 y 1797, según los datos recopilados en *El Mensajero*, periódico local publicado

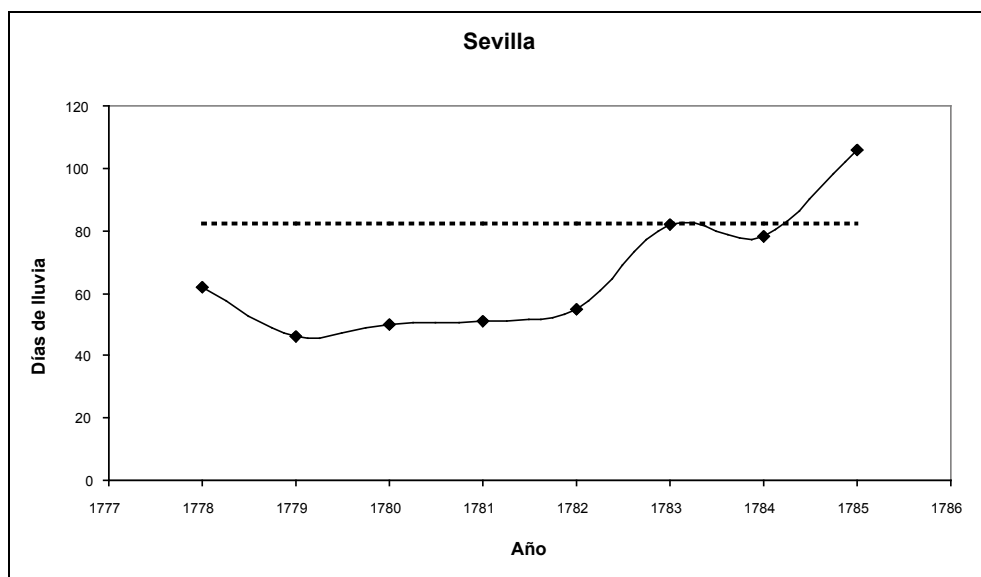


Figura 3. Número anual de días de lluvia en Sevilla, 1778-1785. Línea discontinua: valor medio del periodo de referencia 1961-1990.

durante estos años (Rodrigo et al., 2000a). Se trata de datos diarios tomados al mediodía durante el breve tiempo de publicación del periódico.

Los datos de temperatura correspondientes a las 12 horas están más relacionados con las temperaturas máximas que con las medias, aunque normalmente la temperatura máxima diaria se alcanza después del mediodía. La temperatura media anual en Granada durante los años 1796-1797 fue 17.1°C, 2° más alta que la media del periodo de referencia 1960-1990, y 4.4°C inferior que la media de las máximas. La diferencia es menor en invierno, especialmente en Diciembre (0.4°C). Si aceptamos que las temperaturas a las 12 horas están más relacionadas con las máximas que con las medias diarias, los datos recogidos en la Figura 4 parecen sugerir condiciones ligeramente más frías que en la actualidad, excepto en los meses de verano. Sin embargo, antes de obtener conclusiones es preciso analizar el ciclo diario de temperatura en Granada, así como la posible influencia del desarrollo urbano en los registros de temperatura. Este ejemplo

ilustra las dificultades que surgen cuando se analiza este tipo de datos.

CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se ha intentado exponer cómo es posible inferir la evolución climática de Andalucía en el pasado, durante el periodo anterior al establecimiento de una red institucional de observación meteorológica. Durante el periodo histórico es preciso recurrir a fuentes documentales, diseminadas en multitud de archivos de distinta naturaleza (municipales, eclesiásticos, etc). Los métodos de la climatología histórica permiten reconstruir con cierto grado de fiabilidad el comportamiento de las variables climáticas. Los estudios realizados hasta ahora han permitido reconstruir la evolución de las precipitaciones a escala estacional o anual desde el siglo XVI. Sin embargo, aún queda mucho trabajo pendiente, no sólo para ampliar la cobertura espacial de las informaciones, sino también para refinar la resolución temporal de las mismas (a escala al menos mensual) y para extender el análisis a otras variables, fundamentalmente la

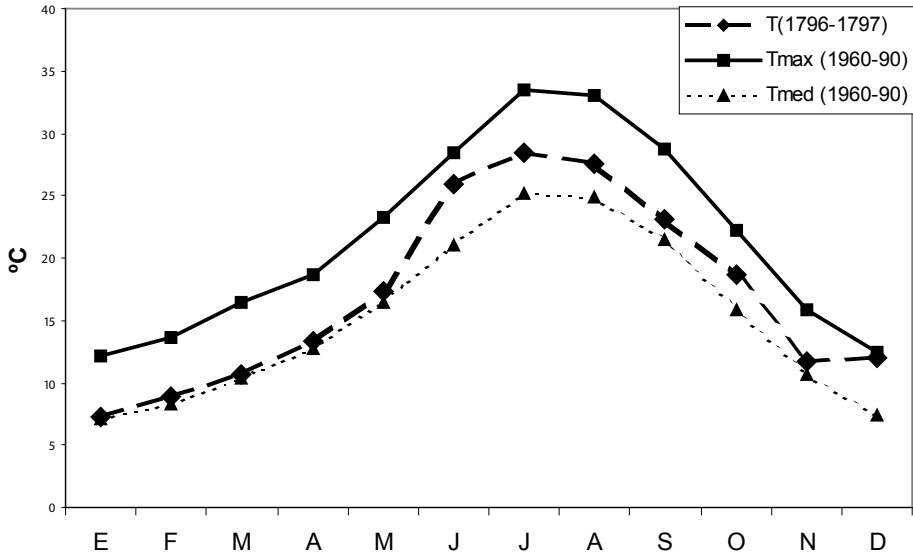


Figura 4. Ciclo anual de temperatura en Granada (1796-1797) y comparación con los valores medios de temperatura máxima diaria y temperatura media durante el periodo de referencia 1960-1990.

temperatura, de la que el volumen de información obtenida es tan escaso que impide la elaboración de cronologías continuadas en el tiempo.

Las precipitaciones muestran un comportamiento fluctuante, con alternancia de periodos secos y húmedos, que, “grosso modo”, pueden caracterizarse por una mayor frecuencia de sequías e inundaciones, respectivamente. La atribución de estas distintas fases climáticas a los diferentes mecanismos causales propuestos por la bibliografía especializada (actividad solar, erupciones volcánicas, gases de efecto invernadero) es una tarea aún por realizar, aunque el paralelismo con el comportamiento de las temperaturas del Hemisferio Norte permite asociar los periodos secos (húmedos) en Andalucía con las fases cálidas (frías) en el Hemisferio Norte. Esta es una hipótesis de trabajo que exigirá posteriores investigaciones en el futuro.

El uso de datos “proxy”, como las series de producción agraria, permite contrastar la validez de las informaciones y descripcio-

nes cualitativas encontradas en otro tipo de fuentes documentales, y explicar en parte las fluctuaciones de alta frecuencia (interanuales) de las variables climáticas. No obstante, el tratamiento de estos datos debe ser especialmente riguroso, dada la influencia de factores socioeconómicos (es decir, no-climáticos) en el comportamiento de la variable en estudio (en nuestro caso los diezmos del trigo).

Las primeras observaciones instrumentales, resultado de iniciativas individuales llevadas a cabo por investigadores ilustrados (médicos, físicos, marinos, etc.) presentan el doble problema de tener que asegurar la calidad de los datos (falta de metadata) y de la brevedad de las series encontradas. Sólo una continuada labor de investigación permitirá en el futuro rescatar estos datos y construir una base de datos con una cobertura espacio-temporal adecuada para realizar posteriores análisis.

El objetivo final de estos estudios no es otro que ampliar en lo posible las informaciones existentes sobre la evolución climática, a

fin de situar el comportamiento del periodo instrumental en un contexto histórico más amplio. Así podrán ofrecerse elementos de análisis para la validación de los modelos

climáticos, y, en consecuencia, para la evaluación de la magnitud de la influencia antropogénica en el clima de Andalucía.

BIBLIOGRAFÍA

- Almarza, C., J. A. López, & C. Flores (1996). *Homogeneidad y variabilidad de los registros históricos de precipitación en España*. Instituto Nacional de Meteorología, Madrid.
- Anés Alvarez, G. (1970). *Las Crisis Agrarias en la España Moderna*. Taurus, Madrid.
- Anés Alvarez, G., A. Bernal Rodríguez, J. García Fernández, E. Giralt Raventós & P. Vilar (1979). *La Economía Agraria en la Historia de España*. Alfaguara, Madrid.
- Barriendos, M. (2000). La climatología histórica en España. Primeros resultados y perspectivas de la investigación. En: *La reconstrucción del clima de época preinstrumental*, J. C. García Cordón (ed): 15-56. Universidad de Cantabria, Santander.
- Barriendos, M., J. García, J. Martín-Vide, F. Nunes, J. C. Peña & M. J. Alcoforado (2000). 18th century instrumental meteorological series in the Iberian Peninsula. General characteristics and climatic utility. En: *Giuseppe Toaldo e il suo tempo*, L. Pigatto (ed): 907-920, Bertonecello Artigrafiche, Padova.
- Barriendos M. & M. C. Llasat (2003). The case of the 'Maldá' anomaly in the western Mediterranean basin (AD 1760-1800): an example of a strong climatic variability. *Climate Change* 61: 191-216.
- Barriendos M. & F. S. Rodrigo (2006). Study of historical flood events on Spanish rivers using documentary data. *Hydrological Sciences-Journal-des-Sciences Hydrologiques* 51: 765-783.
- Bentabol, H. (1900). *Las aguas de España y Portugal*, 2nd ed. Vda. e Hijos de M. Tello, Madrid.
- Bradley, R. S. & P. D. Jones (1992). Climate since A.D. 1500: Introduction. En: *Climate since A.D. 1500*, R. S. Bradley & P. D. Jones (eds): 1-16. Routledge, London.
- Brázdil R., C. Pfister & H. Wanner (2005). Historical Climatology in Europe-the state of the art. *Climatic Change* 70: 363-430.
- Camuffo, D. & S. Enzi (1992). Reconstructing the climate of Northern Italy from archive sources. En: *Climate since A.D. 1500*, R. S. Bradley & P. D. Jones (eds): 143-170, Routledge, London.
- Crowley, T. J. (2000). Causes of climate change over the past 1000 years. *Science* 289: 270-277.
- Domínguez Ortiz, A. (1988). *El Antiguo Régimen: Los Reyes Católicos y los Austrias*. Alianza Editorial, Madrid.
- Font Tullot, I. (1988). *Historia del clima de España. Cambios climáticos y sus causas*. Instituto Nacional de Meteorología, Madrid, 297 pp.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, 966 pp.
- Jones, P. D. & K. R. Briffa (2006). Unusual climate in Northwest Europe during the period 1730 to 1745 based on

- instrumental and documentary data. *Climatic Change* 79: 361-379.
- Luterbacher, J., R. Rickli & E. Xoplaki (2001). The Late Maunder Minimum (1675-1715)- a key period for studying decadal scale climatic change in Europe. *Climatic Change* 49: 441-462.
- Luterbacher, J., E. Xoplaki & D. Dietrich (2002). Extending North Atlantic Oscillation reconstructions back to 1500. *Atmospheric Science Letters* 2: 114-124.
- Luterbacher, J., D. Dietrich & E. Xoplaki (2004). European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500. *Science* 303: 1499.
- Mann, M. E., R. S. Bradley & M. K. Hughes (1998). Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature* 392: 779-787.
- Martín-Vide J & M. Barriendos (1995). The use of rogations ceremony records in climatic reconstruction: a case study from Catalonia (Spain). *Climatic Change* 30: 201-221.
- Muñoz-Díaz, D. & F. S. Rodrigo (2003). Effects of the North Atlantic Oscillation on the probability for climatic categories of local monthly rainfall in southern Spain. *International Journal of Climatology* 23:381-397.
- Pauling, A., J. Luterbacher, C. Casty & H. Wanner H (2006). Five hundred years of gridded high-resolution precipitation reconstructions over Europe and the connection to large-scale circulation. *Climate Dynamics* 26: 387-405.
- Pfister, C. (1992). Monthly temperature and precipitation patterns in Central Europe from 1525 to the present. En: *A methodology for quantifying man-made evidence on weather and climate*, R. S. Bradley & P. D. Jones (eds): 118-142, Routledge, London and New York.
- Pfister, C. & R. Brázdil (1999). Climatic variability in sixteenth century Europe and its social dimension: a synthesis. *Climatic Change* 43: 5-53.
- Pfister, C., R. Brázdil, R. Glaser., M. Barriendos Vallvé, D. Camuffo, M. Deutsch, P. Dobrovolný, S. Enzi, E. Guidoboni, O. Kotyza, S. Militzer, L. Racz, & F. S. Rodrigo (1999). Documentary evidence on climate in sixteenth century Europe, *Climatic Change* 43: 55-110.
- Ponsot, P. (1986). *Atlas de Historia Económica de Andalucía (Siglos XVI-XIX)*. Editoriales Andaluzas Unidas, Granada.
- Rico Sinobas, M. (1851) *Memoria sobre las causas meteorológico-físicas que producen las constantes sequías de Murcia y Almería*. Ministerio de Comercio, Madrid.
- Rodrigo, F. S., M. J. Esteban-Parra & Y. Castro-Díez (1996). Uso de datos sobre el comercio de la nieve en Sierra Nevada para reconstrucciones climáticas. En: *Sierra Nevada. Conservación y Desarrollo Sostenible (Vol. 1)*, J. Chacón Montero & J. L. Rosúa Campos (eds): 41-53, Universidad de Granada, Granada.
- Rodrigo, F. S., M. J. Esteban-Parra & Y. Castro-Díez (1998). On the use of the Jesuit Order private correspondence records in climate reconstructions: a case study from Castille (Spain) for 1634-1648 A.D. *Climatic Change* 40: 625-645.
- Rodrigo, F. S., M. J. Esteban-Parra, D. Pozo-Vázquez & Y. Castro-Díez (1999). A 500-year precipitation record in southern Spain. *International Journal of Climatology* 19: 1233-1253.
- Rodrigo, F. S., M. J. Esteban-Parra, D. Pozo-Vázquez & Y. Castro-Díez (2000a). On the early instrumental series in Andalucía (south Spain): a

- case study from Granada (1796-1797). En: *Giuseppe Toaldo e il suo tempo*, L. Pigatto (ed): 899-906, Bertinello Artigrafiche, Padova.
- Rodrigo, F. S., M. J. Esteban-Parra, D. Pozo-Vázquez & Y. Castro-Díez (2000b). Rainfall variability in southern Spain on decadal to centennial time scales. *International Journal of Climatology* 20: 721-732.
- Rodrigo, F. S. (2001a). Clima y producción agrícola en Andalucía durante la edad moderna (1587-1729). En: *Naturaleza transformada*, M. González de Molina & J. Martínez Alier (eds): 161-182, Icaria, Barcelona.
- Rodrigo, F. S. (2001b). Primeras observaciones meteorológicas en España: el papel de la prensa a finales del siglo XVIII y comienzos del XIX. En: *II Encuentro sobre Historia y Medio Ambiente*, A. Sabio Alcutén & I. Iriarte Goñi (coords): 138-147, Instituto de Estudios Aragoneses, Huesca.
- Rodrigo, F. S., D. Pozo-Vázquez, M. J. Esteban-Parra & Y. Castro-Díez (2001). A reconstruction of the winter North Atlantic Oscillation index back to A.D. 1501 using documentary data in southern Spain. *Journal of Geophysical Research* 106: 14805-14818.
- Rodrigo, F. S., M. Barriandos, E. Rama-Corredor, J. M. Vaquero, M. J. Esteban-Parra, Y. Castro-Díez, D. Paredes-Beato & R. García-Herrera (2007). Medical Topographical Studies: An unexplored source of climatic data in the Iberian Peninsula during the 18th and 19th centuries. *Geophysical Research Abstracts*, 9: 1607-7962/gra/EGU2007-A-02568.
- Rutherford, S., M. E. Mann & T. J. Osborn (2005). Proxy-based Northern Hemisphere surface temperature reconstructions: sensitivity to method, predictor network, target season, and target domain. *Journal of Climate* 18: 2308-2329.
- Sebastián Amarilla, J. A. (1991). La Producción de Cereales en Tierras de León Durante la Edad Moderna (1570-1795). *Agricultura y Sociedad*, 59: 75-117.
- Trigo, R. M., D. Pozo-Vázquez, T. J. Osborn, Y. Castro-Díez, S. Gámiz-Fortis & M. J. Esteban-Parra (2004). North Atlantic Oscillation influence on precipitation, river flow and water resources in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology* 24: 925-944.
- Vincent, B. (1985). *Andalucía en la Edad Moderna: Economía y Sociedad*. Excma. Diputación Provincial de Granada, Granada.
- Wahlen, M., D. Allen, B. Deck & A. Herchenroder (1991). Initial measurements of CO₂ concentrations (1530 to 1940 A.D.) in air occluded in the GISP 2 ice core from central Greenland. *Geophysical Research Letters*, 18: 1457-1460.
- Wheeler, D. (1995). Early instrumental weather data from Cádiz: a study of late eighteenth and early nineteenth century records. *International Journal of Climatology* 15: 801-810.
- Xoplaki, E., J. Luterbacher & H. Paeth (2005). European spring and autumn temperature variability and change of extremes over the last half millennium. *Geophysical Research Letters*, 32: L15713.

CHAPTER 2 / CAPÍTULO 2

***Climatic Variability on Spain for
past centuries. Reconstruction from
historical documentary sources***

**Variabilidad climática en España a
escala plurisecular. Reconstrucción
a partir de fuentes documentales
históricas**

El cambio climático en Andalucía: evolución y consecuencias medioambientales
Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía): 45-54 (2007)
© Los autores. Sevilla. España. ISBN: 978-84-96 776-40-1

Climatic Variability on Spain for past centuries. Reconstruction from historical documentary sources

Mariano Barriendos

**Department of Modern History. University of Barcelona. Montalegre 6. 08001 Barcelona.
mbarriendos@ub.edu**

ABSTRACT

Climatic data collection from documentary sources allows reconstruction of flood and drought patterns for the past 500 years. It shows climatic oscillations in which strong frequencies are recorded, like period between mid 16th Century and late 18th Century. Improvement of this research field can offer increasing data availability helping research on future climatic change.

Key words: *climatic variability, drought, documentary sources, floods, Little Ice Age, rogation ceremonies.*

Variabilidad climática en España a escala plurisecular. Reconstrucción a partir de fuentes documentales históricas

Mariano Barriandos

Departamento de Historia Moderna. Universidad de Barcelona. Montalegre 6. 08001
Barcelona. mbarriandos@ub.edu

RESUMEN

La recuperación de testimonios climáticos en fuentes documentales históricas permite reconstruir el comportamiento de sequías e inundaciones en los últimos 500 años. Se aprecian oscilaciones climáticas en las que estas anomalías incrementan sus frecuencias, especialmente desde mediados de siglo XVI hasta finales del siglo XVIII. La profundización de esta investigación puede ofrecer datos interesantes y en línea con las previsiones de los escenarios de cambio climático antropogénico.

Palabras clave: *variabilidad climática, sequías, fuentes documentales, inundaciones, miniglaciación, rogativas.*

INTRODUCCIÓN

La variabilidad climática es la manifestación de un complejo sistema en el que participan diferentes elementos que interaccionan entre sí y que están condicionados por una extensa gama de factores de naturaleza muy variada. La complejidad del sistema climático dificulta la comprensión precisa de los diferentes comportamientos climáticos, sus variaciones en la dimensión temporal y las magnitudes y frecuencias de sus manifestaciones extremas.

Los avances científicos recientes en observación instrumental remota y las capacidades de cálculo de los medios informáticos proporcionan mejoras sustanciales en algunas facetas de la investigación atmosférica. Por ejemplo, la capacidad de predicción meteorológica ha experimentado una evolución determinante hasta conseguir niveles de precisión y fiabilidad impensables hace sólo 30 años.

La investigación climática sigue también ese proceso pero han aparecido nuevas incertidum-

bres de difícil resolución: el cambio climático inducido por la contaminación atmosférica que genera la quema de combustibles fósiles. Ante este nuevo factor de incidencia climática, la actividad científica se intensifica y se dirige hacia diferentes vertientes temáticas. Por un lado, la modelización climática debe generar los escenarios que se esperan para las condiciones climáticas en un futuro a corto y medio plazo. Ante la cada vez más evidente aparición de impactos inducidos por el cambio climático global, economistas, geógrafos y sociólogos y otras ramas de las ciencias sociales deben preparar el encaje de las actividades y necesidades humanas en esos nuevos escenarios. Desde el ámbito politécnico, las infraestructuras civiles y energéticas deben adaptarse del mejor modo a las nuevas condiciones. Y, entre otros muchos aspectos, la paleoclimatología debe recuperar testimonios del clima del pasado para disponer de referentes ante las incertidumbres futuras y mejorar en lo posible el funcionamiento de los modelos climáticos.

El impulso que ha experimentado la paleoclimatología ha sido notable en los últimos decenios; en primer lugar, gracias a los avances en diferentes técnicas de datación y análisis químicos, que ofrecen altas fiabilidades y precisión en los datos generados. Pero en segundo lugar, por la perentoria necesidad que existe de generar series de datos climáticos cuya escala temporal vaya más allá de la habitual disponibilidad de las series instrumentales modernas. Determinados patrones de la variabilidad climática, y en especial las manifestaciones extremas, se presentan en unas frecuencias suficientemente bajas para dificultar o impedir su pertinente estudio.

Además de las técnicas disponibles, la paleoclimatología ha aportado nuevas fuentes de información, ya sea en testimonios físicos, biológicos o humanos, de naturaleza muy diferente. Los trabajos que se realizan en la actualidad presentan un gran potencial por los resultados que se irán obteniendo sobre la variabilidad climática, y por las sinergias que se obtendrán cuando se pueda trabajar con una integración de grandes cantidades de datos complementarios y obtenidos desde diferentes fuentes de información.

El trabajo que aquí se presenta es el resultado de una investigación paleoclimática centrada en la obtención de información en fuentes documentales históricas. En un primer apartado se mostrará la disponibilidad de documentos y los métodos aplicados para seleccionar la documentación y recuperar el tipo de información que transmite la mayor y mejor cantidad de datos climáticos posible. Se describirán los resultados obtenidos en una primera aproximación al comportamiento de los episodios de sequía y de precipitaciones generadoras de inundaciones. Por último, se discutirán los resultados tanto desde la vertiente metodológica como estrictamente climática para apuntar futuras líneas de trabajo, las dificultades a vencer y los aspectos que muestran mayor fiabilidad.

MATERIAL Y MÉTODO

La climatología histórica es una especialidad relativamente reciente a pesar de emplear documentación histórica generada siglos atrás. La recopilación de información de carácter climatológico o meteorológico en fuentes documentales históricas es una investigación con las lógicas dificultades y potencialidades (Pfister et al., 2002).

Los aspectos negativos son la gran cantidad de series documentales potencialmente útiles para la reconstrucción climática. La cantidad ingente de documentos susceptibles de contener aunque sea una mínima anotación sobre una circunstancia del tiempo atmosférico obliga a aplicar unas pautas metodológicas de selección. La experiencia previa acumulada por investigadores en contextos historiográficos similares lleva a la aplicación de criterios que reducen las fuentes documentales útiles únicamente a aquellas que cumplen con unos niveles óptimos de fiabilidad y objetividad (Alexandre, 1987). Respecto a las informaciones obtenibles, la investigación debe centrarse en la generación de series de datos que hayan podido ser datados con precisión, que se hayan generado con homogeneidad durante largos periodos de tiempo, sin registrar discontinuidades, salvo algún vacío esporádico, y que tengan la posibilidad de ser mínimamente cuantificables (Le Roy Ladurie, 1967).

Las informaciones que cumplen estas características pueden ser susceptibles de generar series de datos “proxy” de carácter climático. En diferentes contextos históricos europeos, se pueden encontrar diferentes conjuntos de información, siendo difícil establecer una pauta común, tanto en lo que respecta a las características formales de las series (duración, densidad de información, grado de resolución, disponibilidad de cobertura espacial), como por la propia naturaleza de los contenidos climáticos recuperados. En el caso español, las informaciones que

mejor se ajustan a estas especificaciones son de dos tipos. Por un lado, las descripciones directas de eventos meteorológicos extremos (grandes inundaciones por lluvias torrenciales, olas de frío, temporales de mar, vendavales...). Esta información se localiza en los libros de actas administrativas de las autoridades de ámbito local. Por otro lado, se encuentran también referencias a periodos de sequía, pero no a través de su descripción directa sino a partir del registro de las ceremonias litúrgicas celebradas para detener la situación de sequía y obtener una lluvia que reparara el déficit hídrico acumulado. Estos testimonios obtenidos de una respuesta religiosa-cultural ante una adversidad ambiental se encuentran también en las fuentes documentales administrativas de instituciones de gobierno local. En este caso, obtenibles tanto de las autoridades municipales como eclesiásticas.

La fiabilidad de las fuentes consultadas y la credibilidad de la información obtenida se presentan con un alto grado de confianza. Uno de los principales obstáculos para la recuperación de esta información, sin embargo, es la organización misma de la documentación administrativa: la concentración de numerosos y variados aspectos de la vida municipal cotidiana, con asuntos de trámite, regulaciones, nombramientos, junto con los aspectos verdaderamente extraordinarios y que incluso llegan a comportar impactos, obliga a consultar una gran cantidad de material para llegar a la recopilación de la información climática. La baja densidad de la información de una temática específica exige una gran carga de trabajo para realizar las reconstrucciones de series de datos, y más todavía cuando se trata de trabajar en amplios periodos temporales.

Las etapas de clasificación y tratamiento de la información son algo más complejos que la recopilación. Se trata de una fase crítica en la que unas descripciones textuales deben convertirse en datos expresados numérica-

mente. Este proceso de cuantificación se ve facilitado por las clasificaciones de la información obtenida.

En el caso de las inundaciones (Barriandos y Martín-Vide, 1998), los episodios pueden clasificarse en tres tipos, según los niveles alcanzados y la severidad de los daños producidos:

1) Crecidas ordinarias: episodios de lluvias que producen el aumento de los caudales en los sistemas fluviales, sin llegar a ocasionar desbordamientos ni daños significativos.

2) Inundaciones extraordinarias: episodios de lluvias que producen desbordamientos en los sistemas fluviales, que pueden llegar a ocasionar daños significativos pero en ningún caso destrucción de elementos permanentes.

3) Inundaciones catastróficas: episodios de lluvias que producen desbordamientos de gran magnitud que ocasionan la destrucción de infraestructuras hidráulicas, edificios, cultivos, vías de comunicación, etc.

En el caso de la vertiente pluviométrica opuesta, los episodios de sequía, la clasificación y cuantificación no viene dada por elementos descriptivos de la propia sequía que pueden obtenerse de la documentación histórica, sino por la identificación del tipo de ceremonia litúrgica que en relación a la severidad del evento las autoridades decidían aplicar sucesivamente hasta que la sequía se daba por concluida (Martín Vide y Barriandos, 1995). Cada población tiene una tradición local específica, con advocaciones y celebraciones de carácter singular. Sin embargo, los aspectos formales básicos se repiten en todos los casos ya que las directrices para el diseño y organización de los actos litúrgicos emana de El Vaticano. El resultado es una clasificación muy clara y permanente para los diferentes actos litúrgicos vinculados a ceremonias de rogativas de diferente gravedad. Para llegar a un sistema complejo de niveles de rogativas, obviamente, debe atenderse un fenómeno

de prolongada persistencia, como es en este caso la sequía o déficit persistente en la precipitación:

-Nivel I: Oraciones simples, dentro del ámbito de la iglesia.

-Nivel II: Exposición de reliquias o imágenes de advocaciones específicas dentro del ámbito de la iglesia.

-Nivel III: Procesiones con reliquias o imágenes de advocaciones específicas, con recorridos significados dentro de la población. Se trata ya de una celebración pública.

-Nivel IV: Inmersión en agua de reliquias o imágenes de advocaciones específicas. Es una celebración pública sustituida por otras de similar solemnidad después de la prohibición vaticana de sumergir reliquias de 1619.

-Nivel V: Peregrinación a lugares de especial devoción para venerar reliquias o advocaciones fuera del ámbito local.

Con estas herramientas de clasificación puede hacerse un seguimiento aceptable de la variabilidad temporal de las precipitaciones, especialmente en sus manifestaciones extremas. Sin embargo, la información histórica es poco sensible para detectar las variaciones pluviométricas de menor magnitud, cercanas a valores medios. Tampoco es sensible a las variaciones en el régimen térmico, quizás por las características propias del clima mediterráneo en el que estamos ubicados.

Siguiendo los criterios de consulta de fuentes documentales y de clasificación de la información obtenida, en años anteriores se ha procedido a realizar una recopilación sistemática en diferentes localidades españolas (Barcelona, Toledo, Santiago de Compostela, Murcia y Sevilla). La investigación se ha realizado en diferentes fases, en un periodo prolongado de tiempo debido a la carga de trabajo que supone la reconstrucción de cada serie, pero en todo momento se han mantenido los mismos criterios de tratamiento de la información y generación de las series de datos.

RESULTADOS

Las series obtenidas constituyen un conjunto preliminar de índices hídricos, con una muy escasa representatividad espacial si se tiene en consideración la enorme complejidad de los climas presentes en la Península Ibérica. Se trata más bien de un esfuerzo inicial por demostrar la posibilidad de extender la investigación en climatología histórica a diferentes sectores y la conexión entre investigaciones paralelas. La climatología histórica es una especialidad relativamente reciente en España, lo que impide la exposición de unos resultados definitivos o muy avanzados. Sin embargo, esta situación constituye a su vez una oportunidad para mostrar pautas metodológicas y poder iniciar esfuerzos colectivos que permitan en un futuro no muy lejano la obtención de resultados útiles para la investigación climática. Afortunadamente, hay grupos que ya han iniciado trabajos en este sentido, obteniendo resultados relevantes en zonas como Andalucía Oriental (Rodrigo et al., 1994, 1995 y 1999) o Levante (Alberola, 1996, 2004a y 2004b).

En el presente trabajo, se han realizado índices hídricos a resolución anual en los que se muestran la frecuencia de sequías e inundaciones en los puntos de observación antes mencionados. El comportamiento de la sequía en España, perceptible a través del Índice Medio Compensado de Sequía (IMCS), se muestra en la Figura 1.

En primer lugar, debe comentarse el diferente comportamiento de la variabilidad de la sequía en los diferentes contextos climáticos peninsulares, con ejemplos evidentes en las muy bajas frecuencias en Santiago de Compostela y unas frecuencias de sequía sostenidamente elevadas en Murcia. Sin embargo, también deben indicarse algunas deficiencias ajenas a la variabilidad natural. En concreto, las ciudades que antes experimentaron procesos de industrialización y de cambio de actitudes políticas van dejando sin uso el sistema de rogativas por motivaciones

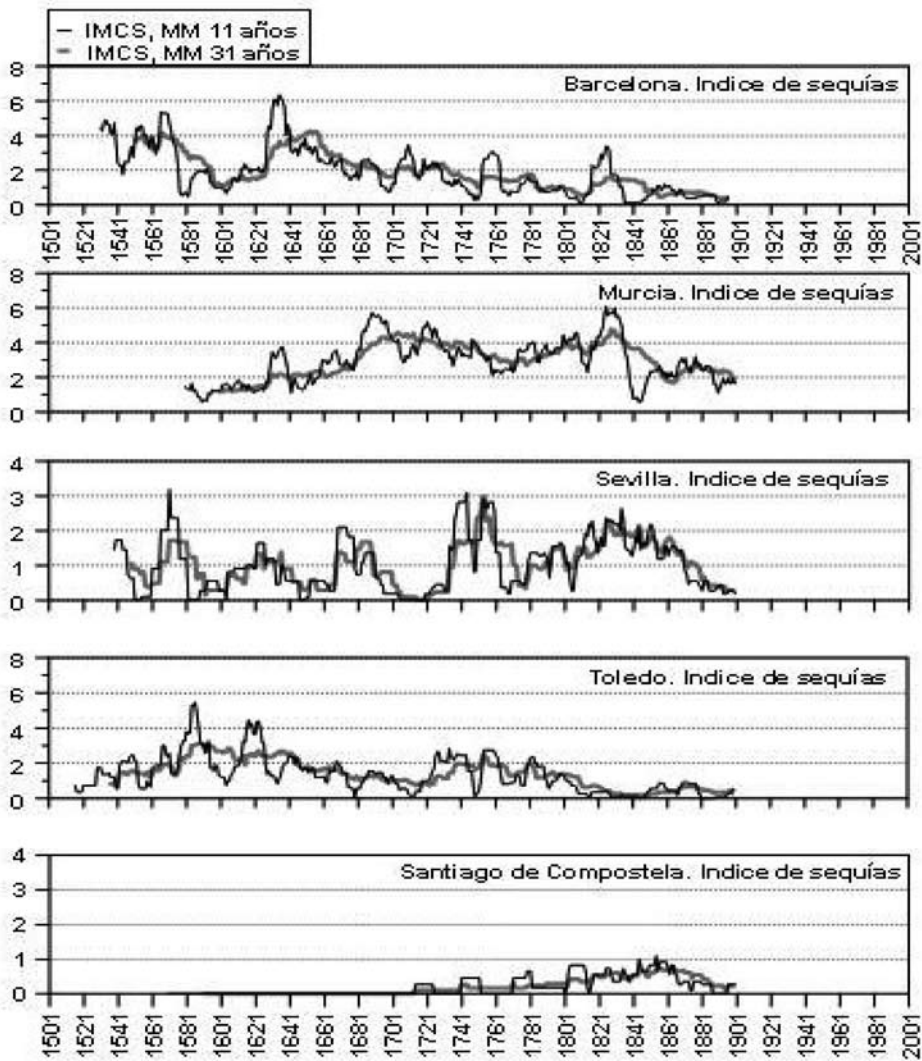


Figura 1. Frecuencia de las sequías en las localizaciones seleccionadas. Índice Medio Compensado de Sequía, expresado en medias móviles de 11 y 31 años.

ambientales. Ello ocasiona un problema de homogeneidad que impide interpretar climáticamente la tendencia a las bajas frecuencias de sequía que durante el siglo XIX aparecen, por ejemplo, en Barcelona. Un efecto similar se produce por la falta de consignación de las rogativas en la documentación administrativa, como sería el caso de Toledo.

La frecuencia de las sequías o, por lo menos, de los episodios de déficit pluviométrico

cuya afectación impulsaba a las comunidades agrarias a pedir rogativas para obtener lluvia, muestra unos patrones algo diferentes según se trata de la vertiente mediterránea o la atlántica. En la mediterránea, Barcelona y Murcia muestran coincidencias muy claras en el decenio de 1560, 1620, 1750 y 1820. En la vertiente atlántica, Toledo y Sevilla muestran los mismos pulsos de sequía frecuente y severa en los decenios de 1560, 1620, 1750 y 1820.

La única novedad es otro pulso perceptible en Sevilla en el decenio de 1660 y otro simultáneo en 1730.

En el caso inverso, la sequía también muestra episodios de muy baja frecuencia. En esta situación, las coincidencias entre ambas vertientes son muy similares. Aparecen periodos de muy escasa sequía en los años 1540-1550

en la vertiente atlántica, y pulsaciones generales entre 1580 y 1600, 1680-1720, aunque en la vertiente mediterránea se limita a 1700-1710, los años 1760-1770 y una última muy evidente entre 1840 y 1860.

Las inundaciones tienen un comportamiento bastante más homogéneo (Figura 2). Se observan tres pulsaciones de incremento de frecuen-

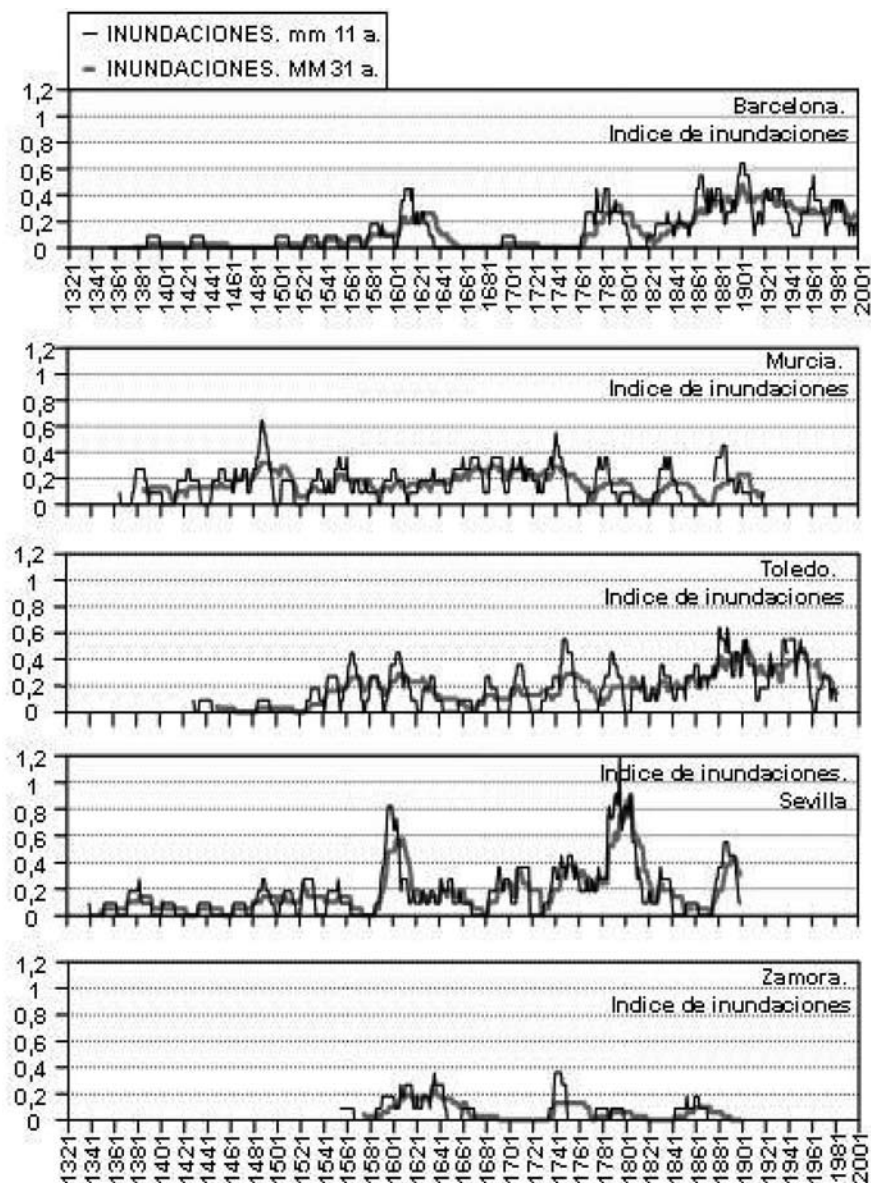


Figura 2. Índice de frecuencia de las inundaciones extraordinarias y catastróficas en las localizaciones seleccionadas. Valores expresados en medias móviles de 11 y 31 años.

cia de inundaciones en los años 1580-1620 (aunque en Murcia no se percibe), 1760-1800 y 1850-1870. Los decenios 1710-1750 tienen un comportamiento similar aunque con magnitudes no tan evidentes en conjunto. Su presencia es acusada en las localizaciones meridionales (Murcia, Sevilla y Toledo) con un comportamiento fluctuante que llega a ser uniforme en el decenio 1740-1750. La síntesis de los índices de todas las localidades promediados ofrece un resultado desigual (Figura 3).

por periodos menos secos, se mantiene relativamente constante hasta que llega el declive en el empleo de rogativas a mediados del siglo XIX. Sólo aparece como notable anomalía el fuerte descenso en la presencia de sequías en los decenios 1580-1620.

La frecuencia de las inundaciones catastróficas ofrece unas oscilaciones más evidentes. Las series en conjunto tienen unas frecuencias bajas, entre las que destacan dos oscilaciones entre 1600 y 1650 y una segunda

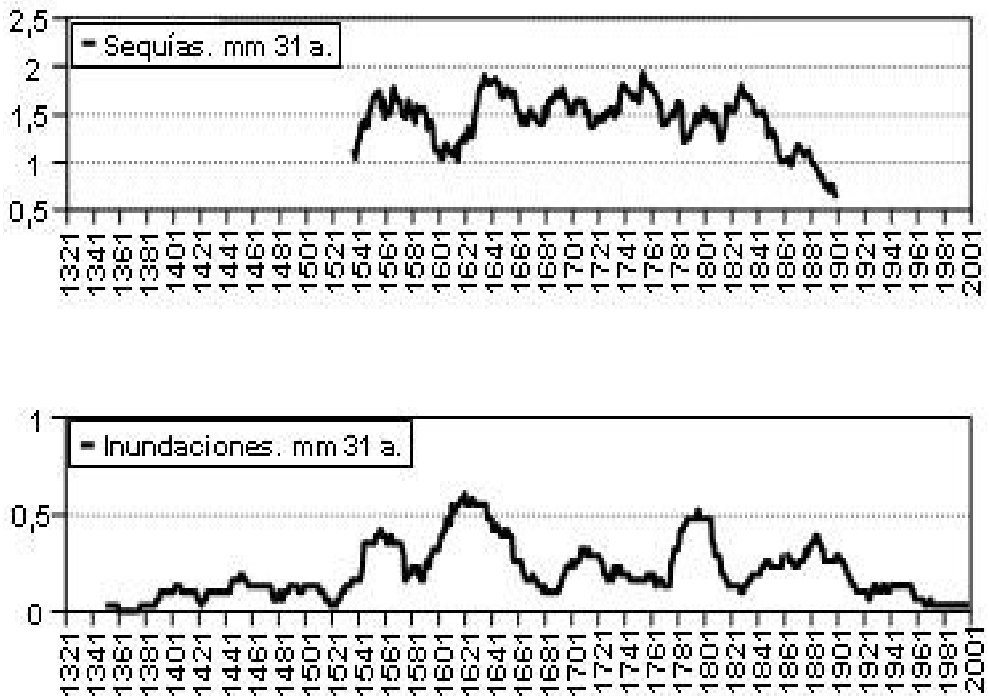


Figura 3: Promedio general de las frecuencias de sequía e inundaciones catastróficas. Valores expresados en medias móviles de 31 años.

Las sequías muestran una dinámica oscilante pero sin eventos climáticos significativos. Ciertamente, se producen unos picos en los que la sequía llega a ser muy frecuente y/o severa, como son los centrados hacia 1560, 1620, 1750 y 1820. Su secuencia, alternada

entre 1770 y 1810. Otras tres oscilaciones de menor magnitud se dieron entre 1540-1570, 1700-1720 y 1850-1890.

Cabe destacar como aspecto singular la coincidencia temporal entre los eventos de sequía acusada con la presencia de frecuentes

inundaciones. Parece que la atmósfera puede producir procesos en los que predominan las sequías o las inundaciones, pero otros pueden generar perfectamente anomalías positivas en las frecuencias de ambos riesgos climáticos.

DISCUSIÓN

La investigación de un fenómeno tan complejo como la variabilidad climática y que se da de forma extensa requiere la colaboración e integración de resultados de diferentes iniciativas de investigación e incluso de diferentes grupos. En algunas especialidades paleoclimáticas, la carga de trabajo para obtener la información y reconstruir series de datos es tan importante que imprime un ritmo de trabajo muy lento y los resultados todavía están lejos de tener un nivel óptimo.

A nivel metodológico, la recuperación de información histórica y su conversión en datos numéricos es una labor ciertamente comprometida. Es difícil encontrar referentes o contrastación de los datos generados para validar los métodos empleados. Por ello, una opción aceptable es el empleo de pautas metodológicas que se apliquen de forma generalizada para que los datos obtenidos tengan la homogeneidad suficiente para unos análisis climáticos en escalas espacio-temporales óptimas. Se trata de iniciar investigaciones con este ánimo y facilitar de este modo que tras un periodo más o menos prolongado los resultados tengan una cobertura temporal y espacial realmente útil y válida para la investigación climatológica.

CONCLUSIONES

Se puede concluir el trabajo con dos ideas básicas mirando hacia el futuro. Por una parte, constatar que la climatología histórica tiene un potencial de investigación muy

importante por la cantidad de información todavía conservada en archivos históricos y no explotada a efectos climáticos. El Patrimonio Documental es tan extenso que no parece haber límite en la posibilidad de extender líneas de trabajo.

Respecto a los primeros resultados, se aprecia una capacidad aceptable de detección y reconstrucción de la variabilidad pluviométrica.

El comportamiento de las sequías se aprecia con unas frecuencias irregulares pero en las que hay un patrón en oscilaciones climáticas de 10 a 20 años de duración en las que las sequías climáticas son frecuentes y severas; casi continuas. Las inundaciones se comportan de un modo parecido y en ocasiones oscilaciones de ambos fenómenos llegan a coincidir. Ello sólo confirma la opinión ya establecida de que durante la miniglaciación el régimen de precipitaciones es notablemente más irregular que en los episodios climáticos de carácter cálido. Si el cambio climático inducido por el hombre en un futuro próximo va a propiciar un incremento en la irregularidad pluviométrica, parece oportuno dirigir una mirada hacia el pasado reciente para encontrar referentes que nos ayuden a gestionar lo mejor posible las incertidumbres futuras.

AGRADECIMIENTOS

Grup de Recerca Consolidat "Paisatge i paleoambients a la muntanya mediterrània" (2005SGR01045). Proyecto Millennium, "European climate of the last millennium" (IP 017008-2). También se agradece la posibilidad de ultimar la recopilación de información al proyecto RAMSHES (REN2002-04584-C04-03/CLI)

BIBLIOGRAFÍA

- Alberola, A. (1996). La percepción de la catástrofe: sequía e inundaciones en tierras valencianas durante la primera mitad del siglo XVIII, *Revista de Historia Moderna* 15:257-269.
- Alberola, A. (2004a). Oscilaciones climáticas y coyuntura agrícola en tierras valencianas durante el reinado de Felipe V. En: *Felipe V y su tiempo*. E. Serrano (ed.): 201-224. Institución "Fernando el Católico".
- Alberola, A. (2004b). Temps de sequera, rogatives i avalots al sud del País Valencià (1760-1770). *Estudis d'Història Agrària* 17: 35-48.
- Alexandre, P. (1987). *Le climat en Europe au moyen âge*. Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, París.
- Barriendos, M. & J Martín Vide. (1998). Secular Climatic Oscillations as Indicated by Catastrophic Floods in the Spanish Mediterranean Coastal Area (14th-19th Centuries). *Climatic Change* 38: 473-491.
- Le Roy Ladurie, E. (1967). *Histoire du climat depuis l'an mil*, Flammarion, París.
- Martín Vide, J. & M. Barriendos. (1995). The use of rogation ceremony records in climatic reconstruction: a case study from Catalonia (Spain). *Climatic Change* 30: 201-221.
- Pfister, C., R. Brázdil, & M. Barriendos. (2002). Reconstructing Past Climate and Natural Disasters in Europe Using Documentary Evidence. *PAGES News* 10, 3: 6-8.
- Rodrigo, F. S., M. J. Esteban-Parra & Y. Castro-Díez,. (1994). An Attempt to Reconstruct the Rainfall Regime of Andalusia (Southern Spain) from 1601 A.D. to 1650 A.D. using Historical Documents. *Climatic Change* 27: 397-418.
- Rodrigo F. S., M. J. Esteban-Parra & Y. Castro Díez. (1995). Reconstruction of Total Annual Rainfall in Andalusia (Southern Spain) During the 16th and 17th Centuries from Documentary Sources. *Theoretical and Applied Climatology* 52: 207-218.
- Rodrigo F. S., M. J. Esteban-Parra, D. Pozo-Vazquez & Y. Castro Díez. (1999). A 500-year precipitation record in Southern Spain. *International Journal of Climatology* 19: 1233-1253.

CHAPTER 3 / CAPÍTULO 3

Temperature and Precipitation Changes in Andalusia in the Iberian Peninsula and Northern Hemisphere context

Cambios Climáticos Observados en la Temperatura y la Precipitación en Andalucía en el Contexto de la Península Ibérica y Hemisférico

Temperature and Precipitation Changes in Andalusia in the Iberian Peninsula and Northern Hemisphere context

Yolanda Castro-Díez, María Jesús Esteban-Parra, Matthias Staudt, Sonia Raquel Gámiz-Fortis.

Departamento de Física Aplicada, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, 18071 Granada. ycaastro@ugr.es, esteban@ugr.es, mstaudt@ugr.es, srgamiz@ugr.es.

ABSTRACT

The climatic change is not only a speculation but a quantifiable reality (IPCC, 2007). Spain lies in an area of special vulnerability; a continuous warming and a 20%-decrease in summer precipitation are assessed, a high uncertainty about winter precipitation persists. In this study, the observed climatic changes in Andalusia have been analyzed, based on the longest available series of maximum and minimum temperatures, as well as precipitation, the key variables in the detection and discussion of global and regional climatic changes. Furthermore, a correction of the urban effect has been applied to the monthly minimum temperatures.

A general decreasing trend is detected in the spring and annual precipitation series, very significant for spring and adjusted to the significance limits for annual data. Similar decreasing trends have been found in other areas of southern Europe, in rough agreement with the most general GCM estimations for the Mediterranean area.

The thermal evolution of the seasonal maximum temperatures shows an outstanding warming in spring about 2 °C, but the amplitude of the changes is smaller in autumn and winter (about 1 °C). Minimum temperature shows similar fluctuations but less pronounced, a total warming amplitude in the 20th century of around 1 °C is found. The minimum temperatures series in Seville, including a correction for the urban effect, indicate that this warming still persists, being nearly insensitive against the magnitude of the urban adjustment.

The mean temperatures in Andalusia have changed in agreement with those of the Iberian Peninsula, characterized by a warming in the 20th century in two periods: one in the first half of the 20th century and the second one starting in the 1970s, being more marked. This behaviour indicates a clear qualitative parallelism between the Andalusian and Iberian mean temperatures and the Northern Hemisphere ones. The thermal evolution resembles the behaviour of the global zonal average; this result suggests that the Andalusian and the Iberian temperatures are essentially governed by the radiative balance, whereas the dynamics play a less important role.

Key words: *climatic change, maximum temperature, minimum temperature, precipitation, Andalusia, tendency, point of change.*

Cambios Climáticos Observados en la Temperatura y la Precipitación en Andalucía en el Contexto de la Península Ibérica y Hemisférico

Yolanda Castro-Díez, María Jesús Esteban-Parra, Matthias Staudt, Sonia Raquel Gámiz-Fortis.

Departamento de Física Aplicada, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, 18071 Granada. ycastro@ugr.es, esteban@ugr.es, mstaudt@ugr.es, srgamiz@ugr.es.

RESUMEN

El cambio climático no es una especulación sino una realidad cuantificable (IPCC, 2007). Por lo que respecta a España, nuestro país se encuentra en una zona de especial vulnerabilidad, estimándose, junto a un calentamiento continuado, una reducción del 20% en la precipitación estival y persistiendo una alta incertidumbre respecto a la precipitación invernal. En este contexto se ha planteado aquí el análisis de los cambios climáticos observados en Andalucía, mediante el estudio de las series más largas de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación, como variables clave en la detección y discusión de cambios climáticos globales y regionales. También se ha llevado a cabo en este trabajo una corrección del efecto urbano para los datos de temperaturas mínimas mensuales.

Los resultados muestran que, de forma general, se detecta una tendencia decreciente en las series de precipitación de primavera y anual (ésta ajustada a los límites de significación). Estas tendencias decrecientes han sido encontradas en otras áreas del sur de Europa, y están en relativo acuerdo con las estimaciones más generales de los GCM para el área mediterránea.

En el examen de la evolución térmica de las temperaturas máximas estacionales, se constata un calentamiento importante en primavera, del orden de 2 °C, pero inferior en otoño e invierno (alrededor de 1 °C). Las temperaturas mínimas andaluzas muestran fluctuaciones similares a las máximas pero más suavizadas. El calentamiento total en el siglo XX es del orden de 1 °C. La corrección urbana aplicada a la serie de temperaturas mínimas de Sevilla muestra que este calentamiento se mantiene y es prácticamente insensible frente a la corrección urbana elegida.

La evolución de las temperaturas medias en Andalucía, en coincidencia con la de la Península Ibérica, se caracteriza por un calentamiento en el siglo XX en dos fases: en la 1ª mitad del siglo y, de forma muy destacada, a partir de los años 70. Este comportamiento, muestra un claro paralelismo cualitativo de las series de temperaturas medias de la Península Ibérica y Andalucía con las del Hemisferio Norte. El hecho de que la evolución térmica se parezca al comportamiento del promedio global zonal sugiere que las temperaturas en la Península Ibérica estén en gran medida gobernadas por el balance radiativo, con un papel menor de los fenómenos dinámicos.

Palabras clave: cambio climático, temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación, Andalucía, tendencia, punto de cambio.

INTRODUCCIÓN

En el Segundo Informe emitido por el IPCC (International Panel on Climate Change, 1996) se establecía ya que las concentraciones de los gases de efecto invernadero han ido aumentando continuamente desde la revolución industrial, debido a las actividades humanas, principalmente las industrias y el tráfico y que se detecta un calentamiento de la superficie terrestre, confirmando los conocimientos teóricos que vinculan las emisiones antropogénicas al efecto invernadero añadido. Las extrapolaciones de esta tendencia al futuro, en parte basadas en modelos climáticos, predicen un aumento sustancial de las temperaturas en el siglo XXI, salvo que se tomen medidas drásticas y globales de estabilización e incluso reducción de las emisiones. El Tercer Informe (IPCC, 2001), es más explícito aún, respondiendo con un sí rotundo a la pregunta de si el clima está cambiando. Esta valoración se basa en los resultados analizados hasta la fecha de elaboración del citado informe y están en concordancia con los recientemente presentados en febrero de 2007 en el Cuarto Informe.

En este Cuarto Informe se establece que once de los últimos doce años (1995-2006) están entre los doce años más cálidos de los registros instrumentales de temperatura superficial global (desde 1850). La tendencia lineal en los últimos 100 años (1906-2005) es de 0.74 [0.56 a 0.92] °C, siendo por tanto mayor que la que se estableció en el Tercer Informe, correspondiente al periodo 1901-2000, de 0.6 [0.4 a 0.8] °C. Desde 1900, la precipitación anual en los continentes del Hemisferio Norte (HN) ha continuado aumentando en latitudes medias y altas, mientras que ha disminuido en los subtrópicos, aunque hay indicios de una recuperación reciente. El aumento general registrado para las precipitaciones es coherente con las temperaturas más cálidas y con una mayor

humedad atmosférica, aunque las tendencias en las precipitaciones varían enormemente entre diferentes regiones y los datos no se encuentran disponibles para todo el siglo XX en algunas regiones continentales.

Los datos más recientes confirman esta tendencia también para la Península Ibérica y Baleares, donde para el año 2006 la anomalía media de las temperaturas respecto a la media del período de referencia 1961-1990 es de +1,34 °C. (Instituto Nacional de Meteorología, 2007). Este valor supera, aunque muy ligeramente, al observado en el año 2003 (+1,32 °C), que había sido hasta el momento el año más cálido en España desde 1989.

La creciente urbanización en el mundo actual constituye un impacto humano sobre el clima local. El término “isla urbana de calor” se vincula, en primer lugar, al efecto de elevación de las temperaturas en zonas urbanas. El efecto urbano no se limita a las temperaturas, puesto que el clima urbano es, en general, más húmedo y más nuboso, en comparación con el clima rural. Sin duda, la isla de calor es el rasgo urbano mejor estudiado y conocido. En latitudes medias, la mayor diferencia térmica entre una ciudad y sus alrededores suele darse por la noche, cuando el enfriamiento es menor en espacios urbanos, debido al calor emitido por las superficies urbanas. Esta diferencia alcanza su máximo en las temperaturas mínimas en la madrugada (Montávez et al., 2000). Depende de las condiciones meteorológicas, siendo mayor en noches claras y con calma - en situaciones anticiclónicas, cuando se maximiza el papel del enfriamiento radiativo. Diversos estudios coinciden en que el efecto urbano es pronunciado en las temperaturas mínimas, menor en las medias y tiende a desaparecer en las máximas (Unger, 1996; Colacino & Lavagnini, 1982). Puede considerarse demostrada la necesidad de eliminar el efecto urbano en estudios de cambios climáticos si se desea obtener resulta-

dos no sesgados por el crecimiento de las ciudades. La extensión de una isla urbana determinada depende de condiciones en pequeña escala, como la densidad y la geometría de edificaciones o la distribución de plantas industriales, carreteras y los demás espacios asfaltados y, de forma general, este efecto se hace importante en ciudades donde la población supera los 100.000 habitantes. En este contexto planteamos aquí el análisis de los cambios climáticos observados en Andalucía, mediante el estudio de las series de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación, como variables clave en la detección y discusión de cambios climáticos globales y regionales. También se ha planteado en este trabajo una corrección del efecto urbano para los datos de temperaturas mensuales. En el apartado de Datos, indicamos las series instrumentales analizadas en este trabajo. La metodología empleada para su análisis se especifica brevemente

DATOS

La base de datos utilizada en este trabajo ha sido suministrada por el Instituto Nacional de Meteorología. Consiste esencialmente en las series de temperatura máxima, mínima, media y precipitación, más largas de Andalucía. Aunque la cobertura de Andalucía lograda con las series estudiadas es aceptable, no ha sido posible emplear una base de datos más densa, como hubiera sido deseable, dado que ello supondría una drástica reducción de la cobertura temporal que impediría el propósito del estudio en la perspectiva del cambio a lo largo de un siglo de datos. La Tabla 1 muestra las series de temperatura y precipitación usadas, explicitando el primer y último año con datos así como la localización de las estaciones de medida. Los problemas de homogeneidad, extensión y rellenado de huecos en algunas series se han resuelto siguiendo el esquema propuesto por Staudt (2004).

Localidad	Temperatura	Precipitación	Longitud	Latitud	Altitud
Almería	1908-2003	1911-2003	227 W	3650 N	7
Cádiz (San Fernando)		1880-1997	612 W	3627 N	30
Córdoba	1911-2003	1901-2003	451 W	3750 N	92
Granada	1940-2003	1940-2003	357 W	3708 N	680
Huelva	1903-2003	1903-2003	656 W	3715 N	26
Jaén	1869-1983	1867-1983	347 W	3746 N	510
Jerez	1913-2003	1912-2003	603 W	3644 N	29
Málaga	1877-2003	1878-2003	425 W	3643 N	53
Sevilla (Anunciación)	1869-1980		559 W	3723 N	15
Sevila (Tablada)	1923-2003	1871-2003	600 W	3721 N	14

Tabla 1. Series utilizadas en este trabajo indicando el intervalo temporal cubierto por los datos, la longitud y latitud de cada estación en centésimas de grado y la altitud en m.

en el apartado siguiente y a continuación se presentan los resultados para cada una de las variables analizadas. Las conclusiones obtenidas nos permitirán contrastar resultados y corroborar las desfavorables previsiones, que dentro de las previsiones globales, corresponden a la Península Ibérica y, en particular, a Andalucía. Esta comparación se lleva a cabo en el apartado de Discusión.

Adicionalmente, para llevar a cabo la corrección del efecto de isla urbana de calor, se han usado los datos de población de Sevilla, resumidos en la Tabla 2, provenientes de las series TEMPUS de la población oficial de hecho del Instituto Nacional de Estadística. La corrección urbana se ha elaborado en este trabajo en base a estos datos, previamente interpolados a un dato de población por año.

Serie/ año	1900	1910	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1981	1991	2002
Sevilla	148.32	158.29	205.53	228.73	312.12	376.63	442.30	548.07	653.83	704.86	704.11

Tabla 2. Población (en miles) de las series TEMPUS del Instituto Nacional de Estadística.

METODOLOGÍA

El Análisis de Componentes Principales (PCA) es una técnica del análisis multivariante que permite extraer los patrones dominantes de las variaciones simultáneas de un campo o variable, reduciendo así las dimensiones del espacio observacional de los datos objeto de estudio, mediante la creación de combinaciones lineales, llamadas componentes principales que representan los modos predominantes de variabilidad. En Climatología, este método se ha usado ampliamente para determinar los patrones principales de variación de grupos de series temporales, incluyendo su regionalización, es decir, la asociación de los modos de variabilidad con las regiones geográficas donde son predominantes (Castro-Díez et al., 2002; Esteban-Parra et al., 1998; Hurrell et al., 2000; Rocha, 1999; Slonosky et al., 2001). Las bases teóricas de este método se explican en Preisendorfer (1988) o en Storch & Zwiers (1995).

En este trabajo hemos usado el PCA para obtener subgrupos de estaciones con características temporales comunes y cuya evolución pueda ser estudiada en conjunto. Esta regionalización ha sido hecha considerando cada variable por separado, es decir se ha hecho una regionalización sobre las características térmicas y otra de los regímenes de lluvias. Se han estudiado las diferencias de comportamiento entre los distintos regímenes de temperaturas máximas y mínimas y de precipitación, para cada estación y anualmente, en Andalucía. Esto nos ha llevado a una separación de la señal climática

en los datos, mediante la selección por procedimientos estadísticos del conjunto de componentes que explican la mayor porción de varianza significativa de los datos. En este trabajo se ha utilizado la regla de selección de North (North et al., 1982). En este trabajo todos los cálculos de PCA se han hecho usando el periodo 1880-2003.

Con el objetivo de evaluar las tendencias y los puntos de cambio en las series de temperatura y precipitación objeto de estudio, el siguiente paso después de obtener las series de componentes principales ha consistido en la aplicación de la prueba de Mann-Kendall, como procedimiento más eficiente para ello. La versión secuencial del estadístico de rango de Mann-Kendall, propuesta por Sneyers (1975), permite no sólo el estudio de tendencias y la detección de puntos de cambio, sino también la localización del comienzo aproximado de un cambio abrupto. Esta prueba parece ser el método más adecuado para analizar cambios climáticos abruptos en las series climatológicas.

Por otra parte, teniendo en cuenta que en los estadísticos de punto de cambio que usan sumas acumulativas, la existencia de correlación serial de los datos afecta al resultado, incluso para valores pequeños de la autocorrelación. Storch & Zwiers (1995) sugieren el preblanqueo de los datos antes de aplicar el test. En consecuencia, los datos han sido filtrados eliminando la correlación serial antes de aplicar el test.

Para llevar a cabo una corrección de la isla urbana de calor, hemos optado por una aproximación empírica y operativa

de la relación entre la temperatura y una medida de la urbanización como es la población, considerando como más adecuada (Englehart & Douglas, 2003) la propuesta por Kart et al. (1988), que vinculan la diferencia de temperatura urbana-rural con la población de la estación urbana, bajo la supuesta igualdad de condiciones meteorológicas en ambos observatorios, encontrando una parametrización de la forma:

$$\Delta T_{urbana-rural} = a \times \text{población}_{urbana}^{0.45}$$

Donde el coeficiente anual a de la regresión para las temperaturas máximas y mínimas (incluyendo la reducción a las condiciones europeas) para poblaciones con más de 100.000 habitantes es $2.394 \cdot 10^{-3}$ como valor promedio. Este valor oscila entre $3.024 \cdot 10^{-3}$ y $1.694 \cdot 10^{-3}$, al establecer un rango de correcciones alta y baja, moviéndonos entre los límites de significación de $\pm 95\%$.

La corrección urbana de las temperaturas máximas es de una amplitud muy reducida y mayoritariamente negativa, siendo las máximas urbanas en general más bajas que las rurales. Este hecho puede deberse principalmente a la atenuación de la radiación incidente por los contaminantes atmosféricos (gases y aerosoles), efecto que predomina ligeramente sobre otros efectos de signo opuesto, como es la eliminación rápida de las aguas de lluvia, que favorecería un aumento de las temperaturas máximas urbanas. En este trabajo se ha decidido no aplicar una corrección urbana a las series de temperaturas máximas, considerando que los resultados encontrados en la literatura no indican sistemáticamente la existencia de un efecto inequívoco de la isla urbana en las temperaturas máximas, que no se conoce con certeza el mecanismo dominante del efecto urbano en las máximas y que

la corrección urbana de las máximas en Karl et al. (1988) no es significativamente distinta de cero. A diferencia de las temperaturas máximas, en las mínimas no hay ambigüedad acerca de la naturaleza del efecto urbano térmico. Asimismo, bajo la consideración de que este efecto se hace importante en ciudades donde la población supera los 100.000 habitantes, hemos aplicado la corrección a la serie de Sevilla. Además se ha optado por ajustar en base anual, sin tener en cuenta las posibles diferencias estacionales, dado que la corrección urbana interesa para la evaluación de cambios climáticos a escalas interanuales.

RESULTADOS

- Detección de cambios pluviométricos

En la Tabla 3 se presentan los factores de carga obtenidos en el estudio de las series estacionales y anual de precipitación tras la aplicación del PCA.

Se tienen dos vectores propios significativos para los datos anuales y de otoño y uno en los demás casos. El primer EOF muestra correlaciones significativas para todas las estaciones, si bien debe destacarse cómo Almería muestra los valores más bajos en todas las estaciones y consecuentemente en el total anual. Teniendo en cuenta que el segundo EOF anual y de otoño representa fundamentalmente esta estación, se ha optado por llevar a cabo el estudio del primer EOF y analizar adicionalmente y por separado el comportamiento de las series estacionales y anuales de Almería.

Las series correspondientes a la primera componente principal para las anomalías de precipitación en cada estación así como para el total anual de precipitación, respecto al periodo 1961-90, junto con sus medias móviles de 10 años, se han representado en la Figura 1 (gráficos a, b, c, d y e), su estudio permite un primer análisis de las

Localidad	Anual	Primav.	Verano	Otoño	Invierno
Almería	0.529	0.493	0.406	0.515	0.641
Córdoba	0.779	0.792	0.801	0.842	0.85
Granada	0.612	0.784	0.737	0.712	0.873
Huelva	0.693	0.821	0.768	0.776	0.885
Jaén	0.789	0.774	0.684	0.796	0.841
Jerez	0.889	0.913	0.898	0.864	0.892
Málaga	0.709	0.812	0.788	0.724	0.814
San Fernando	0.882	0.907	0.787	0.898	0.909
Sevilla (Tablada)	0.918	0.891	0.885	0.898	0.948
Var. Exp.	52.78	58.68	52.37	56.00	65.69

Tabla 3. Factores de carga obtenidos en el análisis de los datos de precipitación y porcentaje de varianza explicada (Var. Exp.) por el primer EOF.

distintas etapas secas o lluviosas en la zona bajo estudio. La 1ª PC asociada a los datos anuales presenta un primer periodo húmedo que concluye hacia 1900, seguido por un largo periodo de leve sequía o valores cercanos a la media que termina a mediados de los años 30. De este periodo destaca la poca variabilidad de la precipitación sobre todo desde 1900 hasta 1930. Entre 1945 y finales de los 50 se desarrollan unos años secos, seguidos por un periodo húmedo que concluye a principios de los 70. Los últimos años se caracterizan por la sequía, con sólo cuatro años con valores por encima de la media, de los que destacan 1989 y 1996, años en los que las precipitaciones de otoño e invierno respectivamente fueron muy abundantes.

La serie de primavera, muestra en general las mismas modulaciones en periodos húmedos y secos que la del total anual. Cabe destacar en ella una muy baja variabilidad desde mediados de los 70 hasta el final del registro, que confiere a este periodo un carácter estabilizado en condiciones secas. Las series de otoño e invierno, como estaciones responsables de la contribución principal a la precipitación total, son las que confieren el carácter más seco al periodo 1940-1960 fundamentalmente por el comportamiento en otoño, y más húmedo al

periodo 1960-1975, especialmente por el comportamiento de la serie invernal. En ambas series el final de los registros se presenta sin anomalías destacables.

La serie de anomalías de precipitación anual de Almería destaca en primer lugar por sus bajísimos valores dentro de una región donde las precipitaciones son también bajas. A lo largo de todo el registro sólo cabe destacar nuevamente el año 1989 en el que la precipitación recogida en otoño alcanza el máximo histórico. Dentro de este carácter general seco, el de los años comprendidos ente 1940 y comienzos de los 70 es ligeramente más húmedo. Al igual que en la serie anual correspondiente a la 1ª PC, los últimos años del registro muestran también un carácter ligeramente más seco. En las series estacionales no hay características reseñables respecto a las ya comentadas.

Las Figuras 1 y 2 muestran también en sus columnas derechas (gráficos f, g, h, i y j), los resultados obtenidos al aplicar el test de Mann-Kendall a las series anual y estacionales de las PCs de la precipitación en Andalucía y en Almería, respectivamente. Las correlaciones seriales en estas series son prácticamente cero, de aquí que los resultados del test sobre las series filtradas y sin filtrar sean idénticos. Su análisis revela

una clara tendencia decreciente en la serie de precipitación anual que comenzando en los años 70 llega a alcanzar el límite de significación. Este resultado vuelve a apare-

cer y de forma aún más clara en la serie de primavera, donde se supera ampliamente el límite de significación, como resultado del carácter seco estabilizado que ya ha sido

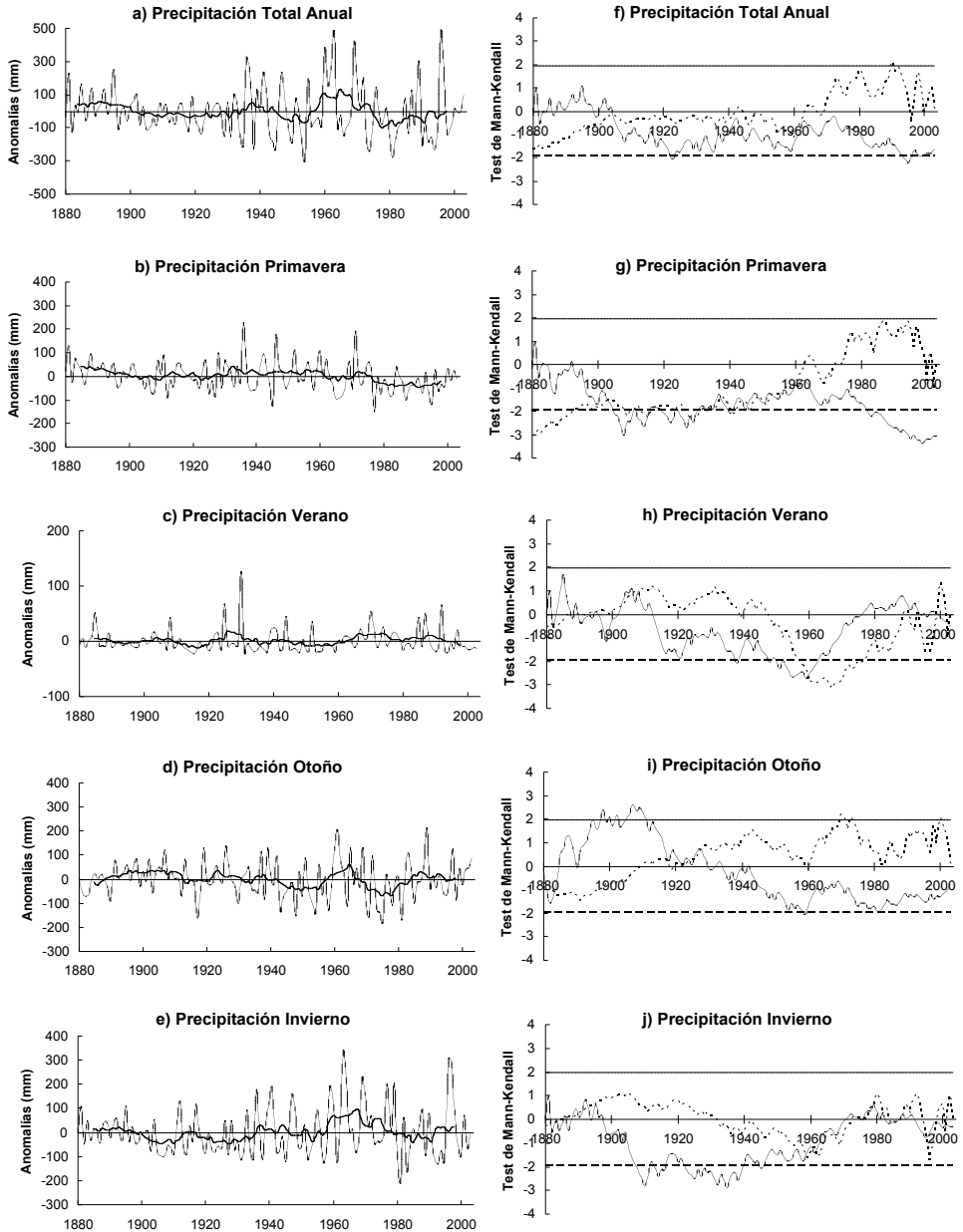


Figura 1. Columna izquierda: series anual y estacionales de anomalías de precipitación (---) en mm, respecto al periodo 1961-90, y medias móviles de 10 años (—), correspondientes a las primeras componentes principales. Columna derecha: resultados obtenidos al aplicar el test de Mann-Kendall a estas series.

comentado. El resto de las series estacionales no muestran tendencias destacables. El resultado del test de Mann Kendall para las series de Almería, aunque con una menor

significación, muestra en general resultados acordes con los obtenidos para las primeras componentes principales. El resultado más destacado corresponde a la serie de prima-

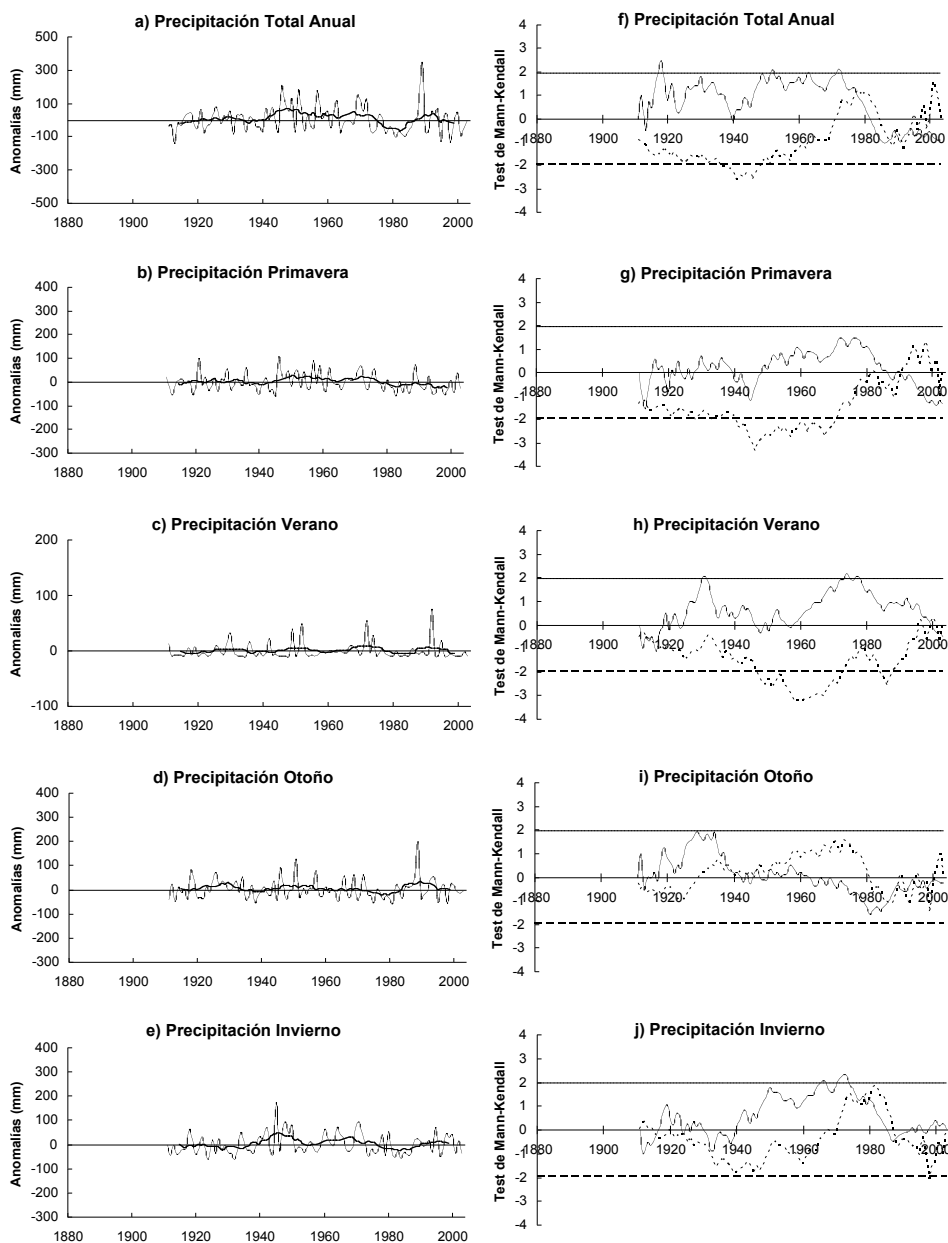


Figura 2. Columna izquierda: series anual y estacionales de anomalías de precipitación (--) en mm, respecto al periodo 1961-90, y medias móviles de 10 años (—), correspondientes a Almería. Columna derecha: resultados obtenidos al aplicar el test de Mann-Kendall a estas series.

vera donde vuelve a detectarse una tendencia decreciente a partir de 1970, y aunque no llega a superarse, casi se alcanza el nivel de significación.

- Detección de cambios térmicos

Las Tablas 4, 5 y 6 muestran los factores de carga obtenidos en el estudio de las series estacionales y anuales de temperatura máxima, mínima y media, respectivamente tras el análisis PC.

En general, sólo el primer EOF es significativo, presentando altas correlaciones en todas las estaciones tanto para las temperaturas máximas como para las mínimas, es decir, todas las estaciones aparecen claramente agrupadas en el primer EOF, que explica una gran cantidad de varianza. Así pues, los resultados confirman un comportamiento térmico unitario del clima Andaluz. Las Figuras 3 y 4, en las columnas situadas a la izquierda (gráficos a, b, c, d y e), muestran las series de anomalías de temperatura respecto al periodo 1961-90, asociadas a las primeras componentes principales para las temperaturas máximas y mínimas respec-

tivamente, junto con sus correspondientes medias móviles de 10 años.

Como se observa en la Figura 3a-e para la temperatura máxima, hasta mediados de los años 40 las temperaturas máximas se mantienen en promedio por debajo de la media. El periodo siguiente, hasta mediados de los 50, tiene un carácter más cálido durante todas las estaciones, excepto en invierno, que se mantiene con temperaturas máximas por debajo de la media hasta los años 70. Son destacables las fuertes anomalías frías ocurridas en las primaveras, veranos y otoños de la década de los 70, que se reflejan también en los promedios de temperaturas máximas anuales. A partir de los 70 se inicia un periodo de aumento en las temperaturas máximas que afecta a todas las estaciones, siendo en promedio superior a 1 °C y alcanzado valores cercanos a los 2 °C en primavera y verano. Este aumento continúa hasta el final de los registros en invierno y muy destacadamente en primavera, mientras que en verano y en otoño, así como en los promedios anuales, se detecta un crecimiento

Localidad	Anual	Primav.	Verano	Otoño	Invierno
Almería	0.705	0.820	0.781	0.694	0.752
Córdoba	0.852	0.884	0.904	0.909	0.835
Granada	0.799	0.816	0.738	0.891	0.831
Huelva	0.833	0.914	0.849	0.920	0.828
Jaén	0.677	0.842	0.776	0.806	0.686
Jerez	0.809	0.928	0.863	0.913	0.638
Málaga	0.667	0.768	0.381	0.740	0.543
Sevilla (Anunciación)	0.801	0.902	0.834	0.895	0.781
Sevilla (Tablada)	0.876	0.929	0.825	0.961	0.888
Val. Prop.	5.534	6.794	5.572	6.710	5.208
Var. Exp.	61.48	75.49	61.91	74.56	57.86

Tabla 4. Factores de carga obtenidos en el análisis de los datos de temperatura máxima y porcentaje de varianza explicada por el primer EOF.

Localidad	Anual	Primav.	Verano	Otoño	Invierno
Almería	0.796	0.827	0.849	0.711	0.907
Córdoba	0.543	0.716	0.501	0.579	0.899
Granada	0.887	0.787	0.888	0.906	0.936
Huelva	0.702	0.767	0.758	0.826	0.916
Jaén	0.804	0.899	0.767	0.851	0.821
Jerez	0.856	0.846	0.865	0.855	0.931
Málaga	0.730	0.592	0.621	0.701	0.811
Sevilla (Anunciación)	0.781	0.875	0.749	0.854	0.947
Sevilla (Tablada)	0.818	0.855	0.735	0.905	0.959
Val. Prop.	5.520	5.706	5.114	5.621	7.256
Var. Exp.	61.33	63.40	56.82	62.46	80.62

Tabla 5. Factores de carga obtenidos en el análisis de los datos de temperatura mínima y porcentaje de varianza explicada por el primer EOF.

Localidad	Anual	Primav.	Verano	Otoño	Invierno
Almería	0.612	0.788	0.757	0.685	0.751
Córdoba	0.843	0.905	0.810	0.860	0.930
Granada	0.835	0.810	0.861	0.894	0.860
Huelva	0.740	0.851	0.802	0.839	0.840
Jaén	0.842	0.896	0.831	0.866	0.819
Jerez	0.835	0.889	0.850	0.889	0.871
Málaga	0.715	0.757	0.640	0.744	0.801
Sevilla (Anunciación)	0.769	0.861	0.818	0.890	0.875
Sevilla (Tablada)	0.882	0.917	0.860	0.957	0.970
Val. Prop.	5.513	6.554	5.805	6.343	6.530
Var. Exp.	61.26	72.83	64.50	70.49	72.56

Tabla 6. Factores de carga obtenidos en el análisis de los datos de temperatura media y porcentaje de varianza explicada por el primer EOF.

final más suavizado de las temperaturas máximas.

Para las temperaturas mínimas (Figura 4a-e), también el comienzo de las series muestra un carácter más frío en todas las estaciones, que resulta más acusado durante la década de 1910. Las temperaturas mínimas sufren un periodo de ascenso, detectable en todas las estaciones excepto en invierno, que se inicia hacia 1940, haciendo que el periodo hasta aproximadamente 1965, resulte de carácter cálido. Igual que para las temperaturas máximas, son destacables las anomalías frías de las temperaturas mínimas ocurridas en los 70, especialmente en verano y otoño. También al igual que en las máximas,

se detecta un periodo de aumento de las temperaturas mínimas que se inicia en los 70, cuyo valor es superior a 1 °C en promedio, con carácter más acusado en primavera y en verano. El ascenso se mantiene en todas las estaciones hasta el final de los registros.

En las Figuras 3 y 4, en las columnas situadas a la derecha (gráficos f, g, h, i y j), se presentan los resultados del estadístico de Mann-Kendall para las series anuales y estacionales de temperaturas máximas y mínimas, respectivamente. De forma general, es destacable que, aunque existen diferencias estacionales en los periodos de crecimiento más o menos acusados, los resultados confieren un carácter

estadísticamente significativo a los aumentos de las temperaturas máximas y mínimas, tanto estacionalmente como en promedios anuales. Así, para las temperaturas máximas,

se detecta un crecimiento que comienza a partir de 1940 en todas las estaciones menos en invierno, en el que se retrasa hasta los años 70. En todas las estaciones, incluyendo los

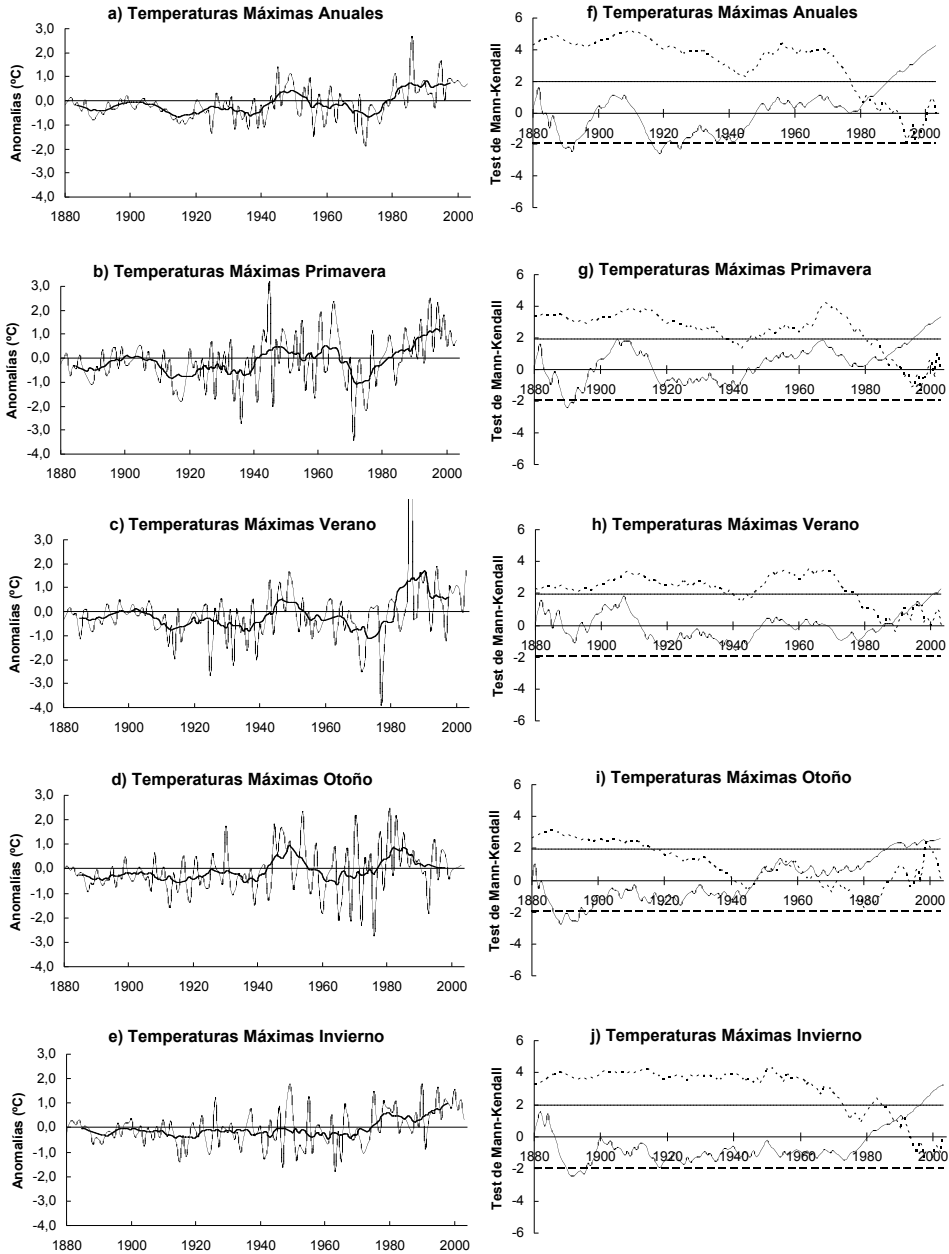


Figura 3. Columna izquierda: series anual y estacionales de anomalías de temperaturas máximas (--) en °C, respecto al periodo 1961-90, y medias móviles de 10 años (—), correspondientes a las primeras componentes principales. Columna derecha: resultados obtenidos al aplicar el test de Mann-Kendall a estas series.

promedios anuales, las temperaturas máximas experimentan un acusado crecimiento a partir de los 70, que hacia los 90 ya supera los límites de significación. Excepto en otoño,

este aumento tiene el carácter de cambio abrupto localizado en la década de los 80.

Respecto a las temperaturas mínimas (Figura 4f-j), cabe destacar que el crecimiento

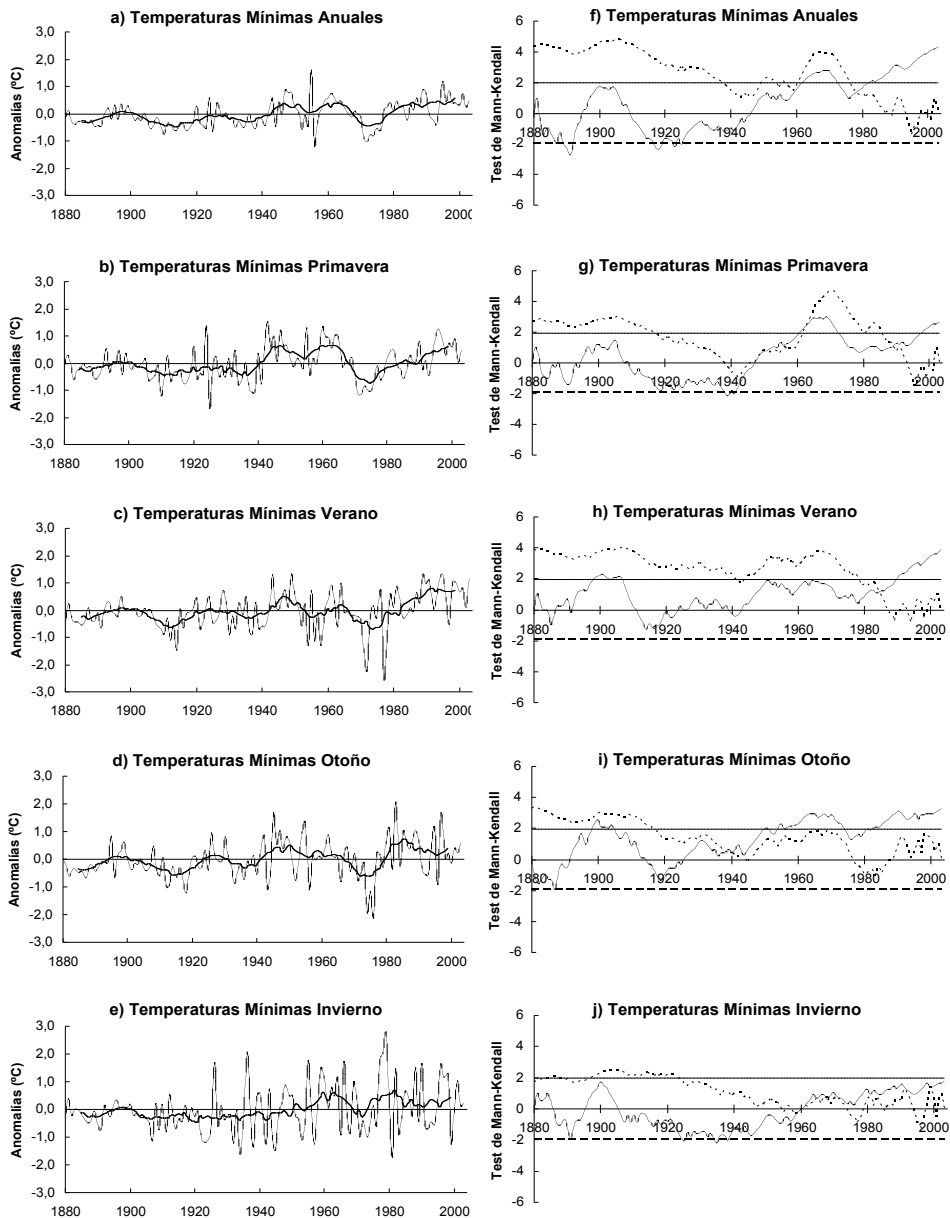


Figura 4. Columna izquierda: series anual y estacionales de anomalías de temperaturas mínimas (--) en °C, respecto al periodo 1961-90, y medias móviles de 10 años (—), correspondientes a las primeras componentes principales. Columna derecha: resultados obtenidos al aplicar el test de Mann-Kendall a estas series.

significativo comienza antes que para las máximas, adelantándose de los años 40 a los 20. Hay también que resaltar que aunque en invierno este crecimiento no llega a superar los límites de significación, sí muestra un carácter continuado y, en el resto de las estaciones, así como en los promedios anuales, se encuentra un crecimiento mantenido de las temperaturas mínimas que supera ampliamente los límites de significación. En verano este crecimiento tiene el carácter de cambio abrupto, de nuevo localizado como en las máximas, en la década de los 80.

- Corrección del efecto urbano

La Figura 5 muestra la evolución de las temperaturas mínimas en Sevilla sin y con la corrección del efecto urbano. El ascenso altamente significativo en el siglo XX persiste tras aplicar esta corrección. Las pruebas t superan ampliamente el nivel de confianza de 99.99%. El calentamiento en Sevilla a lo largo del siglo XX (comparando los treinta primeros y los treinta últimos años del siglo XX), tras aplicar la corrección urbana, es de 1.6 °C, de modo que su detección es insensible frente a la corrección urbana elegida.

DISCUSIÓN

- Discusión de los cambios pluviométricos en Andalucía

Los promedios anuales de precipitación están básicamente relacionados con las precipitaciones de Septiembre a Mayo. El invierno es la estación que más influye en el curso anual de la precipitación, le siguen en importancia la precipitación de primavera y otoño, siendo la precipitación de verano de escasa importancia en el curso anual, dados los bajos valores que se suelen recoger en estos meses (en muchos años cero).

En Andalucía, al igual que en la meseta y noroeste (Esteban-Parra et al., 1998), las precipitaciones son debidas a la circulación zonal con flujos de componente Oeste, asociados con las masas de aire polar marítimo, mP y tropical marítimo, mT. Según Capel Molina (1981) de estos flujos los más frecuentes son los del SW, constituidos por aire polar marítimo de retorno y aire marítimo tropical, seguidos de los de componente W pura, y por último los del NW (estos últimos suelen llegar muy debilitados al sur de la Península, dejando cantidades pequeñas de lluvia). Obsérvese como sólo la Cordillera

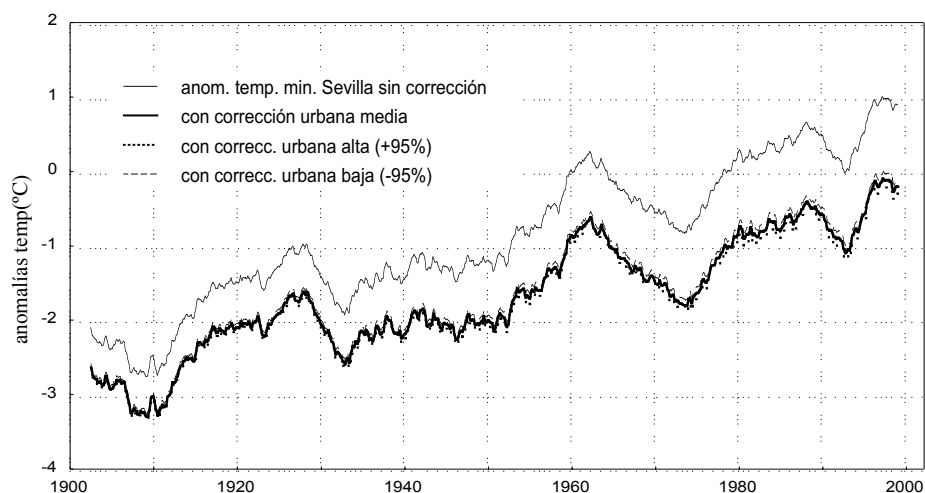


Figura 5. Medias móviles de 5 años de las anomalías de temperaturas mínimas en Sevilla, con y sin corrección de isla urbana.

Penibética tiene una dirección transversal a los vientos de poniente, más frecuentes de Noviembre a Mayo, lo cual queda reflejado en la distinción de la estación de Almería durante el verano y el otoño

El régimen de lluvias mediterráneo es particularmente intenso durante el otoño. Las lluvias son producidas por flujos de componente este, asociados según Capel Molina a irrupciones meridianas de aire polar (marítimo de retorno) que ha girado ampliamente sobre el Atlántico, y por aire continental tropical (Linés, 1980). En ocasiones las gotas frías (depresión cerrada fría en altura) causan episodios de precipitación intensa. Los vientos cálidos y húmedos del Mediterráneo del E y SE traen fuertes lluvias sobre la región, especialmente si en altura vienen acompañados de aire frío.

En la serie de primavera y anual, el test de Mann-Kendall detecta descensos de la precipitación, que se inician alrededor de 1890. Este año es considerado como fin de la Pequeña Edad de Hielo, que parece estuvo caracterizada, al menos en Andalucía (Rodrigo, 1994, Rodrigo et al., 1995) por un aumento de las precipitaciones, lo cual concuerda con el carácter del cambio detectado y con el hecho de que la Pequeña Edad de Hielo parece que acabó de forma repentina, en menos de 10 años (Thompson & Mosley-Thompson, 1987).

Los periodos húmedos detectados concuerdan parcialmente con los obtenidos por otros autores. Así el periodo relativamente húmedo en el Mediterráneo hasta aproximadamente 1910 concuerda con el obtenido por Dauphine (1976) en su análisis sobre la precipitación en el sur de Francia y es encontrado por Maheras (1988) para todo el Mediterráneo occidental. Periodos húmedos de menor duración e intensidad se han encontrado también en el Mediterráneo occidental por Maheras (1988), entre los años 1958-63 y 1975-79 y en el resto del área peninsular (Esteban-Parra et al., 1998) Hay también una

buena concordancia entre los periodos secos. Así la década de los 20 aparece caracterizada en sus promedios anuales como seca en todo el Mediterráneo occidental (Maheras, 1988), en el sur de Francia (Dauphine, 1976), en París (Martin et al., 1981) y en el resto de España (Esteban-Parra et al., 1998).

Evidentemente la presencia e intensidad del anticiclón de las Azores es determinante en el régimen de lluvias andaluz. Pozo-Vázquez (2000) estudiando la influencia de la NAO sobre la precipitación, encuentra una correlación entre el índice NAO y el modo de variabilidad de las precipitaciones representativo del centro y SW de la Península Ibérica que en invierno alcanza el valor de -0.7. Mediante un análisis de regresión llega a establecer que las zonas más afectadas por variaciones en la NAO son Galicia, Portugal y oeste de Andalucía. En particular, en el oeste de Andalucía, situaciones con valores del índice NAO extremo positivo ($NAO > 1$) conducen a disminuciones de la precipitación del orden de un 40% y situaciones con valores del índice NAO extremo negativo ($NAO < -1$) conducen a aumentos en la precipitación del orden de un 50%. Así la secuencia de inviernos secos en el sur de Europa y área mediterránea y las anomalías húmedas en el norte de Europa durante los últimos 10 años están relacionadas con valores positivos del índice durante estos años. En este sentido, la mayor frecuencia y persistencia de la fase positiva de la NAO detectada a partir de los años 70 (Hurrell, 1995), justificaría la tendencia decreciente detectada en las series de precipitación andaluzas.

En un trabajo previo para estudiar la relación entre el ENSO y la precipitación de invierno (Pozo-Vázquez et al., 2005b), utilizando datos de temperatura de la superficie del mar de la región Niño-3 (GISST2.3, Rayner et al., 1996), que cubren el periodo 1871-1995, y datos de precipitación y presión en superficie (Climatic Research Unit, U.K.), que cubren el periodo 1874-1995, hemos encontrado la

existencia de un patrón significativo de anomalías de precipitación asociado a eventos La Niña, que corresponde a un patrón NAO positivo, con disminuciones entre un 20 y 30% en la precipitación media de invierno sobre el SW y Centro de la Península Ibérica. Estos resultados, que muestran una muy alta coherencia (>90%) afectan al comportamiento de la precipitación en Andalucía en su relación con situaciones La Niña.

- **Discusión de los cambios térmicos en Andalucía**

Se ha llevado a cabo un estudio comparativo entre la serie de anomalías de las temperaturas medias anuales respecto al periodo 1961-90, correspondientes a Andalucía y las de la Península Ibérica (Staudt, 2004) y del Hemisferio Norte (www.cru.uea.ac.uk). La Figura 6 muestra las medias móviles de 10 años de estas tres series en sus gráficos a), b) y c), respectivamente.

En la Península Ibérica a lo largo del siglo XX se detecta un calentamiento superior a 1 °C (superior a 1.5 °C si se contabiliza desde el final del siglo XIX). En Andalucía este ascenso es del orden de 1 °C.

Comparando las dos fases principales de tendencias crecientes, los años 1930 (incluyendo finales de los años 20) y el ascenso reciente, a partir de los 70, se constata en la serie del Hemisferio Norte una aproximada igualdad de las amplitudes de calentamiento. En la Península Ibérica y en Andalucía el ascenso térmico es mayor en la 2ª mitad del siglo XX, debido a una tendencia creciente más fuerte en los últimos 30 años.

En resumen, se detecta, tanto en la Península Ibérica como en Andalucía, un calentamiento de las temperaturas medias superior a 1 °C, en el siglo XX y especialmente pronunciado desde los años 70, muy significativo, incluso al aplicar una corrección del efecto urbano. Se encuentran diferencias regionales, en particular cambios pequeños en Galicia y moderados en el Mediterráneo, mientras que el valle del Ebro y el suroeste muestran

un importante calentamiento, alcanzando o superando la marca de 1 °C (Staudt, 2004). No se encuentra un patrón claro que vincule los cambios térmicos con la altitud o latitud geográfica. El calentamiento encontrado es parecido en sus rasgos elementales a la serie hemisférica, predominando de forma más clara el ascenso reciente en las series españolas, aunque al mismo tiempo, el nivel de significación es mayor en las temperaturas hemisféricas, debido a su menor variabilidad.

En un estudio de la variación de situaciones dinámicas, en base a datos mensuales de presiones en Europa y la región del Atlántico norte, Jacobeit et al. (2003) detectan un incremento en la frecuencia de situaciones anticiclónicas en la segunda mitad del siglo XX en el mes de julio, condición que contribuye al ascenso de las temperaturas. Respecto a la evolución térmica en el siglo XIX, Jones y Briffa (1995) encuentran en datos de temperatura de verano el enfriamiento de los años 70 a los años 80, confirmado en el presente estudio.

El ascenso térmico encontrado para Andalucía, así como el de la Península Ibérica (Staudt, 2004) están en concordancia con la literatura (Brunetti et al., 2000; Grieser et al., 2002; Xoplaki et al., 2003b). En general, consta un calentamiento en Europa occidental y central así como en el Mediterráneo occidental, al menos en la 2ª mitad del siglo XX, mientras que en el Mediterráneo oriental no hay indicios claros de ascenso térmico (Hasanean, 2001; Xoplaki et al., 2003a).

La intensidad de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), está relacionada con los contrastes térmicos interzonales (Kozuchowski, 1993), controla la distribución de calor, especialmente su intercambio meridional y el rango de temperaturas regionales, fundamentalmente en Europa, dado que sus condiciones térmicas están bajo la fuerte influencia de los factores circulatorios (Kozuchowski, 1993).

A pesar de ello, es difícil establecer relaciones entre la marcha de las temperaturas en Andalucía y la evolución del índice NAO.

En un trabajo previo (Castro-Díez et al., 2002), utilizando datos de reanálisis (NCEP/NCAR) de SLP y viento en superficie, para analizar la influencia de la NAO

sobre la temperatura en Europa, llegamos a encontrar cómo los resultados difieren sustancialmente en la Península Ibérica respecto al centro y norte de Europa. Las condiciones térmicas resultantes en la Península Ibérica son sensibles no sólo a la fase de la NAO sino a la localización exacta de sus centros de acción.

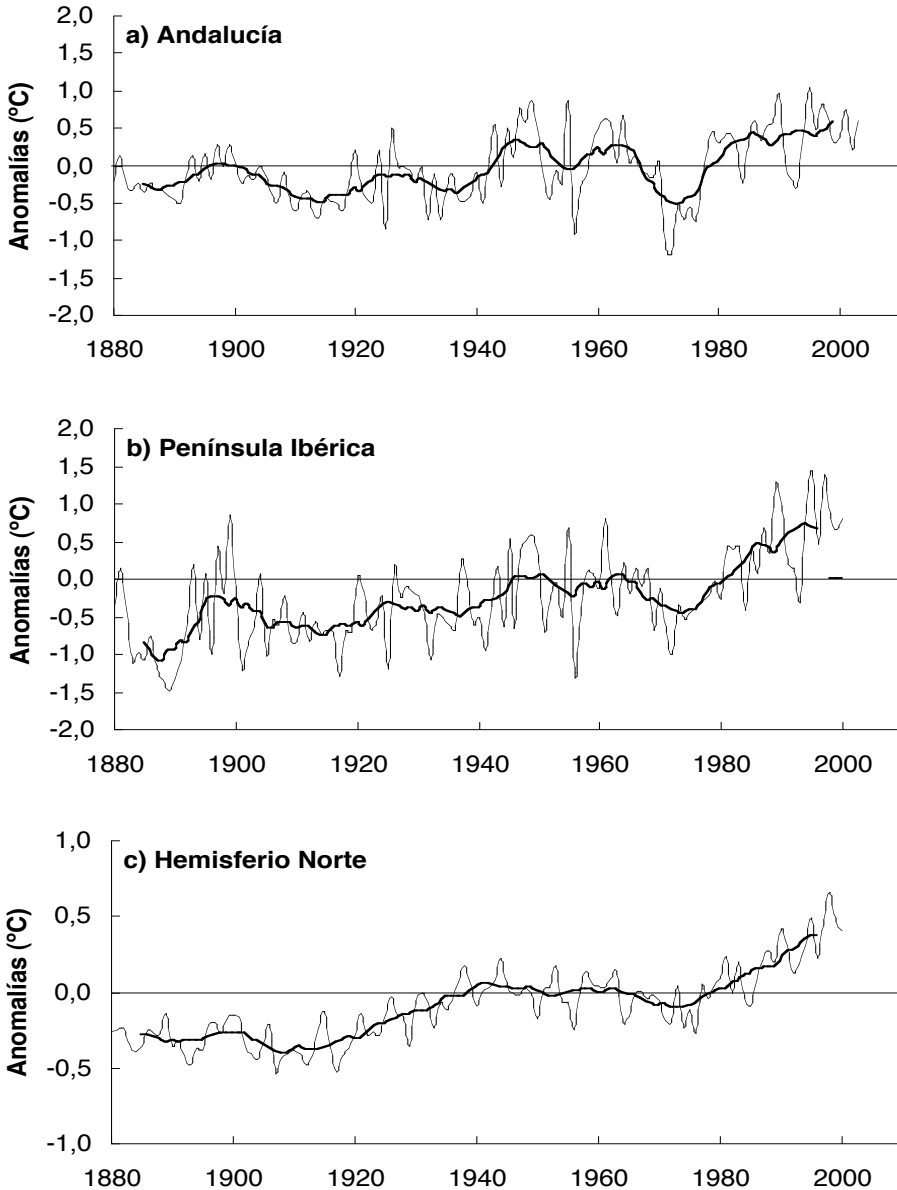


Figura 6. Series de anomalías de temperaturas medias respecto al periodo 1961-90 y medias móviles de 10 años, en: a) Andalucía, b) Península Ibérica (Staudt, 2004) y c) Hemisferio Norte (www.cru.uea.ac.uk).

CONCLUSIONES

Para la serie de precipitación destaca el húmedo periodo de finales del siglo pasado, los años relativamente secos de los 20 y 30, unos años más húmedos en los 60 y principios de los 70 y un periodo de marcada sequía en los últimos años. De forma general, se detecta una tendencia decreciente en las series de primavera y anual (ésta ajustada a los límites de significación). Estas tendencias decrecientes han sido encontradas en otras áreas del sur de Europa, y están en relativo acuerdo con las estimaciones más generales de los GCM para el área mediterránea.

La variabilidad de la precipitación en Andalucía está en gran medida relacionada con las variaciones de la intensidad y posición del Anticiclón de las Azores y con los valores del Índice NAO (Esteban-Parra et al., 1998; Pozo-Vázquez et al., 2005a, 2005b; Castro-Díez et al., 2002), siendo esta relación de carácter inverso. Es la precipitación de invierno la que muestra una correlación negativa más clara, pudiéndose usar estos índices como predictores en técnicas de downscaling. Para el resto de las estaciones, la relación es menos clara, debido al movimiento cíclico anual del anticiclón.

De forma general, tanto para las temperaturas máximas como para las mínimas, y en consecuencia, para las medias, destaca el hecho de la unidad térmica de Andalucía, como permite concluir la forma y varianza asociada al primer vector propio sin rotar. En las temperaturas máximas, predomina la tendencia creciente en el siglo XX, excepto las dos épocas de descenso de aproximadamente una década, a principios del siglo y en los años 60 y 70. El calentamiento total que se detecta en el siglo XX es superior a 1 °C, superando el nivel de significación al 99.9%. Las pruebas estadísticas determinan el papel predominante del ascenso en las dos décadas recientes, en comparación

con la variabilidad térmica en el siglo XX, con un calentamiento marcado que se inicia en la década de los 70. En el examen de la evolución térmica de las temperaturas máximas estacionales, se constata un calentamiento importante en primavera y verano, cercano a los 2 °C, pero inferior en otoño e invierno.

Las temperaturas mínimas andaluzas muestran un importante y continuo calentamiento a lo largo del siglo XX, interrumpido sólo por el descenso térmico en los años 70. A partir de los 70 se inicia un periodo de fuerte calentamiento hasta el final de los registros que alcanza valores superiores a 1 °C, siendo significativo en todas las estaciones así como en los promedios anuales. La corrección urbana aplicada a la serie de temperaturas mínimas de Sevilla muestra que este calentamiento se mantiene y es prácticamente insensible frente a la corrección urbana elegida.

De forma semejante, la evolución de las temperaturas en la Península Ibérica se caracteriza por un calentamiento en el siglo XX en dos fases: en la 1ª mitad del siglo y a partir de los años 70, con ligeras diferencias regionales. Este comportamiento, muestra un claro paralelismo cualitativo de la temperatura en Andalucía, la Península Ibérica y en el Hemisferio Norte. El hecho de que la evolución térmica se parezca al comportamiento del promedio zonal sugiere que las temperaturas en la Península Ibérica estén en gran medida gobernadas por el balance radiativo, con un papel menor de los fenómenos dinámicos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado en parte por el Proyecto de Investigación CGL2004-05340-C02-01, concedido por el Ministerio de Educación y Ciencia.

BIBLIOGRAFÍA

- Brunetti, M., M. Maugeri, & T. Nanni (2000). Variations of Temperature and Precipitation in Italy from 1866 to 1995. *Theoretical and Applied Climatology* 65: 165-174.
- Capel Molina, J. J.(1981). *Los climas de España*. Oikos-Tau, Barcelona.
- Castro-Díez, Y., D. Pozo-Vázquez, F. S. Rodrigo & M. J. Esteban-Parra (2002). NAO and winter temperature variability in southern Europe. *Geophysical Research Letters* 29: 10.1029/ 2001GL0 140421.
- Colacino, M. & A. Lavagnini (1982). Evidence of the urban heat island in Rome by climatological analyses. *Archives for Meteorology, Geophysics and Bioclimatology, Serie B* 31: 87-97.
- Dauphiné, A. (1976). *Les précipitations dans les midis français*. Tesis Doctoral, Universidad de Lyon. 124 pp.
- Englehart, P. J. & A. V. Douglas (2003). Urbanization and seasonal temperature trends. Observational evidence from a data-sparse part of North America. *International Journal of Climatology* 23: 1253-1263.
- Esteban-Parra, M. J., F. S. Rodrigo & Y. Castro-Díez (1998). Spatial and Temporal Patterns of Precipitation in Spain over the Period 1880-1992. *International Journal of Climatology* 18: 1557-1574.
- Grieser, J., S. Trömel & C. D. Schönwiese (2002). Statistical decomposition into significant components and application to European temperature. *Theoretical and Applied Climatology* 71: 171-183.
- Hasanean, H. M. (2001). Fluctuations of surface air temperature in the eastern Mediterranean. *Theoretical and Applied Climatology* 68: 75-87.
- Hurrell, J. W. (1995). Decadal trends in North Atlantic Oscillation and relationship to regional temperature and precipitation. *Science* 269: 676-679.
- Hurrell, J. W, M. P. Hoerling & C. K. Folland (2000). Climatic Variability over the North Atlantic. En *Meteorology at the Millenium*, Academic Press.
- INM (2007). <http://www.inm.es/>
- IPCC (1996). *Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Contribution of WGI to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, K. Maskell and J.A. Lakeman (Eds). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. J.T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C. A. Johnson (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2007). Summary for Policymakers. <http://www.ipcc.ch>
- Jacobeit, J, H. Wanner, J. Luterbacher, C. Beck, A. Philipp, A. & K. Sturm (2003). Atmospheric circulation variability in the North-Atlantic- European area since the mid- seventeenth century. *Climate Dynamics* 20: 341-352.
- Jones, P. D. & K. R. Briffa (1995). Decade-to-Century Scale Variability of Regional and Hemispheric-Scale Temperatures. En *Natural Climate Variability on Decade-to-Century Time Scales. National Research Council*, 512-521.
- Karl, T. R., H. F. Diaz, & G. Kukla (1988). Urbanisation: Its detection and effect in the United States climate records. *Journal of Climate* 1: 1099-1123.

- Kozuchowski, K. M. (1993). Variations of Hemispheric Zonal Index since 1899 and its Relationships with Air Temperature. *International Journal of Climatology* 13: 853-864.
- Linés, A. (1981). *Perturbaciones típicas que afectan a la Península Ibérica y precipitaciones asociadas*. INM, Madrid.
- Maheras, P. (1988). Changes in precipitation conditions in the Western Mediterranean over last Century. *International Journal of Climatology* 8: 179-189.
- Martin, S., Morier, J. & J. Marchand (1981). Variations pluviométriques durant el periore seculaire en Europe occidentale. *Houille Blanche* 7/8: 581- 586.
- Montávez, J. P., A. Rodríguez, A. & J. I. Jiménez (2000). A study of the urban heat island of Granada. *International Journal of Climatology* 20: 899-911.
- North, G. R., T. L. Bell, R. F. Cahalan. & F. J. Moeng (1982). Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. *Monthly Weather Review* 110: 699-706.
- Pozo-Vázquez, D. (2000). *Causas físicas de la variabilidad espacio-temporal del clima de la Península Ibérica en escalas interanual a decadal: NAO y ENSO*. Tesis doctoral. Universidad de Granada, 301 pp.
- Pozo-Vázquez, D., S. R. Gámiz-Fortis, J. Tovar-Pescador, M. J. Esteban-Parra & Y. Castro-Díez (2005a). El Niño-Southern Oscillation events and associated European winter precipitation anomalies. *International Journal of Climatology* 25: 17-31.
- Pozo-Vázquez, D., S. R. Gámiz-Fortis, J. Tovar-Pescador, M. J. Esteban-Parra & Y. Castro-Díez (2005b). North Atlantic winter SLP anomalies based on the autumn ENSO state. *Journal of Climate* 18: 97-103.
- Preisendorfer, R. W. (1988). *Principal Component Analysis in Meteorology and Oceanography*. Elsevier, Amsterdam.
- Rayner, N. A., E. B. Horton, D. E. Parker, C. K. Folland & R.B. Hackett (1996). *Version 2.2 of the Global Sea-Ice and Sea Surface Temperature data set 1903-1994, CRTN 74*. Available from Hadley Centre, Met. Office, Bracknell, U.K.
- Rocha, A. (1999). Low-frequency variability of seasonal rainfall over the Iberian Peninsula and ENSO. *International Journal of Climatology* 19: 889-901.
- Rodrigo, F. S. (1994). *Cambio Climático Natural. La Pequeña Edad de Hielo en Andalucía. Reconstrucción del Clima Histórico en Andalucía*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada, 387 pp.
- Rodrigo, F. S., M. J. Esteban-Parra & Y. Castro-Díez (1995). The Onset of the Little Ice Age in Andalusia (southern of Spain): Detection and Characterization from the documentary sources. *Annales Geophysicae* 13: 330-338.
- Slonosky, V., P. D. Jones. & T. D. Davies (2000). Variability of the surface atmospheric circulation over Europe, 1774-1995. *International Journal of Climatology* 20: 1875-1897.
- Sneyers, R. (1975). *Sobre el análisis estadístico de las series de observaciones*, WMO, Nota Técnica nº 143, Madrid.
- Staudt, M. (2004). *Detección de cambios térmicos en la Península Ibérica con datos homogéneos regionales*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 559 pp.
- Storch, H. V. & F.W. Zwiers (1995). *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge University Press, Boston.
- Thompson, L. G. & E. Mosley-Thompson (1987). *Evidence of abrupt climatic change during the last 1500 years*

- recorded in ice cores from the tropical Quelccaya ice cap, Peru.* In Berger, W. H., and Labeyrie, L. D. (eds.), *Abrupt Climatic Change—Evidence and Implications*, pp. 99–110.
- Xoplaki, E., J. F. González-Rouco, D. Gyalistras, J. Luterbacher, R. Rickli & H. Wanner (2003a). Interannual summer air temperature variability over Greece and its connection to the large-scale atmospheric circulation and Mediterranean SSTs 1950-1999. *Climate Dynamics* 20: 537-554.
- Xoplaki, E., J. F. González-Rouco, J. Luterbacher & H. Wanner (2003b). Mediterranean summer air temperature variability and its connection to the large-scale atmospheric circulation and SSTs. *Climate Dynamics* 20: 723-739.
- Unger, J. (1996). Heat island intensity with different meteorological conditions in a medium-sized town: Szeged, Hungary. *Theoretical and Applied Climatology* 54: 147-151.

CHAPTER 4 / CAPÍTULO 4

*Climate evolution of the Southwest
of the Iberian Peninsula according
to instrumental records*

**La evolución climática del Suroeste
de la Península Ibérica basada en
registros instrumentales**

Climate evolution of the Southwest of the Iberian Peninsula according to instrumental records

Leoncio García Barrón

Department of Applied Physics II. University of Seville. Avda. Reina Mercedes 2. EUAT.
Sevilla (41011). leoncio@us.es

ABSTRACT

The temporal evolution of the meteorological series is one of the factors on which the formulations about the climatic change are based. The method of making predictions based on the hypotheses of the global models starts from the knowledge of the variability happened in the past and specially of the one registered during the instrumental period.

The direct action of the anticyclone of Azores on the southwest of the Iberian Peninsula and its relation with the NAO dipole, makes this zone specially interesting for a climatic study. In order to analyse the climatic evolution, only the meteorologic stations of the zone with long term pluviometric and thermal recordings have been selected.

From those recordings, which represent in total more than a century of precipitation registries, a unique series denominated "Southwestern" has been elaborated, to be representative of the zone under study. The interannual evolution of the series is exposed by means of three complementary methods: the cumulative deviations (that show sequences of dry-rainy temporary sections), the seasonal and annual tendencies (in which the pluviometric descent in spring is emphasized) and the interannual pluviometric irregularity (in which the increase in variability and disparity in the last decades can be observed).

From the different alternatives to study the thermal evolution (tendencies of annual and monthly historical series, ARIMA methods, and so forth), we have selected the analysis of the maximum and minimum daily temperatures of the date series. It has allowed us to detect a greater heating in the minimum temperatures than in the maximum, the interannual increase during the different periods of the year, and the behavior of the extreme intervals within the range of the interannual dates series. Even though it is not yet clear if the detected behavior is whether a manifestation of the natural variability of the climatology or a consequence of the antropic effect, it can be clearly concluded that during the last decades a constant thermal growth has happened, as well as an increase on the pluviometric irregularity.

Key words: *climatic evolution, maximum and minimum temperatures, precipitation, Southwest of the Iberian Peninsula*

La evolución climática del Suroeste de la Península Ibérica basada en registros instrumentales

Leoncio García Barrón

Departamento de Física aplicada II. Universidad de Sevilla. Avda. Reina Mercedes 2. Sevilla (41011). leoncio@us.es

RESUMEN

El comportamiento temporal de las series meteorológicas constituye una de las bases en que se fundamentan las formulaciones acerca del cambio climático. La elaboración de predicciones basadas en las hipótesis de los modelos globales tienen su origen en el conocimiento de la variabilidad ocurrida en el pasado y especialmente de la registrada durante el periodo instrumental.

La acción directa del anticiclón de las Azores sobre el suroeste de la Península Ibérica y su vinculación con el dipolo de NAO, confiere a esta zona de estudio particular interés climático. Para el análisis de la evolución climática se han seleccionado los observatorios meteorológicos de la zona con series de larga duración de las variables pluviométricas y térmicas.

A partir de tales observatorios con más de un siglo de registros de precipitación se ha elaborado una serie única denominada “Suroeste” representativa de la zona objeto de estudio. Se expone la evolución de la serie interanual mediante tres métodos complementarios: las desviaciones acumuladas que pone de manifiesto secuencias de tramos temporales secos-lluviosos; las tendencias anual y estacionales, en que se resalta la disminución pluviométrica primaveral; la irregularidad pluviométrica interanual en que se detecta el incremento de variabilidad y disparidad en las últimas décadas.

De los distintos estudios sobre evolución térmica (tendencias de series históricas anuales y mensuales, métodos ARIMA, etc.) hemos seleccionado el análisis de las temperaturas diarias máximas y mínimas de las series de fecha. Ello nos ha permitido corroborar mayor calentamiento en las temperaturas mínimas que en las máximas, detectar el incremento intranual durante diferentes épocas del año y establecer la uniformidad del comportamiento por intervalos dentro del rango variación de las series interanuales de fechas.

Aun cuando no se establece si el comportamiento detectado es una manifestación de la variabilidad natural del clima o consecuencia del efecto antrópico, las conclusiones reflejan que durante las últimas décadas se detecta un sostenido incremento térmico y de la irregularidad pluviométrica, estadísticamente significativos.

Palabras clave: *evolución climática, temperaturas máximas y mínimas, precipitación, Suroeste de la Península Ibérica*

INTRODUCCIÓN

El conocimiento del comportamiento de las series meteorológicas desempeña un papel clave en la interpretación del clima. Supone una aportación a la comprensión del sistema natural y redundan en beneficio de otros estudios de carácter científico y técnico, con aplicaciones en diversos campos ambientales y sociales. Esta conexión de los estudios climáticos con otros campos hace que se generen amplias relaciones interdisciplinares.

Un aspecto relevante del conocimiento del clima es detectar posibles cambios temporales en las variables meteorológicas, estadísticamente significativos, de los cuales pudieran inferirse consecuencias a medio o largo plazo.

Ya el primer informe sobre Evaluación sobre el Cambio Climático de IPCC – Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático- publicado por el Grupo de Expertos (1990), patrocinado por la Organización Meteorológica Mundial y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente expresamente formula entre las necesidades para aumentar la capacidad de previsión, *“mejorar la observación sistemática de las variables relacionadas con el clima a nivel mundial, y seguir investigando los cambios que se produjeron en el pasado”*. El mismo documento reconoce que *“en las series temporales podemos examinar la variabilidad natural del clima y buscar indicios de posibles cambios”*.

Para enmarcar adecuadamente el objeto de nuestra exposición, basada en series de observaciones, conviene hacer una breve referencia a la evolución climática en épocas históricas. La variabilidad, con oscilaciones del orden de siglos inmersas a su vez en oscilaciones de carácter glacial, es una propiedad del sistema climático. De forma natural a lo largo de los últimos siglos se han producido oscilaciones del régimen térmico, y consecuentemente pluviométrico.

El inicio de la actividad, durante el siglo XIX, de los observatorios meteorológicos - y por tanto, de las primeras series de los registros sistemáticos - se inscribe en un periodo de recuperación cálida, posterior a una fase relativamente muy fría, “la pequeña edad de hielo”, acaecida durante los siglos anteriores. Por tanto, no es descartable que en el presente, con independencia de efectos coadyuvantes de origen antropogénico, el proceso natural tienda hacia un incremento térmico.

Superpuesto a la evolución natural, existe consenso científico de que el clima global se verá alterado en el siglo XXI como resultado de la actividad antrópica (residuos industriales, de gases de efecto invernadero,...). La previsible evolución del sistema climático presenta dos características fundamentales: la incertidumbre actual de la magnitud de los posibles impactos a escala regional y la posible irreversibilidad. La toma de decisiones que eviten que se produzcan en el futuro consecuencias ambientales y sociales irreparables, debe basarse en la profundización del conocimiento del medio natural y de los efectos inducidos en el mismo por la actividad humana. Únicamente así será posible mitigar las consecuencias del cambio climático y adaptarse progresivamente a las mismas.

Consideramos que el texto que antecede pone de manifiesto la importancia del análisis de las series meteorológicas. El objetivo de este capítulo es exponer el comportamiento de series de precipitación y de temperaturas para establecer características generales de la evolución del clima en la región sur-occidental de la Península Ibérica y, a partir de las mismas, elaborar estimaciones predictivas. Aún cuando precipitación y temperatura proporcionan información incompleta del clima, el análisis de estas series de observaciones son las más útiles para conocer su evolución, predecir el futuro y prever, en su caso, repercusiones naturales y sociales.

OBSERVATORIOS METEOROLÓGICOS Y METODOLOGÍA

La fuente de investigación de las series climáticas son los registros de las variables térmicas y pluviométricas realizados a lo largo de los años. Si las circunstancias durante la época analizada han obligado a realizar cambios en cuanto a instrumental, procedimiento y/o localización de los aparatos de medida, o el entorno del observatorio ha sufrido modificaciones, la calidad de la serie de observaciones puede haberse visto afectada. A ello se une la existencia de “lagunas” en lapsos en que no se produjeron observaciones, o, al menos, no se conservan. Las series originales utilizadas en el presente estudio han sido sometidas a un proceso de relleno de lagunas por regresión respecto de los observatorios mejor correlacionados, y sometidos a pruebas de homogeneidad relativa (García-Barrón, 2001).

Para el análisis pluviométrico hemos elegido los observatorios del suroeste español en los que las series de datos de precipitación son superiores al siglo. Los registros corresponden al Observatorio de Marina de San Fernando (36° 27' N, 5° 45' W) en Cádiz, Riotinto (37° 42' N 6° 36' W) en la provincia de Huelva, Sevilla (37° 22' N, 6° 00' W), Córdoba (37° 53' N, 4° 47' W) y Badajoz (38° 53' N, 6° 58' W). Aun cuando el periodo de estudio se centra en el siglo XX, para ampliar la perspectiva el análisis se extiende desde 1882 hasta 2005. El observatorio de San Fernando está situado en la zona costera; el de Badajoz, pertenece a la cuenca hidrográfica del Guadiana, Córdoba y Sevilla (este más próximo al Océano Atlántico) a la del Guadalquivir, el de Riotinto está situado en la vertiente sur de la Sierra de Huelva, la cual ejerce un efecto de pantalla sobre los vientos húmedos que penetran por el suroeste de la Península

desde el océano Atlántico. Nos han servido como registros complementarios los de las series de la Base Aérea de Talavera la Real (4452), y circunstancialmente Cádiz-Cortadura (5973), Jerez-Aeropuerto (5960). Así mismo, en distintas fases se han considerado las series de Gibraltar, y las portuguesas de Tavira, Faro, y Beja.

Aun cuando cada uno de los observatorios tiene características propias es posible destacar aspectos comunes en su evolución. La adecuada distribución espacial permite, a su vez, caracterizar el comportamiento pluviométrico a lo largo del tiempo en una amplia zona geográfica perteneciente al mismo ámbito climático. Generamos, por superposición de las estaciones analizadas, la serie que denominamos “Suroeste”. Esta serie representativa del conjunto regional suaviza las anomalías extremas introducidas por alguna de las estaciones e incluso las posibles inhomogeneidades no detectadas.

El análisis de evolución termométrica se basa en las series de temperaturas diarias -máximas y mínimas- del observatorio Sevilla-Aeropuerto (5783) durante el periodo 1951 a 2001. En relación con las estaciones de Huelva y de Córdoba, los coeficientes de correlación entre los respectivos registros diarios, agrupados estacionalmente durante la década 1990-2000, oscilan entre 0.80 y 0.97 [ligeramente inferiores respecto de Badajoz; García-Barrón & Pita, (2003)]. Ello nos permite deducir que el área de estudio presenta una evolución térmica diaria similar y, por tanto, generalizar las conclusiones particulares de Sevilla al ámbito climático regional.

La metodología para el análisis térmico se basa en las series de fechas. La periodicidad de los movimientos planetarios de rotación y traslación determina la energía solar incidente sobre una determinada zona geográfica, que se refleja en la variación temporal -diaria y estacional- de la

temperatura. La sucesión de temperaturas – máximas y mínimas diarias - a lo largo del año presenta un perfil cuya componente cíclica es altamente predominante, tal que la podemos expresar como una función $T=f(t)$, donde T indica el valor de la temperatura de un día determinado, y t el ordinal de tal día en la sucesión en el ciclo anual. Ello permite caracterizar periodos plurianuales a partir de las correspondientes series de fechas. Para cada variable térmica, se obtienen 365 series de fechas (prescindimos del 29 de febrero), formada cada una de ellas por los respectivos elementos de los sucesivos años objeto de estudio. Al considerar a la temperatura diaria inserta en el ciclo anual, se establece un procedimiento sobre la evolución térmica interanual, complementario a los habituales fundados en el análisis de las series de promedios mensuales/anuales.

La región analizada posee singular interés climático, ya que se conocen conexiones con el comportamiento climático de ámbito europeo. Geográficamente el área suroccidental peninsular está comprendida entre Lisboa y Gibraltar, precisamente los polos continentales utilizados por algunos autores para poner de manifiesto los efectos de North Atlantic Oscillation NAO. En tal sentido, los resultados obtenidos alcanzan proyección continental. (Hurrell, 1995; Jones et al, 1997; Pita et al, 1999; Muñoz & Rodrigo, 2003; Trigo et al, 2004).

Para mayor claridad expositiva, el análisis de las series meteorológicas se efectúa separadamente. En el tercer apartado, referido al régimen pluviométrico, se examinan las series de precipitación centrando el estudio en su estructura y evolución temporal, tanto respecto de la tendencia como de la variabilidad. El cuarto apartado hace referencia a la evolución interanual de las temperaturas por medio de la tendencia lineal y de la distribución de frecuencia de los quintiles extremos.

EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LAS SERIES PLUVIOMÉTRICAS

Una característica del régimen de precipitaciones en amplias zonas de la Península Ibérica –incluido el suroeste- es la gran irregularidad interanual, (Rodríguez-Puebla et al., 1998; Rodrigo et al., 2000), en que se producen años con valores muy inferiores a la media frente a otros con valores relativamente muy altos, y ello - en ocasiones- en años sucesivos. Además, hay que considerar la irregularidad intra-anual (García-Barrón, 2004a) en que frecuentemente un porcentaje importante del total mensual es debido a lluvias caídas –a veces, de forma torrencial- durante sólo algunos días. Esta gran inestabilidad pluviométrica resta capacidad de síntesis al valor promedio de la precipitación anual que tiene que completarse con los parámetros de dispersión para obtener una interpretación más adecuada.

La irregularidad comprende al conjunto de manifestaciones en que pueden detectarse alteraciones en la uniformidad del desarrollo temporal del fenómeno climático. Es un tema de gran importancia porque introduce un factor de riesgo en la toma de decisiones para la previsión, tanto en los aspectos agrícolas de secano y de regadío como de reservas para suministros a las poblaciones. En consecuencia, la planificación socio-económica requiere conocer la estructura de las series temporales para contemplar periodos plurianuales. Aunque es sólo un aspecto parcial, en el área mediterránea los estudios de irregularidad pluviométrica se dedican frecuentemente, por sus graves repercusiones sociales, al análisis de fenómenos extremos que ocasionan inundaciones y, fundamentalmente, a la caracterización de los periodos de sequía (Pita, 1995; García-Barrón, 2002a). En los últimos decenios, los estudios sobre irre-

gularidad de las precipitaciones se han desarrollado en gran medida en el marco de la búsqueda de indicios sobre cambios climáticos.

El análisis del comportamiento temporal de las series de precipitación nos permite conocer su evolución. Para ello vamos a exponer tres aspectos complementarios entre sí: desviaciones acumuladas, tendencia y variabilidad.

- Desviaciones pluviométricas acumuladas

A partir de las series anuales de precipitación, denominamos desviaciones acumuladas a la suma de las desviaciones respecto de la media, correspondientes a todos los años precedentes al de referencia. La gráfica de desviaciones acumuladas permite apreciar intuitivamente la evolución a lo largo del tiempo al comparar la secuencia de posiciones. Tramos descendentes –en los que se pueden intercalar dientes de sierra indicativos de cambio de signo- muestran periodos de déficit hídrico global; por el contrario, tramos ascendentes indican conjunto de anualidades de recuperación húmedas. Si prescindimos de la fluctuación introducida por los pequeños dientes

de sierra, es posible detectar signos indicativos de la evolución durante periodos amplios del siglo XX

En conjunto, el perfil evolutivo de la pluviometría acumulada en el suroeste español puede describirse por tres tramos discontinuos correspondientes a épocas secas. El primero se inicia a principio de siglo (1901) tras el húmedo final del siglo XIX, y se conserva con pendiente descendente –precipitaciones anuales inferior al promedio anual del siglo- hasta 1934, en que se invierte la pendiente. Hacia 1940 se inicia un tramo globalmente seco –con marcadas oscilaciones anuales- dura hasta 1957 en que se produce un mínimo. A continuación se produce una época húmeda que continúa durante el último tercio de siglo con el tramo que incluye los periodos de sequía 1971-75, 1979-83 y 1990-95

- Tendencia pluviométrica

El método directo de detectar la evolución de los valores centrales de una serie temporal es conocer su tendencia. La tendencia lineal, caracterizada por la pendiente, se obtiene como recta de regresión, de tal forma que los cuadrados de las desviaciones de los valores observados respecto de

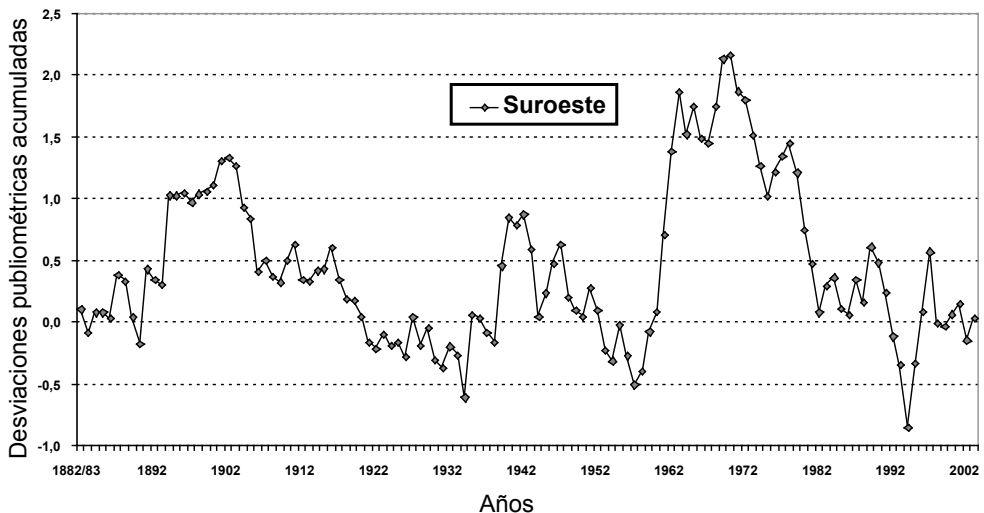


Figura 1. Desviaciones pluviométricas acumuladas, en valores normalizados, basadas en el cálculo de la serie conjunta de los observatorios del Suroeste de la Península Ibérica.

los correspondientes de la recta calculada sean mínimos. En la interpretación de la tendencia anual de distintos observatorios destacamos la inconstancia del signo de la pendiente entre series análogas; en general no alcanzan significación estadística y denota un comportamiento que no caracteriza uniformemente al conjunto regional. Esta circunstancia ha sido puesta de relieve por otros autores al comparar observatorios relativamente próximos de distintas regiones peninsulares y mediterráneas (Camarillo, 1997).

La Figura 2 muestra la evolución de la precipitación en el Suroeste. La recta de tendencia es casi horizontal con una leve pendiente negativa. Hemos indicado que la generación de la serie regional suaviza los extremos por compensación entre distintos observatorios. Aun eligiendo periodos largos, dada la gran irregularidad interanual, al modificar el periodo de estudio no se mantiene el coeficiente de la recta. En caso expuesto, la varianza explicada es inferior a 0,2 %. Es decir, la recta de tendencia se asocia al valor medio de la serie, pero la información que proporciona no es suficiente para

establecer un descenso pluviométrico indicativo del comportamiento futuro en la zona de estudio.

Destaca, sin embargo, la tendencia descendente durante la primavera, a lo largo del siglo XX, de todos observatorios analizados. (García-Barrón, 2002b). La significación estadística y la generalización espacial implican la aceptación del descenso de precipitaciones primaverales en la región (Figura 3) como fenómeno climático. La disminución media es del orden de 60 l/m² a lo largo del presente siglo, y considerando que el promedio zonal de la precipitación de primavera oscila en torno a 160 l/m² ello supone un decremento superior a un tercio del total. La grafica muestra la tendencia de la serie generada por el conjunto de los observatorios del Suroeste peninsular, que refleja el comportamiento global en la zona. Superpuesta a una gran irregularidad interanual, se observa la disminución continuada de precipitación primaveral desde mediado de siglo XX. En particular, durante el último tercio del mismo sólo el 15% de los valores anuales alcanzan el valor promedio de la serie.

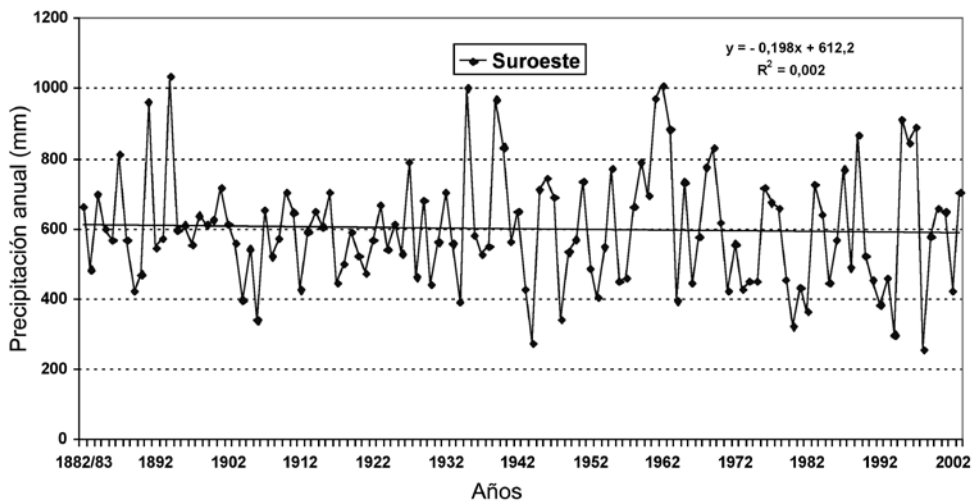


Figura 2. Evolución interanual y tendencia lineal de las precipitaciones en el Suroeste de la Península Ibérica.

El efecto sobre la precipitación anual total no es relevante por compensaciones entre estaciones, pero para aquellas especies vegetales y cultivos de secano cuya producción esté regulada por las lluvias de primavera de mantenerse la tendencia detectada puede incidir de forma considerable en el futuro.

Estos resultados concuerdan con un reciente estudio de M. Aguilar y colaboradores (Aguilar et al, 2006) que pone de manifiesto la tendencia negativa de precipitación del mes de marzo, con un marcado gradiente Sur-Norte en Andalucía occidental.

tiempo hasta generar una nueva serie de variabilidad interanual.

Por tanto, definimos el coeficiente de variación, computado por periodos de once años, para elemento i de la serie generada, como

$$C_i = \sigma_{i-11} / \mu_{i-11}$$

Los resultados obtenidos han servido de base para elaborar la gráfica correspondiente (Figura 4). En la serie representativa del Suroeste peninsular, podemos apreciar, que a partir de la amplia irregularidad a final de siglo XIX destaca una época en que la variabilidad ha sido marcadamente

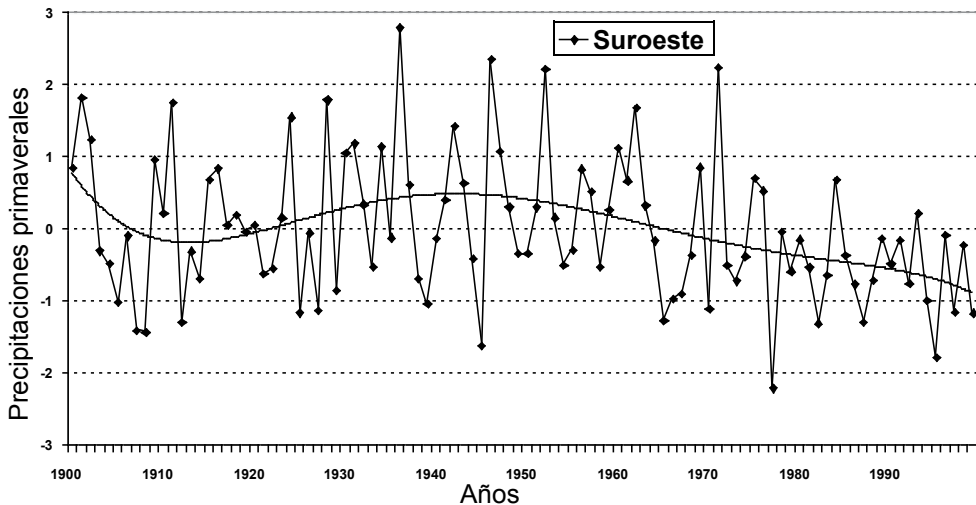


Figura 3. Tendencia de las precipitaciones primaverales en el Suroeste de la Península Ibérica.

- Variabilidad interanual

La línea de tendencia ofrece información acerca de la estabilidad de la media a lo largo de la serie pero no sobre la estabilidad de la varianza. Para conocer la variabilidad de series anuales de precipitaciones de cada observatorio empleamos el coeficiente de variación definido como el cociente entre la desviación típica y el promedio para un periodo determinado. Con la intención de detectar su evolución temporal hemos elegido como referencia el periodo de once años, al cual hemos traslado progresivamente a lo largo del

menor: durante los años 1910 a 1930. Hacia esta fecha se produce un incremento pronunciado hasta 1950, y tras suavizarse ocurre un nuevo aumento a partir de mediados de la década de los setenta que se mantiene actualmente. Como característica más destacable señalamos, por tanto, el incremento de variabilidad durante las tres últimas décadas, que puede ser indicativo de un comportamiento que se proyecte hacia el futuro.

En general, se observan estos rasgos evolutivos comunes a todos los observatorios de la zona de estudio.

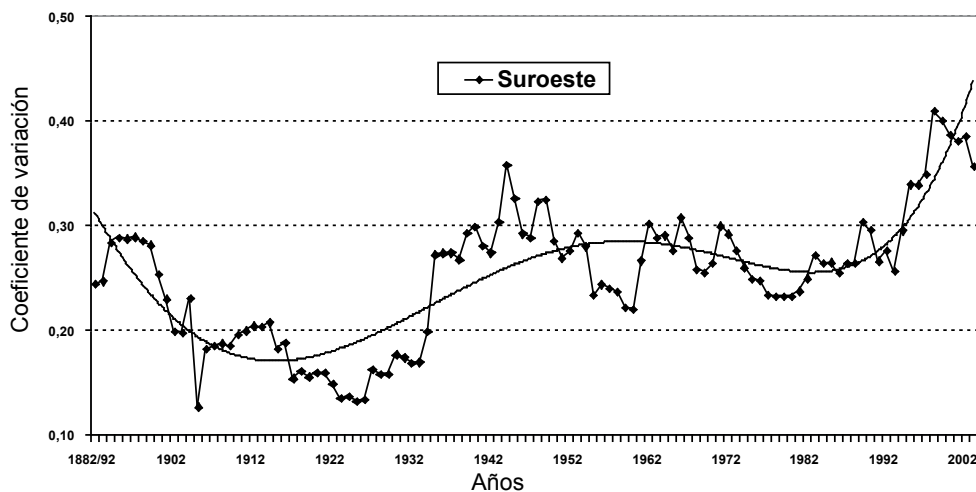


Figura 4. Evolución del coeficiente de variación (por periodos móviles de 11 años) de las precipitaciones en el Suroeste de la Península Ibérica, y ajuste polinómico.

Sin embargo, también, es posible apreciar diferencias de comportamiento. Desde la década de los treinta a los ochenta, el observatorio de Badajoz presenta una mayor regularidad que los demás y que él mismo en el periodo precedente, con oscilaciones del orden de 0,05 unidades frente a las 0,15 de los demás observatorios. Las pendientes positivas de la evolución durante la última época son aún más pronunciadas en Sevilla y San Fernando.

Estudios complementarios (García-Barrón et al, 2004b) muestran no sólo el previsible incremento de la variabilidad de la precipitación sino de la disparidad interanual, de tal forma que serán más probables años de precipitación muy escasa frente a otros muy lluviosos, y ello -en ocasiones- en años consecutivos. Consideramos el índice de disparidad como medida de la variabilidad de la precipitación de un año respecto de la de los años adyacentes anterior y posterior.

La evolución interanual indica alta disparidad en el fin del siglo XIX, un valle en el primer tercio del siglo XX, para alcanza máximo relativo a mediados del mismo y descender hasta la década de los 70, de tal forma que en el último treintenio se produce

una fase marcadamente ascendente hasta la actualidad. (Figura 5).

EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LAS SERIES TÉRMICAS

Estudios precedentes han puesto de manifiesto que las temperaturas en el área de estudio están sometidas a un proceso de calentamiento (García-Barrón & Pita, 2004c). El análisis de las series de fechas debe producir resultados concordantes. A partir de la agrupación de las temperaturas en cada una de las series de fecha y de la clasificación de los registros diarios en intervalos -delimitados por los percentiles propios de cada serie- obtenemos información no sólo la intensidad del incremento térmico interanual en cada fecha y, en consecuencia, en cada época intraanual, si no también cómo se ve afectada la variación temporal de frecuencia de inclusión por niveles de las temperaturas dentro su propio rango de fluctuación.

- Tendencia interanual de las temperaturas

Para las temperaturas mínimas, el 89 % de las 365 series de fecha de poseen pendiente ascendente [324] y únicamente el

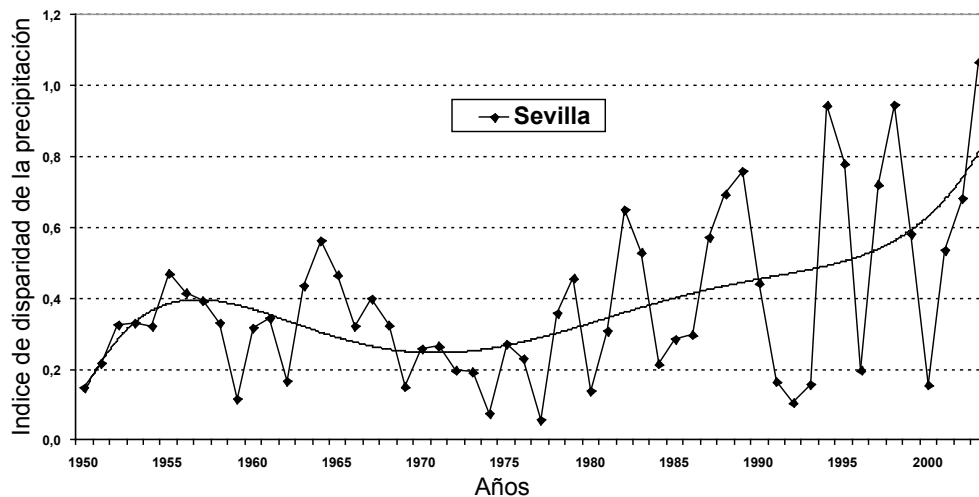


Figura 5. Evolución del índice de disparidad de las precipitaciones en Sevilla y ajuste polinómico.

11 % son descendentes [41]. El promedio del coeficiente lineal para el conjunto de las series resulta $0,037\text{ }^{\circ}\text{C/año}$, equivalente a un calentamiento de $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la segunda mitad del siglo XX. Observamos que la distribución del coeficiente lineal es suficientemente uniforme a lo largo del año. La mayor concentración de incrementos térmicos diarios superiores a $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ a lo largo del periodo de estudio ($0,075\text{ }^{\circ}\text{C/año}$), se produce en las fechas de final de primavera y en verano (Figura 6). Interpretamos que el calentamiento de las temperaturas nocturnas es generalizado durante todas las fechas del año, pero más pronunciado precisamente en la época de “más calor”.

El análisis de las 365 series de fechas de temperatura máxima muestra características distintas en su tendencia: 68 % series de temperaturas máximas [247] poseen carácter ascendente y el 32 % [118] son descendentes. En este caso, el promedio del coeficiente lineal para el conjunto de las series resulta $0,018\text{ }^{\circ}\text{C/año}$, equivalente a un calentamiento aproximado de $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ desde 1951. Además, la distribución del coeficiente a lo largo del año es irregular (Figura 7). Puede interpretarse que, aunque globalmente las temperaturas máximas

experimentan calentamiento interanual, el incremento térmico no mantiene el signo durante todo el año. En particular, incrementos de temperaturas diurnas superiores a $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ a lo largo del periodo estudiado, se concentran en las fechas de final de invierno y principio de primavera, lo que sugiere un adelanto de las condiciones térmicas que favorecen la actividad vegetativa de las plantas. La mayor concentración de valores negativos –tendencia al enfriamiento– indica una suavización térmica a final de verano y principio de otoño.

- Evolución de la distribución de frecuencia de temperaturas extremas

En cada año contabilizamos el número total de días con valores incluidos en los quintiles extremos de la respectiva serie. Evidentemente, en promedio el número de días marcados anualmente es 73 días/año, la quinta parte de los 365 días del año. Si la evolución temporal de 1951 a 2001 hubiera sido uniforme, sin presentar incremento térmico, se obtendría gráficamente una nube de puntos agrupados horizontalmente, distribuidos aleatoriamente en diente de sierra fluctuando en una banda de anchura constante alrededor del valor central. Los resultados obtenidos para las

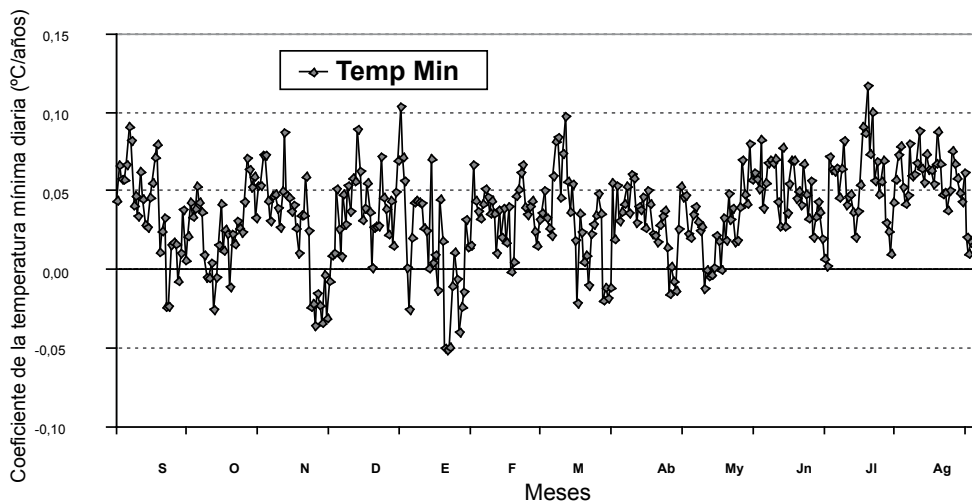


Figura 6. Coeficientes (°C/año) de la tendencia lineal de las temperatura mínima diaria para cada una de las series de fecha, durante el periodo 1991-2001 en Sevilla.

series de temperaturas mínimas y máximas evidencian que no se cumplen las condiciones de estacionariedad.

En primer lugar analizamos el número de días en cada año en que la temperatura mínima diaria está comprendida en el quintil superior de las respectivas series de fecha. Observamos (Figura 8) que el promedio de días que cumplen esta condición en el periodo 1951-1980 es 53 días/año, inferior al valor central, mientras que a partir de 1985 el promedio es 102 días/año,

con marcado carácter ascendente. Es decir, la evolución tiende a aumentar la frecuencia de días en que las temperaturas mínimas alcanzan valores del quintil superior, contribuyendo así al calentamiento.

También analizamos el número de días en cada año en que la temperatura mínima diaria está comprendida en el quintil inferior de las respectivas series de fecha. La frecuencia de estos días presenta una marcada tendencia descendente en las tres últimas década (Figura 9), de forma que el promedio de días

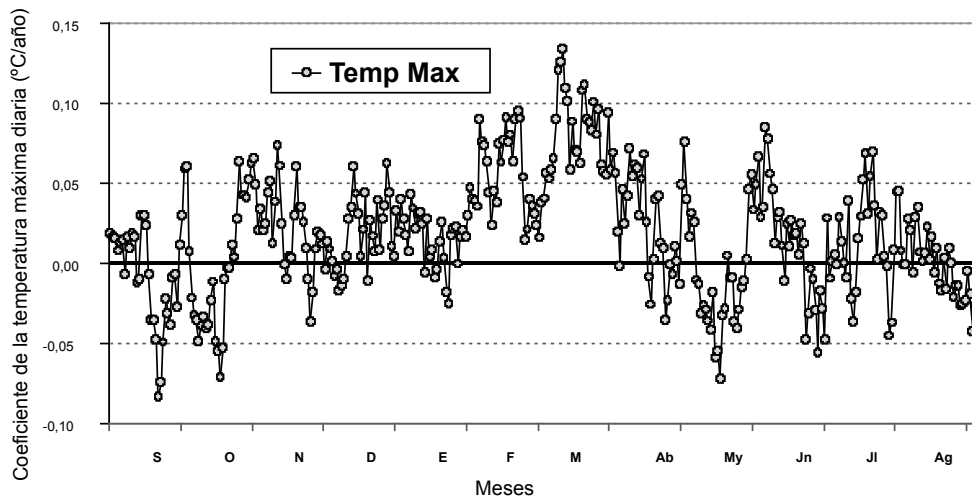


Figura 7. Coeficientes (°C/año) de la tendencia lineal de la temperatura máxima diaria para cada una de las series de fecha, durante el periodo 1991-2001 en Sevilla.

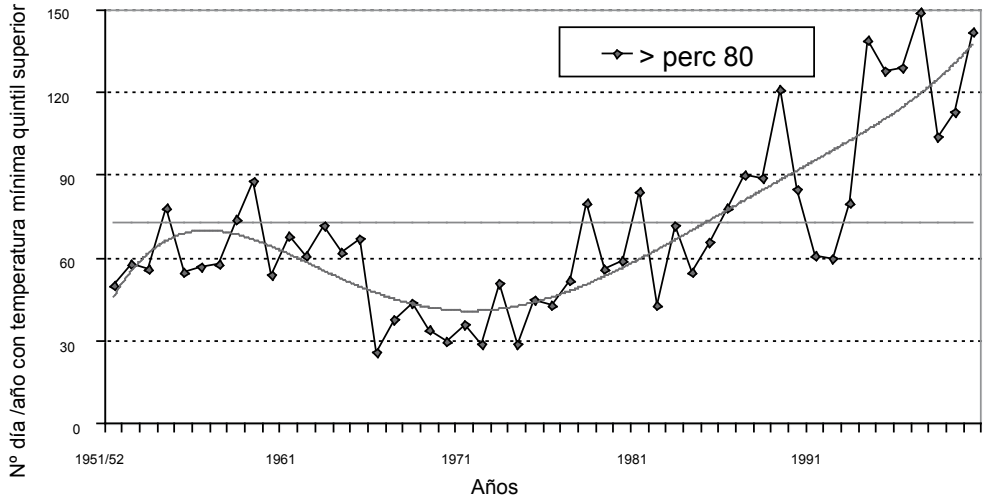


Figura 8. Número de días al año en que la temperatura mínima esta comprendida en el quintil superior de la correspondiente serie de fechas.

que cumplen está condición en el periodo 1951-1980 es 87 días/año, mientras que a partir de 1985 el promedio es sólo 38 días/año y se mantiene permanentemente por debajo del valor central 73,5 días/año. Interpretamos que la evolución hacia el calentamiento de las temperaturas mínimas atmosféricas, enunciado en secciones precedentes, está plenamente confirmada y que se produce tanto al aumentar la frecuencia de los valores en el intervalo superior,

como por la disminución de frecuencia de los valores extremos inferiores. Las líneas polinómicas de ajuste, superpuestas a ambas figuras, muestran perfiles invertidos en que las imágenes aproximadamente simétricas respecto del eje central denotan que el efecto combinado de los quintiles extremos es de similar intensidad para provocar el calentamiento general. Que la variación temporal de frecuencias sea contrapuesta y de similar intensidad en

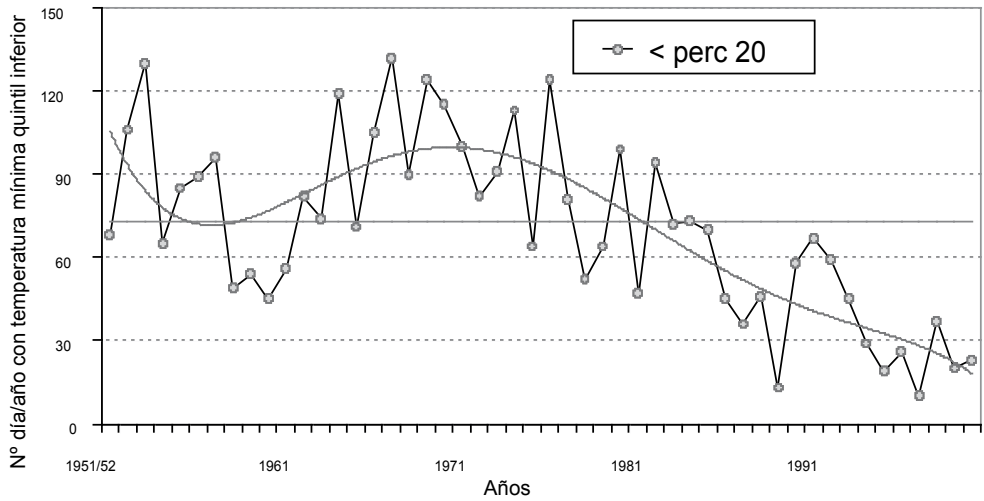


Figura 9. Número de días al año en que la temperatura mínima esta comprendida en el quintil inferior de la correspondiente serie de fechas.

la franja de los percentiles superiores y en la de los inferiores sugiere que el calentamiento atmosférico es uniforme en toda la banda de fluctuación de las temperaturas diarias durante el periodo analizado.

Si por el mismo procedimiento analizamos el número de días en cada año en que la temperatura máxima diaria está comprendida en el quintil superior y en el quintil inferior de las respectivas series de fecha, obtenemos perfiles evolutivos similares a los anteriores. (no representados gráficamente). En este caso la fluctuación de la línea de ajuste es más suave y las correspondientes pendientes durante el último treintenio son manifiestamente menos inclinadas (García-Barrón et al 2006), indicador de la menor intensidad del incremento térmico sufrido por las mismas.

CONCLUSIONES

El presente artículo muestra los resultados obtenidos al analizar la evolución climática, a partir de los registros instrumentales pluviométricos y térmicos en el área sur-atlántica de la Península Ibérica, que puedan servir de base para enunciar extrapolaciones predictivas.

En el análisis secular del régimen pluviométrico es posible detectar, aplicando desviaciones acumuladas, que no existe estabilidad temporal. De los tramos interanuales globalmente secos, el más prolongado coincide con el primer tercio del siglo XX, si bien el más pronunciado ocurre durante el último treintenio en que se registran las secuencias continuas de sequía más intensas.

La tendencia de la precipitación anual muestra distinto signo entre series de los diferentes observatorios y, en general, no alcanzan significación estadística. Aunque algunos modelos indican la previsible desertización debido a la evolución negativa de las precipitaciones, de los resultados obtenidos al analizar las series históricas no es posible efectuar predicciones acerca del “descenso

pluviométrico” del que pudiera derivarse, en el futuro, efectos socio-ambientales. Sin embargo, resaltamos el doble aspecto que ofrece la pluviometría primaveral: presenta una tendencia generalizada descendente y ésta es de tal magnitud que la disminución puede comportar determinadas consecuencias ambientales. Estos efectos negativos se verían potenciados si se corroboran las predicciones enunciadas sobre el incremento de las temperaturas primaverales.

La evolución de la irregularidad indica una época de baja variabilidad y relativamente poco lluviosa durante el primer tercio del siglo XX y un progresivo incremento de la variabilidad durante las tres últimas décadas del mismo. Sin que podamos expresamente atribuirlo a causas antrópicas, ya que en épocas precedentes también se han producido con análoga amplitud, es destacable esta fase ascendente mantenida. En consecuencia, resaltamos que el suroeste de la Península Ibérica está inmerso durante la última época en una fase de progresivo incremento de la irregularidad pluviométrica, medida tanto por la variabilidad como por la disparidad. Si el sentido de la evolución detectada se conserva, es previsible que en un futuro próximo se incremente la frecuencia de años excesivamente secos y de años excesivamente lluviosos, y, además, que estas desviaciones de signo contrario podrán ocurrir en años consecutivos.

El análisis del régimen térmico confirma la pendiente positiva de tendencia interanual de la temperatura atmosférica, recogida en anteriores estudios y señalada por distintos modelos predictivos, si bien es destacable el mayor incremento producido en las temperaturas mínimas. El calentamiento previsto por prolongación de las series será más acentuado en las temperaturas nocturnas. El incremento promedio experimentado por las temperaturas mínimas es de $0,037\text{ }^{\circ}\text{C/año}$, mantenido casi uniforme a lo largo del ciclo anual, frente a sólo $0,018\text{ }^{\circ}\text{C/año}$ de las

temperaturas máximas con marcada irregularidad intraanual. Por sus posibles efectos ambientales destaca el previsto incremento de las temperaturas máximas coincidiendo con las fechas de inicio de primavera.

Se constata durante el último treintenio el incremento de frecuencia de días al año comprendidos en el quintil superior de cada serie y la simétrica disminución de los comprendidos en el quintil inferior. Por tanto, los perfiles simétricos respecto del eje central indican que la contribución de los quintiles extremos es de similar intensidad

para provocar el calentamiento general. En conjunto, podemos deducir que el incremento térmico es uniforme en toda la banda de fluctuación de las temperaturas mínimas diarias (también, aunque menos acentuado, en la banda de las temperaturas máximas diarias). De lo cual, se deduce que la zona objeto de estudio está inmersa en un proceso de calentamiento atmosférico, intensificado durante los tres últimos decenios, del que se infiere la proyección de un incremento térmico hacia el próximo futuro.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, M., E. Sánchez-Rodríguez & M. F. Pita (2006). Tendencia de las precipitaciones de marzo en el sur de la Península Ibérica. En: *Clima, Sociedad y Medio Ambiente. Publicaciones Asociación Española de Climatología* A.5: 41-52.
- Camarillo J. M. (1997). *Evolución de la precipitación en Andalucía Oriental a partir de series instrumentales: los cambios en la variabilidad pluviométrica*. Memoria de Investigación. Dpto. de Geografía Física y A.G.R. Universidad de Sevilla.
- García-Barrón, L. & M. F. Pita (2001). Propuesta metodológica para la determinación de inhomogeneidades relativas en las series de observaciones. En: *El tiempo del clima. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología* A.2: 87-94.
- García-Barrón, L. (2002a). Un modèle pour l'analyse de la sécheresse dans les climats méditerranéens. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie* 14: 67-73.
- García-Barrón, L. (2002b). Evolución de las precipitaciones estacionales en el suroeste español; posibles efectos ambientales. En: *El clima y el agua. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología* A.3: 209-218.
- García-Barrón, L. & M. F. Pita (2003). Aproximación al comportamiento intraanual de las temperaturas diarias en el suroeste de la Península Ibérica. *Revista de Climatología* 3: 17-26.
- García-Barrón, L., J. M. Camarillo & A. Sousa (2004a). Contribución relativa del déficit mensual de precipitación a los periodos de sequía en el suroeste peninsular. *Actas XXVIII Sesiones Científicas. Asociación Meteorológica Española* 21: 1-7.
- García-Barrón, L. & M. F. Pita. (2004b). Stochastic analysis of time series of temperatures in the south-west of the Iberian Peninsula. *Atmosfera* 17-4: 225-244.
- García-Barrón L, I. González-Pérez, P. García-Murillo & A. Sousa (2004c). Evolución pluviométrica en el suroeste peninsular: variabilidad y disparidad. En: *El clima entre el mar y la montaña. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología* A.4: 283-290.
- García-Barrón L., J. Morales, V. Jurado & A. Sousa (2006). Evolución de la distribución intraanual de temperaturas basadas en las series de

- fechas en Andalucía Occidental. En: *Clima, Sociedad y Medio Ambiente. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología* A.5: 625-634.
- Hurrell J. W. (1995). Decadal trends in North Atlantic Oscillation, relationship to regional temperature, precipitation. *Science* 269: 676-679.
- Jones, P. D., T. Jonsson & D. Wheeler (1997). Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar, South-west Iceland. *International Journal of Climatology* 17: 1433-1450.
- Muñoz D. & F. S. Rodrigo (2003). Effects of the North Atlantic Oscillation on the probability for climatic categories of local monthly rainfall in Southern Spain. *International Journal of Climatology* 20: 381-397.
- Pita M. F. (1995). *Las sequías: análisis y tratamiento*. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.
- Pita M. F., M. Aguilar & J. M. Camarillo (1999). Evolución de la variabilidad pluviométrica en Andalucía y su relación con el índice NAO". *La Climatología Española en los albores del siglo XXI. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología* A.1: 399-408.
- Rodrigo F. S., M. J. Esteban-Parra, D. Pozo-Vázquez & Y. Castro-Díez (2000). Rainfall variability in southern Spain on decadal to centennial time scales. *International Journal of Climatology* 20: 721-732.
- Rodríguez-Puebla, C., A. H. Nieto, S. Encinas & J. Garmendia (1998). Spatial, temporal patterns of annual precipitation variability over the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology* 18: 299-316.
- Trigo, R., D. Pozo-Vázquez, J. Timothy, T. J. Osborn, Y. Castro-Díez, M. Gámiz-Fortis & M. J. Esteban-Parra (2004). North Atlantic oscillation influence on precipitation, river flow, water resources in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology* 24:925-944.

CHAPTER 5 / CAPÍTULO 5

**Recent changes and tendencies in
precipitation in Andalusia**

**Cambios y tendencias recientes en
las precipitaciones de Andalucía**

Recent changes and tendencies in precipitation in Andalusia

Mónica Aguilar Alba

Department of Physical Geography. University of Seville. C/ María de Padilla s/n. 41004 Sevilla. malba@us.es

ABSTRACT

Quantifying and understanding climatic changes at a regional scale is one of the most important and uncertain issues within the global change debate. An important step towards the understanding of regional climatic changes and impacts is the assesment of natural climate variability (Lionello et al. 2006). The analysis of a numerous precipitation monthly series over the period 1931-2007 located in the main mountainous ranges of Andalusia region (South of Spain) is presented. These areas are especially sensitive to climate changes due to the fact that most natural protected ecosystem and reservoirs are placed there, where most of the regional precipitation amounts fall and the main water volumes of the region are stored. Therefore, the occurence of changes in the averages of the pluviometric contributions in these mountains will have important environmental and socio-economic impacts.

The mosts relevant and significant changes is found in March when precipitation in the central and western regions of the Iberian Peinsula presents a clear continuous decline of 50% from the 60's onwards documented by several authors. In this paper we describe this phenomenon up to 2007 evaluating, on the one hand, its magnitude and evolution from a historical perspective and, on the other hand, the spatial variations of precipitation in the study area. Despite the similarities with other periods when considering various centuries of data, these last decades of the 20th century present different characteristics. The results of this study are related to climate change predictions and to recent studies reporting atmospheric circulation changes in the North Atlantic area.

Key words: *precipitation, trends, March, climate change, variability, Iberian Peninsula, Andalusia, mountains*

Cambios y tendencias recientes en las precipitaciones de Andalucía

Mónica Aguilar Alba

Departamento de Geografía Física y A.G.R. Universidad de Sevilla. C/ María de Padilla s/n. 41004 Sevilla. malba@us.es

RESUMEN

La cuantificación y el conocimiento de los cambios climáticos a escala regional es una de las temáticas más relevantes en el debate del cambio global. Poder entender los cambios a nivel regional y sus impactos es avanzar en el conocimiento de las características de variabilidad natural (Lionello et al. 2006). Se presentan en este trabajo los resultados del análisis de numerosas series de precipitación de Andalucía durante el periodo 1931-2007 de observatorios localizados en los principales sistemas montañosos de la región. Estas zonas son especialmente sensibles a las variaciones climáticas, ya que en ellas se localizan la mayor parte de los espacios naturales protegidos e infraestructuras hidráulicas. Las cantidades más importantes de precipitación se registran en estas zonas donde se acumulan los principales recursos hídricos de la región. Por ello, la existencia de cambios en las precipitaciones en estas áreas puede tener considerables impactos medioambientales y socio-económicos.

Desde los años sesenta hasta los años noventa del siglo pasado, el cambio más destacable en las series de precipitación, es una tendencia decreciente en marzo, que ha sido constatada por diversos autores para la vertiente occidental de la Península Ibérica. En este artículo ampliamos la dimensión temporal de este fenómeno, evaluando su magnitud con una perspectiva histórica (comienzos del siglo XIX), y extendiéndolo hasta el presente. Además, si examinamos las variaciones espaciales que se registran en todo el sur peninsular. El análisis del fenómeno a una escala plurisecular pone de manifiesto la singularidad de este comportamiento en las precipitaciones a lo largo de las últimas décadas del siglo XX. Por último, hemos puesto en relación los resultados obtenidos, con las previsiones de cambio climático y con estudios recientes sobre variaciones en los patrones de circulación atmosférica en el Atlántico norte.

Palabras clave: *precipitación, tendencias, marzo, cambio climático, variabilidad, Península Ibérica, Andalucía*

INTRODUCCIÓN

Probablemente el área mediterránea es una de las zonas en que la mayor parte de las simulaciones llevadas a cabo mediante distintos modelos climáticos ofrece resultados más coherentes en cuanto a las señales climáticas esperables en un futuro. De hecho,

las diferentes simulaciones acerca de los efectos antropogénicos sobre el clima coinciden en la predicción de un aumento general de las temperaturas mayor que la media planetaria y un descenso, también mayor al global, en las precipitaciones estivales (Lionello et al. 2006). Sin embargo, todavía existe una gran incertidumbre en esta

región sobre el comportamiento futuro de las precipitaciones debido a que la mayor parte de los modelos aún tienen dificultades en describir la cuenca mediterránea dada su accidentada y compleja topografía. Para captar el comportamiento de parámetros tan variables como el viento y la precipitación es necesario conocer bien la diversidad espacial de estos fenómenos, ya que sus escalas de variabilidad son inferiores a 10 Km. A esta complejidad hay que sumar los cambios estacionales, ya que esta zona de transición entre las latitudes subtropicales y las medias, se ve sometida a la alternancia de diferentes centros de presión a lo largo del año. En la región andaluza, a todos estos rasgos de la zona mediterránea hay que añadir la diversidad de su topografía, su localización meridional en Europa, cercana al continente africano, y la influencia de dos grandes mares, factores que añaden aún más complejidad al comportamiento de las precipitaciones. Por esta razón, conocer el funcionamiento de la precipitación a una escala regional y detallada resulta cada vez más necesario para poder validar y perfeccionar los modelos climáticos. De este modo se reduce la incertidumbre sobre los posibles escenarios futuros y la magnitud y tendencia de los cambios esperables para zonas de especial dificultad.

En los últimos años, el número de estudios sobre la precipitación y su comportamiento espacial y temporal han ido aumentando notablemente, siendo lo más habitual que se realicen a escala de la Península Ibérica, y a partir de un número no muy abundante de estaciones. Recientemente, comienzan a aparecer trabajos exhaustivos sobre la tendencia de la precipitación en el área mediterránea como los trabajos de Millán (Millán et al., 2005) y de González-Hidalgo sobre una red de estaciones muy densa (González-Hidalgo, 2006), lo que permite evaluar los cambios con una gran riqueza espacial. Sin embargo, aunque este último

estudio abarca parte de la zona sur oriental de Andalucía, el resto de la región andaluza no ha sido estudiado con el suficiente número de observatorios que permita conocer en detalle y evaluar, las tendencias que la precipitación está experimentando en la región.

Por otro lado, numerosos trabajos se centran en las precipitaciones invernales, intentando explicar los patrones de comportamiento espacial en relación con la NAO (Oscilación del Atlántico Norte). En estos meses invernales, cuando la fuerza de los vientos del oeste es mayor y los contrastes de presión latitudinales son más intensos, se han detectado cambios débiles en las tendencias para la Península, que parecen algo más acusados en el norte (Rodríguez-Puebla & Brunet, 2007).

Son menos frecuentes los estudios centrados en los meses equinocciales (Rodríguez-Puebla et al., 2002) aunque recientemente han recibido una mayor atención científica debido a los notables cambios que se detectan en las precipitaciones primaverales. Entre estos estudios, podemos mencionar, los dedicados al descenso de las precipitaciones en la zona occidental de la Península Ibérica en las últimas décadas del siglo XX (Raso, 1996; García-Barrón, 2002; Rodrigo, 2002; Rodríguez-Puebla et al, 2002; Saladié et al., 2002; González-Hidalgo et al., 2006; Rodrigo & Trigo, 2007) y, más detalladamente, para el mes de marzo (Serrano et al, 1999; Galán et al., 1999; Paredes et al., 2006; Aguilar et al., 2006). Los citados estudios han analizado este comportamiento hasta mediados de los años noventa, verificando la significación estadística de la tendencia. En el trabajo más reciente de Paredes et al. (2006), en el que se analiza este fenómeno en toda la Península Ibérica a lo largo del periodo 1941-1997, se pone de manifiesto cómo este descenso se inicia en 1960 y supone una

disminución de un 50% en los totales pluviométricos de marzo.

En Andalucía, los recientes escenarios regionalizados obtenidos del proyecto “Generación de Escenarios de Cambio Climático en Andalucía” realizados por la FIC (Fundación para la Investigación del Clima) en el marco de la Estrategia de la Comunidad Autónoma Andaluza ante el Cambio Climático (Junta de Andalucía, 2007), permiten disponer de información a escala local y para horizontes próximos (2011-2020, 2041-2050, 2091-2100). La escala espacial y temporal de estos escenarios es muy adecuada para los gestores (escala local y un horizonte de 10-20 años), facilitando las tareas de planificación y adaptación al cambio. A su vez, estos escenarios regionalizados se podrán integrar con modelos hidrológicos para traducirlos en términos de sus impactos sobre las aportaciones a ríos, embalses y acuíferos, y así poder evaluar la vulnerabilidad de los distintos sistemas de explotación agrícola. Cabe resaltar los excelentes resultados de la verificación de esta modelización para Andalucía en el caso de las temperaturas; sin embargo, estos escenarios se deben manejar con cautela para la precipitación, ya que los errores de verificación del modelo son, en algunos casos, similares a los cambios simulados (Giansante, 2007). Por todo ello, siguen siendo necesarios más estudios sobre esta región que permitan mejorar el conocimiento climático de Andalucía, tanto a escala espacial como temporal, no sólo para la precipitación, sino para la mayoría de las variables climáticas.

En esta línea, el presente trabajo pretende continuar profundizando en el conocimiento de los cambios y tendencias más destacables que ha experimentado la precipitación en Andalucía y continúa profundizando en los resultados presentados en 2006 por la autora y colaboradores (Aguilar et al., 2006). El análisis de la precipitación se centrará, espe-

cialmente, en series que comienzan a principios del siglo XX hasta el presente, dando una dimensión espacial a los cambios que en estas series temporales se detectan. De esta forma, podremos apreciar cómo los cambios atmosféricos, a gran escala, no necesariamente se traducen en cambios uniformes en espaciales y, por otro lado, cómo las diferencias espaciales permiten delimitar y evaluar la dimensión de los cambios atmosféricos que se están registrando.

En el estudio precedente, el ámbito analizado fue la región de Andalucía extendiendo sus límites al sector meridional de Portugal y la región murciana, lo que permitió analizar la dimensión espacial de los cambios en las precipitaciones en todo el sur peninsular. Uno de los resultados destacables fue que los descensos más importantes en las precipitaciones se producían en las zonas de montaña, áreas espacialmente sensibles y vulnerables a estos cambios. Por esta razón, el presente trabajo se centra en los ámbitos montañosos de la región, de gran valor natural, y donde se localizan gran parte de los pantanos que permiten regular y gestionar los recursos hídricos. Un descenso en las aportaciones pluviométricas tendrá, sin ninguna duda, unos impactos notables sobre estos valiosos ecosistemas y sobre los volúmenes embalsados, de consecuencias medioambientales y socio-económicas graves, ya que afecta a un recurso sometido a una fuerte demanda.

ÁMBITO DE ESTUDIO Y DATOS

En nuestro estudio, pretendemos avanzar en la caracterización de la precipitación en Andalucía partiendo de los trabajos precedentes, aunque ampliando la cobertura espacial y temporal. En primer lugar, hemos utilizado un número elevado de series, con el objeto de encontrar matices espaciales y, en segundo lugar, hemos enmarcado los

cambios detectados en un contexto temporal más amplio, utilizando para ello las series históricas más largas de Andalucía. En la medida de lo posible, las series utilizadas han sido actualizadas hasta el año 2007, con el fin de describir el comportamiento más reciente de la precipitación en aquellos meses que registran cambios significativos, fundamentalmente el mes de marzo. Por último, relacionaremos estos resultados con las proyecciones de cambio climático para la región y con recientes estudios sobre variaciones climáticas en el ámbito del Atlántico Norte.

de lagunas en su interior, las cuales se han interpolado a partir de los datos procedentes de observatorios cercanos, mediante regresión lineal simple a partir de la serie mejor correlacionada. Sólo en algunos casos, y especialmente en el ámbito oriental de Andalucía, donde la cobertura espacial de la red de observatorios es más deficiente, los criterios han sido algo menos rigurosos en estos requisitos.

Siguiendo estos criterios se han utilizado un total de 141 estaciones de observación, distribuidas en las principales zonas de montaña, como puede apreciarse en la Tabla 1

Zonas	Provincia	Número de estaciones
Sierra de Aracena	Huelva	10
Sierra Norte Córdoba y Sevilla	Córdoba y Sevilla	19
Pedroches	Córdoba	21
Serranía de Ronda	Cádiz y Málaga	32
Sierra Nevada	Granada y Almería	19
Sierras de Cazorla y Segura	Jaén	40
Total		141

Tabla 1. Número total de observatorios utilizados para el estudio según las zonas montañosas establecidas.

Iniciaremos nuestro estudio, con la caracterización de algunos rasgos esenciales de la precipitación en Andalucía para lo que utilizaremos un observatorio representativo de los rasgos más generales en la región, como es el observatorio de Jerez de la Frontera Aeropuerto, en la provincia de Cádiz. Posteriormente, profundizaremos en estos rasgos y así, partiendo de los resultados de nuestro estudio anterior, se han seleccionado las estaciones de observación situadas en los principales sistemas montañosos de la región, donde se han registrado los cambios más notables. Las series de precipitación se han escogido atendiendo a dos criterios fundamentales: la calidad de sus series y una extensión temporal lo más amplia posible, con un mínimo de 70 años de observación y prolongación hasta los años 2006 y 2007. Además, se les ha exigido un máximo de 5 %

y Figura 1. A este grupo hay que sumar, los observatorios que disponen de las series históricas más largas de la región que nos permitirán enmarcar los cambios detectados, en un contexto temporal más amplio y que aparecen en la Tabla 2.

Como es habitual en este tipo de estudios, lo que se pretende analizar es la señal espacial de cambio a largo plazo a una escala mayor que la local, se han combinado las series, con el objetivo de obtener una nueva serie regional representativa del territorio analizado (Jones & Hulme, 1996; Saladié et al., 2004). Ésta se construye a partir de las series individuales estandarizadas, lo que está especialmente recomendado en sectores con una alta variabilidad en la precipitación, como es el caso de suroeste peninsular. El periodo de referencia elegido para la estandarización de las series, ha sido el

último periodo internacional, 1971-2000, siguiendo las recomendaciones de la OMM (WMO, 1967).

No enumeraremos ni describiremos, todas las series utilizadas en este estudio ya que ocuparía un espacio excesivo. Hemos construido seis series regionales de los ámbitos montañosos formadas por un número variable de estaciones, según se recoge en la Tabla 1 y que comparten, como mínimo, el periodo común 1951-2006. A éstas, se suma una séptima serie regional, denominada “histórica”, que no siempre está constituida por el mismo número de observato-

rios. Se inicia con los registros de las dos series más largas (San Fernando y Gibraltar) a principios del siglo XIX, y, a medida que comienzan las demás series, se van incorporando éstas al cálculo de la serie regional (compuesta finalmente por 8 series). Por lo tanto, nuestro estudio parte del análisis de un total de 149 series de precipitación, todas ellas pertenecientes al Instituto Nacional de Meteorología, y, sólo una de ellas no española, Gibraltar, del servicio meteorológico británico (Mettoffice).

Las series de precipitaciones fueron sometidas a un control de calidad inicial que per-

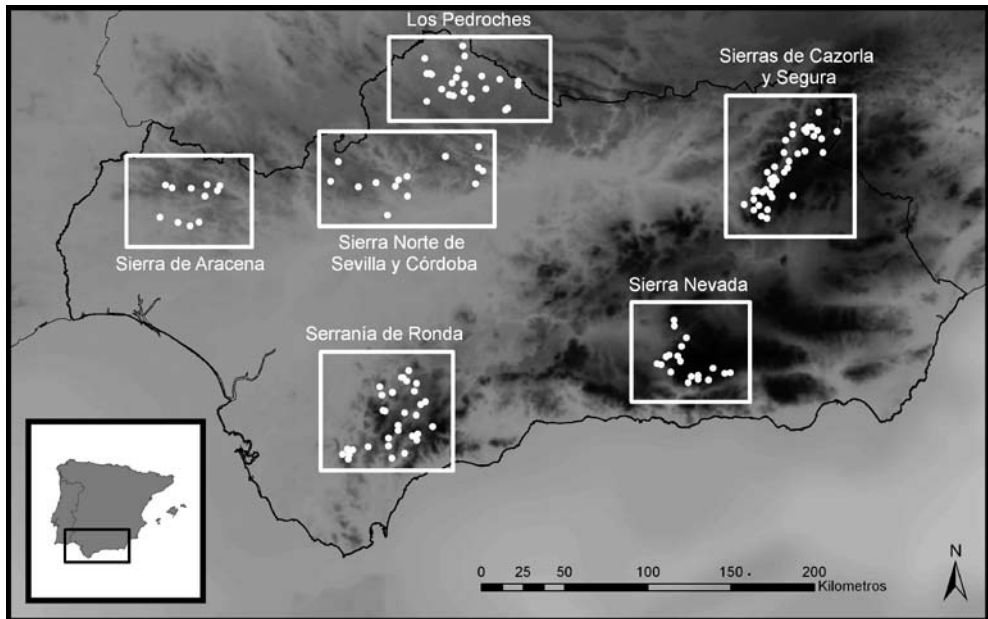


Figura 1. Localización de los observatorios utilizados para el estudio según las zonas montañosas establecidas.

Observatorio	Provincia	Año Inicio	Año fin
Gibraltar	Gibraltar (R.U)	1813	2006
Jerez de la Frontera	Cádiz	1912	2007
Sanlúcar de Barrameda	Cádiz	1888	2005
San Fernando	Cádiz	1838	2005
Sevilla	Sevilla	1871	2005
Tarifa	Cádiz	1869	2005
Úbeda	Jaén	1864	2005
Jaén	Jaén	1867	2005

Tabla 2. Estaciones meteorológicas utilizadas para crear la serie histórica regional de Andalucía.

mitió detectar y corregir numerosos valores erróneos. Posteriormente, y para garantizar la homogeneidad de los datos, se les aplicó el Test de las Diferencias Acumuladas de Craddock (Craddock, 1979) y el Standardized Normal Homogeneity Test de Alexandersson para una sola serie (Alexandersson, 1986; Alexandersson & Moberg, 1997). Algunas de las series, consideradas en fases iniciales del estudio, no fueron finalmente utilizadas en la fase de análisis, por no presentar las garantías de homogeneidad suficientes.

EL RÉGIMEN DE PRECIPITACIONES EN ANDALUCÍA

Con el fin de comprobar si hay cambios en el régimen de precipitación, relacionados con el cambio climático, que pueden traducirse en desplazamientos estacionales, vamos a describir el ciclo anual más representativo en Andalucía para relacionarlos posteriormente con nuestros resultados. Cualquiera de las características que decidamos describir sobre la precipitación en los medios

mediterráneos destacará como rasgos esenciales, en primer lugar, la escasez de precipitaciones durante el verano, que marca el ritmo y ciclo biológico de los ecosistemas y de la sociedad en general en cuanto a consumos, y en segundo lugar, la variabilidad.

En general, si observamos el régimen medio de precipitaciones en Andalucía se caracteriza por presentar un mínimo estival centrado en el mes de julio (ver Figura 2). Los meses de mayor precipitación respecto al total son: noviembre, diciembre y enero con valores entre 12-13,5 %. A partir de enero, los valores comienzan a decrecer progresivamente, al mismo tiempo que las temperaturas van aumentando, lo que supone el inicio del periodo de déficit hídrico que se extiende desde abril hasta octubre, mes en el que vuelve a restituirse el equilibrio entre las pérdidas por evapotranspiración y las lluvias.

La diversidad de comportamientos en Andalucía es grande, al “mezclarse” los ciclos típicamente atlánticos con los mediterráneos. Esto se traduce, lógicamente, en la existencia de diferencias espaciales

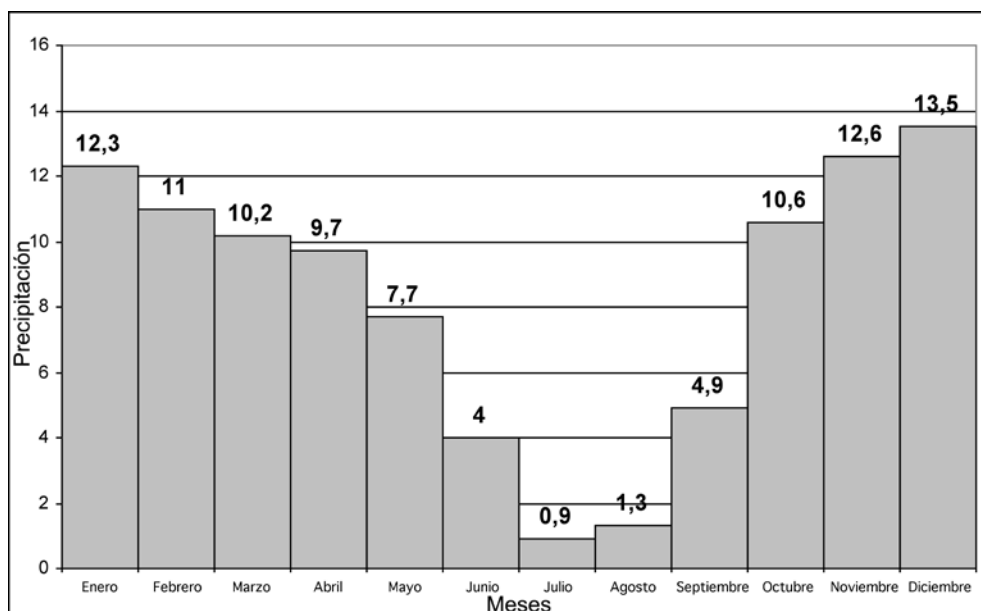


Figura 2. Régimen medio de las precipitaciones en Andalucía (en porcentajes).

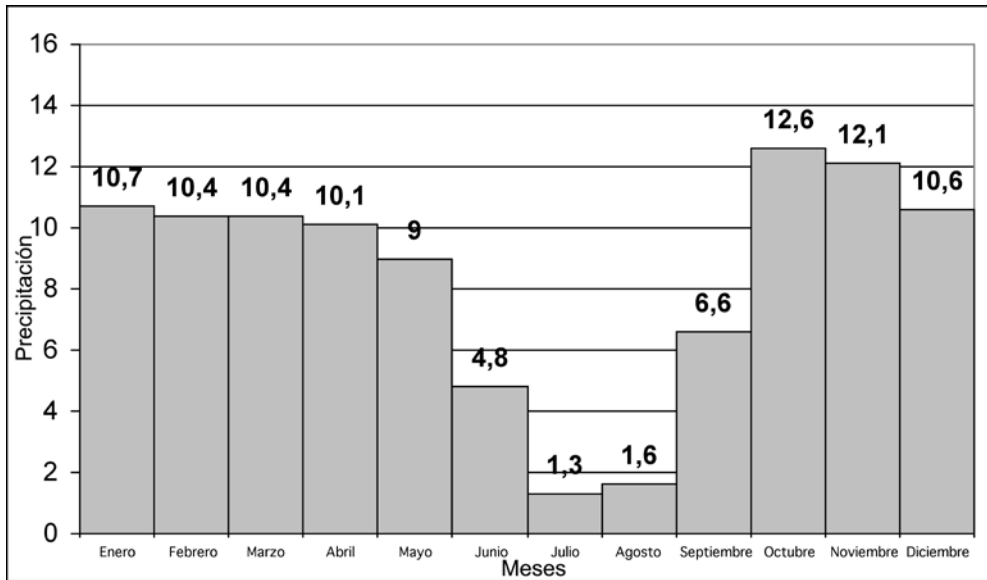


Figura 3. Régimen medio de las precipitaciones en Andalucía oriental (en porcentajes).

muy notables en el ciclo anual, debidas fundamentalmente, a la disposición del relieve, pero también a otros factores como la posición y distancia océano Atlántico y del mar Mediterráneo. Como resultado de todo ello, encontramos un comportamiento diverso en los volúmenes de precipitaciones anuales y mensuales, y en la localización de los máximos. Incluso el rasgo esencial que define los climas mediterráneos, la fuerte sequía estival, presenta diferencias notables en las cantidades registradas respecto al total anual de precipitación, desde mínimos en la zona más occidental, con valores en torno a 2,5 %, hasta valores que alcanzan un 12 % en los observatorios orientales de escasa pluviometría.

En cuanto al comportamiento en la zona oriental, (ver Figura 3), podemos observar cómo las precipitaciones se reparten de forma mucho más regular desde octubre a mayo, con valores en torno al 10%, destacando los meses de octubre y noviembre, que es cuando las precipitaciones ligadas al Mediterráneo, relacionadas con tipos sinópticos convectivos y de advecciones mediterráneas (levantes), son las que aportan mayores lluvias a estas zonas. Como

ponen de manifiesto los recientes trabajos de Estrella, Millán y Miró, que analizan las variaciones y tendencias de la precipitación en el ámbito Valenciano según tipos sinópticos, estos tipos de regímenes también están detectando cambios significativos que parecen explicar el comportamiento que también muestran las series de precipitación de la zona oriental de Andalucía (Estrella et al., 2006; Millán et al., 2006; Miró et al., 2006).

PRINCIPALES CAMBIOS Y TENDENCIAS DE LAS PRECIPITACIONES EN ANDALUCÍA. EL DESCENSO DE LAS PRECIPITACIONES EN MARZO

Aunque el presente estudio sólo presenta los resultados del tratamiento de las precipitaciones a escala mensual, se han analizado también, solo en alguno de los observatorios, los registros a escala diaria a fin de obtener el máximo diario mensual y el número de días de lluvia al mes. Para llevar a cabo un estudio completo es necesario contemplar estas dos variables ya que cambios en los

totales de precipitación pueden ser debidas a variación en la frecuencia de los episodios de lluvia, en la intensidad de éstos o en la combinación de ambos (Rodrigo & Trigo, 2007).

El análisis de las precipitaciones en el observatorio de Jerez de la Frontera Aeropuerto, ofrece los siguientes resultados que pueden apreciarse en la Tabla 3. A escala mensual sólo el mes de marzo presenta una tendencia decreciente significativa estadísticamente, que será el objetivo fundamental de nuestro estudio. El descenso se acompaña de una disminución, también significativa, de los máximos de precipitación diaria registrados durante este mes. Los citados resultados son coherentes con los presentados recientemente para la Península Ibérica por Rodrigo y Trigo, que constatan un descenso generalizado de la intensidad de la precipitación diaria (Rodrigo & Trigo, 2007). Sin embargo, esta tendencia, que la investigación registra fundamentalmente para los meses de invierno, no se detecta en nuestra serie, si bien es cierto que en el estudio se presenta con índices, y no directamente con las cantidades de estos episodios diarios máximos mensuales. Igualmente, los resultados de este trabajo, llevado con datos hasta el año 2002, no detectan ten-

dencias significativas en el número de días de precipitación. Sin embargo, en nuestros observatorios sí se registran durante los meses de octubre a febrero tendencias significativas en el número de días de precipitación, como se recoge en la Tabla 3.

Las conclusiones, aparentemente diferentes, ponen de manifiesto tres cosas. la complejidad de la variabilidad espacial de la precipitación, la necesidad de unificar metodologías para poder comparar resultados y el hecho de que, desde el 2002 al 2007, hasta donde llegan nuestras series, las tendencias se han ido agudizando, alcanzando este comportamiento significación estadística.

En nuestro estudio anterior (Aguilar et al., 2006) en el que analizamos 33 estaciones distribuidas por todo el territorio andaluz, se registra un descenso notable de las precipitaciones en el más de marzo. El fenómeno se produce en todo el ámbito de estudio, con la excepción de los observatorios del sureste, situados en las provincias de Almería y Murcia (Figura 4). Sin duda, la importante barrera separadora ejercida por el Sistema Bético entre los mecanismos atmosféricos “atlánticos” y “mediterráneos”, matiza espacialmente los efectos de unos y otros y determina esta individualización del sector sureste de la región.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Total mensual	NO	NO	SI(*)	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Máximo diario mensual	NO	NO	SI(*)	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Número días con precipitación al mes	SI(*)	SI(*)	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI(*)	SI(*)	SI(*)

Tabla 3. Tendencias en las precipitaciones. Observatorio de Jerez de la Frontera Aeropuerto. (*) Descenso significativo al 95% según el test T-test para el coeficiente de regresión b1, el test de aleatoriedad para verificar la tendencia de los rangos de Spearman y el test de Mann-Kendall.

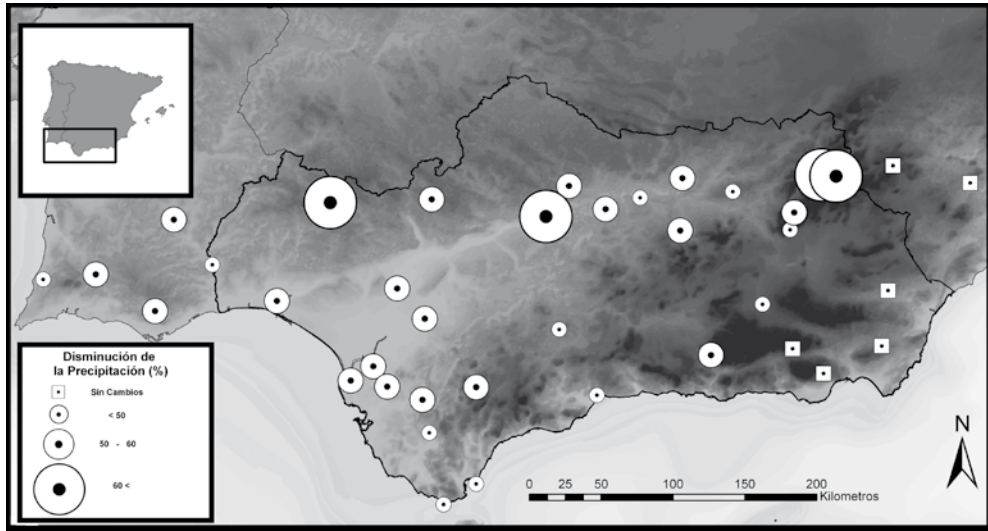


Figura 4: Mapa con el porcentaje de disminución de la precipitación en marzo del periodo 1971-2000 respecto a 1931-1960 (Aguilar et al., 2006).

Los estudios de Millán et al para la Comunidad Valenciana, ya mencionados, confirman un aumento en primavera de los episodios de torrencialidad ligados a las situaciones de frente en retroceso con respecto a las precipitaciones de origen convectivo o advecciones atlánticas que presentan una tendencia decreciente (Millán et al., 2006). Este efecto “compensatorio” entre los diferentes tipos de precipitaciones según su origen sinóptico explicaría la ausencia de tendencia en las series de marzo de la zona más sureste. Tal vez si distinguiéramos en los registros de marzo por tipos de tiempo, como hacen estos estudios citados, podríamos encontrar, también, tendencias decrecientes significativas en la zona, pero este tipo de análisis están fuera de los objetivos del presente estudio. No obstante, podemos concluir que en las series que presenten un régimen predominantemente mediterráneo, con predominio de inputs por frente en retroceso, es esperable que no encontremos una tendencia decreciente en las precipitaciones, por las razones que acabamos de exponer.

Así pues, a la vista de los resultados obtenidos, nos centraremos en las zonas de montaña que son las que están registrando los mayores porcentajes de disminución. Las estaciones más adecuadas fueron seleccionadas y posteriormente, una vez verificada su homogeneidad, se obtuvo la correspondiente serie representativa en cada una de ellas, siguiendo el procedimiento explicado en el apartado de ámbito de estudio y datos. La construcción de las series permite atenuar las diferencias locales y evaluando y cuantificando las tendencias y comportamientos más generales. En la Tabla 5 se recoge la disminución en valores absolutos y en porcentajes de las medias entre diferentes periodos internacionales establecidos por la OMM.

Habría que destacar en los resultados, cómo el descenso de las precipitaciones para el periodo 1971-2000 respecto a 1931-1960, supone más de un 50%. Cuando comparamos la disminución entre los años 1971-2000 respecto a 1961-1990, en que disponemos de registros para todas las zonas, podemos apreciar descensos notables para todas las zonas de Sierra Morena.

	1901-1930	1931-1960	1960-1990	1971-2000
Sierra Aracena	116,8	134,1	80,8	56,7
Sierra Norte			58,1	41,2
Pedroches			44,6	34,7
Serranía Ronda	211,7	170,8	92,2	76,6
Sierra Nevada		78,5	60,6	51,3
Sierra Cazorla	146,5	131,7	92,8	74,4
Porcentaje de reducción		61-90/31-60	71-00 /61-90	71-00/31-60
Sierra Aracena		39,8	29,8	57,7
Sierra Norte			29,1	
Pedroches			22,1	
Serranía Ronda		46,0	16,9	55,1
Sierra Nevada		22,9	15,3	34,6
Sierra Cazorla		29,6	19,8	43,5

Tabla 5. Precipitaciones medias de marzo (milímetros) de los periodos internacionales del siglo XX y porcentaje de disminución entre ellos.

Este hecho concuerda con el apuntado por Paredes et al. (2006), pero introduce, además, matices espaciales en los valores de estos porcentajes de disminución y resalta el *gradiente*, de oeste a este y hacia la vertiente mediterránea, en el que los valores son notablemente inferiores (por

debajo de un 20%; ver Figura 5). Esta diferenciación pluviométrica en Andalucía no haría sino reforzar la ya detectada por Pita et al. (1999) en relación con la variabilidad de las precipitaciones. Según algunos autores, este fenómeno sería una manifestación más de los cambios

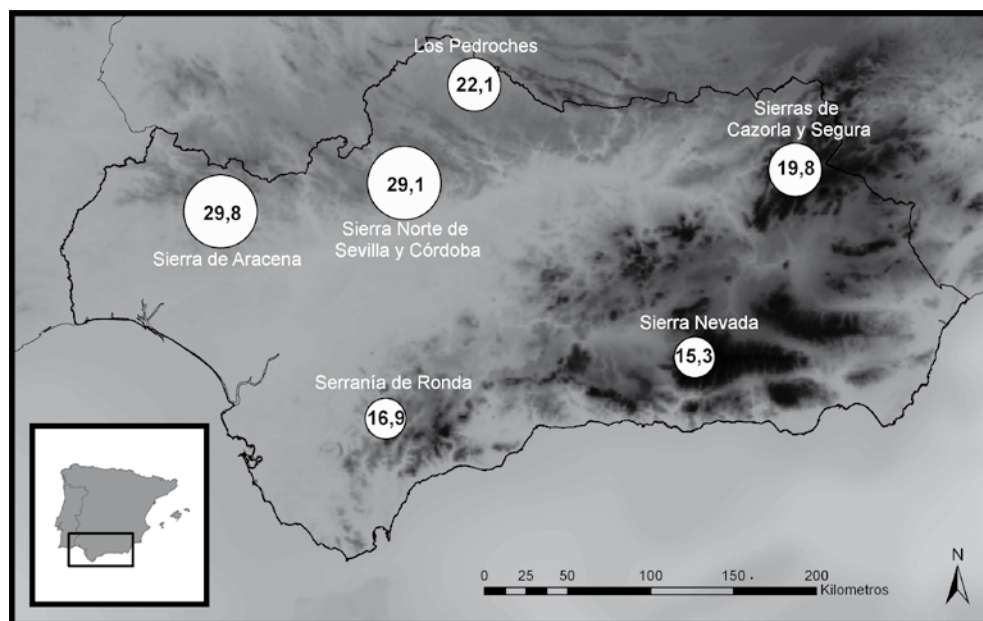


Figura 5. Mapa con el porcentaje de disminución de la precipitación en marzo del periodo 1971-2000 respecto a 1961-1990 en cada una de las zonas montañosas.

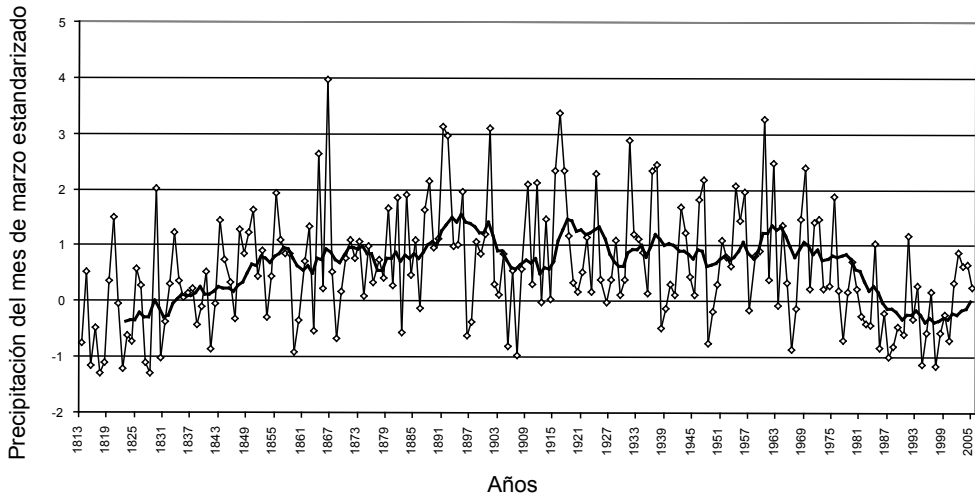


Figura 6. Serie histórica regional de precipitación de marzo estandarizada según el periodo 1971-2005 a la que se ha aplicado una media móvil de 11 años (1813-2005).

que se están detectando en la circulación atmosférica en el sector noratlántico de Europa (Kyselý & Domonkos, 2006; Cassou et al. 2004). En las últimas cuatro décadas, los cambios parecen estar asociados a variaciones significativas en las frecuencias de los tipos de tiempo y en las trayectorias de los ciclones (perturbaciones frontales), lo que están originando un aumento de la precipitación en las regiones más septentrionales (Islas Británicas y parte de Escandinavia), simultáneo a un descenso en la zona sur atlántica (Trigo & Dacamara, 2000).

En la Península, cuando analizamos el comportamiento en la Península, mediante un análisis de componentes principales, puede detectarse en toda la zona occidental que se encuentra bajo la influencia directa de las perturbaciones frontales ligadas a la corriente en chorro (Paredes et al., 2006), habiendo sido identificada esta zona como el primer modo de variación de la precipitación, (Rodríguez-Puebla, 1998; Serrano et al., 1999). La Oscilación del Atlántico Norte (NAO) es el principal mecanismo responsable de las fluctuaciones y cambios en las precipitaciones en este ámbito.

LA EVOLUCIÓN SECULAR DE LAS PRECIPITACIONES EN MARZO

Una vez descrita la importancia de las variaciones espaciales de fenómeno, hemos querido contextualizar los cambios a una escala temporal lo más extensa posible. Con este fin hemos utilizado algunas de las series históricas más largas de la región, que han servido de base para la construcción de la “serie histórica regional”. La evolución de las precipitaciones en dicha serie, desde comienzos del siglo XIX, aparece reflejada en las Figuras 6 y 7, y en ellas se pone claramente de manifiesto la relevancia, a escala plurisecular, de la tendencia decreciente en las precipitaciones, iniciada en los años 60 del siglo XX, la cual, además, continúa siendo significativa, estadísticamente, con arreglo al test de los Rangos de Spearman y el de Mann-Kendall, para un nivel de significación del 95 %.

En la serie histórica regional pueden distinguirse tres etapas: una primera, desde los inicios hasta 1840, con valores muy bajos y crecientes; una segunda etapa, muy extensa, que abarca el resto del siglo XIX y que se extiende hasta 1970 en que los valores son

bastante estables en su conjunto, y una tercera, que se prolonga hasta el final de la serie, en la que encontramos de nuevo pre-

dicciones hídricas de este mes, por implicar una marcada permanencia en valores pluviométricos bajos.

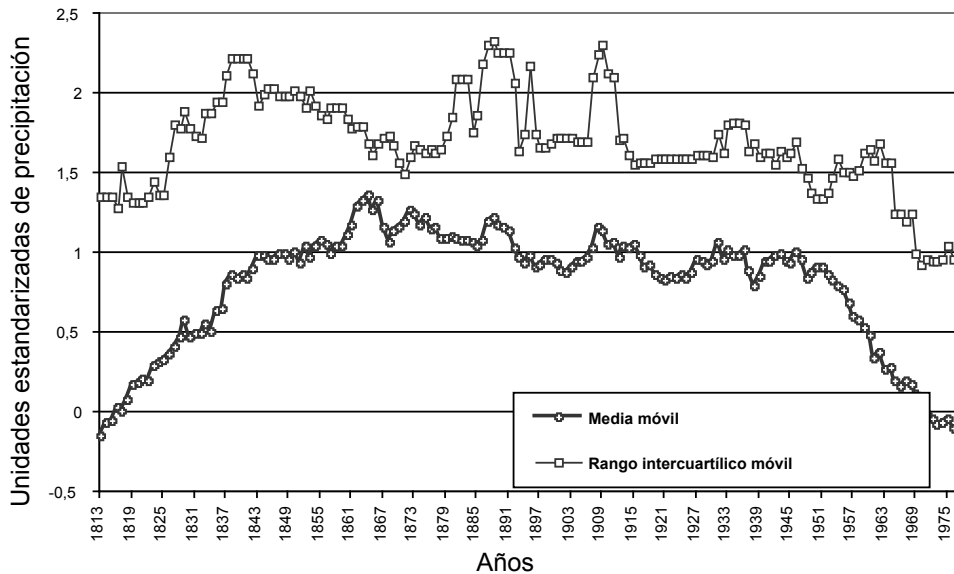


Figura 7. Media y rango intercuartílico móvil de 30 años de la serie regional histórica estandarizada para el periodo 1813-2005.

cipitaciones muy bajas, a pesar de que parecen remontar, ligeramente, en los últimos años. Estos mismos periodos de diferente comportamiento en las precipitaciones en el siglo XX, también han sido identificados en otras zonas de la Península (Aguilar & Pita, 1996; Creus, 1996; Saladié et al., 2002).

Asistimos, pues, a lo largo de estos dos siglos, a una disminución paulatina de la variabilidad pluviométrica y a un volumen de precipitaciones que se mantiene predominantemente estable, con la excepción de la etapa 1813-1840, de marcado ascenso y la etapa actual (1971-2000) en la que lo que se detecta es un descenso notable (Figura 7). Así pues, la singularidad de este último periodo vendría dada por un marcado descenso de las precipitaciones, unido a su reducida variabilidad. Esta circunstancia lo convertiría en único a lo largo de todo el periodo instrumental, además de dotarlo de un presumible agravamiento de las con-

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El estudio de numerosas series de precipitaciones del mes de marzo, en el sur de la Península Ibérica, pone de manifiesto los siguientes aspectos esenciales: en primer lugar, la existencia de una tendencia decreciente importante desde los años sesenta del siglo XX hasta la actualidad, a pesar del ligero repunte registrado en el año 2001. En segundo lugar, la significación estadística de la tendencia, incluso a escala plurisecular, lo que evidencia la magnitud histórica de este comportamiento. El descenso de las precipitaciones, de una duración ya muy prolongada, se acompaña de una disminución significativa de la variabilidad pluviométrica, lo cual agrava, aún más, su impacto sobre los recursos hídricos, por la permanencia de valores muy bajos de precipitación que no pueden compensarse inte-

ranualmente. Son también destacables las diferencias espaciales que aparecen en los porcentajes de disminución de la precipitación, destacando los gradientes norte-sur y este-oeste. Por otro lado, las diferencias espaciales encontradas son coherentes con el patrón general de la precipitación en la región, con dirección predominante SE-NW (Romero et al., 1998; Martín-Vide & Fernández, 2001).

Para evaluar la importancia de los cambios conviene situarlas en el marco de las tendencias registradas por esta variable a escala planetaria, en el contexto de los factores que potencialmente pueden generarlas y, desde luego, en el contexto de la amenaza de cambio climático que pesa sobre todo el planeta. En este sentido, podemos apuntar algunos hechos de especial interés:

Sabemos que el índice de Oscilación del Atlántico Norte (NAO) representa el principal modo de variación en la zona y, entre otros factores, se asocia con los cambios en la trayectoria y fuerza de las perturbaciones frontales, con la temperatura de la superficie del mar o con las anomalías en las temperaturas y en las precipitaciones en Europa, principalmente durante el invierno (Hurrell, 1995). Se ha confirmado, también, la asociación de esta tendencia decreciente de las precipitaciones, con un aumento de la temperatura del mar, el fenómeno el Niño y la Oscilación del Ártico (AO) (Rodríguez-Puebla et al., 2002). Recientemente, algunos estudios indican que la AO y la NAO tienen tendencia predominante a la polaridad positiva, o anomalías positivas de presión en zonas subtropicales, y negativas en las subpolares. Ello conlleva un desplazamiento hacia el norte de los vientos zonales del oeste y, como consecuencia, cambia el régimen de precipitación (Rodríguez-Puebla & Brunet, 2007). Otros muchos trabajos recientes, confirman los cambios significativos que se están produciendo en los patrones de circulación en el Atlántico Norte, especialmente

desde los años ochenta (Trigo & Dacamara, 2000; Fealy & Sweeney, 2005; Kyselý & Domonkos, 2006, entre otros).

En el contexto de un cambio climático, es bien conocida la fase positiva que a partir de mediados de la década de los setenta, experimenta la NAO. Esta circunstancia, explica el descenso de las precipitaciones que se registra en las latitudes subtropicales, lo que está relacionado con un aumento de las situaciones anticiclónicas en el sur de Europa (Schönwiese & Rapp, 1997; Folland & Karl, 2001). Cassou et al. (2004) analizan el desplazamiento del centro de acción de las Azores hacia el NE, como consecuencia del aumento de los gases de efecto invernadero, lo que explicaría el impacto del calentamiento global sobre la circulación atmosférica y la disminución de la precipitación en la Península Ibérica. Aunque fuera de los objetivos de este estudio, hemos verificado su evolución en los últimos años, a partir de los datos del índice NAO para marzo ofrecidos por Hurrell (2006). La duración de esta fase tiene su valor máximo en 1994 y, a excepción de 1996, con un valor negativo muy bajo, permanece con valores positivos hasta el 2003 (último dato disponible), aunque decreciendo. De todo ello puede deducirse que esta etapa podría estar finalizando. No obstante, la tendencia decreciente de las precipitaciones, se enmarca en un contexto de cambios más amplios que se están produciendo a escala global, desde los años ochenta, y forma parte de los cambios y variaciones climáticas más recientes y significativas. Si este comportamiento de las precipitaciones del mes persiste, y la recuperación iniciada en el año 2001 no continúa remontando, como parece estar sucediendo, las consecuencias para la agricultura y los recursos hídricos pueden agravarse, por lo que debería esta circunstancia ser tenida en cuenta en la planificación hidrológica.

La importancia de las fuertes disminuciones en este mes, no es sólo por el descenso de

las aportaciones, sino por el hecho de que es el último mes con balance excedentario. A partir de abril, cuando las temperaturas comienzan a ser elevadas, aumenta la ETp (evapotranspiración potencial) y ETr (evapotranspiración real) y los balances hídricos comienzan a ser negativos. Aunque no se aprecian tendencias negativas en las series en los meses siguientes, la efectividad de estas precipitaciones posteriores es muy pequeña, al superar la ETp a las precipitaciones registradas. Por lo tanto, las “últimas” precipitaciones útiles son las que aporta este mes, adelantándose el inicio de la estación desfavorable de abril a marzo, lo que sin duda significa un fuerte impacto en los ecosistemas. Estos cambios, unidos al incremento de las temperaturas y la ETr, no sólo modifican diversos aspectos del ciclo hidrológico, sino también la demanda de recursos hídricos (aumento de las demandas

de riego, usos residenciales, etc). Además, los impactos podrán ser tanto cuantitativos como cualitativos deterioro de la calidad de las aguas, cambio en la composición de especies, proliferación de algas, intrusión salina en el litoral (Giansante, 2007). Por todo ello, la planificación hidrológica debe adaptarse a los cambios que se constatan en el clima de la región, buscando estrategias que permitan mitigar sus consecuencias adversas.

AGRADECIMIENTOS

Petr Štipánek por proporcionar su versión ampliada del software Anclim y Proclim, a Juan Carlos González Hidalgo, Arturo Sousa y Leoncio García Barrón por su apoyo y ayuda inestimables, y al Instituto Nacional de Meteorología por las series de precipitación suministradas para este estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, M. & M. F. Pita (1996). Evolución de la variabilidad pluviométrica en Andalucía occidental. su repercusión en la gestión de los recursos hídricos. En: *Clima y agua. La gestión de un recurso climático*. Marzol, M., Dorta, P. & P. Valladares (Eds): 299-311. Tabapress. La Laguna.
- Aguilar, M., E. Sánchez & M. F. Pita (2006). Tendencia de las precipitaciones en marzo en el sur de la Península Ibérica. En: *Clima, Sociedad y medio Ambiente*. (p. 167) Cuadrat, J. M., M. A. Saz, S.M. Vicente, S. Lanjeri, M. De Luis & J.C. González-Hidalgo (Eds): 41-51. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A. 5. Zaragoza.
- Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology* 6: 661-675.
- Alexandersson, H. & A. Moberg (1997). Homogenization of Swedish temperature data. Part I. Homogeneity test for linear trends. *International Journal of Climatology* 17: 25-34.
- Cassou, C., L. Terray, J. Hurrell & C. Deser (2004). North Atlantic climate regimes: spatial asymmetry, stationarity with time and oceanic forcing. *Journal of Climate* 17: 1055-1068.
- Cradock, J. M. (1979). Methods of comparing annual rainfall records for climatic purposes. *Weather* 34: 332-346.
- Creus, J. (1996). Variaciones en la disponibilidad hídrica mensual en el valle del Ebro. En: *Clima y agua. La gestión de un recurso climático*. Marzol, M., Dorta, P. & P. Valladares (Eds): 79-86. Tabapress. La Laguna.
- Estrella, M. J., J. J. Miró & M. Millán (2006). Análisis de tendencia de la precipitación por situaciones convectivas en la Comunidad Valenciana (1959-

- 2004). En: *Clima, Sociedad y medio Ambiente*. Cuadrat, J. M., M. A. Saz, S.M. Vicente, S. Lanjeri, M. De Luis & J.C. González-Hidalgo (Eds.): 125-136. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A. 5. Zaragoza.
- Fealy, R. & J. Sweeney (2005). Detection of a possible change point in atmospheric variability in the North Atlantic and its effect on Scandinavian glacier mass balance. *International Journal of Climatology* 25: 1819 - 1833.
- Folland, C. K. & T. R. Karl (2001). Observed climate variability and change. En: *Climate Change 2001. The scientific basis*. Houghton, J. T. et al (Eds.): 99-182. Cambridge University Press. Cambridge,.
- Galán, E., R. Cañada, D. Rasilla, F. Fernández & B. Cervera (1999). Evolución de las precipitaciones en la Meseta meridional durante el siglo XX. En: *La climatología española en los albores del siglo XXI*. Raso Nadal, J. M. & J. Martín-Vide (Eds): 169-180. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A. 1. Barcelona.
- García-Barrón, L. (2002). Evolución de las precipitaciones estacionales en el Suroeste español; posibles efectos ambientales. En: *El agua y el clima*. Guijarro, J. A., Grimalt, M., Laita, M. & S. Alonso (Eds.): 209-218. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Palma de Mallorca.
- Giansante, C. (2007). *El cambio climático y los recursos hídricos en el territorio andaluz*. Agencia Andaluza del Agua. Junta de Andalucía. Sevilla (En prensa)
- González-Hidalgo, J. C., M. De Luis, P. Stapanek & S. Lanjeri (2006). Propuesta metodológica para realizar el control de calidad de precipitaciones mensuales en la vertiente mediterránea de la península Ibérica. En: *Clima, Sociedad y medio Ambiente*. Cuadrat, J. M., M. A. Saz, S.M. Vicente, S. Lanjeri, M. De Luis & J.C. González-Hidalgo (Eds.): 391-409. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A. 5. Zaragoza.
- Hurrell, J. W. (1995). Decadal trends in the NAO: regional temperatures and precipitations. *Science* 269: 676-679.
- Hurrell, J. W. (2006). North Atlantic Oscillation Index data. <http://www.cgd.ucar.edu/~jhurrel/>
- Jones, P. D. & M. Hulme (1996). Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations. *International Journal of Climatology* 16: 361-377.
- CMA (2007). Junta de Andalucía. Estrategia de la Comunidad Autónoma Andaluza ante el Cambio Climático. <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/web/>
- Kysely, J. & P. Domonkos (2006). Recent increase in persistence of atmospheric circulation over Europe. Comparison with long-term variations since 1881. *International Journal of Climatology* 26: 461-483.
- Lionello, P., P. Malanotte-Rizzoli & R. Boscolo (2006). *Mediterranean climate variability*. Elsevier. Amsterdam. The Netherlands.
- Martín-Vide, J. & D. Fernández Belmonte (2001). El índice NAO y la precipitación mensual en la España peninsular. *Investigaciones Geográficas* 26: 41-58.
- Millán, M., M. J. Estrella & J. J. Miró (2006). Análisis de tendencia de la precipitación bajo situación de frente en retroceso en la Comunidad Valenciana (1959-2004). En: *Clima, Sociedad y medio Ambiente*. Cuadrat, J. M., M. A. Saz, S.M. Vicente, S. Lanjeri, M.

- De Luis & J.C. González-Hidalgo (Eds.): 199-209. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A. 5. Zaragoza.
- Miró, J. J., M. J. Estrella & M. Millán (2006). Análisis de tendencia de la precipitación por frentes atlánticos en la Comunidad Valenciana (1959-2004). En: *Clima, Sociedad y medio Ambiente*. Cuadrat, J. M., M. A. Saz, S.M. Vicente, S. Lanjeri, M. De Luis & J.C. González-Hidalgo (Eds.): 211-220. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A. 5. Zaragoza.
- Paredes, D., R.M. Trigo, R. García-Herrera & I. Franco Trigo (2006). Understanding Precipitation Changes in Iberia in Early Spring. Weather Typing and Storm-Tracking Approaches. *Journal of Hydrometeorology* 7: 101-113.
- Pita, M. F., J. M. Camarillo & M. Aguilar (1999). La evolución de la variabilidad pluviométrica en Andalucía y sus relaciones con el índice de la NAO. Raso Nadal, J. M. & J. Martín-Vide (Eds): 399-408. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A. 1. Barcelona.
- Raso, J. M. (1996). Variación de las precipitaciones en el sur de la España peninsular durante el siglo XX. En: Marzol, M., Dorta, P. & P. Valladares (Eds): 123-132. Tabapress. La Laguna.
- Rodrigo, F. S. (2002). Changes in climate variability and seasonal rainfall extremes: a case study from San Fernando (Spain), 1821-2000. *Theoretical and Applied Climatology* 72: 192-207.
- Rodrigo, F. S. & R. M. Trigo (2002). Trends in daily rainfall in the Iberian Peninsula from 1951 to 2002. *International Journal of Climatology* 27: 513-529.
- Rodríguez-Puebla, C., A. H. Encinas, S. Nieto & J. Garmendia. (1998). Spatial and temporal patterns of annual precipitation variability over the Iberian Peninsula *International Journal of Climatology* 18: 299-316.
- Rodríguez-Puebla, C., A. H. Encinas, M. D. Frías & S. Nieto (2002). Impacto de índices climáticos en las variaciones de precipitación acumuladas en los meses de febrero, marzo y abril. En: *El agua y el clima*. Guijarro, J. A., Grimalt, M., Laita, M. & S. Alonso (Eds.): 315-323. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Palma de Mallorca.
- Rodríguez-Puebla, C., A. H. Encinas, S. Nieto & M. D. Frías, (2006). Comparación de la tendencia de índices de precipitación en la Península Ibérica. En: *Clima, Sociedad y medio Ambiente*. Cuadrat, J. M., M. A. Saz, S.M. Vicente, S. Lanjeri, M. De Luis & J.C. González-Hidalgo (Eds.): 465-474. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A. 5. Zaragoza.
- Rodríguez-Puebla, C. & M. Brunet (2007): Variabilidad y cambio climático. En: *La climatología española. Pasado, presente y futuro*. Cuadrat Prats, J. M. & J. Martín-Vide (Eds): 283-330. Prensas Universitarias de Zaragoza. Zaragoza.
- Romero, R., J. A. Guijarro, C. Ramis & S. Alonso (1998). A 30-year (1964-1993) daily rainfall data base for the Spanish Mediterranean regions: first exploratory study. *International Journal of Climatology* 18: 541-560.
- Saladié, O., M. Brunet, E. Aguilar, J. Sigró. & D. López (2002). Evolución de la precipitación en el sector suroriental de la depresión del Ebro durante la segunda mitad del siglo XX. En: *El agua y el clima*. Guijarro, J. A., Grimalt, M., Laita, M. & S. Alonso (Eds.): 335-346. Publicaciones de la Asociación

- Española de Climatología. Palma de Mallorca.
- Saladié, O., M. Brunet, E. Aguilar, J. Sigró & D. López (2004). Variaciones y tendencia secular de la precipitación en el Sistema Mediterráneo Catalán (1901-2000). En: *El clima, entre el mar y la montaña*. García, J. C., Diego, C., Fernández, P., Garmendia, C. & D. Rasilla (Eds.): 399-408. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología, Serie A, 4, Santander.
- Saladié, O., M. Brunet, E. Aguilar, J. Sigró & D. López (2006). Análisis de la tendencia de la precipitación en primavera en la cuenca del Pirineo Oriental durante el periodo 1896-2003. En: *Clima, Sociedad y medio Ambiente*. Cuadrat, J. M., M. A. Saz, S.M. Vicente, S. Lanjeri, M. De Luis & J.C. González-Hidalgo (Eds.): 475-485. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A. 5. Zaragoza.
- Serrano, A., V. L. Mateos & J. A. García (1999). Trend analysis of monthly precipitation over the Iberian Peninsula for the period 1921-1995. *Physics and Chemistry of the Earth* 24: 85-90.
- Schönwiese, C. D & J. Rapp (1997). *Climate trend atlas of Europe based on observations 1891-1990*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. The Netherlands. 224 pp.
- SNIRH (2006). Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos. <http://snirh.inag.pt/>
- Sneyers, R. (1975). *Sur l'analyse statistique des séries d'observation*. WMO. Technical Note 143.189 pp.
- Štípanek, P. (2005). AnClim - software for time series analysis (for Windows). Dept. of Geography. Fac. of Natural Sciences. MU, Brno. 1.47 MB.
- Trigo, R. M. & C. C. Dacamara (2000). Circulation weather types and their influence on the precipitation regime in Portugal. *International Journal of Climatology* 20: 1559-1581.
- WMO (1967). A Note on Climatological Normals. Technical Note nº 84. World Meteorological Organization. Geneva. Switzerland.

ENVIRONMENTAL IMPACTS

CONSECUENCIAS MEDIOAMBIENTALES

CHAPTER 6 / CAPÍTULO 6

***Aquifer recharge and global change:
application to Doñana***

**Recarga a los acuíferos y cambio
global: aplicación a Doñana**

Aquifer recharge and global change: application to Doñana

Emilio Custodio¹, Marisol Manzano² & Isabel Escaler³

¹Dept. Ing. Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Gran Capità s/n, Módulo D-2. 08034 Barcelona. emilio.custodio@upc.edu

²Dept. Ing. Minera, Geológica y Topográfica, Universidad Politécnica de Cartagena. Paseo Alfonso XIII, 52. 30203 Cartagena (Murcia). marisol.manzano@upct.es

³CETaqua (AGBAR, UPC, CSIC). Passeig dels Til·lers, 3. 08034 Barcelona. iescaler@cetaqua.com

ABSTRACT

Groundwater is an essential component of the water cycle that plays an important role in Nature. At the same time it is a water resource for supplying human needs and their activities. Quantifying aquifer recharge is a difficult task, which has an important temporal and spatial uncertainty, and may be very sensitive to the climatic and territorial changes that conform global change. Conspicuous changes in aquifer recharge have taken place in the past, but they are poorly known, except in some arid zones where the soil profile may preserve some memory of these past situations, up to some millennia. The influence of territorial changes in recharge is also poorly known since they have been largely produced when hydrological monitoring was not taking place or it was insufficient to derive a good understanding from them. The very slow evolution of circumstances that favour changes may go along largely unobserved. This should be added to the poor knowledge of changes. Currently only a few detailed studies deal with the effect of global change on aquifer recharge. These changes include not only temperature, solar radiation and atmospheric conditions, but the slow, progressive, associated changes in vegetal cover, to which it has to be added the changes and effects due to modification of partial CO₂, atmospheric pressure and the pedologic soil characteristics associated to the changes of organic matter content. In the Doñana area anthropogenic, conspicuous territorial changes have taken place at least since 5000 years ago, and especially since mid the 20th century. These changes include timber extraction, wood and undergrowth vegetation collection for carbon production, the introduction of extensive areas of eucalyptus tree forest, the consolidation of intensive agriculture irrigated with local groundwater, and finally the recent eradication of large eucalyptus tree areas. All this has modified the aquifers' water balance, and also the chemical composition, in a poorly known manner, but this has to be taken into account in order to point out the main aspects of possible changes due to global effect. It is not known which will be the future trend although some reduction in recharge may be expected under the most widely accepted climatic scenarios.

Key words: *aquifer recharge, global change, Doñana aquifer*

Recarga a los acuíferos y cambio global: aplicación a Doñana

Emilio Custodio¹, Marisol Manzano² & Isabel Escaler³

¹Dept. Ing. Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Gran Capità s/n, Módulo D-2. 08034 Barcelona. emilio.custodio@upc.edu

²Dept. Ing. Minera, Geológica y Topográfica, Universidad Politécnica de Cartagena. Paseo Alfonso XIII, 52. 30203 Cartagena (Murcia). marisol.manzano@upct.es

³CETaqua (AGBAR, UPC, CSIC). Passeig dels Til·lers, 3. 08034 Barcelona. iescaler@cetaqua.com

RESUMEN

Las aguas subterráneas son una parte esencial del ciclo del agua, con un importante papel en la Naturaleza, al tiempo que son una fuente de agua para satisfacer las necesidades humanas y sus actividades. La cuantificación de la recarga a los acuíferos es difícil, tiene asociada una notable incertidumbre temporal y espacial, y puede ser muy sensible a los cambios climáticos y del territorio que conforman el cambio global. En el pasado ha habido cambios importantes pero son mal conocidos, excepto en ciertas zonas áridas, donde el perfil del suelo conserva memoria de acontecimientos de hasta algunos milenios. La influencia de los cambios territoriales es también poco conocida ya que se han producido en buena parte en épocas en que la observación hidrológica no existía o era insuficiente, a lo que se suma la muy lenta evolución, la cual hace que los cambios puedan pasar desapercibidos. En el momento actual sólo unos pocos estudios de detalle abordan el efecto del cambio climático en la recarga a los acuíferos. Estos cambios hacen referencia no sólo la temperatura, radiación solar y condiciones atmosféricas, sino también los lentos pero progresivos cambios asociados en la cobertura vegetal, a los que hay que sumar los debidos al cambio y efectos de la presión parcial del CO₂ atmosférico y de las características del suelo edáfico por modificación de su contenido en materia orgánica. En Doñana se han producido notables cambios territoriales de origen antrópico, además de los climáticos, por lo menos desde hace 5000 años, y en especial desde mediados del siglo XX. Hay que tener en cuenta actividades tales como la obtención de madera, la recolección de leña y sotobosque para producir carbón, la introducción de grandes áreas de bosque de eucaliptos, la instalación de agricultura intensiva regada con agua subterránea local y finalmente la reciente erradicación de grandes superficies de eucaliptales. Todo ello ha influido en el balance hídrico de los acuíferos, y también en la composición química, de forma poco conocida, pero que se puede argumentar para apuntar las grandes líneas de los posibles cambios por efecto global. No se sabe cual será la tendencia más probable si bien puede esperarse cierta reducción de la recarga bajo los escenarios de cambio climático de mayor aceptación en la actualidad.

Palabras clave: recarga a acuíferos, cambio global, acuífero de Doñana

INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha estado actuando a todo lo largo de la historia de la Tierra y con intensidades muy variables, imprimiendo caracteres identificables a las diferentes épocas en cuanto a los materiales y en cuanto a la biota. Se conocen relativamente bien las lentas variaciones generales a lo largo de millones de años, aunque las ha habido de mayor frecuencia, de miles de años y también de decenas de años, en ocasiones con cambios rápidos respecto a la renovación vegetal. Estas últimas no han dejado huellas de fácil identificación, aunque para el hombre son las de mayor interés ya que afectan a la sucesión de generaciones humanas y a su propia vida, en el cortísimo intervalo de tiempo en que se desarrolla su actividad en el devenir de la historia de la Tierra y aún de un acuífero regional.

Dicho cambio climático es el resultado de la compleja interacción de numerosos factores y forzamientos (acciones externas que producen cambios). En el sistema climático existen muchas no linealidades y numerosas realimentaciones, tanto positivas (inestabilizan), como negativas (estabilizan), y aparecen puntos críticos más allá de los cuales una perturbación temporal del sistema no supone la vuelta al estado inicial al cesar la acción sino el paso a una situación diferente. Son numerosos los factores que intervienen, algunos de ellos extraterrestres relacionados con la actividad y dinámica solar (incluso caídas singulares de meteoritos), en relación con los cambios astronómicos relativos de la Tierra y el Sol, y en relación con el comportamiento de la atmósfera como trampa de radiaciones de determinadas longitudes de onda (efecto invernadero). Este último efecto es en buena parte el que hace de la Tierra un planeta singular que ha permitido el desarrollo de la vida, en estadios diversos y con cambios rápidos en ciertos momentos

(Alley, 2004), los cuales han favorecido una evolución dinámica.

A todo lo anterior hay que añadir el notable efecto del océano en cuanto a transportador de calor y fuente y sumidero de gases de efecto invernadero, el de la distribución cambiante de mares y continentes, el de la variable actividad volcánica, el de modificaciones del albedo por grandes masas de hielo y extensas áreas de vegetación, y el de secuestro y liberación de gases de efecto invernadero por las plantas y por el suelo, entre otros.

Desde hace unos 7000 años ha aparecido un nuevo factor con influencia significativa -aunque es uno más de los múltiples factores en juego- que es el hombre como animal capaz de modificar sensiblemente el territorio, y más recientemente de devolver a la atmósfera gases de efecto invernadero atrapados en el terreno (carbón y petróleo, y también materia orgánica del suelo) y aumentar también la concentración de otros gases. Este efecto creciente a lo largo de la prehistoria e historia humana se ha acelerado extraordinariamente a partir de la revolución industrial de mediados del siglo XIX y en especial desde 1950. El impacto de estas acciones es objeto cada vez más de atención por los cambios que suponen, sean positivos o negativos, y se ha creado una notable preocupación por el futuro a medio y largo plazo y por las posibles medidas que haya que adoptar hoy para tratar de mitigar a tiempo o con el menor coste social y económico posible las consecuencias negativas.

La complejidad del problema reside en que además del efecto antrópico existe una evolución natural, y que ese efecto antrópico no se limita a modificaciones atmosféricas sino que llega mucho más allá e incluye cambios territoriales (en el uso del suelo, en la gestión de la cobertura vegetal, en los humedales, en las grandes urbes, en la contaminación marina, ...), y cambios en relación con las políticas globales de producción de energía,

movimientos sociales, comercio, ... Por esa razón parece más apropiado hablar de cam-bio global en vez de cambio climático, el cual sería sólo una parte de la problemática. Esta problemática general -global- debe traducirse en problemática regional, que es la que afecta a comunidades humanas concretas. Este cambio de escala es una nueva gran dificultad añadida y a ello se está dedicando un notable esfuerzo (véase Bouracui et al., 1999; Xu et al., 1999; Wilby et al., 1999; Landman, 2001; Delin et al., 2007).

Los importantes cambios esperables en la temperatura y en el nivel del mar -los mejor conocidos- van acompañados de posibles cambios en el ciclo del agua. Esto afecta no sólo a un aspecto esencial de la vida en la Tierra, sino que puede llegar a condicionar a la sociedad humana y sus actividades, además de modificar los riesgos por fenómenos naturales (avenidas catastróficas, inundaciones, sequías persistentes, aludes de nieve, ...). Estos futuros cambios en el ciclo del agua y en su disponibilidad son menos conocidos y están por ahora asociados a una notable incertidumbre (Murphy et al., 2004). La evolución de los componentes del ciclo del agua a lo largo de los tiempos en cuanto a información del pasado que ayude a conocer el presente y formular predicciones razonables del futuro es aún pobre, con registros históricos cortos, y dentro de una variabilidad natural muy marcada (Issar, 2003). La mayor atención se ha dedicado a la escorrentía en cuencas superficiales aplicando modelos lluvia (y nieve)-escorrentía más o menos sofisticados, y con mayor o menor atención al suelo edáfico y la vegetación (Chalecki & Gleick, 1999), en escenarios climáticos seleccionados entre los más probables, de acuerdo con los diferentes modelos climáticos generales y las recomendaciones del IPCC (Intergovernmental Panel on Climatic Change). Véase por ejemplo Lattenmaier & Gan (2000); Minikou, et al. (2000); Najgar (1999); Zhu et al. (2005);

Burns et al. (2007); Romanovicz (2007). En general la mayoría de esfuerzos han ido dirigidos a conocer y prever la frecuencia de eventos extraordinarios (avenidas) y las aportaciones en puntos singulares de las cuencas en cuanto a cantidad de agua (embalses, tomas de canales) y en la disponibilidad para la vegetación (Gerten et al., 2007), y por ahora en menor medida en cuanto a calidad (transporte de sedimentos, salinidad, concentración de solutos, dilución y transformación de contaminantes). Con frecuencia estos modelos únicamente tienen en cuenta las aguas subterráneas a través de la estimación del caudal de base de los ríos, pero sin entrar en la consideración detallada de la relación río-acuífero.

El impacto del cambio global en las aguas subterráneas ha estado por ahora menos estudiado, en parte por su lenta evolución y tardía respuesta a los cambios de los grandes acuíferos, y en parte por la general menor atención a la fase subterránea del ciclo del agua, a pesar de su importancia natural y también como recurso de agua para el hombre. Esta importancia como fuente de agua para la agricultura y la población ha ido creciendo muy rápidamente en las últimas décadas a nivel mundial, y concretamente en buena parte de España, incluyendo Andalucía (Llamas & Custodio, 2003). Esa postura está cambiando afortunadamente y en Europa contribuye a ello el efecto impulsor de la Directiva Marco del Agua. Sin embargo existe un retraso en el desarrollo de conocimientos, que además deben superar el problema de la muy diferente escala temporal de las aguas subterráneas respecto a las superficiales. Es decir, mientras que los sucesos en hidrología superficial son en buena parte observables y a una escala de tiempo similar al del devenir humano personal, en hidrología subterránea son de observación indirecta o pasan imperceptibles al no experto y a una escala de tiempo que puede ser de generaciones, siglos, e incluso mile-

nios. En realidad en acuíferos relativamente grandes tanto la distribución de potenciales hidráulicos como de salinidad y composición química puede estar aún influida por los notables cambios climáticos y territoriales de las últimas decenas de miles de años.

ACUÍFEROS Y RECARGA

Los acuíferos son formaciones geológicas o conjuntos de formaciones geológicas que tienen sus poros y fisuras llenas de agua (medio saturado), la cual fluye muy lentamente (mm/día a varios m/día en los casos más característicos). Abarcan un área territorialmente extensa (Custodio & Llamas, 1976 y 1983; Candela et al., 1998). Su hidrodinámica se caracteriza por las propiedades hidráulicas de los materiales (conductividad hidráulica o permeabilidad, porosidad, coeficiente de almacenamiento elástico) y por las dimensiones (espesor y extensión de las formaciones), y está condicionada por el gradiente hidráulico, que depende de la recarga, circulación y descarga (características de flujo o renovabilidad) y por el almacenamiento (volumen de agua en un momento determinado).

La recarga es el caudal de procedencia externa que recibe el acuífero, y que puede originarse en la superficie del terreno en las áreas propicias a su generación, o provenir de otros acuíferos con los que esté en contacto, incluyendo los medios de baja permeabilidad, o acuitardos (Custodio et al., 1997).

En buena parte de los territorios continentales e insulares la mayor parte de la recarga se produce por la lluvia caída sobre afloramientos del acuífero o de otros acuíferos con los que esté en contacto. La descarga se produce a ríos, lagos y humedales, donde se mantiene la existencia de agua permanente, o se puede producir por evapotranspiración freática por las plantas allí donde éstas pueden acceder con sus raíces al medio saturado

o a la franja capilar sobre el mismo. En el área costera la descarga puede hacerse directamente al mar, en general en las inmediaciones de la línea de costa, ya que la mayor densidad del agua del mar impide la descarga profunda, salvo que haya condiciones para un elevado potencial hidráulico en el cuerpo de agua dulce del acuífero (Custodio & Llamas, 1976; 1983).

Sin embargo, en áreas áridas y semiáridas los niveles freáticos pueden estar profundos, por debajo de los cauces de ríos, torrentes y barrancos. En este caso, en momentos en que se produce escorrentía superficial procedente de otras áreas o como consecuencia de precipitaciones tormentosas, es posible la recarga a partir de aguas superficiales de forma significativa para el balance hídrico del acuífero. La recarga temporal en piedemontes y abanicos aluviales puede tener notable importancia relativa en esos casos.

Si bien la recarga a los acuíferos se puede identificar sin grandes dificultades mediante métodos hidrodinámicos, hidrogeoquímicos e isotópicos ambientales (Custodio et al., 1997; Lerner et al., 1990; Simmers, 1997), su cuantificación temporal y espacial es una de las tareas más arduas e inciertas de la hidrología subterránea. Se aborda mediante diferentes técnicas, y en lo posible combinando varias de ellas (Samper, 1997). No es raro que el coeficiente de variación de la estimación (valor medio dividido por la desviación estándar) sea de hasta 0,5 en climas secos. Sin embargo la acumulación de observaciones de niveles y de la composición química e isotópica, y su correcta interpretación y modelación, pueden reducir la incertidumbre a valores menores que 0,1 cuando se trata de valores medios plurianuales. En realidad esta incertidumbre no es mayor que la existente en la medida y predicción de caudales y aportaciones de ríos.

La profundidad del nivel del agua en el acuífero depende de la recarga media y de sus oscilaciones. Ello condiciona la existencia

del caudal de base de ríos, la permanencia de lagos, lagunas y humedales, y la subsistencia de áreas de vegetación freatofítica (la que puede tomar agua del medio saturado). La recarga a partir de la infiltración de la lluvia (recarga difusa) se produce a través del suelo edáfico y del medio no saturado que está debajo (donde coexiste agua y aire en los poros y fisuras). Por lo tanto el conocimiento de este medio no saturado es esencial para la recarga a los acuíferos y contiene recarga en tránsito (no será recarga propiamente dicha hasta que el agua se incorpore al acuífero), que produce cambios en el acuífero con retraso de horas a meses, y puede tener un tiempo de recorrido físico de meses a muchos años, en función de la magnitud de la recarga, del espesor del medio no saturado y de su humedad media.

CONDICIONANTES DE LA RECARGA DIFUSA

El agua de la precipitación atmosférica se distribuye entre varios reservorios (Eagleson, 1978). En primer lugar una parte es interceptada por la vegetación para luego evaporarse. El tipo y estado de la cobertura vegetal es determinante en esta fase. Después otra parte es detenida en la superficie del terreno para luego evaporarse. En este caso es el estado de esa superficie del terreno (roca desnuda, grado de repelencia de arenas, existencia de depresiones con materiales finos, hojarasca, ...) el factor determinante. Cuando la intensidad supera cierto umbral o la superficie del terreno se encharca (se satura de agua) una parte de la precipitación escurre en superficie (flujo sobre el terreno) y se concentra en torrentes por donde se evacua, aunque una parte puede infiltrarse aguas abajo en otras áreas. Finalmente otra parte se infiltra (penetra bajo la superficie del terreno) y aumenta la humedad del suelo superior y del suelo edáfico. Una parte de este agua infiltrada

puede salir al exterior si la humedad es alta, circulando por grietas y macroporos, dando origen a la escorrentía subsuperficial, que se une a la escorrentía en superficie para ser evacuada por torrentes. La parte que supera la capacidad de retención del suelo superior se mueve por gravedad y desciende lentamente por el medio no saturado para acabar convirtiéndose en recarga al acuífero freático del lugar. El resto será luego transpirado por la vegetación y en menor grado evaporado a la atmósfera (en función del clima y de la cobertura vegetal existente) y es lo que actualmente viene llamándose agua verde. En este último reparto juegan un papel importante las características del suelo, la vegetación, la penetración de las raíces y su estado vegetativo, y la humedad antecedente. Todos estos procesos edáficos e hidrológicos se pueden describir mediante modelos más o menos sofisticados, que consideran con mayor o menor detalle los diferentes procesos, o por lo menos los más importantes. La mayoría de ellos están orientados al estudio de cultivos y masas forestales, y el término de recarga es el resultado de una diferencia entre cifras inciertas, y por lo tanto está sometido a notable error, en especial en climas áridos y semiáridos. Los modelos orientados a la recarga a los acuíferos son simplificaciones que reducen la parte edáfica a funciones sencillas, que pueden incluir parámetros de difícil cuantificación en un área determinada (Simmers, 1977; Lerner et al., 1990; Samper, 1999). No obstante suelen quedar suficientemente explícitos los términos esenciales, que suelen tratarse en balances diarios, que se secuencian a lo largo del tiempo.

La permeabilidad vertical del suelo superior, la humedad del terreno, la profundidad radical (de las raíces), la demanda potencial de agua de la vegetación (evapotranspiración potencial) y la capacidad de retención de agua del suelo tienen un peso importante para la cuantificación de la recarga difusa.

La evapotranspiración potencial es función de la temperatura, humedad atmosférica, velocidad del viento y radiación solar, además de si la vegetación cubre más o menos el terreno. La humedad del terreno en relación a sus características determina qué parte de la evapotranspiración potencial es evapotranspiración real. Hay numerosos modelos y métodos de cálculo, más o menos sofisticados en función de las variables climáticas de que se disponga y de la utilización de correlaciones generales o particulares de una cierta zona. Unos métodos son más apropiados que otros para el cálculo del consumo de agua de las plantas, pero no son tan determinantes para el

coeficiente. P_u y α se determinan por ajuste a datos medidos o calculados para una serie de años suficientemente larga como para incluir periodos secos, medios y húmedos. Véanse las Figuras 1 y 2. Se trata de una simplificación grande, con incertidumbre ya que dos años de igual pluviometría pueden dar lugar a recargas diferentes según la distribución real de la lluvia a lo largo del año y la humedad inicial (que puede tener importancia en años secos), entre otras variables. Se han propuesto otras fórmulas pero en la práctica el ajuste lineal comentado suele ser suficientemente representativo, a veces con una corrección para años de baja pluviometría.

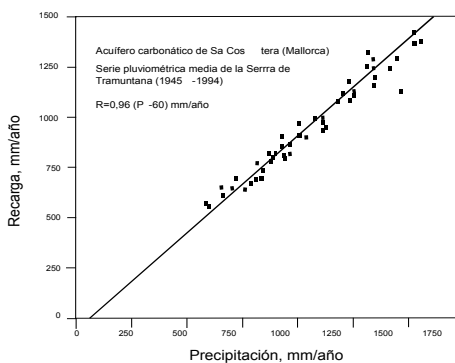
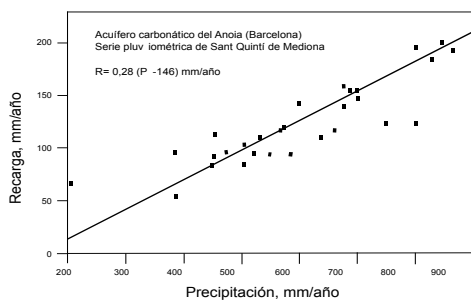


Figura 1. Ejemplos de relación recarga-pluviometría para acuíferos carbonáticos del Anoia y de Sa Costera (derivado de Lambán & Custodio, 1999; Manzano et al., 1998).

cálculo de la recarga a los acuíferos si se mantiene la distribución relativa temporal y su importancia se puede calibrar mediante modelos en función de la respuesta del acuífero (Ross et al., 2005).

En numerosos casos se puede llegar a establecer a nivel anual una relación empírica lineal entre recarga R y pluviometría P para un lugar determinado y con una cierta cubierta vegetal, que es de la forma:

$$R = \alpha (P - P_u) \quad \text{para} \quad P \geq P_u$$

Donde P_u es una pluviometría umbral, por debajo de la cual no habría recarga, y α un

En climas en que se pueden producir lluvias intensas ocasionales en suelos permeables y poco retentivos puede haber recarga significativa aún por debajo del nivel umbral, como sucede en el área de El Abalarío, en Doñana (Figura 3). En climas relativamente húmedos, sin una clara estación seca, se puede obtener un razonable ajuste lineal para valores mensuales (Figura 4). Esta relación es poco clara en el caso de climas áridos, aún a nivel anual. En general no es posible establecer tal relación a nivel diario o semanal, aún en clima húmedo, ya que la estacionalidad y reserva en el suelo antecedente tienen un peso importante.

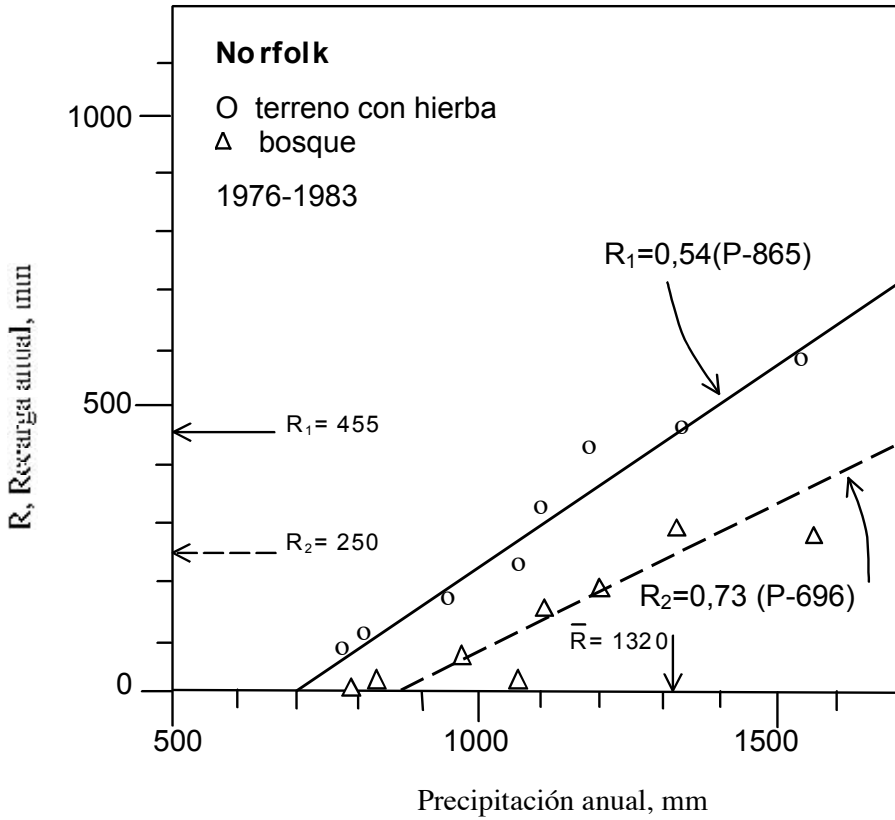


Figura 2. Relación recarga-pluviometría en la isla de Norfolk calculada para áreas de pradera y con bosques (derivado de Falkland & Custodio, 1991).

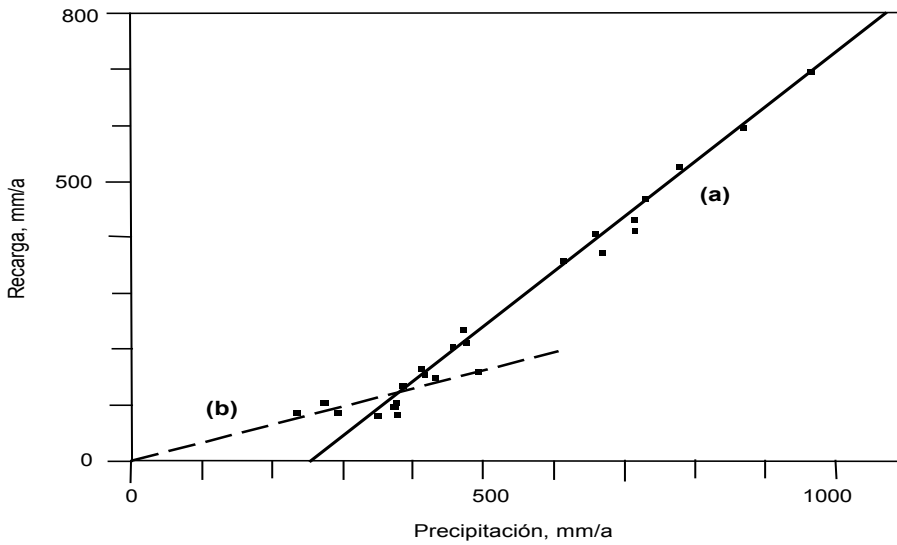


Figura 3. Relación recarga-pluviometría para el área de El Abalarío, Doñana, según resultados de Trick (1998).

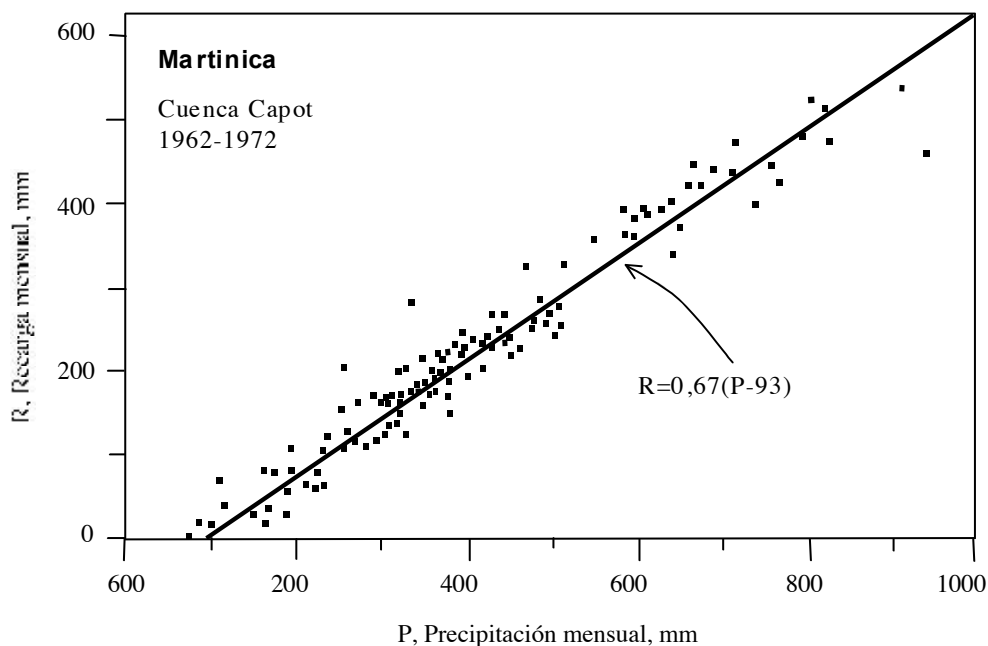


Figura 4. Relación entre recarga mensual y precipitación mensual en la Cuenca Capot, isla de La Martinica, donde la precipitación es alta, según figura modificada tomada de Falkland & Custodio (1991).

EFFECTOS ANTRÓPICOS EN LA RECARGA A LOS ACUÍFEROS

Para un lugar determinado la relación entre recarga y precipitación depende en gran manera de la cubierta vegetal y del suelo edáfico. Por lo tanto esta relación puede ser notablemente modificada por acciones de deforestación, aforestación, estado del sotobosque, creación o abandono de campos de cultivo, arado y modo de preparación del terreno, tipo de pradera o de cultivo, aterrazamiento, etc. Cuando estas acciones son extensivas pueden modificar la recarga al acuífero. Esto incluye la creación y operación de extensas áreas de cultivo bajo plástico, como sucede en el Levante español y en Doñana.

El efecto antrópico reciente ha sido estudiado con cierto detalle en ciertas áreas, como en la cuenca del río Murray, en Australia (Kenneth-Smith, 1994; Doble et al., 2007). Allí la eliminación de grandes superficies de eucaliptales naturales (mallee) y su transformación

en praderas y en campos de cultivo ha substituido una cubierta vegetal muy eficaz en la captación de la lluvia en clima semiárido por otra mucho menos eficaz. La consecuencia ha sido un aumento de la recarga, que entraña el desplazamiento acelerado de aguas salinas acumuladas en el medio no saturado bajo el mallee por concentración de la deposición atmosférica a lo largo de siglos, y aún milenios. La consecuencia es la salinización progresiva del acuífero que está debajo, que en ese caso se recarga predominantemente fuera de la zona, y de los cursos fluviales a los que alimenta el acuífero. La situación persistirá durante décadas, e incluso siglos, que es el tiempo necesario para desplazar las aguas salinas.

Esta situación no es única y puede haber sucedido en el pasado en muchas otras áreas continentales e insulares, donde el resultado ha pasado desapercibido por su lentitud, aunque el efecto acumulado puede ser aparente, o se ha atribuido a causas naturales. Tal puede haber sucedido en áreas semiáridas de la

Península Ibérica que originariamente tenían una extensa cubierta arbórea o arbustiva y que hoy son de cultivo extensivo de cereal o eriales. En concreto puede sospecharse que este efecto se ha dado, y posiblemente aún se da, en Monegros y en Almería. El establecimiento de regadíos con agua importada tiene el grave riesgo no sólo de generar recarga de agua salina de excedentes de riegos, sino de forzar la movilización de aguas salinas de épocas anteriores que aún estén en el medio no saturado.

Lo expuesto no ha sucedido en las áreas principales de recarga de Doñana, como El Abalarío, ya que la vegetación nativa en el clima allí existente no produce de forma acusada la generación de recarga salina, y además el tiempo de tránsito por el medio que recubre al nivel acuífero principal es de solo algunas decenas de años. Pero puede suceder en las áreas periféricas, donde el suelo es mucho más retentivo y por lo tanto la recarga es escasa y más concentrada (Iglesias, 1999). Desgraciadamente no hay estudios al respecto y tan sólo indicios hidrogeoquímicos. El efecto de incremento de concentraciones bajo las áreas de cultivo intensivo parece ser significativa, pero está en estudio.

INFLUENCIA DEL CAMBIO GLOBAL

La influencia del cambio global en la recarga a los acuíferos tiene aspectos a corto y a largo plazo. A corto plazo puede suponerse que no cambian ni el territorio ni la vegetación, y que sólo se modifica la precipitación y las condiciones en las que se produce la evapotranspiración (radiación solar, viento, humedad ambiental, concentración de CO_2 en el aire). Su simulación se hace basándose en escenarios posibles.

Un aumento del CO_2 atmosférico conlleva mayor eficiencia en la fotosíntesis, o sea más producción vegetal neta con la misma toma de agua, de modo que una mayor precipita-

ción puede traducirse en mayor recarga, si bien será también mayor la evaporación por interceptación y detención superficial, y la evapotranspiración si la temperatura aumenta. Parece que el resultado es una mayor influencia relativa del aumento de temperatura que el de la precipitación (Herman et al., 2004). El efecto puede ser más acusado en áreas desérticas y semidesérticas, aunque allí toma relieve la recarga concentrada (en cauces, piedemontes y abanicos aluviales) de aguas de tormenta, y cabe esperar que éstas sean más intensas a mayor temperatura. Sin embargo, en el resultado final influyen también la frecuencia y duración, y no solo la intensidad de estas precipitaciones. Todas estas posibilidades requieren simulación con modelos adecuados, aplicados a un lugar concreto, y en general empleando intervalos de tiempo diarios para la recarga difusa. Ejemplos recientes sobre el comportamiento de acuíferos pueden encontrarse en Changnon et al. (1988); Malcon & Soulsby (2000); York et al. (2002); Yussof et al. (2002); Allen et al. (2003) y Sciabeck et al. (2007). Loáiciga et al. (2000) han considerado acuíferos carbonáticos. La recarga concentrada, también puede simularse, pero la experiencia contrastada es aún menor que para la recarga difusa, y requiere trabajar con un mayor detalle temporal para el que los datos no suelen estar disponibles o requieren una desagregación.

A largo plazo las características de la vegetación y del suelo edáfico ya no pueden suponerse constantes. Es poco conocido cómo evolucionarían ya que hay muchas variables en juego, que incluyen la parcial o total progresiva substitución con el aumento de temperatura de plantas C-3 (fotosíntesis según el ciclo Calvin) por plantas C-4 (según el ciclo Hatch - Slack) que usan el agua de forma más eficiente (Pagani et al., 1999). El concomitante aumento de la concentración atmosférica de CO_2 también influye en la actividad fotosintética vegetal, y por lo tanto en el uso del agua del suelo, modificando así de

forma poco conocida el balance hídrico en el terreno. Una mayor temperatura también puede modificar las características del suelo edáfico al favorecer la mineralización de la materia orgánica, aunque si va acompañada de mayor producción vegetal el efecto puede disminuir y aún invertirse. Poco se sabe al respecto.

Además del efecto de estos cambios climáticos, vistos cualitativamente y de forma muy simplificada, están las influencias antrópicas. Estas podrían a ser dominantes en muchas áreas a consecuencia del cambio climático, en especial en lo referente a la obtención de recursos hídricos, y debido a la extensión de terrenos destinados a la producción de alimentos y de espacio alterado para la urbanización, actividades industriales y de depósito de residuos, así como de reducción de encharcamientos temporales (Schneider & Eugster, 2007). Estos cambios a su vez afec-

tan a la temperatura y pueden modificar la circulación atmosférica local, modificando la precipitación y su régimen.

Todo ello puede suponer modificaciones de la recarga a los acuíferos, de forma compleja y poco experimentada. En principio una disminución de la pluviometría reduciría la recarga, pero no en todos los casos, en función de la evolución de la cobertura vegetal y del uso del territorio. En zonas áridas y semiáridas las plantas freatofíticas pueden jugar un papel importante en el balance hídrico del acuífero y estas plantas pueden quedar afectadas, tanto positiva como negativamente por cambios en el nivel freático (Cooper et al., 2006; Ridolfi et al., 2006). En Doñana tienen una influencia importante (Trick & Custodio, 1997; Trick, 1998).

Entre los estudios realizados en España están los correspondientes a las formaciones carbonáticas del Anoia (Cataluña), y de la

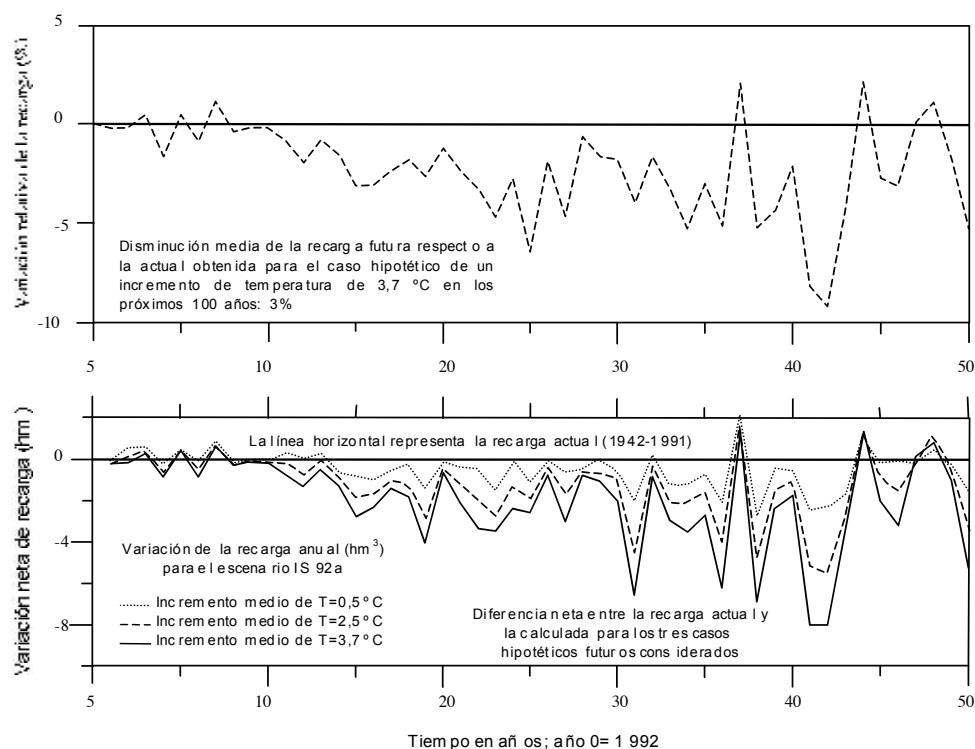


Figura 5. Variación de la recarga hipotética respecto a la actual en la Unidad Anoia, Cataluña (Manzano et al., 1998).

Serra de Tramontana, Mallorca (Manzano et al., 1998; Lambán & Custodio, 1999; Younger et al., 2002). La Figura 5 muestra algunos resultados del Anioia, que es un área carbonática de la cordillera prelitoral, entre Vilafranca del Penedés e Igualada. Con mayor detalle se han estudiado los impactos de cambio climático y escenarios de gestión en la Unidad Hidrogeológica de Inca-Sa Pobla, en Mallorca, para evaluar el impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos en dos escenarios climáticos del IPCC y para los horizontes temporales 2025, 2050 y 2080, y para evaluar el impacto de la combinación de escenarios climáticos y escenarios de gestión sobre los recursos hídricos de la unidad (von Igel, 2006). La evaluación se realiza a partir de simulaciones mediante un modelo para la estimación de la recarga (Visual BALAN) y un modelo del flujo subterráneo (MODFLOW), calibrados y validados previamente con niveles piezométricos observados. El impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos de la unidad se evalúa a partir de series climáticas futuras de precipitación y temperatura generadas a partir de las predicciones del modelo de circulación global HadCM3 aplicando dos métodos de cambio de escala: perturbación de la serie histórica observada y perturbación del generador estocástico. A partir de la recarga estimada por el método de la perturbación del generador estocástico se estima el impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos subterráneos y la incertidumbre asociada.

VISIÓN DEL PASADO

El conocimiento de lo que ha sucedido en el pasado en cuanto a la recarga a los acuíferos puede orientar las previsiones de los posibles futuros cambios, ayudando a calibrar los métodos y modelos de cálculo. Sin embargo los hechos no pueden explicar todas las

incógnitas futuras ya que las circunstancias, acciones, características del forzamiento y estado territorial no es el mismo.

Aunque la evolución territorial y de la vegetación es lenta, es bien conocido que áreas sometidas a glaciación y permafrost hace solo 15000 años, o que eran de estuario hace 7000 años, hoy están bien vegetadas (Prentice et al., 1998), y probablemente lo estuvieron en menos de 1000 años tras los cambios. Pero para el devenir humano el interés se centra en periodos temporales más cortos, de decenas a algunos centenares de años, para los que la información derivada del conocimiento del pasado es mucho más pobre e incierta.

Cuando la recarga a los acuíferos es relativamente importante, de más de algunas decenas de mm/año, toda el agua del medio no saturado ha sido ya renovada respecto a los grandes cambios climáticos del pasado, y también el agua de los acuíferos de dimensiones pequeñas y medianas. Pueden quedar trazas del pasado en grandes acuíferos y en los acuitardos, pero son difíciles de interpretar por los cambios debidos a la dispersión hidrodinámica y las reacciones roca-agua, además de que con gran frecuencia las muestras obtenibles son en realidad mezclas más o menos complejas de aguas de distintos momentos. Sólo en climas áridos, la muy lenta renovación del agua, con tasas medias de recarga que pueden ser inferiores a 1 mm/año, y aún a 0,1 mm/año, puede hacer que se conserve memoria de los cambios pasados en la recarga, principalmente reflejados en la composición química e isotópica de las aguas del medio.

Es de especial interés el medio no saturado, cuando tiene gran potencia, como sucede en áreas interiores desérticas en África, Australia o de América del Norte, o de islas volcánicas altas del área seca intertropical. Sin embargo hay pocos estudios con suficiente detalle como para aportar información paleoclimática que sea interpretable como

paleorecarga. Donde estos estudios han progresado más es en el desierto de Nevada, en concreto dentro del área de militar de los antiguos ensayos nucleares, donde se prevé establecer el repositorio de residuos nucleares de Yucca Mountain, dentro del potente medio no saturado en ignimbritas riolíticas allí existente.

EVOLUCIÓN Y CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS ACUÍFEROS DE DOÑANA

En la Comarca de Doñana se han producido cambios climáticos importantes a lo largo del tiempo, de los que queda constancia en los sedimentos, los restos vegetales que contienen y las variaciones isotópicas de algunos componentes. El cambio más notable reciente es el relacionado con lo que en Europa Central fue el paso del último periodo glaciario al clima actual, lo que sucedió en el entorno de hace 11 000 años. No está tan definido como en otras áreas cuánto cambió la temperatura media. Parece que fue poco en relación con los 5 a 6 °C del Norte Ibérico (Manzano et al., 2001; Vaikmae et al., 2001). Tampoco está definido cómo ha variado la precipitación. Parece que ha disminuido la intensidad de la sequía estacional, aunque no está claro cuánto ha cambiado la pluviometría media anual. Estos cambios llevan consigo una evolución de la vegetación, que es más lenta que el cambio climático, y que afecta a los balances hídricos.

Posteriormente, al fin de la época glacial se han sucedido épocas más cálidas (lo fueron la romana y el final de medioevo) y épocas más frías (inicio del medioevo, siglos XVII a XIX) en los que unas agrupaciones vegetales desplazaron a otras, y cada vez con una mayor intervención humana, forzando la eliminación preferente de unas especies vegetales (por ejemplo las maderables) con respecto a otras.

Todo ello tiene una repercusión en la recarga a los acuíferos y en la humedad del suelo, de modo que puede facilitar la fijación de arena eólica o su movilización, y afectar a la distribución de la vegetación (monte blanco frente a monte negro), de una forma aún poco conocida.

Diversos trabajos abordan la recarga a los acuíferos de Doñana por diferentes métodos hidrodinámicos, químicos e isotópicos. Véase De Haro et al. (1994), Iglesias et al. (1996), Iglesias et al. (1997), Trick & Custodio (1997), Manzano et al. (1998), Trick (1998), De Haro et al. (2004), Trick & Custodio (2004).

A largo plazo, las previsiones del balance hídrico y las relaciones entre los cuerpos de agua en Doñana serán probablemente sensibles al cambio climático futuro, al igual que lo han sido en el pasado, incluso en un pasado no lejano. Esta información previa de lo que ha sucedido es sólo moderadamente conocida y está insuficientemente estudiada. Además de la vertiente natural, se debe tener en cuenta la vertiente antrópica, ya que el área ha sufrido cambios territoriales significativos desde hace unos 5000 años, y en especial en los últimos 50 años. Estos cambios incluyen la modificación de la cubierta vegetal seminatural por pinar y eucaliptal, y posteriormente la eliminación parcial del eucaliptal en los últimos 10-12 años, y la creación de grandes superficies de regadío (Custodio & Palancar, 1995; Manzano et al., 2005).

Esos cambios pueden ser commensurables en cuanto al impacto hídrico con los que se preveían en el informe 2001 del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2001), y que varían poco respecto al informe IPCC (2007). Según esos estudios, entre 1860 y la actualidad la temperatura media se ha incrementado en 0,6°C. Entre el periodo 1960-1990 y el año 2100 se espera un calentamiento que podría variar entre 1,4 a 5,8°C, aunque los resulta-

dos varían mucho según el tipo de escenario y la posible evolución del fondo, la cual podría incluso ir hacia un enfriamiento a largo plazo.

El posible impacto del cambio climático futuro sobre la precipitación atmosférica es muy incierto y modifica incluso su signo según los escenarios que se consideren. Se indica que podría haber sucedido un descenso de la precipitación en el último medio siglo de hasta el 10%, pero es algo a confirmar ya que los grandes ciclos globales, como el fenómeno El Niño-La Niña, que repercute en la oscilación nortatlántica (NAO), tienen un gran papel en la secuencia pluviométrica. En la hipótesis de un descenso pluviométrico, que irá probablemente acompañado de un aumento de la evapotranspiración, y quizás de la escorrentía superficial de tormenta, la recarga a los acuíferos queda afectada, en principio a la baja, pero sin que sea necesariamente así.

El relieve de Doñana en el área de las arenas está muy bien acoplado con la profundidad del nivel freático, y éste es muy sensible a la recarga (Trick & Custodio, 1997; Trick, 1998). Poco se sabe cómo ha jugado esta relación en el pasado y qué papel tiene en cuanto a la extensión de los mantos dunares, pero es probable que exista una buena ligazón. De hecho, los cambios artificiales recientes en la cobertura vegetal han tenido un impacto considerable y complejo, poco estudiado y mal conocido. La reforestación de ciertas áreas puede desecar otras, lo que facilitaría la movilización de arena en unos lugares y su retención en el bosque si hay suficiente sotobosque húmedo. La deforestación facilita una mayor recarga y por lo tanto un ascenso de niveles freáticos, con reactivación de la red de drenaje local y atrapamiento de arena y sedimento. Es difícil prever la evolución futura ya que depende de las intensidades de cambio y la tasa de modificación, de cómo se adapte la

vegetación, y de la arena disponible para ser transportada.

Todo ello debe contemplarse según la “memoria” hidráulica del acuífero. Los modelos matemáticos transitorios indican que el periodo para que desaparezcan los efectos de una perturbación del acuífero libre es del orden 30 a 50 años (Lozano, 2004), o sea inferior a dos generaciones humanas. Este valor está de acuerdo con la expresión macroscópica de ese tiempo:

$$\tau = \alpha L^2 S / T$$

donde α es un factor geométrico que puede variar entre 1,5 y 2, L es una magnitud lineal que representa el tamaño del acuífero, T es la transmisividad hidráulica y S el coeficiente de almacenamiento. Se pueden tomar como valores regionales $L=2$ a 4 km, $T=100$ a 250 m²/día y S (a largo plazo)=0,25, con lo que resulta $\tau \approx 25$ a 200 años, que comprende el anterior intervalo modelado. Esto se refiere principalmente a las áreas más permeables, como El Abalarío, Los Cotos y la franja Norte. Para la parte del acuífero de arenas basales, menos permeables (Rociana, Almonte), los valores más razonables son $L=1$ a 2 km, $T=10$ a 20 m²/día, $S=0,20$, con lo que $\tau \approx 20$ a 130 años. Así pues, el acuífero, en sus diversas partes, no guarda memoria del efecto hidráulico de acontecimientos climáticos de periodo largo, pero sí de los recientes.

Por otro lado el tiempo de renovación del agua, t , se puede calcular como el cociente entre la altura de agua almacenada (espesor saturado, H , por la porosidad total, m) y la tasa de recarga R . Para El Abalarío es $H=60$ m, $m=0,35$, $R \approx 200$ mm/año, con lo que $t=105$ años, y para el área del Norte de El Rocío-Almonte es $H=15$ m, $m=0,30$, $R=60$ mm/año, con lo que $t=75$ años.

Así, la memoria a los cambios químicos e isotópicos ambientales es similar o sólo algo mayor que la hidráulica, y sólo se conserva recuerdo de los acontecimientos relativamente recientes. Esos acontecimientos rela-

tivamente recientes son la introducción de las plantaciones arbóreas de pinos y eucaliptos hace entre 50 y 75 años, la ocupación territorial agrícola y humana hace unos 30 años y la supresión de parte de las superficies de bosque de eucaliptos hace 10 a 12 años. Por esto, tanto los niveles piezométricos (residualmente) como las características químicas e isotópicas de las aguas subterráneas están en régimen no estacionario.

Probablemente los cambios territoriales continuarán y, por lo tanto, se seguirán produciendo cambios en la recarga y descarga de los acuíferos que afectarán a las aguas subterráneas, y a su través, a las salidas naturales y lagunas, con largas evoluciones transitorias, de modo que estas evoluciones se suman a la variabilidad climática. Para poder cuantificar lo expuesto es necesario recurrir a la modelación matemática.

Las predicciones de cambio climático futuro en un plazo de 50 años parecen apuntar con cierta confianza a que se producirá un aumento significativo de temperatura, pero sin que quede claro como evolucionará la precipitación ni su régimen, aunque todo parece indicar que dicho régimen se hará más irregular a causa de la elevación térmica. Muchos escenarios posibles apuntan a un descenso de la precipitación anual, lo que junto a la mayor temperatura y mayor irregularidad, y con la vegetación actual (antes de que evolucione), parece apuntar a una menor recarga.

Un intento grosero de evaluación, con sólo carácter orientativo, se puede intentar a través de las fórmulas empíricas de evapotranspiración real anual de Coutagne y de Turc (véase Custodio y Llamas, 1976, 1986, Sec. 6), transformadas en recarga cuando se

a.- Fórmula de Coutagne (para escurrentía nula)

$$R = \frac{P^2}{0,8 + 0,14t} \text{ con } \frac{1}{8}(0,8 + 0,14t) \square P \square \frac{1}{2}(0,8 + 0,14t); P \text{ y } R \text{ en m/a}; t \text{ en } ^\circ\text{C}$$

$$\frac{dR}{R} = 2 \frac{dP}{P} \square \frac{0,14}{0,8 + 0,14t} dt$$

$$\text{Para } t=15^\circ\text{C} \quad \frac{dR}{R} = 2 \frac{dP}{P} \square 0,0483dt$$

b.- Fórmula de Turc (para escurrentía nula)

$$R=P[1-(0,9+(P/L)^2)^{-1/2}] \quad ; \quad P \text{ y } R \text{ en mm/a}; t \text{ en } ^\circ\text{C}$$

$$L=300+25t+0,05t^2$$

$$\frac{dR}{R} = \left[1 + \frac{[0,9 + (P/L)^2]^{3/2}}{1 - [0,9 + (P/L)^2]^{1/2}} (P/L)^2 \right] \frac{dP}{P} - \frac{[0,9 + (P/L)^2]^{3/2}}{[1 - 0,9 + (P/L)^2]^{1/2}} (P/L)^2 \frac{25 + 0,1t}{L} dt$$

$$\text{Para } P=800 \text{ mm/a} \quad ; \quad t=15^\circ\text{C} \Rightarrow L=686,25$$

$$\frac{dR}{R} = 2,1946 \frac{dP}{P} \square 0,0461dt$$

supone que es nula la escorrentía superficial. Estas fórmulas reflejan una experiencia real, con suelos y vegetación correspondientes al clima actual en las áreas observadas.

En la Figura 6 se representa la variación relativa de la pluviometría $\Delta P/P$ en función de la temperatura, tomando como parámetro la variación relativa de la recarga $\Delta R/R$. Para un incremento esperable de 1°C en la temperatura media -si la vegetación no ha cambiado aún- el valor de $\Delta R/R$ es del orden del 50 % del valor $\Delta P/P$ en ambos casos, pudiéndose reducir algo la recarga relativa (del orden del 5 %) en caso de que no haya variación en la aportación pluviométrica. Pero un análisis más detallado requiere

modelación en escenarios bien seleccionados, por ejemplo utilizando el programa BALAN (Samper et al., 1999).

En la realidad se ha asistido a una notable merma de caudales de La Rocina, y con ello de su contribución permanente a la Marisma, se ha desecado buena parte del ecotono norte, donde ha ido desapareciendo vegetación, que comprende algunas especies tan singulares como el alcornoque, y ha cambiado el hidroperiodo y modo de obtener agua de numerosas lagunas. Pero se trata predominantemente de efectos antrópicos debido a las extracciones para regadío, y en menor grado para abastecimientos, y a los cambios territoriales.

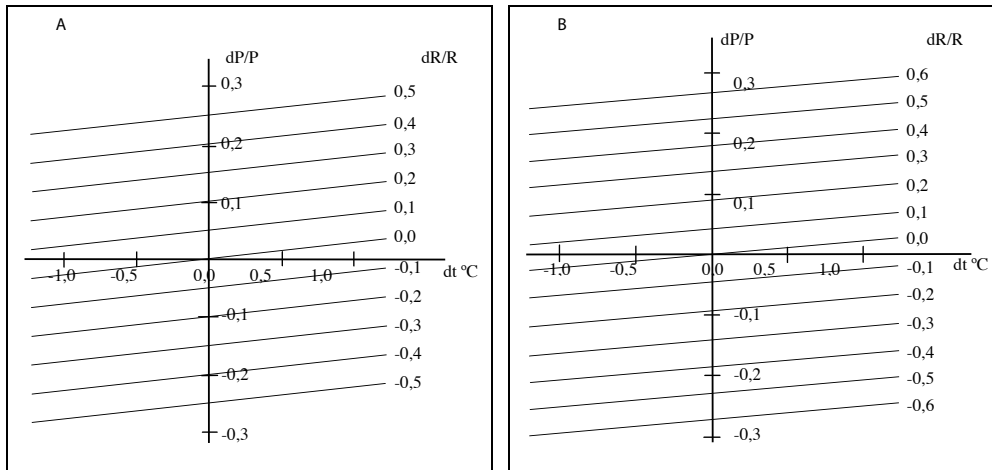


Figura 6. Cambio relativo de la recarga ($\Delta R/R$) para un cierto cambio de temperatura ($\Delta t, ^\circ\text{C}$) y de la precipitación relativa ($\Delta P/P$). A.- Fórmula de Coutagne. B.- Fórmula de Turc.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, D. M., D. C. Mackie, & M. Wei (2003). Groundwater and climate change: a sensitivity analysis for the Gran Forks aquifer, southern British Columbia, Canada. *Hydrogeology Journal* 12: 270–290.
- Alley, R. B. (2004). Abrupt climate change. *Scientific American*, Nov. 2004: 40–47.
- Bouracui, F., G. Vachaud, L. Z. X. Li, H. LeTrent & T. Chen. (1999). Evaluation of the impact of climate change on water storage and groundwater recharge at the watershed scale. *Climate Dynamics* 15: 153–161.
- Burns, D. A., J. Klaus. & M. R. Mc Hale (2007). Recent climate trends and implications for water resources in the Catskill Mountain region, New York, USA. *Journal of Hydrology* 336: 155–170.
- Candela, L., E. Custodio, A. & Navarro (1998). El sol i les aigües subterrànies.

- Medi Ambient i Tecnologia: Guia Ambiental de la UPC*. Politext 1-3. Edicions UPC, Barcelona: 65-85.
- Chalecki, E.L. & P. H. Gleick. (1999). A framework of ordered climate effects on water resources: a comprehensive bibliography. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 35: 1657-1665.
- Changnon, S.A., F. A. Huff, C. F. & Hsu (1988). Relations between precipitation and shallow groundwater in Illinois. *Journal of Climate* 1: 1239-1250.
- Cooper, D. J., J. S. Sanderson, D. I. Standard & D. P. Groeneveld (2006). Effects of long-term water table drawdown on evapotranspiration and vegetation in an arid region phreatophyte community. *Journal of Hydrology* 325: 21-34.
- Custodio, E. & M. R. Llamas Eds (1976; 1983). *Hidrología Subterránea*. Ediciones Omega, Barcelona, 2 Vols., 1-2350.
- Custodio, E. & M. Palancar (1995). Las aguas subterráneas en Doñana. *Revista de Obras Públicas*, Madrid, 142: 31-53.
- Custodio, E., M. R. Llamas & J. Samper. (1997). *Evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica*. Asoc. Intern. Hidrogeólogos-Grupo Español/Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid: 1-455.
- De Haro, J. M., J. V. Giráldez & R. Ordóñez (1994). Movimiento del agua en el perfil de un suelo de Doñana. *Actas del XIV Congreso Nacional de Riegos. AERYD*, Pamplona: 282-288.
- De Haro, J. M., J. V. Giráldez, R. Ordóñez, E. Custodio, M. Iglesias, M. Manzano & J. J. López Rodríguez (2004). Variación temporal de la recarga al acuífero freático del Parque Natural de Doñana, Huelva. *Bol. Geol. Minero*. Madrid, 111(1): 77-88.
- Delin, G.N., R. W. Healy, D. L. Lorenz & J. R. Nimmo (2007). Comparison of local-to regional-scale estimates of groundwater recharge in Minnesota, USA. *Journal of Hydrology* 334: 231-249.
- Doble, R., C. Simmons, I. Solly & G. Walker (2007). Spatial relationships between vegetation cover and irrigation-induced groundwater discharge on a semi-arid food plain, Australia. *Journal of Hydrology* 329: 75-97.
- Eagleson, P.S. (1978). Climate, soil and vegetation. *Water Resources Research* 14: 705-776.
- Falkland, A. (Ed) & E. Custodio (1991). *Guide on the hydrology of small islands*. UNESCO Studies and Reports in Hydrology, 49. Paris. 435 pp.
- Gerten, D., Schaphoff, S. & Lucht, W. (2007). Potential future changes in water limitations of the terrestrial biosphere. *Climatic Change* 80: 277-299.
- Herman, R., R. Stottlemyer, J. C. Zack, R. L. Edmonds & H. van Miegroot (2000). Biogeochemical effects of global change on U.S. National Parks. *Journal of the American Water Resources Association* 36: 337-346.
- Iglesias, M. (1999). *Caracterización hidrogeoquímica del flujo del agua subterránea en El Abalario, Doñana, Huelva*. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica, ETSICCP-Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Iglesias, M., E. Custodio, J. V. Giráldez, M. Manzano & R. Ordóñez (1996). Caracterización química de la lluvia y estimación de la recarga en el área de El Abalario, Doñana, Huelva. *IV Simposio sobre el Agua en Andalucía (SLAGA-96)*. Almería: II-99-121.
- Iglesias, M., J. Lambán, G. Cardoso & E. Custodio (1997). El balance de cloruros como indicador de la recarga: ejemplos recientes. *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación*

- hidrológica*. Asociación Internacional de Hidrogeólogos/Grupo Español-Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid: 357-366.
- IPCC (2001). *Climate change 2001: The scientific basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge.
- IPCC (2007). *Climate change 2007: Fourth Assessment Report*, Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. (contribution of working group).
- Issar, A. S. (2003). *Climate changes during the Holocene and their impact on hydrological systems*. Intern. Hydrology Series, Cambridge University Press: 1–127.
- Kenneth-Smith, A., P. G. Cook & G. R. Walker (1994). Factors affecting groundwater recharge following clearing in the south western Murray Basin. *Journal of Hydrology* 154: 85–105.
- Lambán, J. & E. Custodio. (1999). Caracterización de la recarga en la Unidad Anoia: aplicación de un modelo de balance de agua en el suelo y realización de un balance de cloruros. *Hidrología Subterránea* (Ed. A. Tineo). Serie Correlación Geológica 13. Universidad Nacional de Tucumán: 71–78.
- Landman, W. A., F. J. Mason, P. D. Tyson & W. J. Tennant (2001). Statistical downscaling of GCM simulations to streamflow. *Journal of Hydrology* 252: 221–236.
- Lerner, D. N., A. S. Issar & I. Simmers (1990). *Groundwater recharge*. International Contributions to Hydrogeology, Vol. 8, Intern. Assoc. Hydrogeologists. 345 pp.
- Lettenmaier, D. P. & Y. T. Gan (1990). Hydrologic sensitivities of the Sacramento–San Joaquin riverbasin, California, to global warming. *Water Resources Research* 26: 69–86.
- Llamas, M. R. & E. Custodio (2003). *Intensive use of groundwater: challenges and opportunities*. Balkema, Lisse. 478 pp.
- Loáiciga, H.A., D. R. Maidment & J. B. Valdes, J.B. (2000). Climate-change impacts in a regional karst aquifer, Texas, USA. *Journal of Hydrology* 227: 173–194.
- Lozano, E. (2004). *Las aguas subterráneas en los Cotos de Doñana y su influencia en las lagunas*. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica, ETSICCP-Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. 316 pp.
- Malcon, R. & C. Soulsby, C. (2000). Modeling the potencial impact of climate change on a shallow coastal aquifer in northern Scotland. *Groundwater in the Celtic Regions: Studies in Hard Rock and Quaternary Hydrogeology* (Robins, N.S., Mistle, B.D.R., Eds). Special Publications 182. Geological Society, London: 191–204.
- Manzano, M., E. Custodio, G. Cardoso da Silva & J. Lambán, J. (1998). Modelación del efecto del cambio climático sobre la recarga en dos acuíferos carbonatados del área mediterránea. 4º *Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea*, Montevideo, Uruguay. ALHSUD, 1: 322–333.
- Manzano, M., E. Custodio, H. H. Loosli, M. C. Cabrera, X. Riera & J. Custodio. (2001). Palaeowater in coastal aquifers of Spain. *Palaeowaters in Europe: Evolution of Groundwater since the Pleistocene* (W.M. Edmunds y C. Milne, eds.). The Geological Society (London) Special Publication 189: 107–138.
- Manzano, M., E. Custodio, C., Mediavilla & C. Montes, C. (2005). Effects of localised intensive aquifer exploitation

- on the Doñana wetlands (SW Spain). *Groundwater Intensive Use* (Ed. Sahuquillo, Capilla, Martínez-Cortina and Sánchez-Vila). International Association of Hydrogeologists, Selected Papers 7, Balkema, Leiden: 209-219
- Minikou, M. A., E. Baltas, E. Varanou & K. Pantazis (2000). Regional impacts of climate change on water resources quantity and quality indicators. *Journal of Hydrology* 234: 95–109.
- Murphy, J. M., D. M. Saxton, D. N. Barnett, R. S. Jones, M. J. Webb, M. Collins & D. A. Stainforth (2004). Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations. *Nature* 430: 768–772.
- Najgar, R. G. (1999). The water balance of the Susquehanna River Basin and its response to climate change. *Journal of Hydrology* 219: 7–19.
- Pagani, M., K. M. Freeman & M. A. Arthur. (1999). Late Miocene atmospheric CO₂ concentrations and the expansion of C₄ grasses. *Science* 285: 876–879.
- Prentice, I. C., S. P. Harrison, D. Jolly & J. Guillot (1998). The climate and biomes of Europe at 6000 yr BP: comparison of model simulations and pollen-based reconstructions. *Quaternary Science Review* 17: 659–668.
- Ridolfi, L., P. D'Odorico & F. Laio, F. (2006). Effect of vegetation–water table feedbacks on the stability and resilience of plant ecosystems. *Water Resources Research* 42 (1–5), W01201.
- Romanowicz, R. J. 2007. Data based mechanistic model for low flows: implications for the effects of climate change. *Journal of Hydrology* 336: 74–83.
- Ross, M., J. Geurink, A. Said, A. Aly & P. Tara. (2001). Evapotranspiration conceptualization in the HSPF–MODFLOW integrated models. *Journal of the American Water Resources Association* 41: 1013–1025.
- Samper, J. (1997). Métodos de evaluación de la recarga por la lluvia por balance de agua: utilización, calibración y errores. *La evaluación de la Recarga a los Acuíferos en la Planificación Hidrológica*. Asociación Internacional de Hidrogeólogos/Grupo Español-Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid: 41-81.
- Samper, J., Ll. Huguet, J. Arés & M. A. García (1999). *Manual del usuario del programa visual balan V.1.0: código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga*. ENRESA, Publicación Técnica 05/99. Madrid: 1-132.
- Schneider, N. & W. Eugster (2007). Climatic impacts of historical wetland drainage in Switzerland. *Climatic Change* 80: 301–321.
- Sciabek, J., D. M. Allen, A. J. Cannon. & P. H. Whitfield (2007). Groundwater–surface water interaction under scenarios of climate change using a high–resolution transient groundwater model. *Journal of Hydrology* 333: 165–181.
- Simmers, I. (ed.) (1997). *Recharge of phreatic aquifers in (semi-)arid areas*. International Association of Hydrogeologists 19. Balkema, Rotterdam: 1–277.
- Trick, Th. (1998). *Impactos de las extracciones de agua subterránea en Doñana*. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica, ETSICCP-Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Trick, Th. & E. Custodio (1997). Evaluación de la recarga en El Abalarío (Huelva) por modelación estacionaria del flujo del agua subterránea. *La evaluación de la Recarga a los Acuíferos en la Planificación Hidrológica*. Asoc. Intern. Hidrogeólogos/Grupo Español-Instituto

- Tecnológico Geominero de España, Madrid: 347-355.
- Trick, Th. & E. Custodio (2004). Hydrodynamic characteristics of the western Doñana Region (area of El Abalario), Huelva, Spain. *Hydrogeology Journal* 12: 321–335.
- Vaikmae, R., W. M. Edmunds & M. Manzano (2001). Weichselian palaeoclimate and palaeoenvironment in Europe: background for palaeogroundwater formation. *Palaeowaters in Europe: evolution of groundwater since the Pleistocene* (W. M. Edmunds y C. Milne, Eds.). Geological Society Special Publication 189: 163–191.
- Von Igel, W. (2006). *Impactos del cambio climático y escenarios de gestión en la Unidad Hidrogeológica de Inca-Sa Pobla (Mallorca, España)*. Tesis de Máster en Hidrología Subterránea. Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Xu, C. (1999). From GCMs to river flow: a review of downscaling methods and hydrologic modeling approaches. *Progress in Physical Geography* 23: 229–249.
- York, J. P., M. Person, W. J. Gutowski & T. C. Winter (2002). Putting aquifer into atmospheric simulation models: an example from the Mill Creek Watershed, northeastern Kansas. *Advances in Water Resources* 25: 221–238.
- Yussof, I., K. M. Hiscock & D. Conway, D. (2002). Simulation of the impact of climate change on groundwater resources in eastern England. *Sustainable Groundwater Development*. Special Publication 193. Geological Society, London: 325–344.
- Younger, P. L., G. Teutsch, E. Custodio, T. Elliot, M. Manzano & M. Sauter, M. (2002). Assessments of the sensitivity to climate change of flow and natural water quality in four major carbonate aquifers of Europe. *Sustainable groundwater development* (Hiscock, K. M, Rivett, M. O. & Davison, R. M., eds.). Geological Society Special Publication 193: 303–323.
- Wilby, R. L., L. E. Hay & G. H. Leavesley (1999). A comparison of downscaled and raw GCM output: implications for climate change scenarios in the San Juan River basin, Colorado. *Journal of Hydrology* 222: 67–91.
- Zhu, T., M. W. Jenkins & R. Lund (2005). Estimated impacts of climate warming on California water availability under twelve future climate scenarios. Evapotranspiration conceptualization in the HSPF–MODFLOW integrated models. *Journal of the American Water Resources Association* 41: 1027–1038.

CHAPTER 7 / CAPÍTULO 7

***Climate change and inland aquatic
ecosystems in Andalusia***

**Cambio climático y ecosistemas
acuáticos continentales en
Andalucía**

El cambio climático en Andalucía: evolución y consecuencias medioambientales
Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía): 143-152 (2007)
© Los autores. Sevilla. España. ISBN: 978-84-96 776-40-1

Climate change and inland aquatic ecosystems in Andalusia

Miguel Alvarez Cobelas

Instituto de Recursos Naturales (CSIC), Serrano 115 dpdo., 28006 Madrid.
malvarez@ccma.csic.es

ABSTRACT

Some effects of climate change on Andalusian inland waters are reported, mostly based upon Spanish limnoscientists' views. More specifically, effects on ecosystem size, permanence, biota and biogeochemical cycles in some selected ecosystems, for which there is information enough to suggest future trends, are reported. Climate change will likely result in dramatic changes in all these features of Andalusian fresh- and saline environments, most of which are already ongoing trends arising from anthropogenic impacts, not related with climate change. Some mitigation actions are suggested and research needs are briefly outlined.

Keywords: *rainfall, air temperature, catchments, groundwater, biota, biogeochemistry, mitigation, research.*

Cambio climático y ecosistemas acuáticos continentales en Andalucía

Miguel Alvarez Cobelas

Instituto de Recursos Naturales (CSIC), Serrano 115 dpdo., 28006 Madrid.

malvarez@ccma.csic.es

RESUMEN

Se refieren aquí algunos efectos del cambio climático en las aguas continentales andaluzas, basados en la opinión de los limnólogos españoles. En concreto, se mencionan efectos sobre el tamaño de los ecosistemas, su persistencia, sus comunidades biológicas y sus ciclos biogeoquímicos para los cuales hay la información suficiente como para que permita sugerir algunas tendencias. El cambio climático probablemente dará como resultado cambios importantes en todas esas características de los ambientes acuáticos dulces y salobres de Andalucía, la mayor parte de los cuales no serán sino una intensificación de las pautas ya existentes debidas a los impactos humanos, no directamente asociados al cambio climático. Finalmente, ofrecemos algunas sugerencias para acciones de mitigación y de necesidades de investigación.

Palabras-clave: *precipitación, temperatura del aire, cuencas hidrográficas, aguas subterráneas, comunidades biológicas, biogeoquímica, mitigación, investigación*

INTRODUCCIÓN

Este texto es un resumen abreviado del escrito de Alvarez Cobelas et al. (2005) y referido, en la medida de lo posible, a las condiciones andaluzas. En el estado actual de los conocimientos, resulta muy difícil hacer aseveraciones demasiado específicas sobre el tema para un territorio como Andalucía u otro cualquiera de la Península Ibérica.

SENSIBILIDAD AL CLIMA ACTUAL

Los ambientes acuáticos andaluces son extremadamente sensibles al clima actual porque la inmensa mayoría tiene un tiempo bajo de residencia del agua y, por tanto, depende de la precipitación anual o, incluso,

de la estacional. Los niveles y caudales de la mayoría de ríos, lagos, embalses y humedales se vinculan a la precipitación a corto plazo de modo muy directo. Obviamente, la temperatura del aire también condiciona los sistemas acuáticos a través de su influencia directa en la temperatura del agua, que -a su vez- influye en los procesos metabólicos y biogeoquímicos que suceden en los ecosistemas acuáticos.

Por otra parte, en los ambientes acuáticos continentales de la Península Ibérica son muy importantes las influencias climáticas indirectas, ya que son sistemas muy dependientes de la cuenca hidrográfica donde se enclavan y, por tanto, los efectos del cambio climático sobre los suelos y la vegetación de aquella tendrán también unos efectos adicionales sobre dichos ambientes acuáticos. En general, las cuencas hidrográficas

son muy grandes en comparación con los ecosistemas acuáticos enclavados en ellas, con lo cual éstos acusan una gran influencia del paisaje.

En relación con el cambio climático, ambas variables, temperatura y precipitación, experimentarán una serie de variaciones aún imperfectamente establecidas, cuyos efectos de carácter general sobre los ecosistemas acuáticos continentales podrían ser los siguientes:

- Efectos de los cambios en la precipitación sobre la disponibilidad de agua, tanto de sus promedios como de su variabilidad.
- Efectos del calentamiento global sobre la temperatura y estado del agua.
- Efectos del aumento del nivel del mar.
- Efectos del aumento del CO₂.
- Efectos de la disminución de la nubosidad.

PRINCIPALES IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Los efectos del cambio climático se acumulan a otros efectos antrópicos originados por actividades más inmediatas, como son los cambios en el uso del suelo, las extracciones de agua o los emplazamientos de vertidos y desechos. En ocasiones, puede ser difícil discernir entre ellos, pero -en cualquier caso- debería tenerse en cuenta la posible interacción entre los mismos. Por ejemplo, las inundaciones extraordinarias no están previstas en las obras de regulación de caudales y parece verosímil que dichas inundaciones aumenten si es que lo hacen los eventos extremos. Aunque definir los impactos del cambio climático en detalle resulte una tarea imposible con las previsiones actuales, no resulta en absoluto descabellado pensar que los conflictos socio-económicos relacionados con el agua probablemente aumenten.

- Efectos sobre el número de ecosistemas
Claramente, su número se verá reducido si la evapotranspiración en verano aumenta y

no lo hace la precipitación, pero no sabemos en qué medida. En concreto, muchos ambientes temporales pueden desaparecer. Por otro lado, un aumento de las precipitaciones en primavera y una mayor evapotranspiración estival pueden incrementar el número de ambientes temporales.

- Efectos sobre el tamaño de los ecosistemas

En general, parece que la variabilidad de las fluctuaciones de tamaño será mayor. Teniendo en cuenta que: 1º) el tamaño de los ecosistemas acuáticos depende de su balance hídrico y 2º) algunos términos del mismo (precipitación, evaporación) probablemente se vean alterados por el cambio climático, resulta probable que muchos ambientes reduzcan su tamaño. Esto es especialmente cierto en ambientes semiáridos, como la mayor parte de los sistemas españoles, para los cuales se puede encontrar una buena relación entre la aridez de la zona y la extensión del lago. Por eso, algunos lagos pueden pasar de profundos a someros, y de estratificarse térmicamente a no hacerlo. Este efecto no tendrá lugar en la mayoría de los lagos de montaña situados en cuencas con balance hídrico positivo. Por otro lado, bastantes ambientes pasarán de ser permanentes a temporales, tanto en el caso de ríos como en el de lagos o humedales. Los embalses destinados a usos distintos de la simple regulación (irrigación, abastecimiento, etc.) pueden pasar años enteros en niveles muy bajos, prácticamente secos.

Los pequeños lagos cársticos pueden verse influenciados en cierta medida por el cambio climático, debido a su extrema dependencia de los acuíferos subyacentes y de la dinámica de recarga/descarga de éstos. En cuanto a los lagos endorreicos, los posibles efectos sobre su tamaño dependerán del régimen pluviométrico local, que continuará siendo muy variable geográficamente.

En los ambientes fluviales, es muy difícil discernir los efectos del posible aumento de la torrencialidad de otoño a primavera.

- Efectos sobre la estacionalidad

Los cambios en la estacionalidad de la precipitación generarán cambios en caudales e hidroperiodos, los cuales es de esperar que tengan efectos significativos sobre la estacionalidad en el transporte de materiales y sobre la estacionalidad de las poblaciones animales y vegetales.

- Efectos sobre la calidad del agua

La calidad de las aguas puede empeorar a partir de la primavera, al reducirse el efecto de la dilución por aumentos en la evapotranspiración y, secundariamente, porque quizá haya menos aportes de agua. El aumento de la precipitación torrencial, asociado al cambio climático, podría empeorar la calidad del agua de modo puntual. Obviamente, es éste un aspecto aplicado del cambio climático que requiere investigación, inexistente hasta ahora en España. Actualmente, ya se sabe que la capacidad de retención de nutrientes y la autodepuración disminuyen con el caudal en ríos en condiciones naturales y que los cauces contaminados se apartan de esa relación; no obstante, quedan muchos aspectos por discernir sobre la interacción entre caudal, temperatura, carga de nutrientes y usos del territorio en las cuencas hidrográficas hasta obtener una parametrización que permita aplicaciones y predicciones.

- Efectos sobre los ciclos biogeoquímicos

Se ha sugerido que el aumento de la temperatura y la disminución de la precipitación darán lugar a disminuciones en la exportación de carbono y nitrógeno orgánicos desde los ecosistemas terrestres a los cauces fluviales. No obstante, existen observaciones en el sentido de que el incremento de la precipitación sobre zonas ricas en acumulación de materia orgánica en la cuenca hidrográfica, como podrían ser algunas del noroeste español, ha generado un aumento,

al menos transitorio, en la exportación de carbono orgánico disuelto y de metales asociados hacia los ríos.

- Efectos sobre la biota

Aunque la sequía estival de muchos cauces fluviales ha favorecido la existencia en nuestra flora y fauna de organismos adaptados a esta situación extrema y, por tanto, la existencia de especies endémicas tanto de macroinvertebrados como de peces o de vegetación riparia, es probable que asistamos -al menos de forma transitoria- a un claro descenso de la biodiversidad si la superficie de ambientes extremos aumenta. En la vegetación de las riberas fluviales, se espera un aumento de los tarayes (*Tamarix*) frente a salicáceas (*Salix*) y chopos (*Populus*). La adelfa (*Nerium oleander*) es probable que se expanda. El tamujo (*Flueggea tinctoria*), típico de ríos temporales ácidos y fríos, podría sustituir en muchas zonas al aliso (*Alnus*). En la vegetación emergente de los humedales, se pueden ver favorecidas las especies claramente anfibia frente a las genuinamente acuáticas (por ejemplo, *Phragmites* puede acabar dominando en la mayor parte de los humedales sobre *Typha* o *Cladium*); en cualquier caso, parece seguro que se modificarán bastante las interacciones competitivas.

Las proliferaciones masivas de fitoplancton pueden aumentar en los ambientes eutróficos e hipertróficos, como muchos embalses y lagunas donde una temperatura más elevada puede favorecer los eventos de crecimiento explosivo.

En sistemas fluviales que no sufran desecación, el aumento de la temperatura generará más producción primaria en la zona riparia, la cual -junto con una mayor concentración de carbono orgánico particulado y disuelto de origen alóctono- puede favorecer una mayor producción primaria y bacteriana en lagos, ríos y humedales. No obstante, hay que tener en cuenta que la temperatura tiene un mayor efecto sobre la respiración que sobre la fotosíntesis, de modo que es previsible que se

aceleren los procesos biogeoquímicos relacionados con la descomposición de materiales. De la misma forma, la producción secundaria aumentará porque la temperatura es un factor clave en el metabolismo animal. Con el aumento térmico, el tamaño corporal de los invertebrados (particularmente, del zooplancton) disminuirá; estos cambios en la estructura de tamaños generarán verosímilmente cambios en la transparencia del agua, en la regeneración de nutrientes y en las abundancias piscícolas.

Los ríos que mantienen en el estío un flujo exclusivamente subálveo pueden albergar limnefilidos especializados que pasan la época seca en forma de larvas en diapausa o como pupas. Si la sequía es más intensa, las adaptaciones de muchas especies de insectos acuáticos consistirán en pasar esa época en forma de huevo; esta facultad resulta notable en especies endémicas de plecópteros (criófilas), tales como *Thyrrenoleuctra* y *Guadalgenus*.

Los peces fluviales de mayor tamaño (barbos y bogas) son capaces de desarrollar estrategias migratorias de diferente índole para tolerar el fuerte estiaje, bien remontando hasta encontrar aguas permanentes, o bien descendiendo hasta la confluencia con los ríos principales. Los peces endémicos más peculiares son de pequeño tamaño (*Squalius alburnoides*, *Chondrostoma lemmingii*, *Iberocypris*) y su adaptación básica consiste en resistir el estío en pozas aisladas en condiciones de superpoblación. Su aislamiento ha inducido la adopción de mecanismos reproductores partenogenéticos, como el caso del calandino (*Squalius alburnoides*) con individuos triploides. El hábitat de los Salmónidos se reducirá. La fauna de los tramos medios puede invadir progresivamente los tramos altos si aumenta la temperatura del agua, sustituyendo a la fauna más estenoterma fría de las zonas más montañas. Como consecuencia de esto, las poblaciones de truchas autóctonas se irán fraccionando

al reducirse su hábitat, hecho que favorecería procesos de deriva genética y, eventualmente, de especiación. En este proceso, las actuaciones de reintroducción y gestión de especies de interés piscícola pueden ser determinantes en el devenir de poblaciones locales.

En un contexto general, es probable que las interacciones entre la biota bentónica y la pelágica se vean modificadas.

EFFECTOS ESPECÍFICOS SOBRE LOS DISTINTOS TIPOS DE ECOSISTEMAS

- Humedales

Dadas su variedad y heterogeneidad intrínsecas, los efectos del cambio climático dependerán de las particularidades de cada sistema, por lo que es difícil hacer una evaluación general. No obstante, hay ciertas tendencias esperables en algunos de los procesos relevantes en este tipo de ambientes; del balance local de los mismos, dependerá el comportamiento específico de un humedal determinado. Así, los aumentos de temperatura incrementarán la tasa de los procesos microbianos, la evaporación de la lámina de agua y la transpiración de las plantas emergentes. Ese aumento de la transpiración generará ambientes más salinos, favoreciendo sinérgicamente la dominancia de especies más tolerantes a la salinidad y a la falta de agua, como el carrizo (*Phragmites*), pudiendo darse también efectos de retardo. En el balance hídrico serán muy importantes también los cambios antrópicos en los usos del agua en el entorno de los humedales. La disminución de los aportes de agua implica una disminución del hidroperiodo que, a su vez, limitará la recarga del acuífero subyacente al humedal.

Los cambios en los tipos de vegetación generarán cambios sobre las funciones de los humedales, particularmente en aquellos humedales más complejos (Doñana, por

ejemplo), favoreciendo preferentemente uno de los componentes del mosaico y, por tanto, reduciendo su diversidad.

En condiciones de sequía, la erosión se verá facilitada. Cuando haya agua abundante, la elevación de temperatura favorecerá una más rápida descomposición de la materia orgánica.

Habrán cambios en las emisiones de metano y de óxido nitroso y en su temporización. La desecación definitiva de los humedales por el cambio climático, obviamente, disminuiría las emisiones de esos gases de efecto invernadero.

Los aumentos de CO₂ incrementarán la fertilización y la producción primaria de los helófitos, pero también la tolerancia vegetal al estrés (fotoinhibición, sequía, salinidad).

Las sequías previsibles incentivarán los incendios, que pueden resultar importantes en el caso de humedales con mucho carbono acumulado (turba).

Los cambios en la vegetación y en la superficie inundada, dependientes de las alteraciones en la hidrología, conllevarán modificaciones en los ciclos biogeoquímicos y en las poblaciones de invertebrados y vertebrados dependientes de la vegetación (sobre todo, insectos y aves).

- Ríos

En general, los caudales de base disminuirán, lo cual supondrá el aumento del número de ríos temporales y de tramos de ríos con caudales únicamente estacionales. Por otro lado, el calentamiento hará subir la temperatura del agua. En este aspecto es interesante tener en cuenta que el efecto del aumento de la temperatura del aire sobre el aumento de la temperatura del agua no es independiente de la precipitación. En dicha relación, la precipitación influye negativamente y de forma cuadrática. Por lo tanto, un descenso de la precipitación favorecerá el incremento de la temperatura fluvial, hecho que puede ser relevante para las zonas salmonícolas.

La disminución de los caudales generará un descenso en la concentración del oxígeno disuelto, especialmente importante si además hay contaminación orgánica y aumento de la temperatura, que reduce la solubilidad de aquél.

Las inundaciones, con sus secuelas del aumento de sólidos en suspensión en los cauces fluviales, tendrán mayor importancia en los ambientes áridos, donde los suelos se erosionan más y las relaciones precipitación-escorrentía no son lineales.

El aumento de la evapotranspiración en las cuencas hidrográficas de pequeño tamaño tendrá como consecuencia el descenso de los caudales, notándose más los efectos en los tramos de recepción.

Los cambios en la hidroquímica fluvial serán debidos a cambios en la meteorización de los sustratos rocosos de las cuencas hidrográficas en las zonas de clima más húmedo y más caluroso. Los aumentos de temperatura harán ascender la nitrificación de los suelos y, por escorrentía, el nitrato en los ríos. Y lo mismo sucederá con el nitrógeno orgánico en cuencas predominantemente agrícolas. Este efecto será más patente como resultado de las inundaciones intensas que tengan lugar tras las sequías.

En los ríos de las zonas más áridas (principalmente, en el sureste de la Península Ibérica), la dinámica ecológica será muy susceptible a los cambios en la variabilidad de los caudales, producto del cambio climático.

- Lagos

El cambio climático tendrá efectos importantes sobre la duración de la capa de hielo en los lagos alpinos.

En los lagos con estratificación estable (como Zóñar, en Córdoba), la temperatura del epilimnion puede aumentar de 1-4 °C con el cambio climático; sin embargo, si la estratificación es mayor, el hipolimnion se enfriará unos grados. Parece claro que la estratificación será de mayor duración, con lo cual el consumo de oxígeno en las zonas profundas

será mayor y la probabilidad de llegar a la anoxia aumentará. En los lagos alpinos (a partir de 1500 m.s.n.m.), si la duración de la cubierta de hielo y nieve se reduce, el descenso de oxígeno en las capas profundas y la liberación de fósforo desde el sedimento serán menores. Probablemente, la producción de primavera se verá reducida en favor de una mayor producción otoñal.

En los lagos en los cuales la producción tenga lugar en el epilimnion, el calentamiento aumentará la producción primaria si la estratificación es más prolongada. También disminuirá el oxígeno en las capas profundas por el aumento de aquélla y por el incremento de la sedimentación, debido al aumento de la producción primaria, lo cual generará cambios sobre la fauna profunda.

La disminución del nivel del lago afectará a la zona litoral en aquéllos que pueden variar de nivel significativamente; dicha franja suele ser la más productiva y actúa como zona de transición entre el ecosistema terrestre y el acuático. La colmatación de los lagos de menor tamaño durante los periodos de inestabilidad ecológica de la vegetación en la cuenca puede acelerarse al reducirse el tampón litoral que limita la entrada de sedimentos de origen terrestre.

Los aumentos de la meteorización de las rocas -efecto de la simple cinética térmica o de incrementos en el metabolismo de las comunidades vegetales, debidos al aumento de la temperatura del aire- generarán un incremento de la alcalinidad de los lagos.

Con el aumento térmico, los contaminantes orgánicos presentes en el agua pasan a la atmósfera con mayor rapidez y llegan antes a las zonas geográficas más altas en las que puede haber lagos, con lo cual éstos se contaminarán por deposición atmosférica con mayor facilidad. La movilización de metales y metaloides desde la cuenca a los sistemas acuáticos de zonas frías aumentará (As, Pb), debido a una mayor movilización de esas

sustancias en los suelos y a su transporte atmosférico.

Los efectos del calentamiento global sobre las redes tróficas de los lagos aún son motivo de debate.

Finalmente, ignoramos qué factores condicionan la redistribución futura de las faunas lacustres porque, en la mayor parte de los casos, se desconoce la historia de su dispersión pasada.

- **Embalses**

En general, podrían aplicarse a ellos las mismas aseveraciones que para los lagos, pero -teniendo en cuenta su mayor tasa de renovación del agua, su extrema dependencia de los usos a los cuales aquélla se dedica y que suelen estar sometidos a mayor eutrofización- cualquier predicción resulta sumamente arriesgada (Toja, comunicación personal).

ZONAS MÁS VULNERABLES

Serán las siguientes:

- **Ambientes endorreicos.** Muchos están enclavados en zonas donde disminuirá la precipitación promedio y la distribución estacional de ésta se verá muy alterada (laguna de Fuente de Piedra, por ejemplo), con lo cual están amenazados de desaparición.

- **Lagos y lagunas de alta montaña (1600-2100 metros)** en las zonas de bosques caducifolios y en las del límite del bosque.

- **Humedales costeros.** El litoral se reorganizará lentamente de modo natural si hay cambios en el nivel del mar. Sin embargo, dado que en las costas andaluzas hay multitud de obras civiles, quizá ocurran complicaciones adicionales de tipo administrativo que limiten dicha reorganización.

- **Ambientes dependientes de las aguas subterráneas.** El descenso de los niveles piezométricos, verosímelmente debido a usos consuntivos y a la disminución de la recarga con el cambio climático, los afectará bastante. Estamos hablando de Doñana (particularmente, del complejo turboso del Abalarío).

CASOS CONCRETOS

La Tabla 1 refleja la información obtenida sobre la incidencia de los posibles efectos del cambio climático en algunos aspectos morfométricos y biogeoquímicos de determinados ambientes acuáticos continentales andaluces, suministrada por los expertos que llevan trabajando muchos años en dichos ecosistemas. La información es todavía muy preliminar y debe tomarse con muchas reservas, pues carecemos de estudios específicos sobre esos posibles cambios en ninguno de los ecosistemas considerados. Asociado a la Tabla 1, se ofrece un apartado dedicado a Doñana, el humedal de Andalucía más conocido internacionalmente.

- Doñana y el Cambio Climático

1. ¿Los ambientes acuáticos de Doñana sufrirán cambios en su permanencia?. Sí. En las lagunas sobre las arenas verosímelmente descenderán el volumen de los apor-

tes superficiales y los niveles piezométricos; por lo tanto, es probable que haya una disminución en la superficie inundada, si bien esto -al depender de los cambios en la estacionalidad de las precipitaciones- no resulta demasiado predecible aún (Julia Toja, comunicación personal). Es probable, por tanto, que a largo plazo muchas lagunas desaparezcan, convirtiéndose en pastizales. Los brezales higróturbosos donde domina *Erica ciliaris*, en la actualidad una valiosa “reliquia”, desaparecerán y serán sustituidos por brezales con menor valor desde el punto de vista de la conservación, como los de *Erica scoparia*. Igual suerte correrán los ambientes turbosos del Abalarío, que albergan una gran parte de la flora singular de Doñana, donde se producirá -además- un incremento en la eutrofización y una reducción de la influencia atlántica que experimentan ahora, debida al incremento de las temperaturas mínimas del aire por el cambio climático.

Nombre	Localización geográfica	Cambios en la permanencia (temporal vs permanente)	Cambios en el tamaño	Cambios en los ciclos biogeoquímicos	Cambios en la biota
Parques Nacional y Natural de Doñana (Sevilla-Huelva)*	36° 34' N 6° 24' W	3	3	2	4
Albuferas de Adra (Almería)*	36° 45' N 2° 47' W	2	4	3	4
Laguna de Fuente de Piedra (Málaga)*	37° 06' N 4° 46' W	1	0	1	1
Lagunas de Sierra Nevada (Granada)	37° 05' N 3° 05' W	0	4	4	4
Desembocadura del río Guadalhorce (Málaga)	36° 40' N 4° 27' W	0	0	1	1
Embalse de Aracena (Huelva)	37° 55' N 6° 28' W	0	0	4	4
Embalse de La Minilla (Sevilla)	37° 43' N 6° 10' W	0	0	4	4

Tabla 1. Afecciones probables a los ecosistemas acuáticos continentales españoles más estudiados relacionadas con el cambio climático, basadas en la experiencia de distintos científicos andaluces, pertenecientes a las Universidades de Sevilla y Granada (véase Alvarez Cobelas et al., 2005). Dichas afecciones se caracterizan como inexistentes (0), escasas (1), apreciables (2), importantes (3) o muy importantes (4). El asterisco indica que se trata de ambientes incluidos en el Convenio Internacional RAMSAR para la Conservación de Humedales.

Respecto a la marisma, este cambio en las condiciones se traducirá en un incremento de las poblaciones de helófitos y pastizales, en detrimento de los macrófitos sumergidos, lo cual -a su vez- incentivará los procesos de colmatación y de disminución de superficies inundadas, procesos que se retroalimentan; en definitiva, se acelerará la velocidad de colmatación de la marisma.

2. ¿Sufrirá Doñana cambios el tamaño de sus ecosistemas acuáticos?. Como se ha dicho antes, habrá cambios, pero dependerán del estadio sucesional de cada ambiente en cuestión.

3. ¿El cambio climático afectará a los ciclos biogeoquímicos de Doñana?. Probablemente sí. Serán especialmente evidentes en los medios higróturbosos, caracterizados por la baja concentración de nutrientes y la acumulación de materia orgánica. Esta dejará de acumularse y se incrementará la concentración de nutrientes disueltos, dando paso a especies oportunistas que desplazarán a las especialistas en estos hábitats tan singulares. En la marisma, al desaparecer o disminuir de manera notable los macrófitos sumergidos, los ciclos biogeoquímicos tomarán otras rutas, ya que los distintos elementos circularán fundamentalmente por los helófitos y pastizales.

4. ¿Se verán afectadas las comunidades biológicas de las aguas de Doñana por el cambio climático?. Habrá disminución de la biodiversidad, al disminuir la heterogeneidad de hábitat. Asimismo, se incrementarán las posibilidades de que se instalen especies exóticas invasoras (como está ocurriendo con el helecho *Azolla filiculoides*).

5. ¿Afectará a Doñana el ascenso del nivel marino?. Sí. Buena parte de sus terrenos están prácticamente al nivel del mar y sólo separados de éste por pequeños diques dunares, de alturas inferiores a un metro. Es verosímil que, de continuar el ascenso del mar con las tasas previstas, una porción

extensa de Doñana se vea ocupada por el mar en un siglo.

6. ¿Padecerá Doñana intrusión marina?. En la actualidad, no existe, pero no pueden descartarse cambios futuros si hay conflictos por el uso del agua freática en una zona de agricultura intensiva donde es previsible que la recarga del acuífero sea menor por los efectos del cambio climático.

PRINCIPALES OPCIONES ADAPTATIVAS

Las adaptaciones deben llevarse a cabo tanto desde la oferta como desde la demanda de agua. En el primer caso, tratando de aumentar la cantidad de agua disponible para los ecosistemas acuáticos mediante políticas de ahorro. En el segundo, tratando de reorientar la demanda hacia usos de bajo consumo. A escala regional, no se vislumbran adaptaciones humanas posibles para mitigar o preservar efectos importantes (emisiones de gases, secuestro de carbono, etc.). A escala local, sí puede haberlas para controlar la inundación, mejorar la biodiversidad y reducir la contaminación.

Sabiendo de antemano que la adaptación de los ecosistemas acuáticos continentales al cambio climático es limitada, en nuestra opinión se deberían abordar las siguientes acciones:

- Estimulación del ahorro de agua en la agricultura.
- Estimulación de la recarga de acuíferos.
- Estimulación del reciclado de aguas residuales.
- Mejora de la calidad de las aguas superficiales.
- Recuperación del espacio inundable en el Dominio Público Hidráulico.
- Revegetación (forestal o arbustiva) masiva en cuencas hidrográficas, favoreciendo la ocupación del espacio por las plantas autóctonas.

- Estimulación de la conservación de los espacios naturales y de la conexión ambiental entre ellos.
- Estimulación de la acreción en humedales costeros.

PRINCIPALES INCERTIDUMBRES Y DESCONOCIMIENTOS

Son los siguientes:

- Carencia casi absoluta de series de datos fiables a largo plazo para el estudio de los efectos del cambio climático.
- Información aún escasa sobre el estado ecológico y la biología de las especies más importantes.
- Desconocimiento absoluto sobre los procesos de histéresis.
- Desconocimiento de los efectos de los cambios abruptos o graduales en las comunidades vegetales terrestres y la geología de las cuencas sobre los ecosistemas acuáticos.

NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN

Como apenas se sabe nada, a excepción de la opinión de los expertos, habría que incidir en muchas aspectos que hasta ahora se han pasado por alto. El Plan Andaluz de Investigación debiera plantearse estas necesidades lo antes posible. Entre ellas, se cuentan:

- Estudios a largo plazo sobre los efectos ambientales del cambio climático en

ecosistemas acuáticos continentales andaluces en zonas sensibles al mismo.

- Diseño de un sistema de indicadores biológicos de los impactos del cambio climático.

-Implementación de los modelos existentes para detectar efectos del cambio climático sobre los ecosistemas acuáticos continentales andaluces.

-Finalización urgente de la elaboración de las floras y faunas andaluzas, especialmente de plantas no vasculares e invertebrados, junto con la descripción de su distribución en Andalucía.

-Estudio sobre la dispersión y la ecología de plantas y animales invasores (*Azolla filiculoides*, *Eirocheir sinensis*, etc.) en relación con el cambio climático, cuya presencia ya se ha detectado en Andalucía.

-Estudio de impactos y adaptaciones al cambio climático a nivel genético, ecofisiológico, poblacional y ecológico.

-Estudios de los cambios en la biodiversidad de macrófitos y vertebrados a nivel local asociados al cambio climático.

-Simulaciones "in situ" de los posibles cambios en ecosistemas determinados (pequeños lagos, humedales y cuencas), alterando las condiciones ambientales de manera análoga a los cambios previstos.

-Estudio e inventario de comunidades biológicas georeferenciadas a escala geográfica regional.

-Estudio de los efectos de las medidas de mitigación.

BIBLIOGRAFÍA

Alvarez, M., J. Catalán & D. García de Jalón. (2005). Impactos sobre los ecosistemas acuáticos continentales. En: *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del*

Cambio Climático. J. M. Moreno Rodríguez, (ed.): 113-146. Ministerio de Medio Ambiente y Universidad de Castilla-La Mancha. Madrid.

CHAPTER 8 / CAPÍTULO 8

***Flora, vegetation and climatic
changes***

**Flora, vegetación y cambios
climáticos**

El cambio climático en Andalucía: evolución y consecuencias medioambientales
Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía): 155-166 (2007)
© Los autores. Sevilla. España. ISBN: 978-84-96 776-40-1

Flora, vegetation and climatic changes

Pablo García Murillo.

Departamento de Biología Vegetal y Ecología. Facultad de Farmacia. Universidad de Sevilla. C/ Profesor García González s/n. E-41012 Sevilla. pgarcia@us.es

ABSTRACT

The aim of this chapter is to point out the link between floristic and vegetation researches, and climatic and Global Changes. From amacroevolutionary perspective, a brief survey about the milestones in the evolution of SW European flora is remarked. Besides, on a historical scale, Floristic Change concept is presented. Finally, an example of a retrospective study about flora and vegetation located in Doñana Natural Park (SW Spain) is given in order to show how a cryptic climate crisis was detected.

Key words: *flora, vegetation, floristic change, climatic change, Global Change, Doñana, SW Spain*

Flora, vegetación y cambios climáticos

Pablo García Murillo

Departamento de Biología Vegetal y Ecología. Facultad de Farmacia. Universidad de Sevilla. C/ Profesor García González s/n. E-41012 Sevilla. pgarcia@us.es

RESUMEN

El objetivo del presente capítulo es señalar la relación entre los estudios florísticos y de vegetación, con las situaciones de cambio climático y Cambio Global. Se revisan los principales hitos en la evolución de la flora andaluza desde una perspectiva macroevolutiva. Se comentan los estudios de Cambio Florístico. Finalmente, se aporta un ejemplo sobre un estudio retrospectivo de la flora y vegetación de una zona del Parque Natural de Doñana que puso de manifiesto una crisis climática no detectada en la zona por los métodos instrumentales tradicionales.

***Palabras clave:** flora, vegetación, cambio florístico, cambio climático, Cambio Global, Doñana, SW España*

INTRODUCCIÓN

Se entiende por flora al conjunto de especies vegetales que se encuentran en un lugar determinado.

En la naturaleza, las especies vegetales no se presentan aisladas, sino que forman comunidades donde individuos de diversas especies conviven en una localidad y bajo unas mismas condiciones climáticas, edáficas y ecológicas. Al conjunto de comunidades vegetales de un lugar se denomina vegetación.

Ante un escenario de cambio climático la respuesta de la vegetación es rápida y consiste en la sustitución de unas especies vegetales por otras. De esta forma, los procesos ambientales que han ocurrido en un lugar determinado condicionan la naturaleza de su flora y vegetación. Por tanto, la historia de los cambios en la composición florística y en las comunidades de un lugar determinado, resultan fundamentales para conocer la respuesta de la vegetación y de los ecosistemas al cambio global.

Los cambios en la vegetación han sido una constante en la historia de la biosfera y se han sucedido a un ritmo desigual. La intención de este capítulo es, primero, poner de manifiesto la reiteración e importancia de estos cambios y, segundo, mostrar el interés de los estudios históricos sobre flora y vegetación para tener un conocimiento preciso de los fenómenos de cambio climático y cambio global. Para ello se ha organizado este capítulo en tres apartados. En el primero se exponen de forma sucinta los principales hitos que han ocurrido en la evolución a escala macroevolutiva de la vegetación de Andalucía. En el segundo, se intenta ofrecer una visión sobre las posibilidades que tienen los estudios sobre el cambio florístico ocurrido en las últimas décadas, a partir de investigaciones realizadas en otros países. Y, en el tercero, se refiere un caso estudiado por el autor de este capítulo; en él, partiendo de unas investigaciones sobre la flora y vegetación de una zona de Andalucía, se relacionaron anomalías florísticas y cambios históricos en las superficies

de comunidades vegetales higrofiticas, con un proceso de cambio climático ocurrido hace algunos siglos y del que no se tenían noticias en nuestro territorio.

ALGUNAS IDEAS SOBRE EL ORIGEN DE LA FLORA ANDALUZA

La flora andaluza es producto de una serie de cambios, que de una forma brusca o más gradual han conformado su espectro florístico y biogeográfico. Revela una historia de extinciones, invasiones, migraciones y reorganización de comunidades, donde las condiciones climáticas han causado estos cambios, hasta que el hombre apareció en la escena.

Las primeras plantas aparecieron en la tierra hace unos 420 millones de años, en un mundo en que las masas de tierra estaban agrupadas en un único continente: Pangaea (Figura 1A). Durante la segunda mitad de la era Paleozoica (Figura 2), las plantas vasculares que ya cubrían la superficie terrestre, fueron diversificándose y evolucionando. En el Mesozoico, hace unos 180-135 millones de años, se produjo la división de la Pangaea en dos continentes: Laurasia, al norte, y Gondwana, al sur, separados por el mar de Thetys (Figura 1B). Desde el punto de vista climático esto supuso una mayor variedad de climas. Asimismo en este período de tiempo, las plantas que hasta entonces habían dominado las tierras emergidas: los Pteridófitos (el grupo vegetal al que pertenecen los helechos), dieron lugar a otros grupos: las Pteridospermas (los helechos con semilla), las Gimnospermas (el grupo vegetal al que pertenecen las coníferas) y, al final de la era Mesozoica, las Angiospermas (las plantas con flores y frutos).

Sin embargo, fue en la era Cenozoica (Figura 2) cuando tuvieron lugar los acontecimientos que conformaron los rasgos característi-



Figura 1. Los antiguos continentes. A. Pangaea. B. Laurasia y Gondwana separados por el mar de Thetys.

cos de la vegetación que cubre el territorio andaluz. Además en este período de tiempo, las Angiospermas se diversificaron y poco a poco fueron haciéndose dominantes a la vez que las Pteridofitas y Pteridospermas, menos competitivas, redujeron sus efectivos, quedando en situaciones marginales, las primeras y extinguiéndose, las últimas. La primera parte de esta era, el Paleógeno (dentro del Terciario), situado entre los 65-25 millones de años, se caracterizó, a grandes rasgos, por un clima tropical y cálido que dio lugar a una vegetación tipo laurisilva (la misma que puede observarse en los bosques de algunas de las islas Canarias, como la Gomera) que se extendía por gran parte de lo que hoy es Europa. El Mediterráneo aún no se había formado y tampoco exis-

ERA	PERIODO	EPOCAS (DURACION EN MILLONES DE AÑOS)	MILLONES DE AÑOS ANTES DEL PRESENTE	
CUATERNARIO	CUATERNARIO	HOLOCENO (0.01)	0.01	
		PLAISTOCENO (1.99)		
	TERCIARIO	TERCIARIO	PLIOCENO (3)	2
			MIOCENO (20)	5
			OLIGOCENO (13)	25
			EOCENO (17)	38
			PALEOCENO (10)	55
CRETÁCICO	CRETÁCICO	TARDÍO TEMPRANO (79)	65	
			144	
JURÁSICO	JURÁSICO	TARDÍO MEDIO TEMPRANO (64)	208	
TRIÁSICO	TRIÁSICO	TARDÍO MEDIO TEMPRANO (37)	245	
PÈRMICO	PÈRMICO	TARDÍO MEDIO TEMPRANO (41)	286	
CARBONIFERO	CARBONIFERO	TARDÍO MEDIO TEMPRANO (74)	360	
DEVÓNICO	DEVÓNICO	TARDÍO MEDIO TEMPRANO (48)	408	
SILÚRICO	SILÚRICO	TARDÍO MEDIO TEMPRANO (30)	438	
ORDOVÍCICO	ORDOVÍCICO	TARDÍO MEDIO TEMPRANO (67)	505	
CÀMBRICO	CÀMBRICO	TARDÍO MEDIO TEMPRANO (35)	540	
		(4060)	4600	

Figura 2. Escala geológica del tiempo.

tían los casquetes polares permanentes. Europa, Groenlandia y Norteamérica estaban aun unidas; este contacto es la causa de que regiones del SW de los Estados Unidos y de la Europa mediterránea compartan géneros de plantas como: *Alnus*, *Arbutus*, *Crataegus*, *Juniperus* o *Quercus*.

Pero, en la segunda parte del Terciario, el Neógeno, entre los 25-2 millones de años, el panorama cambió, iniciándose un período de gran aridez. Europa y Groenlandia se separaron. Finalizó la Orogenia Alpina que originó las principales cadenas montañosas europeas, como los Alpes, Cárpatos o Pirineos. Se formó el Mediterráneo y el SW de Europa estuvo unido episódicamente al continente africano. Quizás la crisis climática más significativa de este periodo, tuvo lugar en el Mesiniense, entre los 6.7-5.2 millones de años, cuando el Mediterráneo se secó y quedó reducido a un inmenso marjal. Este hecho tuvo una enorme importancia desde el punto de vista florístico, ya que permitió la incorporación de nuevos elementos a la flora de nuestro territorio. Numerosos grupos ubicados en territorios asiáticos o africanos, separados por este mar pudieron alcanzar nuevos territorios; por ejemplo, gran parte de las plantas esteparias ibéricas tienen sus orígenes en este acontecimiento, el cual permitió a especies propias de las estepas de Asia Menor llegar al oeste de Europa.

El final del Terciario vino acompañado de una transgresión marina, como resultado de la apertura del estrecho de Gibraltar, que tuvo también importantes consecuencias para la flora andaluza. La subida de las aguas provocó el aislamiento de numerosas poblaciones, lo cual condujo a una especialización alopatrica, como puede observarse por ejemplo en el grupo de *Silene mollissima* (Jeanmonod & Bocquet, 1981). Igualmente, ocurrieron varias crisis climáticas sucesivas que tuvieron un doble efecto desde el punto de vista de la flora. Por un lado, favorecieron la expansión de las especies esteparias y xerofíticas, y por otro, contribuyeron a la extinción, en el territorio europeo, de los géneros de climas templados y tropicales que habían aparecido a comienzos del Terciario: *Taxodium*, *Sequoia*, *Liquidambar*, *Hammamelis*, etc.

Los últimos dos millones de años corresponden al período denominado Cuaternario. La principal característica de este período en el continente europeo es la alternancia entre fases glaciares e interglaciares. Según Carrión & Díez (2003), el 80% del tiempo del Cuaternario en el norte de Europa fue glacial. Este hecho supuso la extinción de numerosos taxones que vivían en territorio europeo. Las condiciones de frío intenso se extendieron por el norte y centro de Europa y sólo las regiones meridionales conservaron lugares donde el suelo no se heló. Estas condiciones de frío fueron simultáneas con ambientes de aridez y xerofitismo en las regiones del sur. Igualmente, bajo estas circunstancias, las cadenas montañosas costeras del sur de Europa fueron decisivas para el mantenimiento de la diversidad de las masas forestales europeas ya que actuaron como refugio de especies que encontraron en estos microclimas su salvación. Cuando se retiraron los hielos colonizaron de nuevo los territorios del norte y centro de Europa, según la hipótesis expuesta por Carrión (2003), Carrión & Díez (2003) y Arroyo et al. (2004).

La etapa interglacial actual, que abarca los últimos 10000 años se denomina Holoceno y se caracteriza por la disparidad en la dinámica vegetal y la gran heterogeneidad biogeográfica.

Además, la aparición del hombre y el uso del fuego introdujeron un importante factor de perturbación en las comunidades vegetales. El fuego y el pastoreo han influido muy significativamente en la evolución de la vegetación durante la segunda mitad del Holoceno. La acción antrópica es un elemento crítico de perturbación que determina cambios en las especies dominantes y conlleva cambios radicales en la diversidad y la cobertura arbórea y arbustiva (Valladares et al., 2004). Como consecuencia de la influencia humana, una gran parte de las comunidades vegetales de nuestro

territorio fue destruida para crear cultivos y pastos, pero eso es ya otra historia.

En definitiva, la vegetación andaluza ha sufrido numerosos avatares climáticos e históricos que han determinado la estructura y dinámica de las comunidades actuales y que tendrán indudables repercusiones en su respuesta futura al cambio global. Sin embargo, el camino que queda por recorrer para tener un conocimiento efectivo de estos procesos no parece fácil. Suscribimos las palabras de Valladares et al. (2004) sobre el bosque mediterráneo: *“A la luz de los estudios paleoecológicos, la contingencia histórica aparece como un responsable significativo de la trayectoria temporal de las comunidades vegetales. La exploración de secuencias vegetales de varios miles de años revela interacciones múltiples, abundancia de pautas no repetidas y una gran sensibilidad a la situación inicial, todo lo cual hace poco apropiadas las explicaciones mecanicistas y desafían la simulación”*.

EL CAMBIO FLORÍSTICO

El Concepto de Cambio Florístico hace referencia a cambios históricos en las floras de países o regiones y es motivo de atención en diversas investigaciones actuales. Los cambios en las floras se producen por la adición de nuevas especies a catálogos florísticos ya realizados o por la desaparición de especies cuya presencia había sido registrada en el área de estudio. Así, entre otros, Wiegmann & Waller (2006) señalan la pérdida de especies en los bosques norteamericanos en los últimos 50 años, Abbot et al. (2000) cambios en la vegetación de una isla australiana en los últimos 40 años, Sand Jensen et al. (2000) la pérdida de especies de plantas acuáticas en Dinamarca en los últimos 100 años y Kühn et al. (2003), Lososova et al. (2006) y Marini et al. (2007) el incremento de especies nitrófilas en varias regiones

centroeuropeas desde una perspectiva histórica. En todos ellos subyacen los problemas de la extinción de especies autóctonas, invasión de exóticas y homogeneización de hábitat. Pero quizá, el mejor referente sobre el Cambio Florístico lo encontramos en Gran Bretaña. Las peculiaridades culturales de este país le permiten abordar las cuestiones sobre el Cambio Florístico desde una posición de ventaja sobre otros países. La Botánica en el Reino Unido es una ciencia apreciada y que posee una gran tradición. Desde el siglo XVII Gran Bretaña posee rigurosas floras y un importante elenco de botánicos que durante más de 300 años han continuado los estudios de identificación y distribución de las especies vegetales de su territorio. Cuenta además con numerosos herbarios donde durante siglos se han ido depositando las plantas recolectadas y que se mantienen al día gracias a los trabajos de numerosos profesionales y aficionados, así como abundante documentación, que se remontan varios cientos de años, sobre las condiciones ambientales de su territorio. En definitiva las condiciones idóneas para abordar este tipo de estudios.

Bajo este enfoque y con estas circunstancias, los investigadores que han trabajado en esta materia coinciden en que durante el siglo XX se han producido importantes cambios en la flora británica. Así Preston (2003), tomando como base 68 floras regionales publicadas entre 1660 y 1960, sostiene lo expuesto anteriormente, añadiendo que el cambio fue más intenso en el período que va desde 1950 hasta nuestros días y señala que, por el contrario, antes de 1860 resulta muy difícil encontrar referencias de cambio florístico. Del mismo modo, Marren (2001) y Walker (2003b) han estudiado las extinciones en la flora de 15 y 25 condados ingleses, respectivamente, durante el siglo XX y su conclusión ha sido que la tasa de extinción de especies en la floras estudiadas está entre 0.5-0.8 especies por año; es decir

más de una especie cada dos años desde 1900, con una velocidad de extinción que se incrementa progresivamente a medida que se acercan al final del siglo XX (Figura 3). en Inglaterra.

Por otro lado, en las floras británicas modernas se está incluyendo información sobre las especies que se han extinguido de determinados lugares o referencias al período o a la fecha de aparición de especies exóticas en las Islas Británicas. Aunque, estas investigaciones acaban de comenzar, existe actualmente una importante discusión sobre el método y la forma de interpretar algunos de los datos sobre flora (Rich & Karran, 2006), la escala de los trabajos, el tratamiento de las especies de difícil identificación (Walker, 2003a), etc.

Con todo, pensamos que los estudios sobre el Cambio Florístico están proporcionando y proporcionarán una información fundamental para el conocimiento del cambio global. Aportan series de datos históricos relativos a organismos muy sensibles a los cambios ambientales. Información que permite: cuantificar variaciones de diversidad en una escala de tiempo y espacio considerable, observar los períodos de extinciones de especies en una determinada región, la aparición de especies exóticas, conocer la frecuencia de estos procesos, relacionarlos con las variables ambientales y, cuando las circunstancias lo permitan, establecer comparaciones con otros lugares del mundo. Todo ello a un nivel de observación diferente de las investigaciones ecológicas tradicionales.

LOS ESTUDIOS SOBRE LA FLORA Y VEGETACIÓN DE EL ABALARIO

En 1994, como consecuencia de los trabajos desarrollados por un equipo multidisciplinar coordinado por el Prof. Montes del Olmo de la Universidad Autónoma de

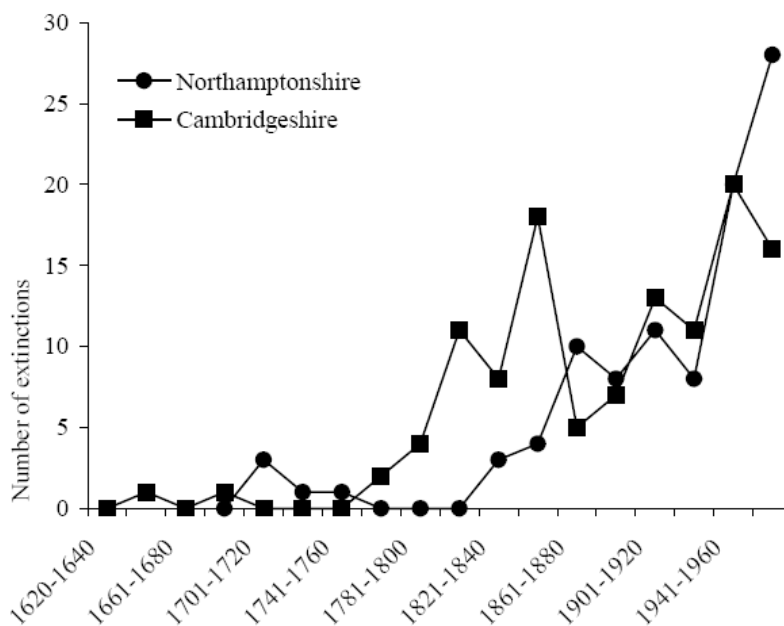


Figura 3. Estudios sobre el Cambio Florístico en Inglaterra. Número de especies extintas en los condados de Northamptonshire y Cambridgeshire desde 1620 [tomado de Walker, (2003b)].

Madrid: “*Bases ecológicas para la restauración ecológica del complejo palustre del Abalarío*”, en el que el autor de este capítulo fue el responsable del Equipo de Flora y Vegetación; tuvimos la ocasión de realizar un detallado análisis de las comunidades y elementos vegetales de una parte del litoral onubense: el complejo palustre de el Abalarío.

La zona de Abalarío, situada al oeste del Parque Nacional de Doñana (Figura 4), era en esa fecha un territorio desfigurado, donde su paisaje natural había sido sustituido por cultivos forestales, presentes en el territorio desde los años 40 del siglo XX (García Murillo, 2001). Al tomar contacto con el área de estudio, nuestras primeras impresiones fueron las de estar ante un paisaje desolador formado por cultivos forestales abandonados y jalonado de numerosas cubetas de lagunas que no contenían, en su mayoría, ni agua, ni vegetación acuática, y que contrastaba especialmente con

el paisaje que ofrecía su vecino, el Parque Nacional de Doñana.

La Junta de Andalucía se había hecho cargo recientemente de ese territorio, como consecuencia de la organización del Estado Español en Comunidades Autónomas, y debido a su proximidad al Parque Nacional de Doñana y a su reciente calificación como espacio protegido, deseaba que esta zona recuperara su valor natural. En ese sentido, nuestro trabajo consistía en proporcionar información rigurosa sobre el paisaje vegetal de la zona. Una información que permitiera a los gestores desarrollar las tareas de restauración ecológica de acuerdo con criterios científicos. Así, elaboramos un catálogo florístico de la zona, se realizaron mapas de vegetación (a partir de datos de campo y de ortofotos aéreas) en los que se representaron las distintas unidades de vegetación reconocidas y se realizó un modelo que explicaba los factores que intervenían en la distribución de las comunidades vegetales

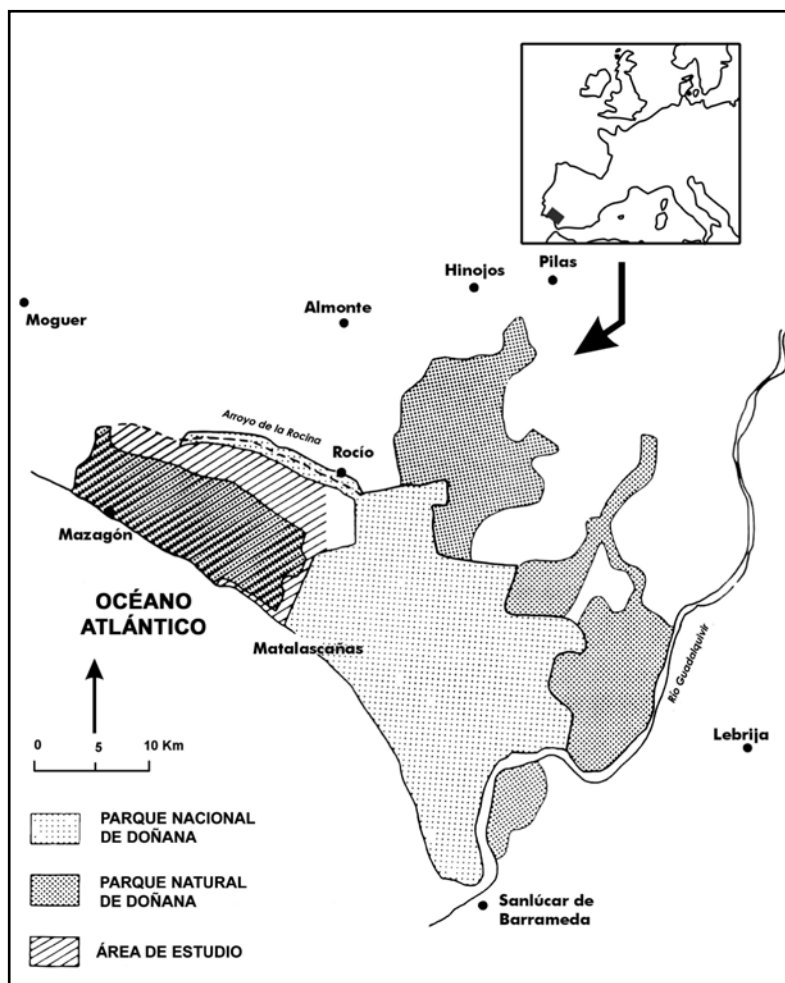


Figura 4. Localización del área de estudio para los trabajos sobre flora y vegetación de el Abalarío (Parque Natural de Doñana, SW España).

de la zona de estudio (García Murillo, 2005; García Murillo & Sousa, 1997 y 1999).

En el transcurso de los trabajos descubrimos una gran zona turbosa, oculta entre la masa de eucaliptos, que se extendía por los lugares denominados Ribatehilos y El Peladillo. Esta zona, a pesar de haber sido intensamente alterada por los cultivos forestales durante 50 años, mantenía destacables manchas de vegetación de turbera que albergaba numerosas especies singulares, como: *Erica ciliaris*, *Genista ancyrocarpa*, *Pinguicula lusitanica* o briófitos del género *Sphagnum*, con un gran valor desde el punto de vista de la conservación. Estos

lugares llamaron nuestra atención desde el primer momento que los exploramos, no sólo por el interés florístico de las especies que en ellos se encontraban, sino por lo insólito de su ubicación: en un clima mediterráneo, a nivel del mar y en el extremo sur de Europa.

Las turberas son ecosistemas caracterizados por la acumulación de materia orgánica debido a una saturación permanente de agua que origina condiciones anaeróbicas impidiendo así la descomposición de la materia orgánica (Fernández Zamudio et al., 2007). La formación de una turbera se debe a la acumulación de una masa de materiales

orgánicos en lugares de drenaje restringido donde las condiciones hidromorfas anaerobias han permitido su conservación a través del tiempo. El agua es, por tanto, el factor exógeno más importante para el desarrollo, transformación y forma de la futura turbera. Las condiciones climáticas idóneas para la formación de turba son temperaturas bajas y precipitaciones abundantes distribuidas a lo largo de todo el año. En Europa, estas condiciones son frecuentes en las fachadas atlánticas de Irlanda y Gran Bretaña, costas del norte de Europa, Escandinavia y en las regiones montañosas más elevadas; en la Península Ibérica son raras y, en general, están presentes en determinadas zonas del norte y noroeste, y en las zonas más altas de las cordilleras. Por tanto, la presencia de una turbera en nuestra zona de estudio era un acontecimiento realmente sorprendente. Por esta razón resolvimos profundizar en nuestras investigaciones sobre la turbera y

decidimos investigar la vegetación remontrándonos más allá de los años 30 del siglo XX, momento con una presión antrópica casi inexistente en nuestro área de estudio. Los resultados, mostraron un significativo incremento en la superficie cubierta por vegetación turbosa. Igualmente, observamos una disminución paulatina de estas comunidades a medida que nos acercábamos al siglo XX (Figura 5).

Algo estaba desorganizando las comunidades de vegetación turbosa y no era la acción del hombre, ya que en las épocas consideradas la zona de estudio era un desierto en lo relativo a presencia humana, un territorio completamente marginal y aislado de la influencia antrópica. Iniciamos, entonces una serie de trabajos encaminados a confirmar estas observaciones y a buscar una explicación a este sorprendente hecho. El Dr. Sousa de la Universidad de Sevilla, llevó la iniciativa en estos trabajos que

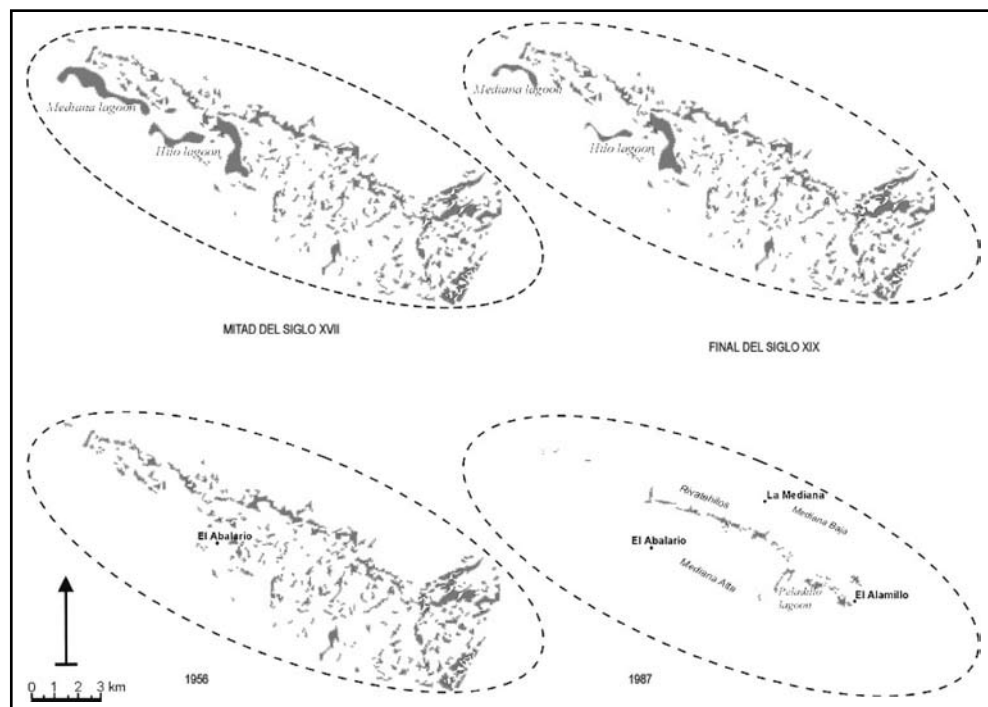


Figura 5. Evolución de las turberas de Abalarío, desde el siglo XVII hasta finales del siglo XX (tomado de Sousa et al., 2006).

incluyeron: estudios sobre el relieve y avenamiento superficial desde una perspectiva histórica, estudio de cartografía histórica y documentos antiguos que se refirieran a la zona de estudio y un estudio de flora y vegetación de unos humedales vecinos que no habían estado sometidos a una perturbación tan intensa como los cultivos forestales, las lagunas del Parque Nacional de Doñana.

Los resultados de estas investigaciones han sido publicados en varias revistas científicas y libros (Sousa & García Murillo, 1998, 1999, 2001, 2002, 2003 y 2005; Sousa et al. 2006), y confirmaron las hipótesis de que las comunidades turbosas, al igual que los arroyos de la zona y determinadas lagunas habían experimentado una significativa reducción en su superficie, debido fundamentalmente a un proceso de aridización que se remontaba, al menos, a unos dos siglos y que lo vinculamos con el final de una crisis climática conocida en Europa como Pequeña Edad del Hielo. Estos resultados han supuesto una importante contribución al conocimiento de este período climático, ya que sus efectos en el sur de Europa son escasamente conocidos. Asimismo, pensamos que estos trabajos constituyen un buen

ejemplo para mostrar que investigaciones fuera de los límites de las disciplinas estrictamente climáticas, pueden aportar información de gran valor a cuestiones relativas a cambios en el clima

CONCLUSIONES

En este capítulo se ha intentado mostrar que tanto la flora, como la vegetación del territorio andaluz se han forjado a partir de numerosos cambios, a escala macroevolutiva, causados por crisis climáticas. Éstas, han producido extinciones, invasiones y migraciones de especies que han organizado y desorganizado las comunidades vegetales.

Por esta razón los estudios sobre cambios en la flora y vegetación de una región, a gran escala, o a una escala histórica, constituyen un instrumento de gran valor para conocer, no sólo los efectos de las crisis climáticas o el cambio global, sino también, para detectar procesos ambientales globales que, al no haber estado registrados por los procedimientos instrumentales tradicionales, han permanecido invisibles.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbott, I., N. Marchant & R. Cranfield (2000). Long-term change in the floristic composition and vegetation structure of Carnac Island, Western Australia. *Journal of Biogeography* 27 (2): 333–346.
- Arroyo, J., J. S. Carrión, A. Hampe & P. Jordano (2004). La distribución de especies a diferentes escalas espacio-temporales. En: *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Valladares, F. (ed.): 27-67. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S.A., Madrid.
- Carrion, J. S. 2003. *Evolución vegetal*. Librero editor, Murcia.
- Carrión, J. S. & M. J. Díez (2004). Origen y Evolución de la vegetación mediterránea en Andalucía a través del registro fósil. En: *El monte mediterráneo en Andalucía*. C. M. Herrera (Coord.): 21-27. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. Sevilla.
- Fernández Zamudio, R., A. Sousa & P. García Murillo (2007). *Laguna de Las Madres. Flora y Vegetación*. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.
- García Murillo, P. (2001). Restauración del Complejo Palustre del Abalarío: la reconstrucción del paisaje. En: 1ª

- Reunión Internacional de Expertos sobre la Regeneración Hídrica de Doñana. Ponencias y Conclusiones. Ministerio de Medio Ambiente (Ed.): 117-130. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- García Murillo, P. (2005) Reconstrucción del paisaje del Abalario: un referente para la restauración ambiental en Doñana. En: Doñana Agua y Biosfera. Martín, C. & F. García Novo (Eds.): 271-275. Conferederación Hidrográfica del Guadalquivir, Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- García Murillo, P. & A. Sousa (1997). Vegetation changes in Abalario (Natural Park Entorno de Doñana, SW of Spain). *Lagascalia* 19: 737-744.
- García Murillo, P. & A. Sousa, (1999). El Paisaje vegetal de la zona oeste del Parque Natural de Doñana (Huelva). *Lagascalia* 21:111-132.
- Jeanmonod, D. & G. Bocquet (1981). Remarques sur la distribution de *Silene mollissima* (L.) Pers. et des especes affines en Méditerranée occidentale. *Candollea* 36: 279-287.
- Kühn I., R. Brandl, R. May & St. Klotz (2003). Plant distribution patterns in Germany – Will aliens match natives?. *Feddes Repert.* 114 : 559–573.
- Lososova, Z., M. Chytry, I. Kühn, O. Hájek, V. Horakova, P. Pysek & L. Tichy (2006). Patterns of plant traits in annual vegetation of man-made habitats in central Europe. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 8: 69–81.
- Marini L., M. Scotton, S. Klimek, J. Isselstein & A. Pecile (2007). Effects of local factors on plants species richness and composition of Alpine meadows. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 119: 281–288
- Flora, vegetación y cambios climáticos
- Marren, P. (2001). “What time hath stole away”: local extinctions in our native flora. *British Willdlife* 12: 305-310.
- Preston, C.D. (2003). Perceptions of change in English county Floras, 1660–1960. *Watsonia* 24: 287-304.
- Rich, T. C. G. & A. B. Karran (2006). Floristic changes in the British Isles: comparison of techniques for assessing changes in frequency of plants with time. *Botanical Journal of Linnean Society* 152: 279–301.
- Sand-Jensen, K., T. Riis, O. Vestergaard & S. E. Larsen (2000). Macrophyte decline in Danish lakes and streams over the past 100 years. *Journal of Ecology* 88: 1030-1040.
- Sousa, A. & P. García Murillo (1998). Cambios históricos en el avenamiento superficial y la vegetación del Parque Natural de Doñana (Sector Abalario), Huelva. *Eria* 46: 165-182.
- Sousa, A. & P. García Murillo (1999). Historical evolution of the Abalario lagoon complex (Doñana, Natural Park, SW Spain). *Limnetica* 16: 85-98.
- Sousa, A. & P. García Murillo (2001). Can place names be used as indicators of landscape changes? Application to the Doñana Natural Park (Spain). *Landscape Ecology* 16. 391-406.
- Sousa, A. & P. García Murillo (2002). Méthodologie pour l'étude des effets du petit age glaciaire dans le Parc Naturel de Doñana (Huelva, Espagne). Essai de reconstitution des formations palustres et du drainage superficial. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie* 14: 359-367.
- Sousa, A. & P. García Murillo (2003). Changes in the wetlands of Andalucía (Doñana Natural Park, SW Spain) at the end of the Little Ice Age. *Climatic Change* 58: 193-217.
- Sousa, A. & P. García Murillo (2005). *Historia ecológica y evolución de*

- las lagunas peridunares del Parque Nacional de Doñana*. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- Sousa, A., L. García-Barrón, J. Morales & P. García Murillo (2006). Post-Little Ice Age warming and dessication of the continental wetlands of the Aeolian sheet in the Huelva region (SW Spain). *Limnetica* 25: 57-70.
- Valladares, F., J. J. Camarero, F. Pulido & E. Gil-Pelegrín (2004). El bosque mediterráneo, un sistema humanizado y dinámico. En: *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Valladares, F. (ed.): 13-25. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S.A., Madrid.
- Walker, K.J. (2003a). Using data from local floras to assess floristic change. *Watsonia* 24: 305-319.
- Walker, K.J. (2003b). One speceies lost every year? An evaluation of plant extinctions in selected British vice-counties since 1900. *Watsonia* 24: 359-374.
- Wiegmann M. & D. M. Waller (2006). Fifty years of change in northern upland forest understories: Identity and traits of “winner” and “loser” plant species. *Biological Conservation* 129: 109-123.

CHAPTER 9 / CAPÍTULO 9

***Pycnogonids and the possible
effect of the climatic change in the
andalusian fauna***

**Los Pícnogónidos y el posible efecto
del cambio climático en la fauna
andaluza**

Pycnogonids and the possible effect of the climatic change in the andalusian fauna

Esperanza Cano Sánchez y Pablo J. López-González

Biodiversidad y Ecología de Invertebrados Marinos. Departamento de Fisiología y Zoología. Facultad de Biología. Universidad de Sevilla. Avda. Reina Mercedes 6. 41012 Sevilla. ecano@us.es; pjlopez@us.es

ABSTRACT

Pycnogonids are one of the groups of chelicerate, they can be found in all marine habitats, they have not economic importance and our knowledge on their biology is limited. Pycnogonids are one of the few groups of animals in which the parental care is exclusively assumed by males. There are four known pycnogonid postembryonic development: Typical Protonymphon, Encysted Larva, Atypical Prothonymphon and Attaching Larva. In the three first types, the first instar is the protonymphon larva, it has three pairs of appendages and live parasitic on their feeding substrata; in the fourth one, the first instar has a single pair of appendages, while others remain as processes. This last type stay on the ovigers of the males for several molts. Adults are usually associated with other sessile or sluggish invertebrates, they are carnivores grazers. Thirty-nine species have been reported from Andalusian coasts, all they considered with a clear Atlantic-Mediterranean distribution, only in eight of them the larval type is known, and only in four species their complete larval development have been investigated.

The forecast changes in the water sea level (0,09-0,88 m of elevation in the XXI century), rainfalls, pH, water temperatures, winds, CO₂ dissolved, salinity and in the pollution, all of them will surely affect to the stuary and sea water quality. All these changes will have a difficult to evaluate impact on the fisical, biological and biogeochemical characteristics of coasts and seas. Considering that pycnogonids are present in a wide range to environmental conditions, from littoral to bathyal and abyssal zones, and (considering the limited available information) that, in general, they seem to be moderate-tolerant to the direct effects of water pollution, it is probably that the climatic expected changes affecting on our pycnogonids fauna will not be initially responsible of strong physiological stress but mainly associated with the transformation and habitat lost.

Key words: *Pycnogonids, postembryonic development, protonymphon, climatic change, andalusian fauna.*

Los Picnogónidos y el posible efecto del cambio climático en la fauna andaluza

Esperanza Cano Sánchez y Pablo J. López-González

Biodiversidad y Ecología de Invertebrados Marinos. Departamento de Fisiología y Zoología. Facultad de Biología. Universidad de Sevilla. Avda. Reina Mercedes 6. 41012 Sevilla. ecano@us.es; pjlopez@us.es

RESUMEN

Los picnogónidos son un grupo de quelicerados que se encuentran en todos los hábitat marinos, carecen de importancia económica, y del que se tienen conocimientos muy limitados sobre su biología. Es éste uno de los pocos grupos animales en los que el cuidado parental lo realizan los machos. Hay descritos cuatro tipos de desarrollo postembrionario: Protonymphon Típico, Larva Enquistada, Protonymphon Atípico y Larva Anclada. En los tres primeros, el primer estadio larvario es la larva protonymphon, que presenta tres pares de apéndices y vive como parásito de su sustrato alimentario; en el cuarto tipo, el primer estado es una larva con un par de apéndices y dos primordios de apéndices. Estas larvas permanecen unidas a los apéndices ovígeros del macho completando un número de mudas. Los adultos normalmente se encuentran asociados a otros animales, pues son carnívoros ramoneadores-suctores, la mayoría de ellos invertebrados sésiles o de movimientos lentos. En las costas andaluzas se han citado 39 especies, que pueden considerarse típicas de la zona Atlántico-Mediterránea, sólo en ocho de ellas se conoce el tipo de larvas que presentan, y sólo en cuatro de ellas se ha descrito su ciclo de vida completo.

Los cambios previstos en el nivel medio de los mares (elevación de 0,09-0,88 m en el siglo XXI), en las precipitaciones, el pH, la temperatura de las aguas, el viento, CO₂ disuelto, salinidad y contaminación por nutrientes y toxinas, pueden todos afectar a la calidad de las aguas de estuarios y mares. Todo esto tendrá un impacto, difícil de evaluar hoy día, sobre las características físicas, biológicas y biogeoquímicas de los océanos y de las costas. Teniendo en cuenta que los picnogónidos presentan una tolerancia variable a las características ambientales, entre las formas litorales y las batiales y abisales, y que, en general, según los escasos datos disponibles, muestran una moderada tolerancia a los efectos directos de la polución de las aguas: es probable que los impactos que el cambio climático pueda ocasionar sobre la fauna de picnogónidos de nuestra zona no se deban en un primer momento al estrés fisiológico directo, sino más bien a la pérdida o alteración de su hábitat.

Palabras clave: *Picnogónidos, desarrollo postembrionario, protonymphon, cambio climático, fauna andaluza.*

INTRODUCCIÓN

Los pcnogónidos (Chelicerata; Pycnogonida), conocidos vulgarmente como “arañas de mar”, son un pequeño grupo de quelicerados marinos que se encuentran en todos los océanos y en todos los hábitat marinos, desde zonas intersticiales a profundidades abisales (Hedgpeth, 1947; Arnaud & Bamber, 1987; Genzano, 2002; Gillespie & Bain, 2006). Se trata de uno de los pocos grupos animales que presentan cuidado parental exclusivo paterno, son los machos adultos los que transportan la puesta, y en algunos casos larvas, en unas patas únicas de este grupo, las patas ovígeras (Arnaud & Bamber, 1987; Bain, 2003a, 2003b; Gillespie & Bain, 2006).

Su tamaño es muy variable desde menos de 1 mm a más de 70 cm con las patas extendidas. Los pcnogónidos presentan un cuerpo reducido, generalmente con cuatro pares de patas multiarticuladas (ocasionalmente 5 e incluso 6), con quelíforos, palpos y patas

ovígeras (situadas entre los palpos y el primer par de patas) (Figura 1).

Este grupo animal suele aparecer en muy baja densidad, a menudo crípticos en el sustrato donde viven, y carecen de importancia económica, lo que ha hecho que tradicionalmente se consideraran como un grupo “menor” entre la fauna marina, recibiendo un tratamiento superficial en los textos de Zoología general (Arnaud & Bamber, 1987). La mayoría de los estudios sobre este grupo son taxonómicos, en los que son abundantes las descripciones de géneros y especies, y son ocasionales los que incluyen algunas referencias a su biología. Por tanto, es este un grupo en el que los conocimientos sobre su modo de vida, su desarrollo, y su ciclo de vida son muy limitados (Wilhelm et al., 1997; Bain, 2003a; Gillespie & Bain, 2006). En Europa, este hecho se agrava dado que los pcnogónidos que viven en las aguas europeas son normalmente de pequeño tamaño, inconspicuos, de movimientos lentos y raramente numerosos (Child, 1997).

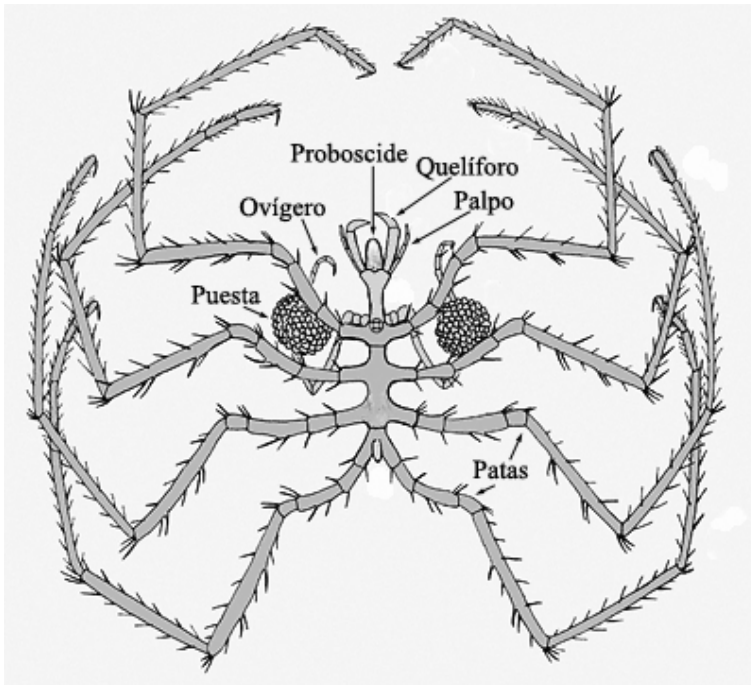


Figura 1. Esquema de *Nymphon gracile*. Macho transportando la puesta.

Pero al margen de las necesidades e intereses humanos, es necesario resaltar el valor intrínseco que tienen para la biodiversidad marina y su importancia en las cadenas tróficas bentónicas.

CICLO DE VIDA

-Reproducción

Durante el cortejo y la cópula, los machos frotan su ovígero sobre el cuerpo de la hembra y este suceso parece inducir la puesta de huevos por parte de ésta. Una vez la hembra empieza a realizar la puesta el macho los fertiliza mientras ella los sujeta en su pata ovígera (Nakamura & Sekiguchi, 1980; Arnaud & Bamber, 1987). Tras la fertilización, y dependiendo de la especie, el macho agrupa los huevos uno a uno en su pata ovígera, o engancha su ovígero a la masa de huevos de la hembra y de un solo movimiento coge la mayoría de los huevos en una masa simple en su ovígero (Nakamura & Sekiguchi, 1980; Bain, 2003a). La mayoría de los picnogónidos transporta los huevos hasta su eclosión, aunque se han descrito casos de machos que transportan larvas (Hoeck, 1881a; Bain, 1991; Bamber & Thurston, 1993; Wilhelm et al., 1997; Bogomolova & Malakhov, 2006; entre otros). Una excepción la constituye la familia Colossendeidae, pues nunca se han encontrado machos transportando huevos ni larvas, de ahí que muchos autores piensen en un posible desarrollo directo o incubación interna (Arnaud & Bamber, 1987). Una vez los huevos han eclosionado y la larva abandona al macho, poco se conoce de su desarrollo posterior. Larvas y juveniles han sido encontrados sobre diferentes invertebrados marinos, pero el ciclo de vida completo se conoce en pocas especies (Bain, 2003).

-Desarrollo postembrionario

El nombre de protonymphon fue propuesto por Hoeck (1881b) para designar la larva de los picnogónidos, y no es hasta un siglo

después que Nakamura (1981) reconoce un tipo distinto de larva. Tras la eclosión la larva protonymphon abandona la pata ovígera del macho y nada o reptará rápidamente. Estados larvales más desarrollados y juveniles han sido encontrados dentro o sobre una gran variedad de invertebrados marinos (Bain, 1991; Tomaschko et al., 1997; Wilhelm et al., 1997). Una vez que la larva abandona al macho, y dependiendo de la especie, el desarrollo puede seguir distintos caminos. Bain, en 2003, resumió los tipos de desarrollo postembrionario descritos, nombrándolos: "Protonymphon o Protonymphon Típico", "Larva Enquistada", "Protonymphon Atípico" y "Larva Anclada"; en los tres primeros tipos de desarrollo el primer estadio larvario es la larva "protonymphon", que presenta tres pares de apéndices (un par de quelíferos y dos pares de apéndices terminados en uñas).

En el desarrollo de tipo "Protonymphon o Protonymphon Típico" la larva abandona al macho y vive como ectoparásito en hidroides, la aparición de las restantes patas en los siguientes estadios larvarios es estrictamente secuencial; en el de tipo "Larva Enquistada" la larva abandona al macho y parasita la cavidad gástrica de cnidarios, en este caso aparecen los primordios de tres pares de patas simultáneamente y el cuarto aparece posteriormente; en el de tipo "Protonymphon Atípico" la larva abandona al macho y se instala en la cavidad del manto de bivalvos o en poliquetos sedentarios, en este caso los primordios de todas las patas aparecen a la vez; y en el tipo "Larva Anclada" el primer estadio larvario es una larva con un par de quelíferos y los primordios de dos pares de apéndices, esta larva no se alimenta (vive de sus reservas) y permanece en el ovígero del macho hasta alcanzar los estadios más avanzados.

Bogomolova & Malakhov (2006) indican un quinto tipo de desarrollo al que denominan “Protonymphon Lecitotrófico” en el que el primer estadio larvario es la larva protonymphon, que se alimenta de sus reservas y permanece en los ovígeros del macho hasta estadios avanzados, la aparición de las patas en los sucesivos estadios es secuencial, las diferencias con “Larva Anclada” aún debe ser mejor establecida en futuros trabajos.

-Interrelaciones con otros organismos

La mayoría de las especies de picnogónidos descritas son epibentónicas, algunas son intersticiales y otras batipelágicas, pero recientemente las descripciones de especies comensales y parásitas están aumentando. En cualquier caso, normalmente se encuentran asociados a otros animales, la mayoría de estas asociaciones implican a invertebrados sésiles o de movimientos lentos como alimento (Bain, 1991; Genzano, 2002). En general son carnívoros suctores: pinchan la célula o pared corporal de su presa y succiona su contenido a través de la proboscis (Arnaud & Bamber, 1987).

Las asociaciones más comunes registradas son con cnidarios, las anémonas marinas (Mercier & Hamel, 1994) y especialmente hidroides (Staples, 1997; Arnaud & Bamber, 1987; Lovely, 2005), las citas en medusas son relativamente raras (Okuda, 1940; Child & Harbison, 1986); algunos son grandes consumidores de briozoos (Ryland, 1976; Clark, 1976); pero también se han registrado otras presas como moluscos, lamelibranquios, equinodermos, poliquetos, así como algunas algas (Benson & Chivers, 1960; Arnaud, 1976; Arnaud & Bamber, 1987; Munilla, 1981, 1982); algunos son detritívoros (Wyer & King, 1974); y en algunos casos son muy selectivos con la presa (Fry, 1965). De hecho la posición

trófica relativa de los picnogónidos en las comunidades bentónicas es relativamente, por encima de cnidarios y moluscos entre otros (Iken et al., 2001).

LA FAUNA ANDALUZA

Existen datos contradictorios sobre el número de especies que habitan nuestras costas, pues información reciente del Ministerio de Medio Ambiente en su informe sobre la biodiversidad de la fauna española, difundido a través de su página web, indica la existencia de 30 especies de picnogónidos en las costas españolas, dato que claramente es muy inferior al que indican Ros & Munilla (2004) para las costas andaluzas (39 especies). Esta controversia se debe a que los estudios sobre este grupo animal son escasos, posiblemente incompletos, y como se ha indicado con anterioridad muy recientes.

Se aceptan 10 familias de picnogónidos, de las cuales todas tienen representantes en las costas andaluzas excepto la familia Austrodecidae (Tabla 1). Las especies citadas han sido capturadas en profundidades comprendidas entre los 0 m y más de 2000 m, entre ellas se encuentran especies como *Endeis spinosa* que es el picnogónido más frecuente en aguas libres del mar Mediterráneo. En nuestras costas, la diversidad detectada es mayor en la vertiente atlántica que en la mediterránea, lo que puede atribuirse a falta de estudios sobre la zona mediterránea andaluza, o bien a la falta de colonización por parte de algunas especies oceánicas; de las 39 especies citadas 17 lo son en el mediterráneo, 32 en el atlántico y 10 comunes en ambos sectores (Tabla 1). Ros & Munilla (2004) consideran que la fauna andaluza de picnogónidos es típica de la zona Atlántico-Mediterránea.

POSIBLE INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA FAUNA DE PICNOGÓNIDOS PRESENTE EN LAS COSTAS ANDALUZAS

El informe IPCC de 2002 considera que el cambio climático, en general, afecta directamente a las funciones de los organismos individuales (por ejemplo, el crecimiento y el comportamiento), modifica poblaciones (en, por ejemplo, el tamaño y la estructura), y afecta a la estructura y función del ecosistema (en la descomposición, ciclos de los nutrientes, flujos del agua, composición de las especies e interacciones de las especies) y la distribución de los ecosistemas dentro de los paisajes; e indirectamente a través de cambios en los regímenes de alteraciones.

Es muy probable que el calentamiento detectado, aproximadamente 0,6 °C, del siglo XX haya contribuido de manera importante a la elevación observada del nivel medio de los mares, 10 a 12 centímetros, mediante la expansión térmica del agua marina y la pérdida generalizada de parte de las masas de hielo. Además, y debido a la misma causa, se estima que el nivel medio mundial del mar se eleve en 0,09–0,88 m entre los años 1990 y el 2100, con importantes variaciones regionales. También cambios en la frecuencia e intensidad de las precipitaciones, el pH, la temperatura de las aguas, el viento, el CO₂ disuelto, y la salinidad, combinados con la contaminación antropogénica por nutrientes y toxinas, pueden todos afectar a la calidad del agua en estuarios y en el mar. Por tanto, todos estos cambios tendrán un impacto sobre las características físicas, biológicas y biogeoquímicas de los océanos y de las costas en diferentes escalas de espacio-temporales, modificando sus estructuras y funciones ecológicas. Así, las variaciones de temperatura de la superficie del mar modificará a su vez la distribución geográfica de la biota marina y cambios en la composición de su biodiver-

sidad, sobre todo en latitudes altas y medias. Aún así, el nivel del impacto es probable que varíe dentro de una amplia gama, dependiendo de las especies y las características de la comunidad, así como de las condiciones específicas de la región (IPCC, 2002). De hecho, el Ministerio de Medio Ambiente en su informe sobre la biodiversidad de la fauna española, estima que el impacto del cambio climático será superior en las costas españolas del norte que en las del sur (http://WWW.nma.es/portal/secciones/cambio_climatico/el_cambio_climatico/).

Los picnogónidos se hallan sobre un amplio rango batimétrico, desde la línea de marea a las fosas abisales. Por tanto, su tolerancia a las características ambientales es variable, así las formas litorales están adaptadas a variaciones en la temperatura, salinidad y posible desecación, mientras que las especies batiales y abisales están sujetas a alta presión hidrostática y a bajas (polares) o altas (hidrotermales) temperaturas pero estables. Para las primeras formas la luz puede ser un estímulo ambiental significativo, mientras que está perpetuamente ausente para las segundas. Esta variedad de condiciones ecológicas es previsible que tenga una elevada influencia en sus procesos fisiológicos. Por otro lado, según los escasos datos disponibles, en general, los picnogónidos son tolerantes a los efectos directos de la polución de las aguas, pero se pueden ver afectados (positiva o negativamente) por los efectos que la polución produzca en los organismos con los que se encuentran asociados (Arnaud & Bamber, 1987). De hecho, El-Hawawi & King (1978) observaron que *Nymphon gracile* y *Achelia echinata* (especies que son muy frecuentes en nuestras costas) eran más tolerantes a variaciones en la salinidad del agua a bajas temperaturas, y en ambos casos los adultos más tolerantes que las larvas, y *Nymphon gracile* más tolerante que *Achelia echinata*. Ambas especies presentes en las costas andaluzas (Tabla 1).

F. Ammotheidae	F. Callipallenidae	F. Phoxichilidiidae	F. Colossendeidae	F. Pycnogonidae
<i>Achelia echinata</i> (Hodge, 1864) A-M	<i>Callipallene</i> <i>brevirostris</i> (Johnston, 1837) M	<i>Anoplodactylus</i> <i>angulatus</i> (Dohrn, 1881) A-M	<i>Colossendeis</i> <i>angusta</i> (Sars, 1877) A#	<i>Pentapycnon geayf</i> (Bouvier, 1911) A#
<i>Achelia langi</i> (Dohrn, 1881) A-M	<i>Callipallene ema-</i> <i>ciata</i> (Dohrn, 1881) A-M	<i>Anoplodactylus</i> <i>arnaudae</i> (Stock, 1978) A#	<i>Colossendeis</i> <i>arcuata</i> (A. Milne-Edwards, 1885) A#	<i>Pycnogonum</i> <i>nodulosum</i> (Dohrn, 1881) M
<i>Achella vulgaris</i> (Costa, 1861) A-M	<i>Callipallene phan-</i> <i>toma</i> (Dohrn, 1881) A	<i>Anoplodactylus</i> <i>petiolatus</i> (Kroyer, 1844) A-M	<i>Colossendeis</i> <i>colossea</i> (Wilson, 1881) A#	<i>Pycnogonum</i> <i>pusillum</i> (Dohrn, 1881) M
<i>Ammothella</i> <i>biunguiculata</i> (Dohrn, 1881) A	<i>Callipallene pro-</i> <i>ducta</i> (Sars, 1888) A-M	<i>Anoplodactylus</i> <i>pygmaeus</i> (Hodge, 1864) M	<i>Colossendeis</i> <i>macerrima</i> (Wilson, 1881) A#	
<i>Ammothella</i> <i>gibraltarensis</i> (Munilla, 1993) A	<i>Callipallene spec-</i> <i>trum</i> (Dohrn, 1881) A	<i>Anoplodactylus</i> <i>robustus</i> (Dohrn, 1881) M	<i>Rhopalorhynchus</i> <i>atlanticum</i> (Stock, 1970) A	
<i>Ammothella longipes</i> (Hodge, 1864) A-M	<i>Callipallene tiberi</i> (Dohrn, 1881) A-M	<i>Anoplodactylus</i> <i>typhlops</i> (Sars, 1888) A#		
<i>Ammothella</i> <i>uniunguiculata</i> (Dohrn, 1864) M	<i>Pallenopsis scoparia</i> (Fage, 1956) A	<i>Anoplodactylus</i> <i>virescens</i> (Hodge, 1864) A		
<i>Ascorhynchus</i> <i>pudicum</i> (Stock, 1970) A				
<i>Cilunculus</i> <i>europaeus</i> (Stock, 1978) A#				
<i>Hannonia stocki</i> (Munilla, 1993) A				
<i>Paranymphon</i> <i>spinosum</i> (Caullery, 1896) A				
F. Nymphonidae	F. Tanystylidae	F. Rhynchotoraxidae	F. Endeidae	
<i>Nymphon caldarium</i> (Stock, 1987) A#	<i>Tanystylum</i> <i>conisrostre</i> (Dohrn, 1881) A-M	<i>Rhynchothorax</i> <i>mediterraneus</i> (Costa, 1861) A	<i>Endeis spinosa</i> (Montagu, 1808) A	
<i>Nymphon gracile</i> (Leach, 1814) A	<i>Tanystylum</i> <i>orbiculare</i> (Wilson, 1878) M			

Tabla 1. Especies de picnogónidos capturados en las costas andaluzas (modificado de Ros & Munilla, 2004)
 A= Especie capturada en el Atlántico; M= Especie capturada en el Mediterráneo; #=Especie no citada en el Mediterráneo.

Por todo lo expuesto anteriormente es probable que los impactos que el cambio climático pueda ocasionar sobre los picnogónidos de nuestra zona no se deban principalmente al estrés fisiológico directo, sino más bien a la pérdida o alteración de su hábitat, dado que se encuentran estrechamente interrelacionados con otros organismos. Las especies cuyo desarrollo postembrionario se realiza a través de la larva protonymphon (Tabla 2), se

podrán ver especialmente afectadas, dado que esta es una fase larvaria parásita y va a depender del grado de especificidad que presenten. Solo con estudios concretos para conocer tanto el número de especies presentes en nuestra zona como su biología completa se podrá conocer el impacto real del posible cambio climático en la fauna de picnogónidos andaluza.

	Tipos de desarrollo postembrionario	Ciclo de vida
<i>Ammothella longipes</i> (Hodge, 1864)	Protonymphon Típico	Completo
<i>Achelia echinata</i> (Hodge, 1864)	Protonymphon Típico	Completo
<i>Anoplodactylus petiolatus</i> (Kroyer, 1844)	Larva Enquistada	Completo
<i>Anoplodactylus angulatus</i> (Dohrn, 1881)	Larva Enquistada	Incompleto
<i>Anoplodactylus pygmaeus</i> (Hodge, 1864)	Larva Enquistada	Incompleto
<i>Tanystylum orbiculare</i> (Wilson, 1878)	Protonymphon Típico	Completo
<i>Callipallene brevirostris</i> (Johnston, 1837)	Larva Anclada	Incompleto
<i>Endeis spinosa</i> (Montagu, 1808)	Larva Enquistada	Incompleto

Tabla 2. Ciclo de vida descrito de las especies de picnogónidos capturadas en las costas andaluzas (modificado de Bain, 2003). Completo=descripción completa de su ciclo de vida; Incompleto=descrita la mayoría de su ciclo de vida

BIBLIOGRAFÍA

- Arnaud, F. (1976). Sur quelques pycnogonides de Turquie et de la mer Eje (Meéditerranée orientale. *Acta Ecológica Iranica* 1: 68-72.
- Arnaud, F. & R. N. Bamber (1987). The Biology of Pycnogonida. En: *Advances in Marine Biology Vol. 24*. Blaxter J. H. S. & Southward A. J. (ed.): 1-96. Academic Press, New York.
- Bain, B. A. (1991). Some observations on biology and feeding behavior in two southern California pycnogonids.
- Bain, B. A., 1991. Some observations on biology and feeding behavior in two southern California pycnogonids. *Bijdragen tot de Dierkunde* 61: 63-64.
- Bain, B. A. (2003a). Larval types and a summary of postembryonic development within the pycnogonids. *Invertebrate Reproduction and Development* 43: 193-222.
- Bain, B. A. (2003b). Postembryonic development in the pycnogonid *Austropallene cornigera* (Family Callipallenidae). *Invertebrate Reproduction and Development* 43: 181-192.
- Bamber, R. N. & M. H. Thurston (1993). Deep water pycnogonids of the Cape Verde Slope. *Journal of Marine Biology Association* 73: 837-861.
- Benson, P. H. & D. C. Chivers (1960). A pycnogonid infestation of *Mytilus californianus*. *The veliger* 3: 16-18.
- Bogomolova, E. V. & R. V. V. Malakhov (2006). Lecithotrophic Protonymphon is a special type of postembryonic development of the sea spiders (Arthropoda, Pycnogonida). *Doklady Biological Sciences* Vol. 409: 328-331.
- Child, C. A. (1997). Antarctic and Subantarctic Pycnogonida: Nymphonidae, Colossendeidae, Rhynchothoraxidae, Pycnogonidae,

- Endeidae and Callipallenidae. *Antarctic Science* 9: 111-112.
- Child, C. A. & G. R. Harbison (1986). A parasitic association between a pycnogonid and a seychomedusa in midwater. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 66: 113-117.
- Clark, W. C. (1976). The genus *Rhynchothorax* Costa (Pycnogonida) in New Zealand waters. *Journal of the Royal Society of New Zealand* 6: 287-296.
- El-Hawawi, A. S. N. & P. E. King (1978). Salinity and temperature tolerance by *Nymphon gracile* (Leach) and *Achelia echinata* (Hodge) (Pycnogonida). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 33: 213-221.
- Fry, W. G. (1965). The feeding mechanisms and preferred foods of three species of Pycnogonida. *Bulletin of the British Museum (Natural History)* 12: 195-233.
- Genzano, G. N. (2002). Associations between pycnogonids and hydroids from the Buenos Aires litoral zone, with observations on the semi-parasitic life cycle of *Tanytulum orbiculare* (Ammonotheiidae). *Scientia Marina* 66: 83-92.
- Gillespie, J. M. & B. A. Bain (2006). Postembryonic development of *Tanytulum bealensis* (Pycnogonida, Ammonotheiidae) from Barkley Sound, British Columbia, Canada. *Journal of Morphology* 256: 308-317.
- Hedgpeth, J. W. (1947). On the evolutionary significance of the Pycnogonida. *Smithsonian Miscellaneous Collections* 106: 1-54.
- Hoeck, P. P. C. (1881a). Report on the Pycnogonida dredged by HMS Challenger 1873-76. *Report on the Scientific Results of the Voyage of HMS Challenger* 3: 1-167.
- Hoeck, P. P. C. (1881b). Nouvelles études sur les Pycnogonides. *Archives de Zoologie Expérimentale et Générale* 9: 445-542.
- Iken, K., T. Brey, U. Wand, J. Voigt & P. Junghans (2001). Food web structure of the benthic community at the Porcupine Abyssal Plain (NE Atlantic): a stable isotope analysis. *Progress in Oceanography* 50: 383-405.
- IPCC (2002). Documento técnico V: Cambio climático y biodiversidad. Unidad de Apoyo Técnico del Grupo de Trabajo II del IPCC. H. Gitay, A. Suárez, D. J. Dokken & R. T. Watson (eds.). 93 pp.
- Lovely, E. C. (2005). The life history of *Phoxichilidium tubularie* (Pycnogonida: Phoxichilidiidae). *Northeastern Naturalist* 12: 77-92.
- Mercier, A. & J. Hamel (1994). Deleterious effects of a pycnogonids on the sea anemone *Bartholomea annulata*. *Canadian Journal of Zoology* 72: 1362-1364.
- Munilla, T. (1981). Contribucio al coneixement de la distribucio ecológica dels pycnogonides a la Costa Brava Catalana. *Bulletin del Instituto Catalan de Historia Natural* 47: 77-86.
- Munilla, T. (1982). Pycnogonifauna existente en la feocifea *Halopteris* de la costa alicantina. En: *Actas del Simposio Ibérico de Estudios del Bentos Marino* J. Ros & F.X. Niell (ed.): 221-224. Cuadernos de Biología Marina, Barcelona.
- Nakamura, K. (1981). Post embryonic development of a pycnogonid, *Propallene longiceps*. *Journal of Natural History* 15: 49-62.
- Nakamura, K. & K. Sekiguchi (1980). Mating behaviour and oviposition in the pycnogonid *Propallene longiceps*. *Marine Ecology (Progress Series)* 2: 163-168.

- Okuda, S. (1940). Metamorphosis of a pycnogonid parasitic in a hydromedusa. *Journal of the Faculty Science. Hokkaido Imperial University Series VI. Zoology* 7: 73-86.
- Ros, J. L. & T. Munilla (2004). Picnogónidos o arañas de mar. Generalidades y fauna andaluza. En: *Proyecto Andalucía. Naturaleza XVI: Zoología*. Publicaciones Comunitarias, S. L.(ed.): 383-398.
- Ryland, J. S. (1976). Pycnogonid predators. En: *Physiology and Ecology of Marine Bryozoans. Advances in Marine Biology* 14: 417-421.
- Staples, D. A. (1997). Sea spiders or pycnogonids (Phylum Arthropoda). En: *Marine Invertebrates of Southern Australian, Part. III*. Sherrard S.A. & Davies M. (ed.): 1041-1072. South Australian Research and Development Institute.
- Tomaschko, K.H., E. Wilhelm & D. Bückmann (1997). Growth and reproduction of *Pycnogonum littorale* (Pycnogonida) under laboratory conditions. *Marine Biology* 129: 595-600.
- Wilhelm, E.D., D. Bückmann & K.H. Tomaschko (1997). Life cycle and population dynamics of *Pycnogonum littorale* (Pycnogonida) in natural habitat. *Marine Biology* 129: 601-606.
- Wyer, D. & P.E. King (1974). Feeding in British littoral pycnogonids. *Estuarine and Coastal Marine Science* 2: 177-184.

CHAPTER 10 / CAPÍTULO 10

Wetlands as the indicators for the detection of the climatic points of inflection. Application to SW Andalusia (environment of Doñana, Spain)

Los humedales como sensores para detectar los puntos de inflexión climática. Aplicación metodológica al SW de Andalucía (Entorno de Doñana, España)

Wetlands as the indicators for the detection of the climatic points of inflection. Application to SW Andalusia (environment of Doñana, Spain)

Arturo Sousa¹, Rocío Fernández Zamudio¹ & Sükran Sahin²

¹ Department of Plant Biology and Ecology, University of Seville, Profesor García González, 2. Apdo. E-41012 Seville. asousa@us.es; rzamudio@us.es

² Department of Landscape Architecture, Ankara University, Turkey; sahin@agri.ankara.edu.tr

ABSTRACT

This chapter works out the existing relationship between most recent climate changes –as Little Ice Age and global warming- and the evolution the wetlands in Andalusia. That's why, it is required to develop a proper method –ad hoc- which permits not only to remodel the evolution of wetlands during last centuries, but also quantifies it using normalized cartography.

One of the most important wetlands in Europe was taken as reference or study area to develop this novel method, where less ultimate transformations have occurred in last centuries: environment of Doñana (Huelva, SW of Spain).

After the conceptual development and the implementation of the mentioned method, it is obtained as a result that, the studied wetlands have suffered from a considerable regression, at least from the beginning of the 17th century. Although the most intensive part of this desiccation should be in the places of anthropogenic activities during the second half of the 20th century, this phenomenon forms part of the regional scale tendency about disappearance of relic plants communities with Atlantic character, from the chorological point of view. This means, globally as well as from the point of hygrophyte plants and the studied wetlands, an aridization of the Mediterranean communities and especially a mediterraneisation (and via that process the reduction of studied wetlands into more than 80% in last four century) of vegetation and marsh formations in more Atlantic character.

In addition to the mentioned anthropogenic factors, important reductions of Rivatehilos shallow lagoons with peat formations and small Atlantic brooks of eastern coastal are noticeable at the end of 19th century.

The reasons of those changes, therefore, are associated with the the third and last wet peak of Little Ice Age in Andalusia, and the beginning of the tendencies related to global warming, which is currently called as post-Little Ice Age warming in recent bibliography and have found comparable repercussion in other part the world.

Key words: *wetlands, Doñana, climate change, Little Ice Age, global warming, shallow lagoons, petlands, brooks, hygrophyte vegetation, mediterraneisation.*

Los humedales como sensores para detectar los puntos de inflexión climática. Aplicación metodológica al SW de Andalucía (Entorno de Doñana, España)

Arturo Sousa¹, Rocío Fernández Zamudio¹ & Sükran Sahin²

¹ Departamento de Biología Vegetal y Ecología. Facultad de Farmacia. Universidad de Sevilla. C/ Profesor García González, 2. Apdo. E-41012 Sevilla. asousa@us.es; rzamudio@us.es

² Departamento de Arquitectura del Paisaje, Universidad de Ankara, Ankara, Turquía. sahin@agri.ankara.edu.tr

RESUMEN

Este capítulo pretende poner de manifiesto las relaciones existentes entre los cambios climáticos más recientes -como la Pequeña Edad del Hielo y el Calentamiento Global- y la evolución de los humedales andaluces. Para ello es necesario desarrollar una metodología propia -ad hoc- que permita no sólo reconstruir la evolución de los humedales en los últimos siglos, sino cuantificarla a través de su expresión en un soporte cartográfico normalizado.

Una vez desarrollada conceptualmente esta metodología, y aplicada en el entorno de Doñana, se obtiene como resultado que los humedales estudiados han soportado una regresión de gran relevancia, al menos desde principios del S. XVII. Si bien la parte más intensa de esta desecación se debe a la actividad antrópica (durante la segunda mitad del siglo XX), este proceso se enmarca en una tendencia a escala regional de desaparición de las comunidades vegetales relictas en la actualidad por su carácter atlántico (desde el punto de vista corológico). Globalmente -y desde la perspectiva de la vegetación higrofitica y de los humedales estudiados- supone una aridización de las comunidades mediterráneas y especialmente una mediterraneización (y con ello su reducción en más de un 80 % en los últimos cuatro siglos), de la vegetación y formaciones palustres con características más atlánticas.

Además de los factores antrópicos mencionados, destaca una importante reducción en las lagunas turbosas de Rivatehilos y en los pequeños arroyos atlánticos del litoral oriental onubenses, a finales del S. XIX.

Las causas de estos cambios, por tanto, están ligadas a la finalización del tercer y último pulso húmedo de la Pequeña Edad del Hielo en Andalucía, y al inicio de las tendencias vinculadas al Calentamiento Global. Lo que se reconoce en la bibliografía más reciente como calentamiento posterior a la Pequeña Edad del Hielo (post-Little Ice Age warming), y que ha tenido repercusiones comparables en otras del áreas del mundo.

En suma los resultados demuestran el interés y las posibilidades de aplicación de la metodología presentada en este capítulo, así como el carácter de los humedales como sensores de cambios climáticos, ya que la propia capacidad de resiliencia de las comunidades vegetales les permite obviar y adaptarse a las anomalías y fluctuaciones climáticas.

Palabras claves: Doñana, cambios climáticos, Pequeña Edad del Hielo, Calentamiento Global, lagunas, turberas, arroyos, vegetación higrofitica, mediterraneización.

INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente se han empleados diversas fuentes indirectas para reconstruir las tendencias climáticas de las variables instrumentales en el pasado. Este sería el caso de: registros descriptivos del tiempo, cuadernos de bitácora, libros de cuentas y anales, nivel de lagos, anillos de árboles, varvas, avances y retrocesos glaciares, análisis de polen, microfauna marina y algas calizas (Pita, 1997), entre otros. Recientemente se han ido incorporando otros datos indirectos o no usuales de las tendencias climáticas (Barriendos, 1995; Martín-Vide & Moreno García, 1995), como diversos tipos de archivos (ver Rodrigo, 2007 en este volumen), las inundaciones más o menos catastróficas (Barriendos & Martín-Vide, 1998; Brazdil et al., 1999; Barriendos & Rodrigo, 2006; Barriendos, 2007 en este mismo volumen), variaciones en los hielos del mar Báltico (Koslowski & Glaser, 1995), y un abanico muy variado que puede ir desde las ceremonias de rogativa pro-pluvia y pro-serenitatem (Martín-Vide & Barriendos, 1995), la evolución de determinados insectos (Buckland & Wagner, 2001; Dusoulier, 2001), los autos de fé donde se quemaban a las brujas en la Europa durante las fases álgidas de la *Pequeña Edad del Hielo* (Behringer, 1999), la toponimia local y regional (Sousa et al., 2006a) e incluso la posible relación con la desaparición o incremento con determinadas patologías infecciosas como la Malaria (Reiter, 2000; Sousa et al., 2005a, 2006b y 2006c).

En este tipo de estudio -generalmente- no suelen aparecer los humedales -entendiendo como tales las anomalías hídricas positivas del terreno, de suficiente tamaño y duración para poseer comunidades ecológicas diferentes del entorno (González Bernáldez, 1992)-. Ya que, en general, se conoce muy poco de su evolución pretérita. Su reconstrucción, hasta un pasado histórico reciente

mediante métodos objetivos, supone un serio escollo para emplearlos, a pesar de que hay una clara constatación de los efectos que el clima tiene sobre ellos (Álvarez Cobelas et al., 2005), por lo que resulta conveniente el desarrollo de metodologías *ad hoc* para obtener series largas de datos biológicas (Peñuelas & Filella, 2001; Álvarez Cobelas et al., 2005 y 2007 en este volumen; Valladares et al., 2005).

Por ello, en este capítulo, se pretende desarrollar una metodología que permita reconstruir, en primer lugar, la evolución de los humedales desde tiempos históricos recientes -y lo que es más importante- cuantificar esa evolución mediante un método verificable y reproducible. Una vez esbozada esta metodología se aplicará a una de las áreas naturales más reconocidas de Andalucía y -sin duda- de Europa, como es Doñana y su entorno (en el SW de la Península Ibérica). De esta forma se puede plasmar la evolución paralela del clima junto con la de algunos de los humedales más importantes del área de estudio, poniendo así de manifiesto la capacidad de éstos para ser empleados como sensores que permitan -más que reconstruir las tendencias climáticas pasadas (como “proxy data”)- detectar los puntos de inflexión en dichas tendencias (entendiendo como tales los que tienen una repercusión irreversible sobre los ecosistemas vegetales).

De acuerdo a esto, los objetivos de este estudio, se incardinan en tres fases sucesivas:

1º. Generar una metodología que permita reconstruir la evolución de los humedales desde tiempos históricos recientes.

2º. Analizar si esa evolución puede ser explicada en exclusiva sólo por la actividad e influencia directa o indirecta del hombre.

3º. Verificar si existen otras causas de origen natural, como las climáticas que sean coherentes y necesarias para poder explicar esa evolución, en el caso de que sean insuficientes las causas derivadas de la acción humana.

Una síntesis de esta aproximación metodológica se recoge en la Figura 1. entre los núcleos turísticos de Matalascañas, Mazagón y El Rocío (ver Figura 2).

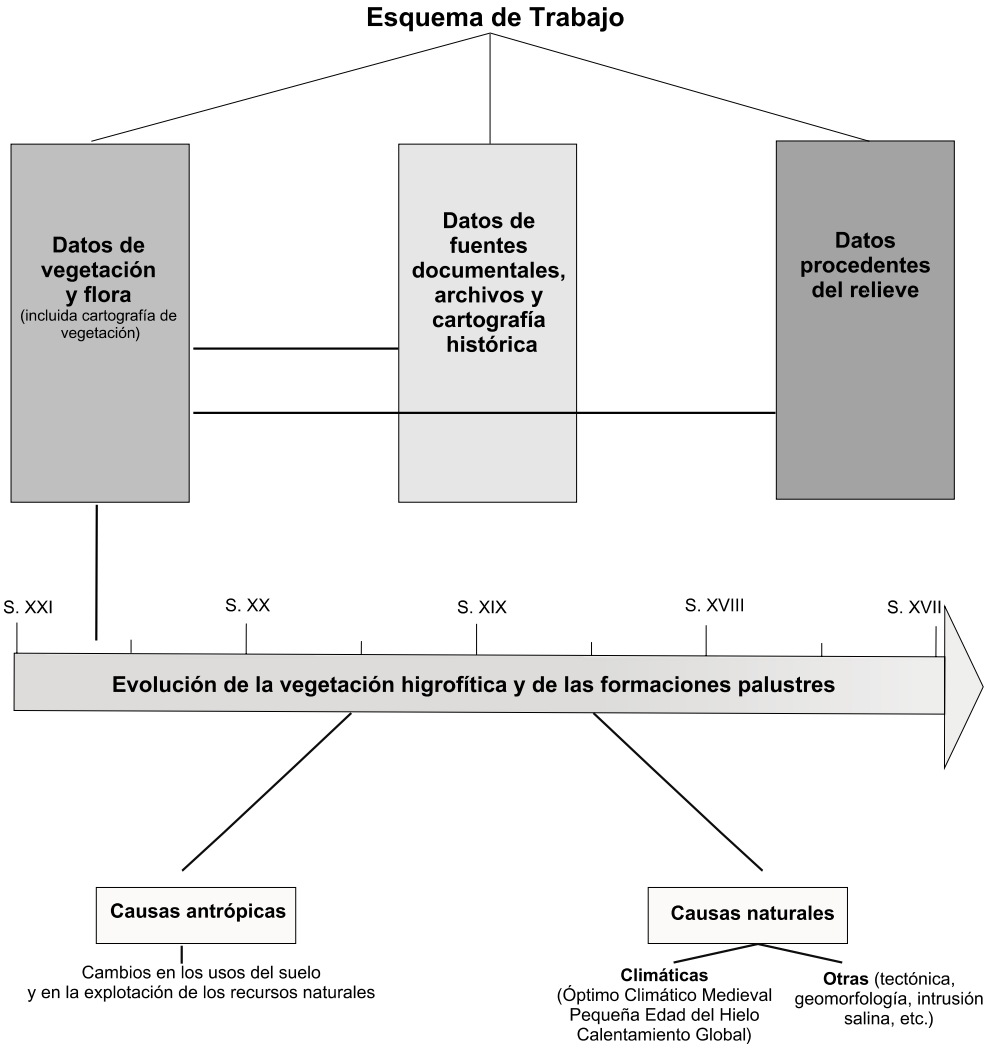


Figura 1. Esquema metodológico desarrollado para emplear los humedales como indicadores de puntos de inflexión climática. Tomado de Sousa (2004) y Sousa & García Murillo (2005).

ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio seleccionada se sitúa en Andalucía occidental, concretamente en su mayor parte se ubica dentro de los límites del Parque Natural de Doñana (en su sector oeste conocido como Abalario), ocupando aproximadamente 25.000 ha (aproximadamente 37° 10' latitud N y 6° 45' longitud W)

Desde un punto de vista climático este territorio, por su posición geográfica, participa del dominio de los climas mediterráneos con matices de meridionalidad y marcada influencia oceánica. Esta influencia oceánica se manifiesta por inviernos templados (temperatura media de las mínimas del mes más frío 4.1 °C), veranos más suaves (temperatura media de las máximas

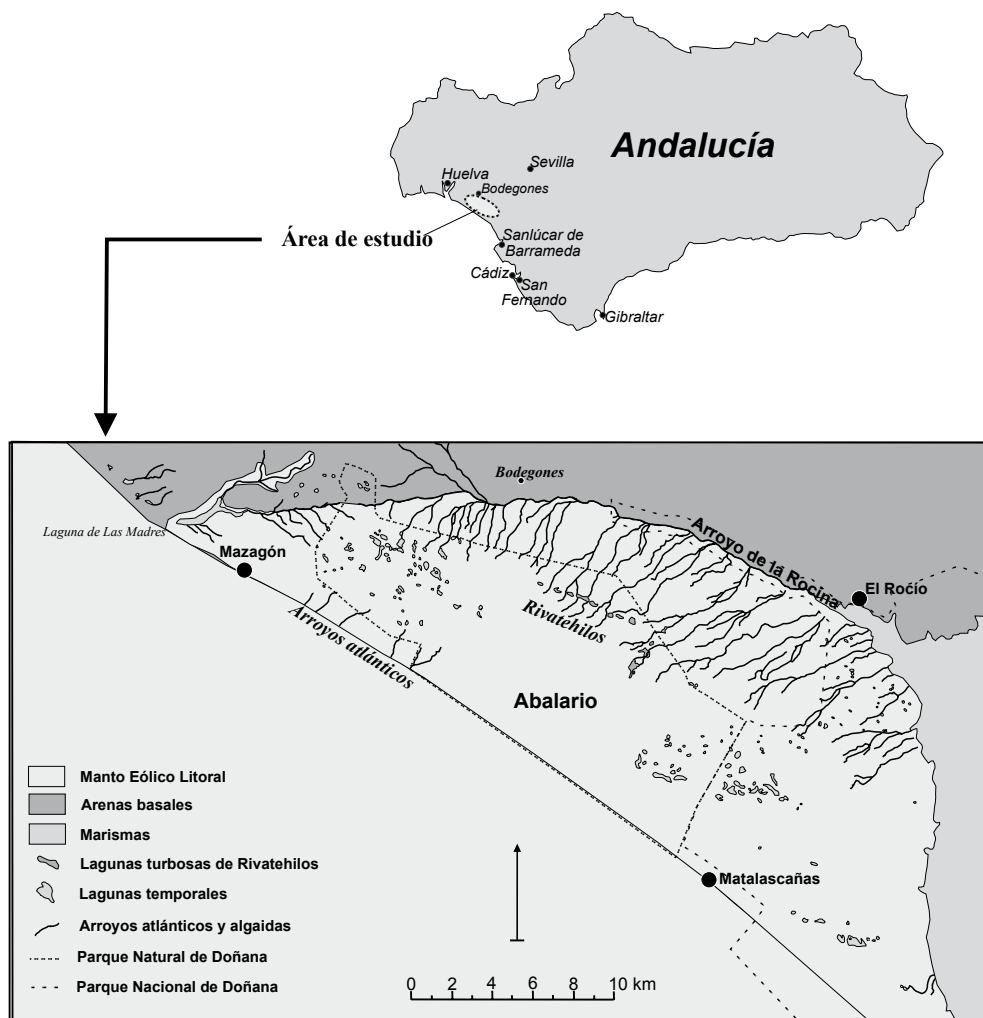


Figura 2. Área de estudio, donde se destaca, dentro del Manto Eólico Litoral, los arroyos atlánticos y las lagunas turbosas de Rivatehilos. En el mapa superior se localiza la zona de estudio en el ámbito de la comunidad autónoma andaluza, destacándose la localización de los principales observatorios meteorológicos del entorno.

del mes más cálido 33.2 °C) y un mayor volumen de precipitaciones. De acuerdo a los datos de la estación meteorológica de Bodegones (que se sitúa en el límite del área estudiada), la temperatura media anual para el período 1951-1980 fue de 16.3 °C y la media anual de precipitaciones 678.4 mm. Desde el punto de vista bioclimático se localiza en el piso termomediterráneo superior (Rivas-Martínez, 1988), y la distribución de la precipitación es de un 41 % en los meses de otoño y un 15 % en los de primavera.

En este espacio se localizan las formaciones mejor conservadas de brezales higrófilos de *Erica ciliaris* de todo el entorno de Doñana (Huelva, Andalucía), y un gran número de pequeñas lagunas. Aunque en la actualidad quedan sólo algunas manchas dispersas de la comunidad original asociadas a un conjunto de carácter higróturboso denominado Rivatehilos. Las lagunas de Rivatehilos se desarrollan sobre un substrato de origen eólico denominado Manto Eólico Litoral onubense, concretamente entre los Episodios Eólicos I (>15.000-14.000 B.P.)

y II (11.000 B.P.), de acuerdo a la caracterización de Borja & Díaz del Olmo (1996) y Rodríguez-Ramírez et al. (1996).

Por otro lado, limitando al oeste con el Parque Natural de Doñana, aparecen un conjunto de pequeños arroyos, que en la actualidad no son funcionales, pero que en las zonas mejor conservadas (dentro de los límites del espacio protegido), incluyen algunos taxones vegetales en cuya área de distribución aparece la fachada atlántica ibérica y/o europea (García Murillo et al., 1995).

Por tanto de los diferentes tipos de humedales de la zona de estudio (ver Figura 2), en este capítulo, se presentan sólo los resultados de los dos anteriores (las lagunas turbosas de Rivatehilos y los pequeños arroyos atlánticos), ya que contienen todavía algunos destacados elementos florísticos que corresponden a condiciones climáticas de mayor atlanticidad que las actuales, y que tienden a desaparecer. El interés y la singularidad corológica de estos elementos vegetales ha sido estudiada de forma detallada por García Murillo et al. (1995), García Murillo & Sousa (1997 y 1999), García Murillo (2001 y 2005), Fernández Zamudio (2005) y Fernández Zamudio et al. (2007), entre otros.

La presencia de estos elementos biogeográficos de carácter atlántico (como *Sphagnum inundatum*, *Osmunda regalis*, *Thelypteris palustris*, *Centaurea uliginosa*, *Cistus psilosepalus*, *Erica ciliaris*, *Molinia caerulea* var. *arundinacea*, *Pinguicola lusitanica* o *Ulex minor*) en las lagunas de Rivatehilos y/o en la desembocadura del Arroyo del Loro, resulta desde un punto de vista climático muy significativo. Ya que -a pesar de que se encuentran en el litoral onubense (bañado por el Océano Atlántico)- biogeográficamente corresponden con un clima mediterráneo. Téngase en cuenta que la precipitación en Andalucía Occidental tiene un marcado carácter mediterráneo (largo verano acusadamente cálido), incluso superior a los

territorios levantinos bañados por el Mar Mediterráneo según Rivas-Martínez (1988). Otro rasgo diferencial -en opinión de este autor- entre el ombroclima andaluz occidental y el levantino mediterráneo, además de las menores precipitaciones estivales, es que la precipitación invernal es la más elevada del año (en vez de la otoñal como ocurre en Cataluña o Valencia). Esta idea coincide con las conclusiones de la evolución del régimen de precipitación en el oeste de Andalucía elaboradas por García Barrón (2002a), quien deduce que durante el invierno se alcanza casi el 40 % de la precipitación.

Por tanto resulta muy relevante -desde el punto de vista de la vegetación- los cambios que se puedan detectar no sólo en la cantidad de precipitación, sino también en la variación de su régimen de distribución estacional. Especialmente debido a la presencia de estos elementos florísticos, e incluso comunidades completas (como los brezales húmedos atlánticos meridionales de *Erica ciliaris* reconocidos como hábitat "prioritario" por la Directiva Europea 92/43/ECC), de forma más o menos relictica (testigos de condiciones climáticas pasadas). Además estas comunidades presentan una cierta dependencia del nivel freático, a través de unas condiciones estables de encharcamiento (al menos de su sistema radicular), lo cual puede facilitar la detección de puntos de inflexión climática como respuestas de los ecosistemas acuáticos a la disminución de la humedad edáfica. Ya que un incremento del estrés hídrico sería un indicador de cambios en las tendencias de la precipitación y la evapotranspiración asociadas a cambios en las pautas climáticas.

MATERIAL Y MÉTODO

Dentro de este apartado vamos a hacer referencia en primer lugar a las fuentes de datos empleadas, y en segundo lugar a la metodología desarrollada para la reconstrucción de los humedales.

- Fuentes de datos

Para alcanzar los objetivos anteriormente descritos, resulta imprescindible emplear fuentes de datos muy diferentes. Además éstas irán variando con el tiempo, en función de su disponibilidad, lo cual supondrá que -a medida que la reconstrucción de la situación de los humedales retroceda en el pasado- progresivamente su precisión disminuirá. Sin embargo lo que no debe disminuir es la fiabilidad de la reconstrucción de la situación de los humedales. Por ello es fundamental emplear el mayor número de fuentes de información posible (tanto cualitativas como cuantitativas), o al menos que para cada período exista más de una fuente de información. De forma que al solaparse unas con otras en los diferentes períodos esto permite contrastar la fiabilidad de los datos que de ellas se infieren.

En la Tabla 1 se recogen las diferentes fuentes de datos empleadas en cada uno de los 5 períodos de tiempo estudiados (si bien los datos del 2000 se refieren sólo a los arroyos atlánticos).

Un listado detallado de las fuentes de información recogidas en la Tabla 1 (lista de vuelos aéreos, lista de fuentes históricas documentales y cartográficas, número de cotas interpoladas en el análisis del microrelieve, etc.), empleadas en la reconstrucción de los arroyos atlánticos y de las lagunas de Rivatehilos, se puede consultar en Sousa (2004) y Sousa et al. (2006d).

- Metodología

Para reconstruir la situación de los humedales se ha comenzado por su situación actual y se ha ido retrocediendo paulatinamente en el tiempo, de acuerdo a las fuentes de datos disponibles en cada momento (ver Tabla 1). Por ello el estudio se inicia con el trabajo de campo, y posteriormente se va reconstruyendo con la ayuda de vuelos aéreos e imágenes de satélite en primer lugar, y posteriormente con datos de archivos y cartografía histórica (junto con un análisis del microrelieve del entorno de los humedales). Una síntesis de la metodología empleada para el proceso de reconstrucción se recoge en la Figura 3, donde en cada una de las 5

Época	Trabajo de campo	Fotografía aérea	Imágenes de satélite	Archivos forestales	Documentos históricos	Cartografía histórica	Análisis del microrelieve
2000	X	X	-	-	-	-	-
1987	X	X	X	X	-	-	-
1956	-	X	-	X	X	-	-
S. XIX (~ 1869)	-	-	-	-	X	X	X
S. XVII (~ 1630)	-	-	-	-	X	-	X

Tabla 1. Fuentes de datos empleadas para la reconstrucción de los humedales de la zona de estudio.

Otro aspecto a considerar, en este esquema metodológico, es que no cabe emplear puntual y aisladamente una fuente histórica documental o cartográfica, ya que su lectura descontextualizada podría conducir a una interpretación sesgada o errónea. Por ello deben de ser tratadas las diferentes fuentes disponibles en cada uno de los cinco períodos estudiados (2000, 1987, 1956, 1869 y 1630), de una forma conjunta, transdisciplinar y crítica.

fases de estudio se emplea metodologías y fuentes de datos diferentes (al menos parcialmente).

Un aspecto novedoso, desde el punto de vista metodológico, a la hora de cuantificar la superficie de los humedales desaparecidos en el pasado (más allá de los períodos de los que existen imágenes aéreas), ha sido el análisis del microrelieve (ver esquema de Figura 1 y Figura 3). Esto ha permitido, no sólo reconstruir cualitativamente la situación

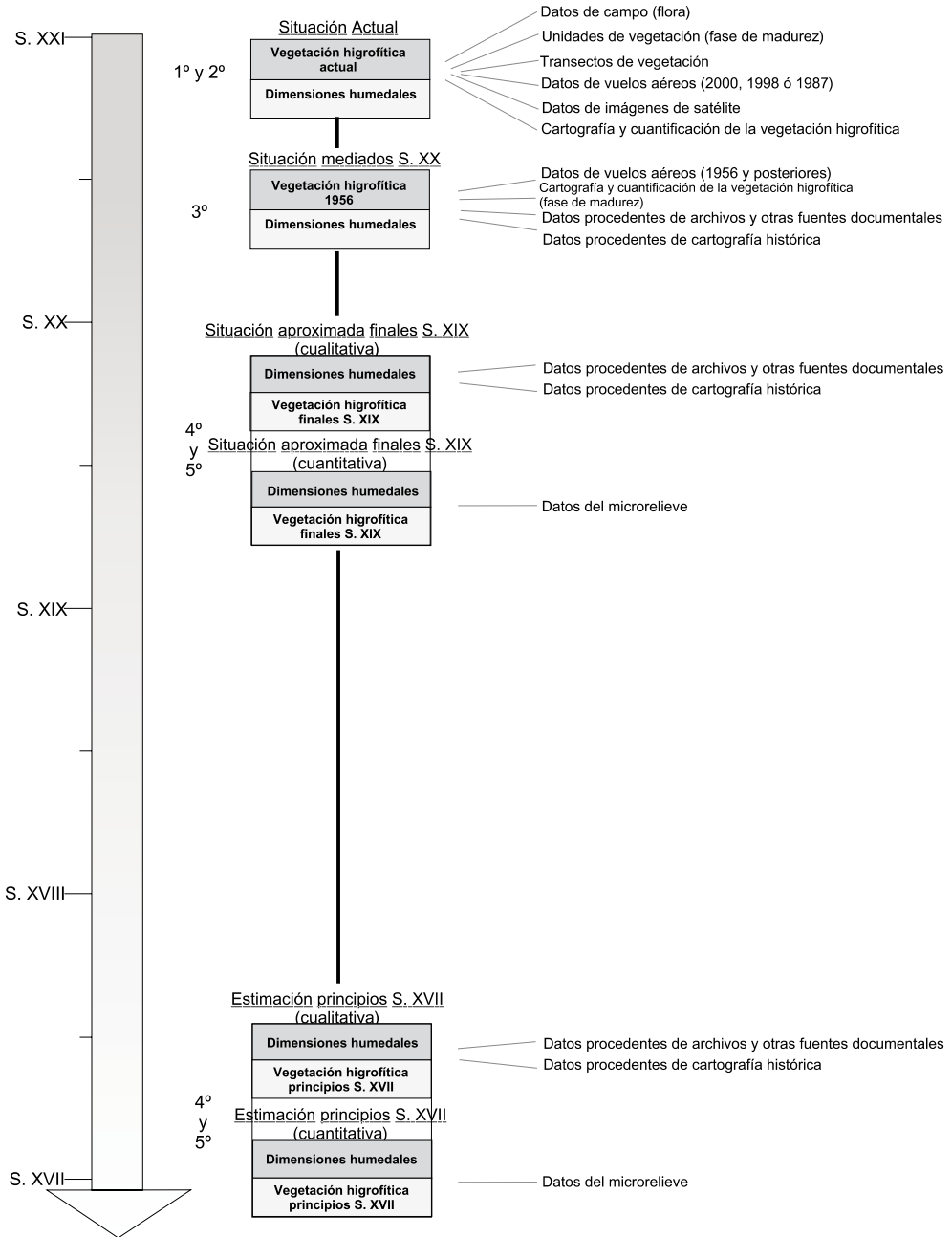


Figura 3. Fases de la metodología empleada para reconstruir los humedales en la zonas de estudio, diferenciando las fuentes de información cualitativa de las fuentes de información cuantitativas (cartografiadas en un soporte con una proyección estándar). Tomado de Sousa (2004).

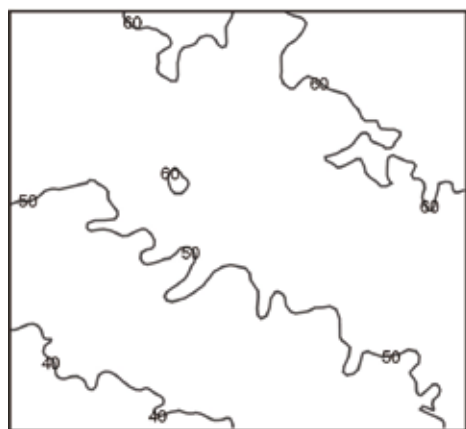
aproximada de estos humedales a finales del S. XIX y principios del S. XVII, sino sobre todo poder trasladar esta información a una cartografía normalizada (permitiendo de esta forma cuantificar de forma comparada

con períodos en los que sí existen vuelos aéreos o imágenes de satélite como los años 2000, 1987 y 1956).

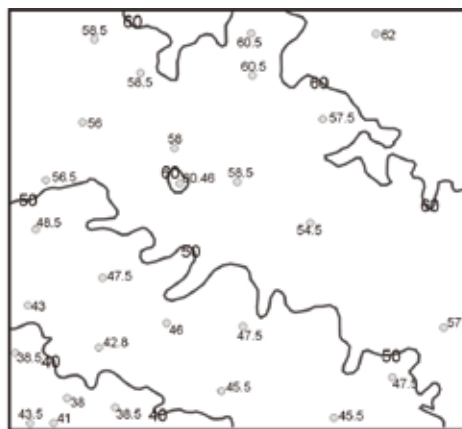
Este sistema se basa en la interpolación manual de las cotas contenidas en los Mapas

Topográficos de Andalucía (M.T.A., a partir de ahora) del Instituto de Cartografía de Andalucía (I.C.A.) a E. 1:10.000, partiendo de las curvas de nivel cada 10 m más próximas. Un ejemplo de esta metodología se recoge en la Figura 4, aplicándola concretamente a una pequeña zona de los Arroyos Atlánticos (más información sobre este aspecto se puede consultar en Sousa, 2004). Más concretamente se han interpolado manualmente -en el caso de los Arroyos Atlánticos- más de 400 cotas topográficas, y más de 250 en el caso de las lagunas turbosas de Rivatehilos. Tras esta primera fase se

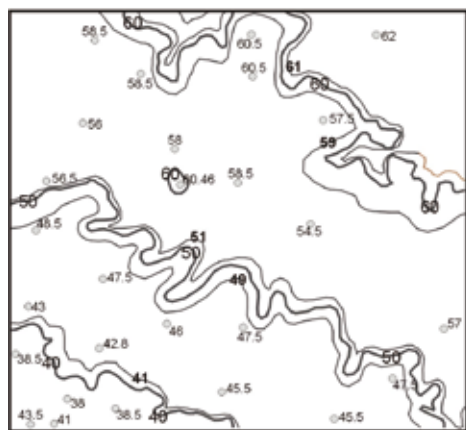
puede detectar, en el caso de los arroyos, el trazado original de sus talweg partiendo de su situación en 1956 con la ayuda de documentos y cartografía histórica de la fecha (simplemente siguiendo las líneas de escorrentía y la divisoria de agua de las cuencas de cada uno de los arroyos por gravedad). En el caso de las lagunas permite detectar cubetas desaparecidas en el pasado -si es que tienen un tamaño relevante para aparecer reflejado en una cartografía a esta escala-. Al igual que ocurre con los arroyos, la existencia de estas lagunas desaparecidas en los últimos 4 siglos deberá ser refrendada por



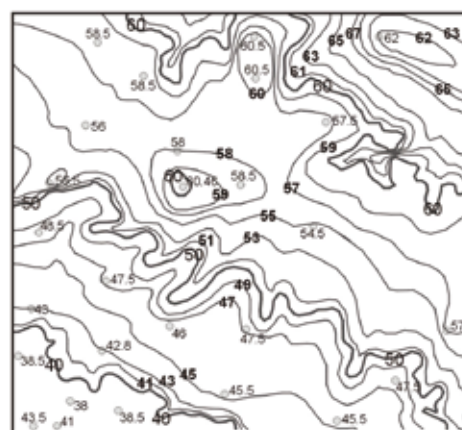
(A). Curvas de nivel a E. 1:10.000 según M.T.A



(B). Curvas de nivel a E. 1:10.000 y cotas topográficas



(C). Inicio interpolación primeras curvas



(D). Situación final tras la interpolación

Figura 4. Ejemplo de aplicación de la metodología para reconstruir el microrelieve. Detalle correspondiente a la zona de los Arroyos Atlánticos.

otras fuentes diferentes, como documentos escritos de la fecha o cartografía histórica fiable.

Este método se ha empleado por Sousa & García-Murillo (2002) y Sousa et al. (2006d), para reconstruir algunas de las lagunas andaluzas con mayor superficie desaparecidas a finales del S. XIX, como es el caso de la *Laguna de Invierno* (Sousa & García Murillo, 1999).

Este mismo principio se ha aplicado a la situación existente a principios del S. XVII (más allá no se han recogido suficientes fuentes documentales o cartográficas para poder realizar un análisis fiable), como se puede ver en la Figura 3.

Para la reconstrucción de los cambios antrópicos se han empleado gran parte de las fuentes citadas en el apartado anterior. En este sentido los 49 informes de compra, venta y valoración de los 10 cotos forestales que conforman el área de estudio han sido de gran utilidad. Esta información se ha corroborado con los mapas forestales de la zona elaborados a E. 1:25.000, a partir de los fotogramas aéreos correspondientes a los vuelos de 1956 y 1987.

Los datos de usos del suelo de fechas anteriores han sido elaborados a partir de diferentes fuentes documentales históricas: libros de Montería de los S. XIV y XVI, los legajos con descripciones de las fortificación del litoral de Huelva durante el S. XVI, relaciones o encuestas reales del S. XVIII [recopiladas para la provincia de Huelva por Ruiz González (1999) y Sánchez Sánchez (1999)], inventarios forestales de la Ley de Montes de 1748, así como diversos documentos científicos y técnicos de finales del S. XIX y principios del XX. Un listado de esta información se puede consultar en Sousa & García-Murillo (1999, 2001 y 2003), y una revisión crítica de las fuentes arriba citadas en Sousa (2004).

Para el análisis de las tendencias en la precipitación y temperatura se han seguido

los resultados de García Barrón (2002b) y García-Barrón & Pita (2004) para los observatorios del SW de la Península Ibérica. Para ver el efecto de posibles cambios en la secuencia de los años húmedos y secos se ha empleado el análisis de quintiles (Arlery et al., 1973), que divide la distribución entre 5 intervalos de acuerdo al período de referencia. Esta aproximación metodológica es la recomendada por la Organización Meteorológica Mundial, y el Instituto Nacional de Meteorología español para clasificar los meses o años en: muy secos, secos, normales, húmedos y muy húmedos. A partir de estos datos se ha calculado la frecuencia de cada uno de ellos, y posteriormente la frecuencia acumulada, con el objeto de detectar algún posible punto de inflexión, siguiendo para ello los criterios desarrollados por Sousa (2004) y Sousa et al. (2004 y 2005a), concretamente para las estaciones de San Fernando, Sánlúcar de Barrameda y Huelva. Para los datos de cambios en las tendencias de precipitación estacional se han considerado los resultados de los estudios de García Barrón (2002a), y Aguilar et al. (2006).

RESULTADOS: EVOLUCIÓN DE LOS ARROYOS ATLÁNTICOS

- Segunda mitad del S. XX

La fotointerpretación de los vuelos de los años 2000 (B/N a E. 1:20.000) y 1987 (B/N a E. 1:20.000) e imágenes de satélite LANSAT-TM (1986 y 1990) y SPOT (1989), en primer lugar, y posteriormente de 1956 (B/N a E. 1:33.000) nos permite reconstruir -previa verificación a través del trabajo de campo- con gran fidelidad la situación de éstos arroyos, y de la vegetación a ellos asociada, como se recoge en la Figura 5.

Posteriormente hemos de recurrir a los datos procedentes de otras fuentes, además

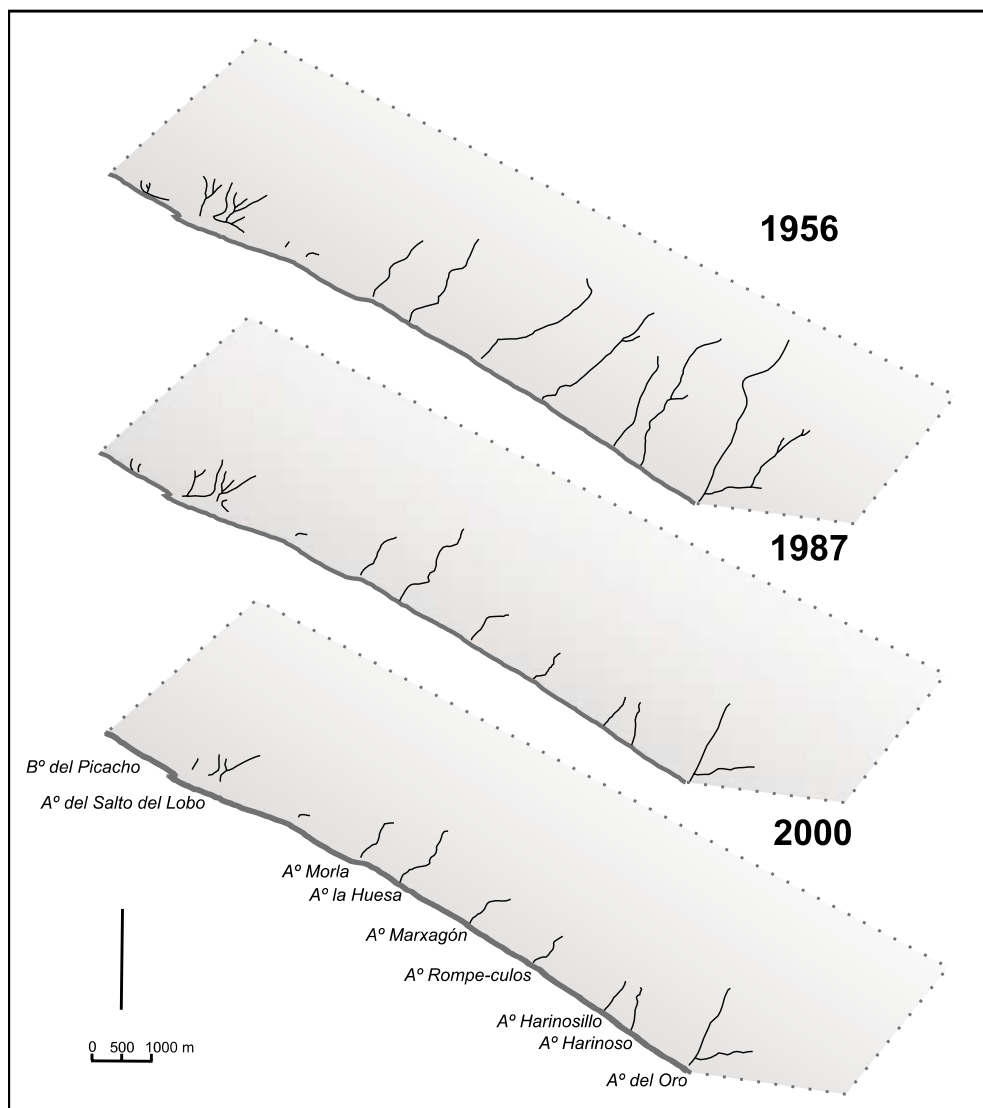


Figura 5. Situación de los talweg de los Arroyos Atlánticos en 1956, 1987 y 2000, elaborada a partir de la correspondiente fotografía aérea de cada una de estas fechas.

de los ya mencionados fotogramas aéreos e imágenes de satélite, se han revisado un total de 23 mapas históricos donde aparecen cartografiados estos arroyos (fechados desde el S. XVIII hasta la primera mitad del S. XX), junto con diversos documentos escritos fechados en los siglos XVI, XVIII, XIX y principios del XX [más detalles de los mismo pueden verse en Sousa & García-Murillo (2002), Sousa (2004) y Sousa et al.(2006e)]. Un ejemplo de fuente

de información a través de cartografía histórica, especialmente fiable a partir de finales del S. XIX, se recoge en la cartografía de Coello donde se aprecia que a finales del S. XIX- estos arroyos ocupaban una extensión mucho más amplia que en 1956 (ver Figura 6).

Con estas fuentes de información se obtiene una idea cualitativa de la situación de estos humedales lineales, pero para poder representarla en una cartografía normalizada es

no hay puertos de mar o río “*por no haber río alguno en su término si no es algunas riberillas de poca corriente*”. Así los Arroyos Atlánticos al oeste del Río del Oro existen con poca entidad (lógicamente en comparación con el Guadalquivir, el Tinto o el propio Arroyo de la Rocina), sin embargo señalan que tienen “*poca corriente*”.

Esta descripción se complementa con la que se realiza en 1756 [Legajo D-27 recopilado por Mora (1981)], que describe las fortificaciones de la costa andaluza, y señala textualmente que la Torre del Oro: “*...esta ella combatida del mar por la que circuye en las mareas crecientes; y las vertientes del arroyo que en las menguantes corre por su pie; lo cual ocasiona continuas ruinas, y la experiencia haze creerla destruirán irremediamente los temporales marítimos*”. Por tanto este texto del S. XVIII pone de manifiesto la existencia de un caudal, más o menos fuerte, que afectaba a los cimientos de la Torre del Oro. Como señala Mora (1981) a pesar de la zapata de los gruesos sillares del pie y del relleno con argamasa del pozo o aljibe, el efecto combinado de la marea creciente y el cauce del arroyo del Oro, que tenían continuamente encharcados los cimientos, acabarían por destruir la torre. Existe otro texto fechado unos años antes [1740; recopilado por Castrillo (2000)] que confirma esta idea de que existía un caudal relevante que afectó a los cimientos de dicha torre: “*... y que la torre del Río de Loro que estaba mandaba hazer en la mitad del agua de dho río entre la dha tierra de Almonte y de la Villa de Palos...*” (sic).

- S. XVI

Si retrocedemos más aun en el tiempo -a finales del S. XVI- en los mismos legajos recopilados por Mora (1981), en relación con la construcción de las torres de almenara que defendían este litoral de Castilla se señala: “*De la Higuera al Río del Oro ay tres leguas, ay aguada abundantísima y es estancia de pescadores y acuden allí de*

ordinario los navíos de enemigos por hazer agua por ser en abundancia y hazella presto tiene necesidad de torre muy buena...” (sic) (1577, Legajo D-3).

Finalmente también se ha estudiado la relación entre la superficie ocupada por la cuencas de cada uno de los arroyos estudiados y su superficie. El resultado pone de manifiesto que la mayor correlación es con la estimación de principios del S. XVII con un $R-SQ = 0.89$, reforzando así al coherencia de la reconstrucción de la situación de los arroyos, como queda recogido en la Figura 7.

En ella se aprecia que existe un buen ajuste entre la longitud de los arroyos, a principios del S. XVII, y la superficie ocupada por sus respectivas cuencas hidrográficas (aunque el tamaño de muestra es pequeño), lo que reafirma la eficacia de la metodología desarrollada para reconstruir la situación original de los cauces. Finalmente la Figura 8 reconstruye la reducción total que han tenido en los últimos 4 siglos.

RESULTADOS: EVOLUCIÓN DE LAS LAGUNAS TURBOSAS DE RIVATEHILOS

Una metodología similar se ha empleado para reconstruir la evolución histórica de las lagunas turbosas de Rivatehilos, aunque las fuentes históricas disponibles pueden variar parcialmente de las que aparecían en los arroyos atlánticos. Por ejemplo la ubicación de los arroyos en el límite intermareal hace su representación frecuente, y bastante fiable, en las cartas de navegación, a diferencia de las lagunas que -aunque litorales- se encuentran alejadas de la línea costera. En la Figura 9 se recoge un detalle de la situación de estas lagunas, de acuerdo con la primera edición del Mapa Topográfico Nacional fechado en 1951 y en el mapa de Coello fechado en 1869.

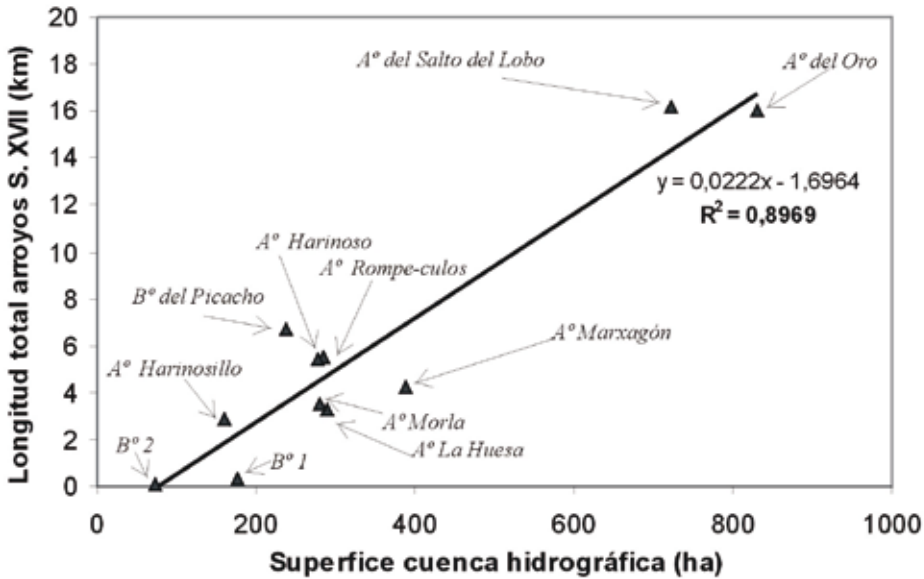


Figura 7. Relación entre la longitud total y la superficie de las cuencas hidrográficas de los 11 arroyos atlánticos situados entre los límites del Parque Natural de Doñana (sector oeste) y el Paraje Natural de las lagunas de Palos y Las Madres.

En la Figura 10 queda puesto de manifiesto la consistencia de la metodología empleada, al comparar la reconstrucción de las grandes lagunas turbosas desaparecidas a finales del S. XIX (*Lagunas del Hilo* o *La Higuera* y *Laguna Mediana*) con la cartografía histórica más fiable para ése mismo período.

Una reconstrucción cartográfica detallada de la evolución de estas lagunas desde principios del S. XVII se puede ver en éste mismo volumen en García Murillo (2007). Tanto en esa figura como en la Figura 11 se recoge la paulatina regresión de las lagunas turbosas - al menos- desde principios del S. XVII hasta

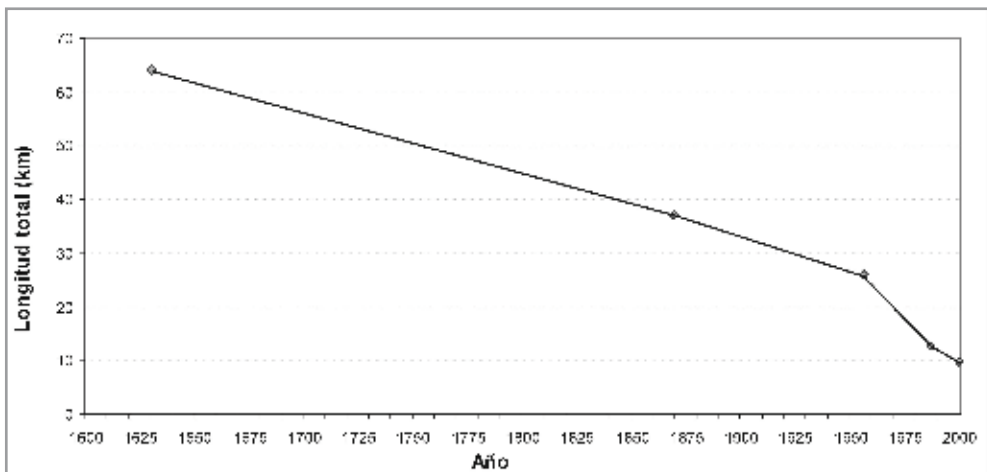


Figura 8. Evolución del conjunto de arroyos atlánticos estudiados desde principios del S. XVII hasta el año 2000. Modificado a partir de Sousa (2004)

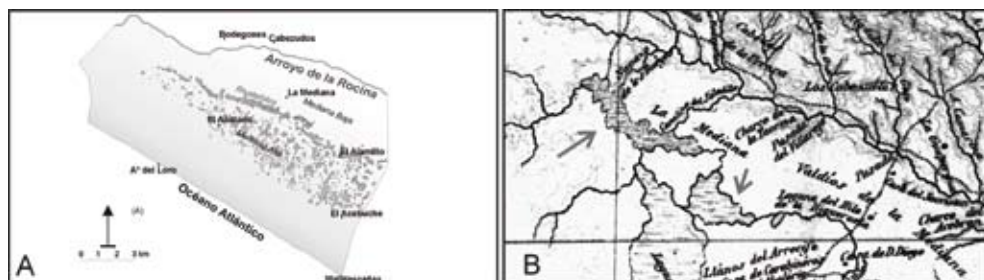


Figura 9. Detalle de la situación de las lagunas turbosas de Rivatehilos según dos fuentes diferentes de cartografía histórica. A) Mapa Topográfico Nacional E. 1:50.000 (M.T.N., 1951) y B) Cartografía de Coello (1869) donde se marcan con sendas flechas las desaparecidas lagunas turbosas del Hilo o Higuera y La Mediana.

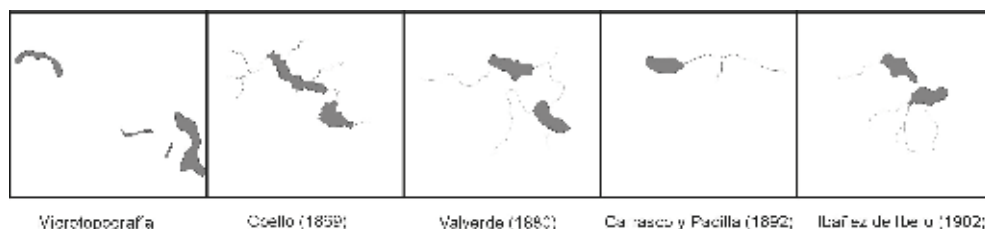


Figura 10. Análisis comparativo de la reconstrucción de las grandes lagunas turbosas desaparecidas a finales del S. XIX según el análisis del microrelieve, y 4 fuentes cartográficas históricas datadas para el mismo periodo.

nuestros días. A lo largo de este proceso de desecación o desaparición de estas lagunas se detecta un retroceso muy acentuado durante la primera mitad del S. XX, aunque no menos significativo es el incremento de la tasa de desecación justo a finales del S. XIX.

En la Figura 12 se recogen los principales usos del suelo en la zona de estudio, derivados de la acción del hombre y de la explotación de sus recursos naturales. En nuestra opinión, el hecho más destacable es que la presión sobre los recursos naturales ha sido exigua (limitada a actividades predatorias y recolectoras como caza ocasional, pesca, carboneo o algunas rozas), hasta bien entrada la segunda mitad del S. XX (a través de la colonización por monocultivos forestales de *Pinus pinea*, *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus camaldulensis*). Este esquema ha sido modificado a partir de Sousa (2004), y para su elaboración se han utilizado fuentes similares a las recogidas para estudiar la evolución de los humedales. Información más detallada sobre estos cambios en los

usos del suelo en la zona de estudio se recoge en Espina & Estévez (1992 y 1993), Ojeda (1987), Sousa & García Murillo (1998, 2001 y 2003), García Murillo (2001 y 2005), Sousa et al. (2005b y 2006d) o la reciente revisión de García Novo et al. (2007).

CAMBIO CLIMÁTICO FRENTE A CAMBIO GLOBAL. EL CALENTAMIENTO POSTERIOR AL FINAL DE LA PEQUEÑA EDAD DEL HIELO

Sino se tuvieran en cuenta los resultados recogidos en la Figura 12, una primera impresión errónea podría conducir a interpretar directamente la regresión de estos humedales, desde principios del S. XX, en relación con el *Calentamiento Global*. Sin embargo como demuestran diversos estudios a partir de datos de vegetación (García Murillo & Sousa, 1997 y 1999), lagunas (Sousa & García Murillo, 1998, 1999 y

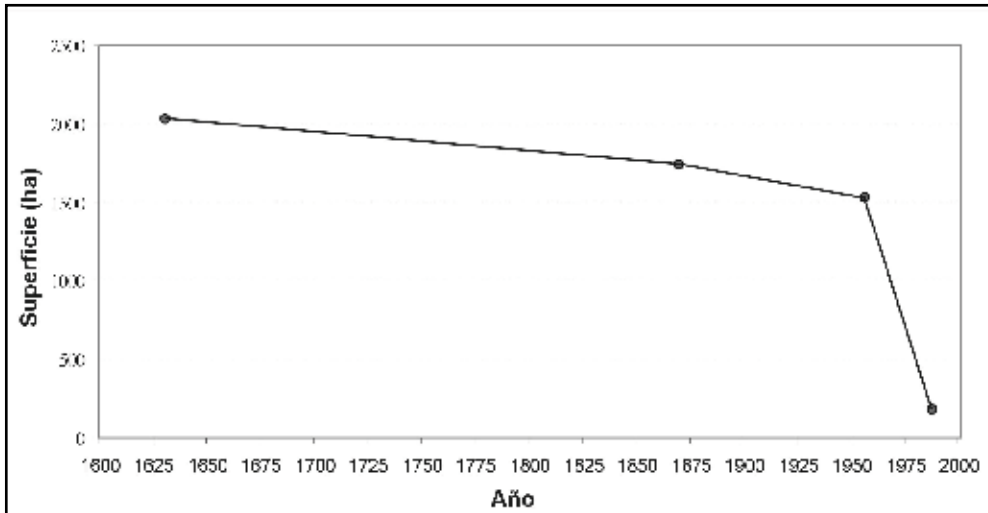


Figura 11. Evolución de la superficie ocupada por las lagunas turbosas de Rivatehilos desde principios del S. XVII.

2001) y niveles hidrogeológicos (Sousa & García-Murillo, 2003; Trick & Custodio, 2003; Sousa, 2004; Manzano et al., 2005), la principal causa de este retroceso se debe a la actividad de implantación de monocultivos de especies de crecimiento rápido [lo cual a su vez incentivaría los procesos erosivos, de removilización y arenas volanderas ya estudiados por Granados (1987)]. Ello no es óbice para que, sobre este impacto antrópico principal, se superpongan con menor intensidad, los impactos derivados de modificaciones en las tendencias climáticas (por tanto sería una consecuencia de un *Cambio Global*). Ya desde hace varias décadas -la disminución de los niveles freáticos (independientemente de su origen)- ha sido considerada como una de las principales amenazas para la conservación de la biodiversidad de la Reserva de la Biosfera de Doñana, y especialmente para la comunidad higrofitas de origen turboso (Rivas-Martínez et al., 1980; González Bernáldez, 1986; Rivas-Martínez, 1988).

De hecho, desde principios del S. XVII, los brezales húmedos atlánticos meridionales se van reduciendo a razón de 1.2 ha/año de media. Esta tasa de desaparición se duplica a partir de finales del S. XIX hasta mediados

del S. XX (2.4 ha/año). Por lo que durante este período la superficie total estimada de estos humedales pasa de 2035 ha a principios del S. XVII a 1551 ha en 1956.

Como señala Hughes (2000) la distribución y/o abundancia de muchas especies ha estado afectada por la actividad del hombre, alterando o haciendo perder sus hábitats. Así durante el período comprendido entre 1956 y 1987, la superficie ocupada por los brezales húmedos atlánticos meridionales de *Erica ciliaris* disminuyen exponencialmente con una tasa media de 43.6 ha/año, hasta que esta comunidad se queda reducida a su situación crítica actual (sólo alrededor de 180 ha). La causa de la intensificación de la regresión de estas comunidades durante la segunda mitad del S. XX se encuentra sobre todo en la disminución del nivel freático, como consecuencia de un intenso proceso de monocultivos con diferentes especies de eucaliptos. Este proceso condujo a la desecación de la mayoría de las lagunas turbosas dominadas por *Erica ciliaris* y *Ulex minor*, y su substitución por un matorral higrofito (dominado por *Erica scoparia* y *Ulex australis*), mejor adaptado a condiciones de encharcamiento temporal (Ramírez Díaz et al., 1977; Sousa & García-Murillo, 2003).

Estos resultados parecen coincidir con estudios realizados sobre turberas más septentrionales (Weltzin et al., 2003), donde su composición florística puede verse afectada como respuesta a un calentamiento y/o cambios en los niveles freáticos.

La sustitución de los brezales húmedos atlánticos meridionales de *Erica ciliaris* [*Erico ciliaris-Ulicetium (minoris) lusitanicus*] por brezales de *Erico scoparia-Ulicetum australis*, mucho menos estenohídricos, queda clara si analizamos de forma comparativa los vuelos aéreos de 1956 y 1987: así -durante este periodo- la superficie de las lagunas turbosas pasa de ocupar 178 polígonos (1533.0 ha) á 30 polígonos (180.6 ha), y en cambio el Monte Negro se incrementa en la misma proporción, pasando de distribuirse por 55 manchas (154.1 ha) a 198 polígonos (907.5 ha).

Sin embargo hasta la primera mitad del S. XX la presencia del hombre en la zona de estudio fue sólo testimonial (actividades de carácter predatorio y recolector), como

queda reflejado en la Figura 12. ¿Cuáles fueron entonces las causas de la regresión de estas comunidades desde principios del S. XVII hasta 1956?. Al analizar las series instrumentales de precipitación y temperatura se detectan dos cambios relevantes:

1º.- Una tendencia marcada a la disminución de las precipitaciones primaverales (García Barrón, 2000 y 2002a), especialmente acentuada durante el mes de marzo (Aguilar et al, 2006 y 2007, en este volumen), desde principios del S. XX. Esta tendencia va a asociada a una disminución de la frecuencia acumulada de años húmedos en relación con la frecuencia acumulada de años secos (Sousa et al., 2004). Este cambio o punto de inflexión se da a finales del S. XIX, coincidiendo con el tercer y último periodo húmedo de la *Pequeña Edad del Hielo* detectado en Andalucía por Rodrigo et al. (1994, 1999), y en el litoral mediterráneo español por Barriendos & Martín-Vide (1998). Este último periodo húmedo llevaba

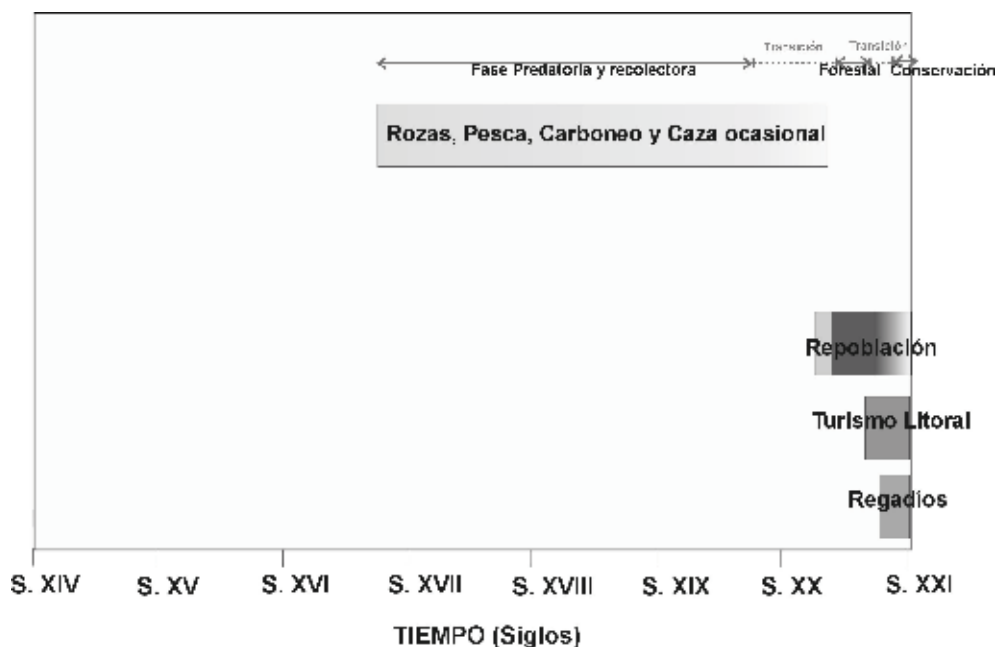


Figura 12. Evolución de la actividad antrópica en el Parque Natural de Doñana (sector oeste, Abalarío).

aparejada un incremento en las anomalías positivas de la precipitación media anual.

2°.- Paralelamente a esta disminución de los años húmedos y de las precipitaciones primaverales, se ha producido un incremento en las temperaturas medias de las mínimas desde principios del S. XX (García Barrón, 2002b y 2007 en este volumen; García-Barrón & Pita, 2004).

Por tanto hay dos procesos climáticos que parecen superponerse de manera sinérgica en el inicio del S. XX: por un lado el final de la *Pequeña Edad del Hielo* y por otro el inicio del *Calentamiento Global*.

La finalización de la *Pequeña Edad del Hielo* ha conducido a una gradual disminución de los niveles freáticos que afectaría a las comunidades vegetales más estenohidricas de la zona de estudio. La coincidencia de los datos climáticos históricos (Granados et al., 1988; Rodrigo et al., 1994 y 1999; Barriendos & Martín-Vide, 1998), con la reconstrucción de la superficie ocupada en la zona y de las grandes lagunas desaparecidas, nos induce a pensar que se trata de un proceso con un marcado punto de inflexión. Este cambio en el equilibrio biológico tendría lugar a finales del S. XIX pero se iniciaría, al menos, a principios del S. XVII (fase álgida de la *Pequeña Edad del Hielo* en Andalucía 1590-1650, según Rodrigo et al., 2000).

El uso de este término -*Pequeña Edad del Hielo*- sigue siendo en la actualidad controvertido (IPCC, 2001; Jones & Briffa, 2001; Jones & Mann, 2004; Hunt, 2006). Según Ogilvie & Jónsson (2001) el término "Little Ice Age" (*Pequeña Edad del Hielo*, *Pequeña Era Glaciar* o *Miniglaciación*) hace referencia a tres conceptos diferentes. En relación con ello, a pesar de lo inadecuado o la imprecisión que tiene la traducción del término anglosajón al castellano en latitudes tan meridionales como las estudiadas en este trabajo, entedemos que no hace referencia a una pequeña glaciación global en sentido

estricto, sino a un intervalo de tiempo (que no fue uniformemente frío en el espacio ni en el tiempo).

Por otro lado el incremento de las temperaturas medias de las mínimas, desde principios del S. XX (García-Barrón & Pita, 2004), supone un incremento de la tasa de evapotranspiración. Este incremento afectaría más marcadamente a las comunidades vegetales higrofiticas y freatofiticas, tras acentuarse el periodo de estío por la disminución de las precipitaciones primaverales (García Barrón, 2002a y 2002b).

En este sentido, para que se pueda considerar que una modificación supone un *Cambio* en la tendencias climáticas -siguiendo a Pita (1997)- por oposición a una mera *Anomalia* o *Fluctuación climática* debe de verificar que:

a) El Sistema no vuelve a su estado anterior, por lo que supone un equilibrio nuevo.
b) Afecta a todos los componentes del sistema.

c) Supone una ruptura del equilibrio, por lo que las anomalías locales no se compensan. La detección de estos puntos de inflexión -que diferencien una fluctuación de un cambio climático- es una de las utilidades que puede tener el análisis y la reconstrucción de la vegetación asociada a los humedales. Ya que la vegetación natural tiene una gran capacidad para adaptarse, recuperarse e internalizar las fluctuaciones naturales del clima (especialmente en climas mediterráneos), pero no los cambios de éste. En este caso se ha detectado un punto de inflexión climática en las tendencias climáticas seculares, ya que hay una ruptura en el equilibrio de los ecosistemas vegetales higrofiticos (asociados a los humedales), dando un lugar a un cambio de carácter irreversible. Esto es lo que ocurre en las lagunas turbotasas de Rivatehilos como se esquematiza en la Figura 13.

Los cambios biológicos detectados en los humedales estudiados, nos ponen de mani-

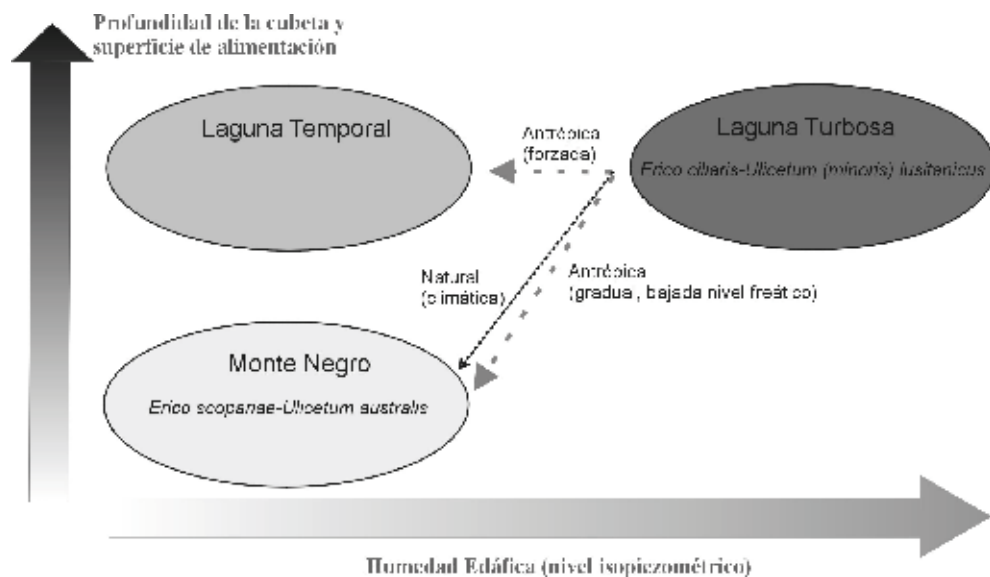


Figura 13. Esquema del cambio en la situación de equilibrio de la vegetación higrofítica asociada a las lagunas turbosas de Rivatehilos, como consecuencia del proceso de desecación (tomado de Sousa, 2004 modificado).

fiesto que la alteración y la pérdida de hábitats generados por la acción del hombre, pueden estar enmascarando procesos naturales de cambio de mayor calado o escala temporal. Es decir, importantes alteraciones regionales o globales en comunidades de plantas originadas por cambios climáticos recientes, pueden no haber sido detectadas por el fuerte impacto que ha tenido y tiene el hombre sobre los espacios naturales, como se esquematiza en la Figura 14, en el caso de los arroyos atlánticos. Concretamente estos arroyos retrocedieron globalmente 54.1 km desde principios del S. XVII hasta el año 2000.

De acuerdo a los datos florísticos de Dahlgren & Lassen (1972), es posible que este proceso haya afectado también a las turberas desaparecidas de la Península Tingitana (Norte de Marruecos). Del mismo modo los cambios que se han advertido en los arroyos atlánticos del entorno de Doñana, ligados al mismo proceso, parecen ser comunes con los detectados en el Algarve portugués (Devereux, 1982). Todo lo cual hace pensar que puede tratarse de un cambio que haya afectado a

una vasta zona de la cuenca mediterránea occidental.

Asimismo el retroceso detectado en estas comunidades resulta coherente con los efectos estudiados sobre los biomas de las zonas montañosas mediterráneas del Montseny (NE España; Peñuelas & Boada, 2003). Estos autores demuestran una progresiva sustitución de los ecosistemas más templados por los ecosistemas mediterráneos, lo que implica el desplazamiento –entre otros- de comunidades de brezales.

Todavía resulta más llamativa la coincidencia temporal de estos resultados con otros trabajos realizados en latitudes y ecosistemas con características biológicas muy diferentes. Así Sorvari et al. (2002) han detectado cambios en la composición de los lagos árticos de Finlandia (especialmente en las diatomeas), que coincide con un calentamiento de la región ártica que marca el final de la *Pequeña Edad del Hielo*. Este proceso -que Sorvari et al. (2002) denominan *post-Little Ice Age warming*- sería consecuencia del calentamiento posterior al S. XIX debido -en nuestra opinión- a la suma del final de la *Pequeña Edad del Hielo*

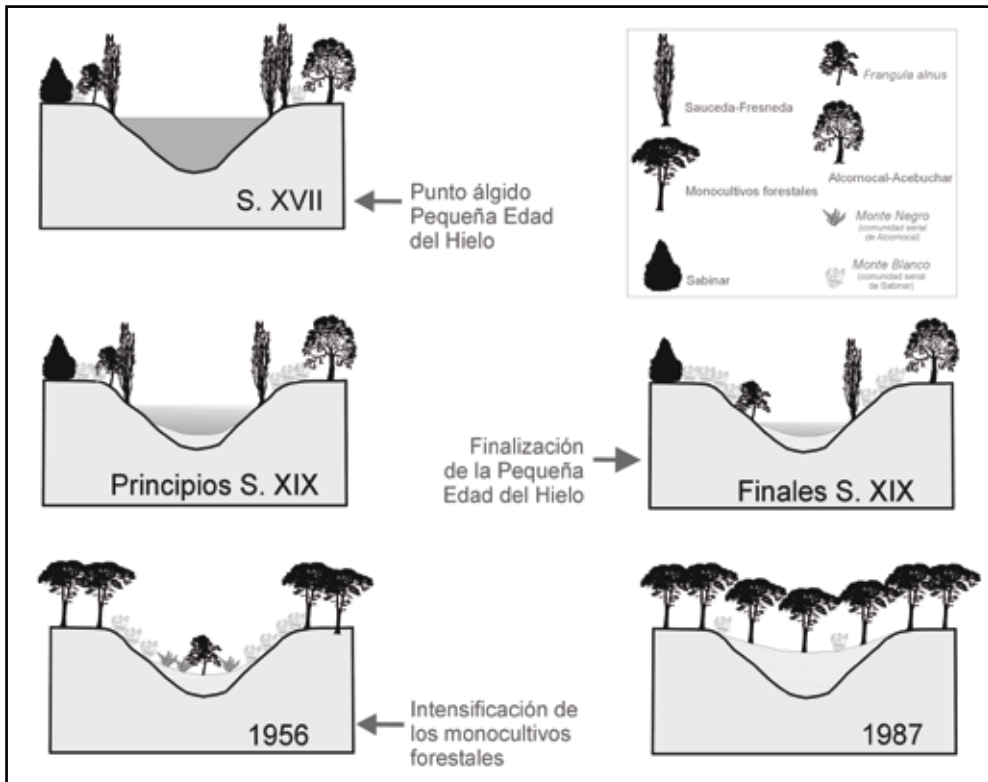


Figura 14. Reconstrucción visual del paisaje vegetal de los Arroyos Atlánticos de la zona de estudio desde el S. XVII hasta nuestros días.

y el inicio del *Calentamiento Global*. Estos datos nos inducen a pensar en la posibilidad de que los resultados obtenidos reflejen sólo un aspecto de un cambio biológico a escala global de gran magnitud y complejidad. Ya que las comunidades vinculadas a suelos de carácter más o menos turboso –como las turberas boreales– son consideradas particularmente vulnerables a cambios climáticos (Weltzin et al., 2003), por sus propias características de funcionamiento.

Por tanto, lo que inicialmente se podría interpretar como un cambio antrópico local en el SW de la Península Ibérica, parece que tiene un origen climático. Este cambio afectaría también a las comunidades zoológicas adaptadas a estos ecosistemas húmedos, como es el caso de la rata de agua (*Arvicola sapidus*; Fedriani et al., 2002).

El efecto del cambio climático sobre estas comunidades de brezales de *Erica ciliaris*

se sumaría, por ello, a otros estudios que indican que el incremento de temperaturas recientes ha afectado a la fenología, dinámica, composición y distribución de comunidades muy diversas (Walther et al., 2002). Y es que –como señala McCarty (2001)– el cambio global puede ser una amenaza presente y futura para la conservación.

CONCLUSIONES

La primera conclusión de este estudio sería destacar el interés de la metodología utilizada, no sólo para reconstruir humedales costeros similares a los estudiados, sino lo que es más importante, para poder cuantificar y cartografiar de forma normalizada esa reconstrucción.

En segundo lugar queda clara la importante regresión de los humedales del entorno de Doñana estudiados (91 % de la superficie

de las lagunas turbosas de Rivatehilos, y 84 % de la longitud de los pequeños arroyos atlánticos). Inicialmente esta regresión es más intensa debido a la intervención del hombre, a través de la reforestación con monocultivos de eucaliptos (sobre todo en las lagunas turbosas de Rivatehilos con una reducción media anual, a partir de 1956, de 43.6 ha/año); sin embargo es un proceso que se remonta más atrás en el tiempo. En efecto, al menos desde principios del S. XVII (1.2 ha/año), se ha producido una aridización de los humedales estudiados, durante un período en el que la presencia humana en la zona de estudio era testimonial (y muy limitada a la franja intermareal).

De esta forma se ha dado una paulatina desecación de las lagunas turbosas, cuyo ritmo se intensifica desde el final del S. XIX (duplicándose hasta una media 2.4 ha/año), conduciendo a un proceso de regresión muy importante de los últimos reductos de vegetación atlántica en la zona, en lo que se puede denominar como la mediterraneización de la vegetación higrofitica y de los humedales costeros más atlánticos de Doñana. Este proceso de carácter natural -ya que es previo a la intervención humana- supone la desaparición de las grandes lagunas turbosas de la zona que ocupaban algo más de 500 ha, y el retroceso total de cerca de 38 km en arroyos los arroyos atlánticos.

En tercer lugar habría que señalar que el origen de este proceso radicaría en lo que se viene denominando calentamiento posterior a la *Pequeña Edad del Hielo* (post-*Little Ice Age* warming). En el caso andaluz conllevaría no sólo un incremento térmico, sino también una disminución del número de años húmedos. Por tanto aparecen dos procesos climáticos con continuidad en el tiempo que -en el caso del litoral onubense oriental- conducen de forma sinérgica a una disminución de

la disponibilidad hídrica a nivel edáfico y de alimentación a los niveles freáticos. Ésta sería, por tanto, una consecuencia de un incremento del número de años secos y muy secos (final de la *Pequeña Edad del Hielo*), y un incremento en las variables térmicas (y muy probablemente una disminución en la precipitación primaveral, acentuando así el estío) como consecuencia del llamado Calentamiento Global (*Global Warming*). Estos resultados coinciden con las previsiones del panel de expertos de la Oficina Española de Cambio Climático (Fernández González et al., 2005), que consideran previsible como consecuencia del Cambio climático la aridización de los ecosistemas mediterráneos y la mediterraneización de los ecosistemas atlánticos. La manifestación de estos procesos biológicos como consecuencia de cambios climáticos ponen en evidencia un punto de inflexión climático a finales del S. XIX, que podría anticipar las consecuencias futuras de la alteraciones climáticas de acuerdo a las previsiones de los escenarios de futuro SRES del IPCC (2007), al tratarse de una zona donde se encuentran comunidades finícolas, es decir que están en el límite más meridional de su área de distribución.

Como cuarto y último punto consideramos que queda demostrada la utilidad de emplear los humedales -al menos aquellos con condiciones similares a los estudiados- como sensores no sólo de los efectos de los cambios climáticos, sino también para detectar puntos de inflexión o de cambio climático (sensu Pita, 1997).

AGRADECIMIENTOS

Los resultados que se recogen en este artículo han sido financiados parcialmente por el Ministerio Español de Educación y Ciencia (Proyecto CGL2006-07194/BOS).

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, M., E. Sánchez & M. F. Pita (2006). Tendencias en las precipitaciones de marzo en el sur de la Península Ibérica. En: *Clima, Sociedad y Medio Ambiente*. Zaragoza. Asociación Española de Climatología. pp. 41-51.
- Álvarez Cobelas, M., J. Catalán & D. García de Jalón (2005). Impactos sobre los ecosistemas acuáticos continentales. En: Moreno, J. M. (Ed.). *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del Cambio Climático*. Ministerio de Medio Ambiente, pp. 109-142.
- Álvarez de Cardoso, A. (1785). Relación enviada por el Párroco de Almonte a Tomás López. En: Ruiz González, J. E. (1999): "*Huelva, según las relaciones enviadas por los párrocos al geógrafo real Tomás López en el siglo XVIII*". Diputación Provincial de Huelva, Huelva. 427 p.
- Arlery R., H. Grisolle & B. Guilmet (1973). *Climatologie. Méthodes et pratiques*. Gauthier-Villars, Paris, 434 pp.
- Barriandos, M. (1995). La climatología histórica en España. En: *Cambios y variaciones climáticas en España*. Pita, M. F. & M. Aguilar (Eds.), págs. 47-61. Actas de la I Reunión del Grupo de Climatología de la Asociación de Geógrafos Españoles. Sevilla.
- Barriandos, M. & J. Martín-Vide (1998). Secular climatic oscillations as indicated by catastrophic floods in the Spanish mediterranean coastal area (14th-19th centuries). *Climatic Change*, 38, 473-491.
- Barriandos, M. & F. S. Rodrigo (2006). Study of historical flood events on Spanish rivers using documentary data. *Hydrological Sciences* 51: 765-783.
- Behringer, W. (1999). Climatic Change and witch-hunting: the impact of the Little Ice Age on mentalities. *Climatic Change* 43: 335-351.
- Borja, F. & F. Díaz del Olmo (1996). Manto Eólico Litoral (MEL) de El Abalario (Huelva, España): episodios morfogénicos posteriores al 22.000 BP. En: *Dinámica y evolución de medios cuaternarios*, Pérez, A., P. Martini, W. Chesworth. & A. Martínez (Eds.), págs. 375-390. Actas del Simposio Paleambiente Cuaternario de la Península Ibérica. Santiago de Compostela.
- Brázdil, R., R. Glaser, C. Pfister, P. Dobrovolný, J. M. Antoine, M. Barriandos, D. Camuffo, M. Deutsch, S. Enzi, E. Guideboni, O. Kotyza, & F. S. Rodrigo (1999). Flood events of selected european rivers in the Sixteenth Century. *Climatic Change* 43: 239-285.
- Buckland, P. C. & P. E. Wagner (2001). Is there an insect signal for the "Little Ice Age"? *Climate Change* 48: 137-149.
- Carrasco y Padilla, J. (1892). *Nuevo mapa geográfico estadístico de la provincia de Huelva*". Autor: José Carrasco Padilla (Excmo. Diputación Provincial de Huelva). E. 1: 300.000. Meridiano de origen de Madrid. En "La representación del territorio, Huelva", Cartoteca del Instituto Geográfico Nacional.
- Castrillo, M. C. (2000). *Doñana Nombre a Nombre. Estudio de la toponimia del Parque Nacional de Doñana*. Diputación Provincial de Huelva. Huelva, 288 p.
- Coello, F. (1869). *Huelva*. Escala y proyección desconocida. Escala estimada 1:50.000. Cartoteca Histórica del Servicio Geográfico del Ejército.
- Dahlgren R., & P. Lassen (1972) Studies in the flora of Northern Morocco I.

- Some poor fen communities and notes on a number of northern and atlantic plant species. *Botaniska Notiser* 125: 439-464.
- Devereux, C. M. (1982). Climatic speeds erosion of the Algarve's Valleys. *Geographical Magazine*: 10-17.
- Dusoulier, F. (2001). Les insectes peuvent-ils servir de bio-indicateurs climatiques?. L'exemple des orthoptères en Bretagne. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie* 14: 245-252.
- Espina, J. & A. Estévez (1992). *Programa de recuperación del Patrimonio del P. N. Doñana*. Vol. III. Abalarío. Informe inédito. Huelva, 221 p.
- Espina, J. & A. Estévez (1993). El espacio de repoblación de Cabezudos-Abalarío. En: *Intervenciones Públicas en el Litoral Atlántico andaluz. Efectos territoriales*, Granados M. & Ojeda, J. F. (Eds.), págs. 95-107. Agencia de Medio Ambiente. Sevilla.
- Fedriani J. M., M. Delibes, P. Ferreras & J. Roman (2002). Local and landscape habitat determinants of water vole distribution in a patchy Mediterranean environment. *Ecoscience* 9: 12-19.
- Fernández-González F., J. Loidi & J. C. Moreno (2005). Impactos sobre la biodiversidad vegetal. En: Moreno, J. M. (Ed.). *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del Cambio Climático*. Ministerio de Medio Ambiente, pp. 183-248. Ministerio de Medio Ambiente.
- Fernández Zamudio, R. (2005). Estudio de la flora, vegetación y cambios en el paisaje de la laguna de Las Madres (Huelva). Tesis de licenciatura. Universidad de Sevilla, Sevilla, 431 pp.
- Fernández Zamudio R., A. Sousa & P. García Murillo (2007). *Laguna de las Madres (Huelva). Flora y Vegetación*. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. Sevilla, 287 p.
- García Barrón, L. (2000). *Análisis de series termoplumiométricas para la elaboración de modelos climáticos en el suroeste de España*. Tesis doctoral, Departamento de Física Aplicada. Universidad de Sevilla. Sevilla, 160 p.
- García Barrón L. (2002a) Evolución del régimen de precipitaciones en el oeste de Andalucía. *Aestuaría* 8: 219-240.
- García Barrón L. (2002b) Un modèle pour l'analyse de la sécheresse dans les climats méditerranéens. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie* 14: 67-73.
- García-Barrón, L. & M. F. Pita (2004). Stochastic análisis of time series of temperature in the South-West of the Iberian Peninsula. *Atmósfera* 17: 225-244.
- García Murillo, P., A. Sousa & E. Fuertes (1995). *Sphagnum inundatum* Russ., nuevo para Andalucía. *Anales del Jardín Botánico de Madrid* 53: 245.
- García Murillo, P. & A. Sousa (1997). Vegetation changes in Abalarío (Natural Park Entorno de Doñana, SW of Spain). *Lagascalía* 19: 737-744.
- García Murillo, P. & A. Sousa, (1999). El Paisaje vegetal de la zona oeste del Parque Natural de Doñana (Huelva). *Lagascalía* 21: 111-132.
- García Murillo, P. (2001). Restauración del Complejo Palustre del Abalarío: la reconstrucción del paisaje. En: *1ª Reunión Internacional de Expertos sobre la Regeneración Hídrica de Doñana. Ponencias y Conclusiones*. Ministerio de Medio Ambiente (Ed.): 117-130. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- García Murillo, P. (2005) Reconstrucción del paisaje del Abalarío: un referente para la restauración ambiental en Doñana. En: *Doñana Agua y Biosfera*.

- Martín, C. & F. García Novo (Eds.): 271-275. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- García Novo, F., A. Martín & J. Toja (2007). *La frontera de Doñana*. Secretariado de Publicaciones, Universidad de Sevilla. Sevilla. 317 p.
- González Bernáldez, F. (1986). Paisajes freatófiticos. En: Figura con Paisajes. Homenaje a Fernando González Bernáldez. Montes, C., C. Levassor, A. Cuenca & S. Casado (Eds.), págs. 120-125. Fundación Fernando González Bernáldez, Madrid, 2002.
- González Bernáldez, F. (1992). *Los Paisajes del Agua. Terminología popular de los humedales*. Reyero, J. M. (Ed.), Madrid, 256 p.
- Granados, M. (1987). *Transformaciones históricas de los ecosistemas del P.N. de Doñana*. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla. Sevilla, 485 p.
- Granados, M., A. Martín & F. García Novo (1988). Long-term vegetation changes on the stabilized dunes of Doñana National Park (SW Spain). *Vegetatio* 75: 73-80.
- Hugues L. (2000) Biological consequences of global warming: is the signal already apparent?. *Trends in Ecology and Evolution* 15: 56-61.
- Hunt, B. G. (2006). The Medieval Warm Period, the Little Ice Age and simulated climatic variability. *Climate Dynamics* 27: 677-694.
- Ibáñez de Ibero, C. (1902). *Mapa de España (Ibáñez de Ibero, 1902)*. Escala 1:500.000. Mapa de España formado por el excmo. señor Mariscal de Campo D. Carlos Ibáñez de Ibero con motivo de la división del territorio en zonas militares para situar las reservas y depósitos del ejército (sic). Publicado en 1884 y reproducido en 1902. Lit. Instituto Geográfico y Estadístico. Sin proyección, meridiano en el origen el de Madrid. Sin escala gráfica. Cartoteca del Instituto Geográfico Nacional.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C. A. Johnson (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2007). Summary for Policymakers. <http://www.ipcc.ch>
- Jones, P. D. & K. R. Briffa (2001). The "Little Ice Age": local and global perspectives. *Climatic Change* 48: 5-8.
- Jones, P. D. & M. E. Mann (2004). Climate over past millennia. *Reviews of Geophysics* 42 (2): 1-42.
- Koslowski, G. & R. Glaser. (1995). Reconstruction of the ice winter severity since 1701 in the western baltic. *Climatic Change* 31: 79-98.
- M.T.N. (1951). *Mapa topográfico Nacional E. 1:50.000*, Hoja 1017 ("El Picacho"). Coordenadas geográficas con el meridiano en el origen de Madrid. Escala gráfica en metros. 1ª edición. Dirección General del Instituto Geográfico Catastral y Servicio Geográfico del Ejército. Cartoteca del Instituto Geográfico Nacional.
- Manzano M., E. Custodio, C. Mediavilla & C. Montes (2005). Effects of localised intensive aquifer exploitation on the Doñana wetlands (SW Spain). En: *Groundwater Intensive Use* (eds Sahuquillo A., J. Capilla, L. Martínez-

- Cortina & X. Sánchez-Vila), pp. 209-219. Balkema Publishers, Leiden.
- Martín-Vide, J. & M. Barriendos. (1995). The use of rogation ceremony records in climatic reconstruction: a case study from Catalonia (Spain). *Climatic Change* 30: 201-221.
- Martín-Vide, J. & M. C. Moreno García (1995). Algunos indicadores no usuales en el estudio del cambio climático. En: *Cambios y variaciones climáticas en España*. Pita, M. F. & M. Aguilar (Eds.), págs. 65-76. Actas de la I Reunión del Grupo de Climatología de la Asociación de Geógrafos Españoles. Sevilla.
- McCarthy J. P. (2001) Ecological consequences of recent climate change. *Conservation Biology* 15: 320-331.
- Mora, L. (1981): *Torres de almenara de la costa de Huelva*. Diputación Provincial de Huelva. Huelva, 115 p.
- Ogilvie, A. E. J. & T. Jónsson (2001). "Little Ice Age" research: a perspective from Iceland. *Climatic Change* 48: 9-52.
- Ojeda, J. F. (1987). *Organización del territorio en Doñana y su entorno próximo (Almonte). Siglos XVIII-XX*. Instituto para la Conservación de la Naturaleza (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación). Madrid.
- Peñuelas, J. & I. Filella. (2001). Responses to Warming World. *Science* 294: 793-795.
- Peñuelas J. & M. Boada (2003). A global change-induced biome shift in the montseny mountain (NE Spain). *Global Change Biology* 9: 131-140.
- Pita, M. F. (1997). Los cambios climáticos. En: *Climatología*. Cuadrat, J. M. & M. F. Pita (Eds.), págs. 387-458. Editorial Cátedra, Madrid.
- Ramírez Díaz L., F. García Novo, J. Merino & F. González Bernáldez (1977). Sistemas de dunas y arenas estabilizadas de la reserva Biológica de Doñana. En: *Doñana. Prospección e inventario de Ecosistemas*. García Novo, F., J. Merino, L. Ramírez Díaz, M. Ródenas, F. Sancho Royo, A. Torres, F. González Bernáldez, F. Díaz Pineda, C. Allier, V. Bresset & A. Lacoste (Eds.), págs. 159-193. Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza (Ministerio de Agricultura), monografía 18. Madrid, 243 p.
- Reiter, P. (2000). From Shakespeare to Defoe: Malaria in England in the Little Ice Age. *Emerging Infectious Diseases* 6: 1-11.
- Rivas-Martínez, S. M. Costa, S. Castroviejo & E. Valdés (1980). Vegetación de Doñana (Huelva, España). *Lazaroa* 2: 5-190.
- Rivas-Martínez, S. (1988). Bioclimatología, biogeografía y series de vegetación de Andalucía Occidental. *Lagascalía* 15: 91-119.
- Rodrigo F. S., M. J. Esteban-Parra & Y. Castro-Diez (1994). An attempt to reconstruct the rainfall regime of Andalusia (Southern Spain) from 1601 A.D. to 1650 A.D. using historical documents. *Climatic Change* 27: 397-418.
- Rodrigo F. S., M. J. Esteban-Parra, D. Pozo-Vázquez & Y. Castro-Diez (1999). A 500 year precipitation record in Southern Spain. *International Journal of Climatology*: 19: 1233-1253.
- Rodrigo F. S., M. J. Esteban-Parra, D. Pozo-Vázquez & Y. Castro-Diez (2000). Rainfall variability in Southern Spain on decadal to centennial times scales. *International Journal of Climatology* 20: 721-732.
- Rodríguez-Ramírez, A., J. Rodríguez-Vidal, L. Cáceres, L. Clemente, G. Belluomini, L. Manfra, S. Improta & J. R. De Andrés (1996). Recent coastal evolution on the Doñana National

- Park (SW Spain). *Quaternary Science Review* 15: 803-809.
- Ruiz González, J. E. (1999). *Huelva, según las relaciones enviadas por los párrocos al geógrafo real Tomás López en el siglo XVIII*. Diputación Provincial de Huelva, Huelva. 427 p.
- San Miguel, M. (1913): "Las costas de la provincia de Huelva y sus variaciones en el período histórico". *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural* 13: 434-468.
- Sánchez Sánchez, J. M. (1999). *Huelva y su provincia en las relaciones geográficas de Don Tomás López*. Padilla Libros Editores & Libreros, Sevilla, 280 p.
- Sorvari S., A. Korhola & R. Thompson (2002). Lake diatom response to recent Arctic warming in Finnish Lapland. *Global Change Biology* 8: 171-181.
- Sousa A (2004). *Evolución de la vegetación higrofitica y de los humedales continentales asociados en el litoral onubense oriental*. Tesis doctoral. Universidad de Sevilla, Sevilla, 550 pp.
- Sousa, A. & P. García Murillo (1998). Cambios históricos en el avenamiento superficial y la vegetación del Parque Natural de Doñana (Sector Abalarío), Huelva. *Ería* 46: 165-182.
- Sousa A. & P. García Murillo (1999) Historical evolution of the Abalarío lagoon complex (Doñana Natural Park, SW Spain). *Limnética* 16: 85-98.
- Sousa, A. & P. García Murillo (2000). *Los topónimos como indicadores de los cambios territoriales y la percepción del paisaje: el caso del Abalarío (Parque Natural de Doñana, Huelva)*. Colección Cuadernos de Almonte 49. Edita Ayuntamiento de Almonte (Huelva), 80 pp.
- Sousa, A. & P. García Murillo (2001). Can place names be used as indicators of landscape changes? Application to the Doñana Natural Park (Spain). *Landscape Ecology* 16: 391-406.
- Sousa, A. & P. García Murillo (2002). Méthodologie pour l'étude des effets du Petit Âge Glaciaire dans le Parc Naturel de Doñana (Huelva, Espagne). Essai de reconstitution des formations palustres et du drainage superficiel. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie* 14: 359-367.
- Sousa, A. & P. García Murillo (2003). Changes in the wetlands of Andalucía (Doñana Natural Park, SW Spain) at the end of the Little Ice Age. *Climatic Change* 58: 193-217.
- Sousa A. & P. García Murillo (2005). *Historia ecológica y evolución de las lagunas peridunares del Parque Nacional de Doñana*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 170 pp.
- Sousa A., P. García Murillo, M. I. González Pérez & L. García Barrón (2004). La desaparición de las lagunas del entorno de Doñana (Huelva, España), y su relación con cambios climáticos recientes. *Publicaciones de la Asociación Española de Climatología* A.4: 716-724.
- Sousa, A., J. Morales, M. Aguilar, P. García-Murillo & L. García-Barrón (2005a). Existe-t-il une relation entre la disparition du paludisme dans le Sud-Ouest de l'Europe (Doñana, Huelva) et les changements climatiques récents?. En: XVIII Colloque Internationale de Climatologie 18. Genes. pp. 275-278.
- Sousa, A., J. Morales & P. García-Murillo (2005b). ¿Se están desecando los humedales de Doñana?. *Bio Andalucía* 4: 2-4.
- Sousa, A., J. Morales, P. García-Murillo, L. García-Barrón & S. Sahin (2006a). The place names referring to wetlands As a key to understanding historical changes of the mediterranean

- wetlands. Application to the Doñana Natural Park. En: *Proceedings of the International Conference on Climate Change and the Middle East: Past, Present and Future*. Istanbul. pp. 477-482.
- Sousa A., P. García Murillo & L. García Barrón (2006b). Paludismo, cambios climáticos y humedales en el litoral oriental onubense. *Aestuaría* 9: 179-204.
- Sousa, A., P. García Murillo, J. Morales & L. García Barrón (2006c). Los humedales del SW de España (litoral oriental onubense) como vínculo entre la malaria y los cambios climáticos más recientes. En: *Clima, Sociedad y Medio Ambiente*. Zaragoza. Asociación Española de Climatología. pp. 709-719.
- Sousa, A., L. García-Barrón, J. Morales & P. García Murillo (2006d). Post-Little Ice Age warming and dessication of the continental wetlands of the Aeolian sheet in the Huelva region (SW Spain). *Limnetica* 25: 57-70.
- Sousa, A., P. García-Murillo, V. Jurado, L. García-Barrón & J. Morales (2006e). *Regression of the small Atlantic coastal creeks in the Doñana environment (SW Spain)*. 5ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica, pp. 1-4. Sevilla.
- Trick T. & E. Custodio (2003). Hydronamic characteristics of the western Doñana Region (area of El Abalarío), Huelva, Spain. *Hydrogeology Journal* 12: 321-335.
- Valverde, E. (1880). *Provincia de Huelva*. E.1:750.000. Atlas Geográfico descriptivo de la Península Ibérica, Islas Baleares, Canarias y Posesiones Españolas en Ultramar por el Comandante graduado Capitán de Infantería D. Emilio Valverde y Álvarez, auxiliar que ha sido del depósito de los Guerra, Provincia de Huelva (sic). Imprenta y fotografía de la Biblioteca Nacional. Cartoteca Histórica del Servicio Geográfico del Ejército.
- Valladares F., J. Peñuelas & E. Luis Calabuig (2005). Impactos sobre los ecosistemas terrestres. En: Moreno, J. M. (Ed.). *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del Cambio Climático*. Ministerio de Medio Ambiente, pp. 65-112.
- Walther G. R., E. Post, P. Convey P., A. Menzel, C. Parmesan, J. C. T. Beebee, J. M. Fromentin, O. Hoegh-Guldberg & F. Bairlein (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416: 389-395.
- Weltzin J. F., S. D. Bridgham, J. Pastor, J. Chen & C. Harth (2003). Potential effects of warming and drying on peatlandplantcommunitycomposition. *Global Change Biology* 9: 141-151.

CHAPTER 11 / CAPÍTULO 11

*Possible effects of the climate
change on human health: allergy and
malaria*

**Posibles efectos del cambio
climático sobre la salud humana:
alergia y malaria**

Possible effects of the climate change on human health: allergy and malaria

Julia Morales González

Department of Plant Biology and Ecology. University of Seville. C/ Profesor García González, 241012 Seville. jmorales@us.es

ABSTRACT

It seems that the climate change could bring along a series of risks for human health as a result of extreme meteorological phenomena, atmospheric pollution and infectious vectors and rodents-transmitted diseases. Regarding the extreme meteorological phenomena, the last heat waves have disclosed the effect that high temperatures have on the morbidity and mortality rise. The forecasts point out that a greater number of heat waves, and even their strength, will be produced. The climate change can affect both the production and dispersion of the atmospheric pollutants as well. A greater frequency of anticyclonic conditions will decrease their dispersion, whereas an increase of temperatures can result in a greater emission of pollutants to the atmosphere, because of the use of air-conditioning systems. The biological pollutants released to the atmosphere by plants and fungi, also could be affected by the Global Warming, so that a generalized advancement of the pollen season start in some species would be produced, and in many cases a greater allergenic pollen and spores production and release, which would pose an significant threat to human health. The risk of a new outbreak of some infectious diseases as a consequence of the climate change has been the subject of controversy. Specifically, in the case of malaria, one of the most serious human parasitical diseases, it does not seem to constitute a great risk provided the present socioeconomic, hygienic-sanitary conditions in the first world maintain their standards. In Spain, the risk lies on the proximity of Africa, which converts the country into a passageway for possible infected people, and on the possibility of being invaded by Plasmodium-sensitive African vectors, to which the natives are resistant.

Key words: *climate change, pollen, spores, malaria, atmospheric pollutants, heat wave.*

Posibles efectos del cambio climático sobre la salud humana: alergia y malaria

Julia Morales González

Departamento de Biología Vegetal y Ecología. Universidad de Sevilla. C/ Profesor García González, 2. 41012 Sevilla. jmorales@us.es

RESUMEN

Parece ser que el cambio climático podría traer consigo una serie de riesgos para la salud como consecuencia de fenómenos meteorológicos extremos, contaminación atmosférica y enfermedades transmitidas por vectores infecciosos y roedores. En lo concerniente a los fenómenos meteorológicos extremos, las últimas olas de calor han puesto de manifiesto el efecto que tienen las altas temperaturas sobre el incremento de la morbilidad y la mortalidad. Las previsiones apuntan hacia una mayor aparición de las olas de calor y de su intensidad. El cambio climático puede afectar también, tanto a la producción como a la dispersión de contaminantes atmosféricos. Una mayor frecuencia de fenómenos anticiclónicos disminuirá su dispersión, mientras que un aumento de las temperaturas puede favorecer las emisiones de contaminantes a la atmósfera debido al uso de sistemas de refrigeración. Los contaminantes biológicos que son liberados a la atmósfera por plantas y hongos también pueden verse afectados por el Calentamiento Global de tal manera que se produciría un adelanto generalizado en el inicio de las emisiones polínicas de diferentes especies, y en muchos casos una mayor producción y liberación de polen y esporas alergógenas, lo que plantearía un riesgo significativo para la salud. La posibilidad de que se produzca un rebrote de determinadas enfermedades infecciosas como consecuencia del cambio climático ha dado lugar a una gran controversia. Concretamente en el caso de la enfermedad parasitaria más extendida que puede sufrir el hombre, la malaria, no parece que el riesgo sea muy grande, ya que para ello las condiciones socio-económicas e higiénico-sanitarias tendrían que disminuir mucho en los países del primer mundo. En España el peligro radica en su proximidad con el continente africano, lo que la convierte en una zona de tránsito de personas que pueden sufrir la enfermedad, y en la posibilidad de ser invadidos por vectores africanos susceptibles a cepas tropicales de Plasmodium a las que nuestros vectores son resistentes.

Palabras clave: cambio climático, polen, esporas, malaria, contaminantes atmosféricos, olas de calor.

INTRODUCCIÓN

Según los informes realizados por distintos grupos de expertos, el cambio climático podría traer consigo una serie de riesgos para la salud.

En los últimos años se ha podido comprobar como tanto el aumento de la temperatura como su disminución por debajo de unos valores umbrales, pueden provocar un aumento de la morbilidad y de la mortalidad. Existe una temperatura de disparo a partir de la cual se observa un incremento acusado de la mortalidad.

La última ola de calor importante por su intensidad y duración fue la del verano del 2003 que no sólo afectó a España, sino también a los países del centro de Europa. Durante el periodo de tiempo que duró esta ola de calor se produjeron en Francia 14.800 fallecimientos más que en años anteriores, en Italia 4.175 (entre los mayores 65 años), en Portugal 1.316, en Gran Bretaña 2.045 (Pirard, 2003). En España este incremento fue de 6.000 personas más (Martínez *et al.*, 2004). Concretamente en Navarra se produjo un aumento de la mortalidad del 23%, el Instituto de Salud Pública reconoció 12 personas fallecidas directamente relacionadas con la ola de calor (8 por golpe de calor y 4 por deshidratación), desconociéndose el número de fallecidos en los que pudo influir indirectamente el calor (Pejenaute, 2004).

En este sentido las previsiones no son muy halagüeñas, ya que apuntan hacia un aumento de la frecuencia e intensidad de las olas de calor, especialmente en los primeros meses del verano (Hulme *et al.*, 2002).

En cuanto a la contaminación atmosférica un informe reciente pone de manifiesto que ésta es responsable del 1,4% de muertes en todo el mundo (Cohen *et al.*, 2003). Entre los niños europeos de hasta 4 años de edad, del 1,8 al 6,4 % de todas las muertes serían atribuibles a la contaminación atmosférica en exteriores, y el 4,6 % al aire contaminado

del interior de edificios (Valent *et al.*, 2004). La concentración de contaminantes en la atmósfera depende de su producción y de su dispersión, y el cambio climático puede afectar a cualquiera de estos dos procesos. Una mayor frecuencia de fenómenos anticiclónicos puede hacer disminuir la dispersión de los contaminantes, el aumento de la temperatura se correlaciona directamente con un incremento en las concentraciones de ozono, e indirectamente con un incremento de las emisiones de contaminantes por el mayor consumo de energía (sistemas de aire acondicionado, refrigeración, conservación de alimentos, etc.).

Por otra parte, tanto el polen como las esporas que son liberadas a la atmósfera por plantas y hongos con la única finalidad de generar un nuevo individuo, pueden producir sobre las personas un efecto no deseable; son por lo tanto contaminantes atmosféricos de origen biológico. De nuevo, el cambio climático actuaría influyendo sobre la fenología de estos vegetales, modulando la producción y liberación de estas partículas biológicas.

Finalmente, el rebrote de la mayor parte de enfermedades infecciosas está condicionado por cambios evolutivos y medioambientales que pueden afectar a la interacción entre el patógeno y su vector, su hospedador intermediario y su reservorio, o bien a la relación entre patógeno, vector y hospedador con las condiciones medio ambientales. Un cambio de temperatura puede influir en la mayor o menor supervivencia del vector, condicionar su tasa de crecimiento, modificar la susceptibilidad al patógeno y su periodo de incubación, y cambiar la actividad y el patrón de la transmisión estacional. En cuanto a las precipitaciones, un aumento podría incrementar el número de criaderos de vectores y la densidad vegetal que proporcionaría cobijo y alimento a los roedores hospedadores intermediarios. Por el contrario, las inundaciones eliminarían el hábitat de vec-

tores y vertebrados. Las sequías por un lado favorecerían la formación de remansos en los ríos lo que aumentaría los lugares de cría, y por otro provocarían una mayor deshidratación del vector lo que le obligaría a alimentarse con mayor frecuencia, dando lugar a un mayor número de picaduras.

Otros factores que pueden afectar al resurgimiento de este tipo de enfermedades infecciosas son: el desarrollo urbano, la deforestación, los planes de irrigación y abastecimiento de aguas, la intensificación agrícola, la contaminación química, el incremento del comercio internacional y los movimientos de poblaciones.

De todos estos aspectos a continuación se van a analizar en más profundidad dos: las alergias y la malaria.

ALERGIA

En los países industrializados los casos de polinosis han aumentado considerablemente durante los últimos años. Se estima que en la actualidad el 23 % de la población que vive en las ciudades presenta reacciones positivas al test de hipersensibilidad frente a algún tipo de aeroalérgeno. Recientemente en Madrid se ha observado que un incremento en las concentraciones de polen de gramíneas y llantén en el aire del percentil 95 al 99, se asocia significativamente con un incremento en el número de visitas a urgencias hospitalarias por asma del 17 y 16 % respectivamente. También se encontró una asociación con el polen de Urticáceas, aunque en este caso el porcentaje fue inferior (Tobías et al., 2003).

El aumento generalizado de las extensiones de especies anemófilas por el desarrollo de prados y pastos a expensas de los bosques, y el aumento de cultivos de cereales, influye en este incremento de la rinitis y el asma bronquial alérgica; pero también lo hace una mayor exposición a los contaminantes químicos. Fundamentalmente,

el dióxido de azufre y el nitrógeno contribuyen a la inflamación de la mucosa pituitaria aumentando su permeabilidad, favoreciendo por tanto la penetración de los alérgenos. Existe una relación causa-efecto entre el aumento de los contaminantes y los problemas respiratorios, así como una mayor sensibilidad de las personas alérgicas a la contaminación, (Kagamimori et al., 1986). Kaneko et al., (1980) hallaron que la proporción de rinitis alérgica entre los niños en distritos contaminados por los humos de los vehículos era marcadamente superior a la de los distritos no contaminados. Masaharu Muranaka et al., (1986) en experimentos con ratones, encontraron que las partículas de los escapes de los motores diesel potencian la producción de IgE contra sustancias alergénicas aisladas del polen del cedro japonés.

Pero la exposición a algunos de estos contaminantes químicos además de potenciar, como hemos visto, los efectos de los alérgenos, pueden actuar directamente sobre la producción de polen. Rogers et al. (2004) cultivaron plantas de *Ambrosia artemisiifolia* (ambrosia) en ambientes con distintas concentraciones de CO₂ y observaron que plantas que crecían en presencia de altos niveles de CO₂ tenían una mayor biomasa y sus anteras producían más polen que las que crecían con bajas concentraciones de CO₂.

Por otra parte, la floración de las distintas especies vegetales y por tanto la liberación al aire del polen que producen, depende de las condiciones meteorológicas; al igual que depende la emisión de las esporas de los distintos géneros de hongos. Es fácil intuir que cualquier cambio en estas condiciones modificará la concentración de estos alérgenos en la atmósfera y por tanto sus efectos, y así un incremento de la temperatura media anual podría adelantar o alargar el periodo polínico para algunas especies con capacidad alergógena.

- Polen

En cuanto al posible efecto que puede tener el cambio climático sobre la concentración de los granos de polen en la atmósfera existen distintos trabajos que han puesto de manifiesto un adelanto generalizado en el inicio de la emisión polínica de diferentes especies en la Europa Occidental. Así, en el caso del polen de abedul (*Betula*), género muy alergógeno que además presenta una reacción cruzada con otros géneros muy próximos como el aliso (*Alnus*), el avellano (*Corylus*) y el carpe (*Carpinus*), e incluso con alimentos como la manzana, se ha observado una tendencia al adelanto progresivo de la estación polínica que en el caso del Reino Unido es de 5 días por década. Si las tendencias se mantienen en los próximos 10 años se adelantará 6 días más en ciudades como Londres, París, Lyon, Bruselas, Zurich o Viena (Emberlin et al., 2004), lo cual tiene un efecto sobre la longitud del periodo de liberación de polen a la atmósfera y por lo tanto sobre la salud.

Un ejemplo más llamativo aún del adelanto en la estación polínica de una especie, es el caso del polen del cedro japonés (*Cryptomeria japonica*) que ha comenzado a polinizar con una antelación entre 20 a 30 días desde 1983 al 2003 (Teranishi et al., 2004).

La ola de calor del verano del 2003 tuvo también un profundo impacto sobre la polinización de especies estivales. Así por ejemplo en un estudio realizado en el centro del valle del Ródano (Francia), se observó que la concentración de polen de Urticáceas en la atmósfera alcanzó niveles mucho más bajos de los esperados. Algo similar ocurrió con la especie *Ambrosia artemisiifolia*, su concentración fue menor, sin embargo su presencia en el aire duró más tiempo, recogándose niveles elevados durante el mes de septiembre cuando ya debería haber cesado su actividad (Penel & Sanjuán, 2004). De este modo vemos como esta especie vegetal, que

produce granos de polen de los más agresivos, se adapta a las condiciones extremas de calor y sequía, retrasando la estación de riesgo para aquellas personas sensibilizadas a este tipo de polen. En Suiza, esta misma ola de calor provocó que las gramíneas comenzaran a polinizar entre 1 y 2 semanas antes y terminaran de 10 a 18 días antes de lo habitual. Estas temperaturas tan elevadas también tuvieron su efecto sobre otro grupo de herbáceas, las Chenopodiáceas que produjeron y liberaron a la atmósfera una gran cantidad de polen (Gehrig et al., 2004).

En España también se han realizado estudios en este sentido. Galán et al., (2005) pusieron de manifiesto como se había producido un adelanto en la polinización del olivo en Andalucía, que podría llegar a ser de 1 a 3 semanas a final de este siglo si se mantienen las tendencias climáticas. No hay que olvidar que el olivo (*Olea europaea*), produce unos granos de polen con un elevado poder alergizante. En zonas donde abunda, la sensibilización a su polen es de un 30 a 40 % y normalmente va asociada a una sensibilización frente a otros tipos de polen. En España aproximadamente existen 4,5 millones de personas alérgicas al olivo y concretamente en Andalucía es la primera causa de alergia, con unos porcentajes de población alérgica que oscilan entre el 46 % de Málaga (Burgos, 1991) y el 89 % de Jaén (Florido, 1999). También se ha observado un adelanto en la estación polínica de las encinas, alcornoques y robles que para el horizonte del 2099 podría iniciarse de uno a dos meses y medio antes en algunas localidades españolas (García-Mozo et al., 2006).

La temperatura mínima es uno de los factores principales que influyen en la producción de polen de algunas especies anemófilas cuyo inicio de la floración depende de las temperaturas mínimas que se hayan dado en los meses previos. Un aumento de esta temperatura se relaciona con un adelanto de la floración y una mayor producción de polen

y por lo tanto el riesgo para la salud será mayor. Esta respuesta biológica convierte a las plantas en unos óptimos bioindicadores del cambio climático, en concreto de los cambios en las temperaturas.

- Esporas fúngicas

Los hongos producen esporas para la propagación de la especie, funcionan como una semilla, pero sin embrión. Su presencia en el aire que respiramos es constante y llegan a alcanzar unos niveles de concentración muy superiores a los granos de polen. En un estudio realizado en Sevilla durante los años 1997 y 1998 se observó que la concentración de esporas en la atmósfera era extremadamente superior al total de polen registrado, el 95 % y el 97 % respectivamente del contenido esporo-polinico de la atmósfera (Morales, 2004). Porcentajes muy similares a los citados por Royes (1987) en Jamaica, donde la concentración de esporas de hongos alcanza el 97,73 % del total del material observado, y por Lim et al., (1998) en Singapur con un 86-89,4 %. También se observaron diferencias en los picos máximos de concentración y en la fecha en que estos se producen. Así, mientras que en el caso del polen es durante la primavera cuando se presentan los niveles de concentración más altos, en el de las esporas es sin duda el principio del otoño cuando se dan los valores más elevados (Tabla 1).

ocasionar grandes pérdidas económicas. Su concentración en el aire está influenciada por un gran número de factores biológicos y medioambientales, entre los que destacan las variables climáticas. Por lo tanto la producción, liberación y dispersión de las esporas de los hongos también puede verse afectada por los cambios en el clima.

La diversidad de esporas que encontramos en el aire es muy grande y la influencia de los factores meteorológicos sobre su concentración varía según el grupo al que pertenezcan.

Volviendo al estudio que realizamos en Sevilla, aunque no disponemos de unos datos históricos largos, sí pudimos observar qué grupos de esporas de hongos eran los más abundantes y de qué modo las variables climáticas afectaban a su concentración. En primer lugar encontramos que el grupo más numeroso era el de las esporas producidas por los hongos imperfectos o deuteromicetes con el 85 % de la concentración total de esporas, seguido de las esporas de los basidiomicetes con un 9 %, las esporas de ascomicetes con un 4 % y por último el grupo formado por las esporas de mixomicetes, oomicetes y zigomicetes con el 2 % restante (Figura 1).

Las esporas de los hongos imperfectos son las que presentan una mayor concentración en la atmósfera no sólo de Sevilla, sino

Partículas	Porcentaje	Total anual registrado	Concentración máxima	Fecha
Esporas totales 97	95	1.326.570	43.424	29-09
Esporas totales 98	97	1.242.176	84.465	20-09
Polen total 97	5	66.903	5.477	30-03
Polen total 98	3	40.375	2.333	06-03

Tabla 1. Resultados principales de esporas totales y polen total durante los dos años de estudio.

Estas esporas fúngicas pueden originar enfermedades respiratorias, de hecho afectan a más del 30 % de la población alérgica (Gravensen, 1979); los cultivos agrícolas también son vulnerables a enfermedades producidas por su germinación, lo que puede

de la mayor parte del mundo (Vittal & Krishnamoorti, 1988; Palmas & Consentino, 1990; Rutherford et al., 1997). Son de una gran importancia además de por su elevada concentración, por su capacidad para producir trastornos alérgicos en el hombre y

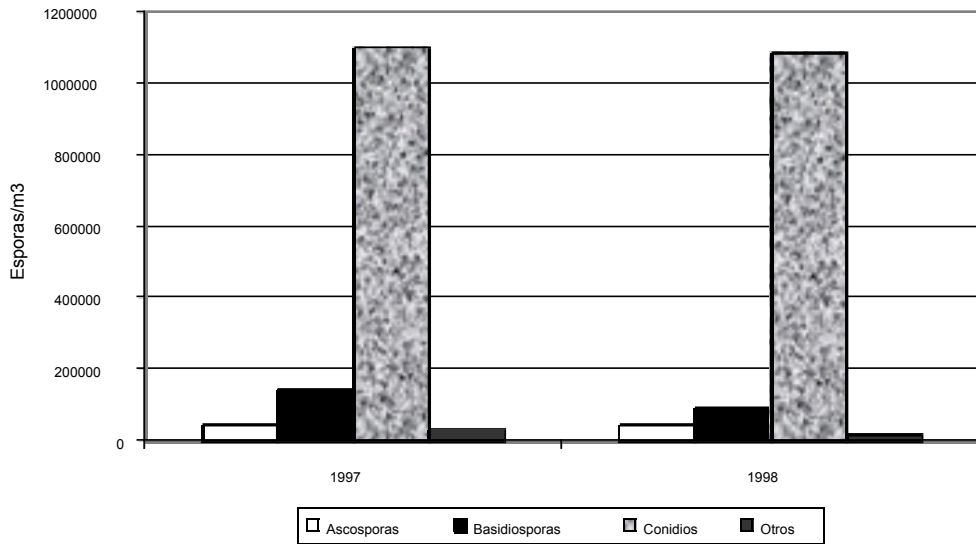


Figura 1. Concentraciones anuales totales de las distintas clases de esporas fúngicas durante los dos años de estudio.

diversas patologías en cultivos. En Sevilla se llegaron a identificar hasta 64 tipos distintos de estas esporas que en su mayoría vieron favorecida su producción y liberación al aumentar las temperaturas.

Dentro de este diverso y gran grupo merece la pena destacar al género *Alternaria* y al género *Cladosporium*. El primero de ellos por su alergenicidad, es citado por numerosos autores como el hongo alergógeno y productor de asma más importante (Hyde, 1972; Gravesen, 1979; Petersen & Sandberg, 1981; Subiza & Jerez, 1983; Grant, 1984; Chapman, 1986; Resano et al., 1998). Según Caretta (1992) la concentración de esporas de *Alternaria* capaz de producir síntomas alérgicos en el hombre es de 1.200 esporas/m³. Se han identificado los antígenos de alguna de sus especies, alguno de los cuales dan reacciones cruzadas con los antígenos de otros hongos alergógenos (Budd, 1986) e incluso pueden producir lesiones cutáneas (Hoog & Guarro, 1995). En el caso de Sevilla, los niveles de esporas de *Alternaria* nunca llegaron a sobrepasar el valor umbral, el máximo obtenido fue de 910 esporas/m³. Pero este género también muestra una relación positiva con las temperaturas, princi-

palmente con la temperatura mínima, luego, es muy posible que estas concentraciones suban a los niveles necesarios para desencadenar estos trastornos.

El segundo, *Cladosporium*, por su abundancia, ya que las medias diarias obtenidas durante el periodo de máxima concentración, el otoño, ascienden hasta las 7.264 esporas/m³, niveles muy elevados que superan con creces el umbral establecido por Caretta (1992) de 3.000 esporas/m³ a partir del cual se producen trastornos respiratorios alérgicos. Después de *Alternaria* es el género que causa con mayor frecuencia síntomas alérgicos. Se obtuvieron correlaciones significativas entre la concentración de *Cladosporium* en la atmósfera y la temperatura máxima, media y mínima. Es decir, si las tendencias del Calentamiento Global se cumplen debemos esperar que los niveles en el aire de las esporas de este género sean aún superiores y el riesgo para la salud será aún mayor. Además entre ambos géneros existe una reacción cruzada.

Los Basidiomicetes constituyen un grupo de hongos muy importante ya que a él pertenecen especies dañinas para las plantas como son los "tizones" y las "royas" que producen

grandes pérdidas económicas en la agricultura, otras parasitan árboles forestales, ornamentales e incluso pueden aparecer sobre cualquier objeto de madera. Producen abundantes esporas que son dispersadas por el viento a largas distancias; algunas especies llegan a liberar miles de millones de esporas al día. Muchas de estas esporas son importantes aeroalérgenos que intervienen en procesos asmáticos y rinitis alérgicas. De hecho, según Lehrer & Horner (1990), del 20 al 30 % de los pacientes con síntomas alérgicos de tipo respiratorio presentan tests cutáneos positivos a estas esporas. Las lluvias durante el otoño favorecen el crecimiento de estos hongos, produciéndose la mayor concentración de esporas en el aire durante el mes de noviembre, durante el cual se alcanzaron en Sevilla concentraciones máximas diarias de hasta 4.746 esporas/m³. En cuanto a su comportamiento en relación con las temperaturas es muy dispar entre los 18 tipos diferentes encontrados. Algunos géneros como *Ganoderma* y *Ustilago* se correlacionan positivamente con las temperaturas, el resto, salvo *Coprinus* que únicamente se correlaciona con la temperatura mínima, no se relacionaron o lo hicieron negativamente.

Dentro de este grupo solo haremos mención al género *Ustilago*, por ser uno de los más frecuentes e importantes desde el punto de vista económico, porque produce el tizón o carbón principalmente en cereales, y desde el punto de vista sanitario porque sus esporas han sido citadas como alergógenas por distintos autores (Hyde, 1972; Subiza & Jerez, 1983). A las esporas de este género se las considera esporas de dispersión por aire seco y las altas temperaturas favorecen su producción y liberación. ¿Las olas de calor pueden por lo tanto incrementar su concentración? Cabría pensar que sí.

Para finalizar mencionaremos someramente al grupo de los Ascomicetes cuyas esporas aparecen con mayor frecuencia en aquellos meses en los cuales las precipitaciones son

más abundantes. A este grupo pertenecen algunos hongos fitopatógenos y hongos cuyas esporas tienen capacidad alergógena como *Leptosphaeria* (Burge, 1986), muy frecuente en zonas industrializadas (Hasnain, 1993). Por lo general un aumento de las temperaturas no va a favorecer el aumento de este grupo de esporas en el aire. Sin embargo, los ascomicetes utilizan las salpicaduras de gotas de lluvia como mecanismo de liberación de sus esporas, que se registran en una mayor proporción en días lluviosos y durante los días secos que siguen a días lluviosos. Los cambios previstos en las tendencias de las precipitaciones podrían favorecer el incremento de los niveles de esporas de ascomicetes en el aire.

De todo lo visto anteriormente podemos extraer, por tanto, cómo los cambios en el clima debido al Calentamiento Global pueden incrementar la abundancia de ciertos pólenes y esporas alergógenas y plantear un riesgo significativo para la salud.

MALARIA

La Malaria está considerada como la más importante de todas las enfermedades parasitarias que afectan al hombre. Existen 103 países endémicos en los cuales se producen de 1 a 3 millones de muertes al año (White & Breman, 1994).

La malaria está producida por un protozoo que pertenece a distintas especies del género *Plasmodium*: *P. vivax*, *P. ovale*, *P. malariae* o *P. falciparum*, esta última especie es la más peligrosa. El individuo que la padece presenta unos picos febriles cada dos o tres días y una destrucción de sus hematíes. Son las hembras de mosquitos del género *Anopheles* las que transmiten esta enfermedad una vez transcurridos diez días después de haber sido infectadas con el protozoo.

La duración de la metamorfosis de estos mosquitos desde su fase de huevo a la fase adulta varía según la temperatura ambien-

tal, desde veinte días a 20 °C, o tan solo una semana si la temperatura sube hasta 31 °C. Las puestas de los huevos se realizan al cuarto o quinto día de vida del mosquito y se repiten cada dos o tres días coincidiendo con la picadura en busca de sangre. Una vez que el mosquito se ha infectado puede transmitir el parásito durante toda su vida, que puede ser de unas cuatro semanas o incluso de hasta seis meses como en algunas especies de zonas templadas. Existe una temperatura óptima tanto para el desarrollo del mosquito como del protozoo, que en este caso es de 20 a 27 °C para las hembras de *Anopheles* y de 22 a 30 °C para el parásito. Por lo tanto por debajo de los 15 °C y por encima de los 38 °C no habrá transmisión de la enfermedad.

Esta enfermedad prevaleció en Europa hasta la II Guerra Mundial, aunque de España no se consiguió erradicar hasta el año 1964, siendo Doñana y su entorno una de las últimas zonas endémicas (Sousa et al., 2006). Por lo tanto, en Europa ya no existe malaria autóctona, sin embargo se han producido rebrotes esporádicos de la enfermedad, como por ejemplo el aparecido en algunas repúblicas de la antigua URSS en los años 90 como consecuencia del regreso de los militares que habían contraído la enfermedad en Afganistán.

En España también se han detectado casos de malaria importada o inducida por transfusiones o intercambio de jeringuillas. Actualmente el 85 % de estos casos corresponden a pacientes que provienen del centro y oeste de África (Rubio et al., 1999). El principal vector potencial en nuestro país es *Anopheles atroparvus* con una población muy extendida, aunque es resistente a las cepas tropicales de *P. falciparum* lo que limita la transmisión autóctona a partir de casos adquiridos en el África subsahariana (Ramsdale & Coluzzi, 1975; Junta de Andalucía, 1989).

El riesgo de re-emergencia de la Malaria debido al cambio climático ha sido tratado

en diversos paneles de expertos (Parry, 2000; McCarthy et al., 2001; Díaz et al., 2005) suscitándose una gran polémica al respecto. Loevinsohn (1994), ha establecido relaciones entre el incremento de esta enfermedad y el Calentamiento Global (especialmente con el incremento de las temperaturas medias mínimas), prediciendo que estos cambios climáticos pueden suponer modificaciones en los límites de las áreas de distribución de esta enfermedad. Esto resulta relevante por cuanto el análisis de las series de los observatorios onubenses obtenidos por García-Barrón (2000, 2002a y 2002b), apunta hacia un incremento de las temperaturas mínimas y una disminución de las precipitaciones primaverales, desde principios del S. XX. Sin embargo, Reiter (1998 y 2000) afirma que la posibilidad de un resurgimiento de la malaria, debido a las modificaciones vinculadas al cambio climático, supone ignorar la realidad y despreocuparse de la historia reciente de esta enfermedad. Bate (2004) coincide con esta postura, y califica incluso de alarmistas aquellos trabajos que apuntan en sentido contrario.

La única manera de dar luz a esta controversia es realizar investigaciones profundas en este sentido, estudiando no sólo la presencia del protozoo patógeno y de sus vectores, sino también la existencia de determinados tipos de humedales, que pueden verse afectados por cambios climáticos como la Pequeña Edad del Hielo (Sousa y García-Murillo, 2003).

En algunos países de Europa Occidental como Italia (Romi et al., 2001) o el Reino Unido (Kuhn, 2003; Chin & Welsby, 2004), ya se han realizados diferentes estudios que analizan el riesgo de re-emergencia de malaria motivados por cambios en el clima. Si bien estos resultados no son tan definitivos como los equivalentes realizados en África (Nchinda, 1998), sí contemplan determinados riesgos vinculados al Calentamiento Global.

El reestablecimiento de la enfermedad en España, a nivel epidémico, parece improbable según asegura el reciente informe preliminar sobre el impacto del cambio climático (Díaz et al., 2005), a no ser que se produzca un deterioro drástico de las condiciones socio-económicas e higiénico sanitarias. Aunque cabría la posibilidad de que vectores africanos susceptibles a cepas tropicales de *Plasmodium* invadieran el sur de

la península Ibérica (López-Vélez & García Camacho, 1998).

AGRADECIMIENTOS

Los resultados que se recogen en este capítulo han sido financiados parcialmente por el Ministerio Español de Educación y Ciencia (proyecto CGL 2006-07194\BOS).

BIBLIOGRAFÍA

- Bate, R. (2004). Climate Change and Mosquito-Borne Disease: causal link or green alarmism?. *American Enterprise Institute for Public Policy Research* March-April 2004: 1-6.
- Budd, T. W. (1986). Allergens of *Alternaria*. A review of recent concepts. *Grana* 25: 147-154.
- Burge, H. A. (1986). Some comments on the aerobiology of fungus spores. *Grana* 25: 143-146.
- Burgos, F. (1991). Pólenes y Medio ambiente: sensibilizaciones polínicas en Andalucía. XX Reunión de la Asociación de Alergólogos e Inmunólogos del Sur. Libro del Congreso. Huelva. 134-141 pp.
- Caretta, G. (1992). Epidemiology of allergic disease: The fungi. *Aerobiologia* 8: 439-445.
- Cohen, A. J., H. R. Anderson, B. Ostro, K. D. Pandey, M. Kryzanowsky & N. Kuenzly (2003). Mortality impacts of Urban Air Pollution. En: *Comparative Quantification of Health Risks: Global and Regional Burden of Disease. Attributable to Selected Major Risk Factors*. Ezzat M., A. D. Lopez, A. Rodgers & C. J. L. Murray (eds.). Organización Mundial de la Salud. Ginebra.
- Chapman, J. A. (1986). Aeroallergens of southeastern Missouri, USA. *Grana* 25: 235-246.
- Chin, T & P.D. Welsby. (2004). Malaria in the UK: past, present and future. *Postgraduate medical journal* 80: 663-666.
- Díaz, J., F. Ballester & R. López-Velez. (2005). Impactos sobre la salud humana. En: Moreno Rodríguez, J. M: (Ed.). *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del Cambio Climático*. Ministerio de Medio Ambiente, pp. 727-772.
- Emberlin, J., M. Detandt, R. Gehrig, S. Jaeger, M. Laaidi, N. Nolard, A. Rantio-Lehtimäki & A. Stach. (2004). The impact of recent climate changes in Europe on the start of *Betula* (birch) pollen seasons in seven countries. *Polen* 14: 89-90.
- Florido, J. F., P. G. Delgado, B. S. de San Pedro, J. Quiralte, J. M. Saavedra, V. Peralta & L. R. Valenzuela (1999). High levels of *Olea europaea* pollen and relation with clinical finding. *International Archives Allergy and Immunology* 119: 133-137.
- Galán, C., H. García-Mozo, L. Vázquez, L., Ruiz, C. Díaz de la Guardia & M. M. Trigo (2005). Heat requirement for the onset of the *Olea europaea* L. pollen season in several sites in Andalusia and the effect of the expected future

- climate change. *International Journal of Biometeorology* 49: 184-188.
- García-Barrón, L. (2000). *Análisis de series termopluviométricas para la elaboración de modelos climáticos en el suroeste de España*, Tesis doctoral, Departamento de Física Aplicada. Universidad de Sevilla. Sevilla, 160 p.
- García-Barrón, L. (2002a). Evolución del régimen de precipitaciones en el oeste de Andalucía. *Aestuarina* 8: 219-240.
- García-Barrón, L. (2002b). Un modèle pour l'analyse de la sécheresse dans les climats méditerranéens. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie* 14: 67-73.
- García-Mozo, H., C. Galán, V. Jato, J. Belmonte, C. Díaz de la Guardia, D. Fernández, M. Gutiérrez, J. Aira, M. J. Roure, J. M., Ruiz, L., M. M. Trigo & E. Domínguez-Vilches. (2006). *Quercus* pollen season dynamics in the Iberian Peninsula: response to meteorological parameters and possible consequences of climate change. *Annals of Agriculture and Environmental Medicine* 13: 209-224
- Gehrig, R., B. Clot & B. Köhler (2004). The influence of the hot and dry summer 2003 on the pollen season in Switzerland: Does it show a future scenario of climate change? *Pollen* 14:93-94.
- Grant, E. (1984). *Sampling and identifying allergenic pollens and molds*. Blewstone press. San Antonio, Texas. 98 pp.
- Gravensen, S. (1979). Fungi as a cause of allergic disease. *Allergy* 34: 135-154.
- Hasnain, S. M. (1993). Allergenic implications of airborne *Leptosphaeria* ascospores. *Grana* 32: 315-318.
- Hoog G. S. & J. Guarro (1995). *Atlas of Clinical Fungi*. Centraalbureau voor schimmelcultures & Universitat Rovira I Virgili. 720 pp.
- Hulme, M., G. J. Jenkins, X. Lu, J. R. Turnpenney, T. D. Mitchell, R. G. Jones, J. Lowe, J. M. Murphy, D. Hassell, P. Boorman, R. McDonald & S. Hill. (2002). Climate change scenarios for the United Kingdom: the UKCIPO2 scientific report. Norwich, Tyndall Centre for Climate Change Research, School of Environmental Sciences, University of East Anglia. 120 pp.
- Hyde, H. (1972). Atmospheric pollen and spores in relation to allergy. *Clinical and experimental Allergy*: 7: 153-179.
- Junta de Andalucía. (1989). *Control integral de mosquitos en Huelva. Estudio ecológico de poblaciones larvarias*. Ed. Dirección General de Atención Primaria y Promoción de la Salud. Sevilla. 340 pp.
- Kagamimori, S. M., T. Katoh, Y. Naruse, M. Watanabe, J. Shinrai & S. Kawano (1986). The changing prevalence of respiratory symptoms in atopic children in response to air pollution. *Clinical Allergy* 16: 299-308.
- Kaneko, S., K. Shimada, H. Horiuchi, A. Endo, M. Kodama, N. Shinoda, T. Imai & K. Takiguchi (1980). Nasal allergy and air pollution. *Oto-Rhino-Laryngology Tokyo* 23 (suppl 4): 270.
- Kuhn, K. G., D. H. Campbell, B. Armstrong & C. R. Davies (2003). Malaria in Britain: past, present, and future. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 19: 9997-10001.
- Lehrer, S. & E. Horner (1990). Allergic reactions to basidiospores: identification of allergens. *Aerobiologia* 6: 181-186.
- Lim S. H., F. T. Chew, S. D. B. Mohd Dali, H. T. W. Tan, B. W. Lee & T. K. Tan (1998). Outdoor airborne fungal spores in Singapore. *Grana* 37: 246-252
- Loevinsohn, M. E. (1994). Climatic warming and increase malaria incidence in Rwanda. *Lancet* 343: 714-718.

- López-Vélez, R. & A. García Camacho (1998). Malaria, África y viajes: un triángulo de riesgo. *Revista Clínica Española* 198: 494-5.
- McCarthy, J. J., O. F. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken & K. S. White (2001). *Climate Change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge. 1032 pp.
- Martínez, F., F. Simón-Soria & G. López-Abente (2004). Valoración del impacto de la ola de calor del verano de 2003 sobre la mortalidad. *Gaceta Sanitaria* 18: 250-258.
- Masaharu, M., S. Suzuki, K. Koizumi, S. Takafuji, T. Miyamoto, R. Ikemori, & H. Tokiwa. (1986). Adjuvant activity of diesel-exhaust particulates for the production of Ig E antibody in mice. *Journal of Allergy and Clinical Immunology, St. Louis* 77: 616-623.
- Morales, J. (2004). *Estudio aerobiológico de las esporas de hongos en la atmósfera de Sevilla y su relación con las variables climáticas*. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla. 362 pp.
- Nchinda, T. (1998). Malaria: a reemerging disease in Africa. *Emerging Infectious Diseases* 4: 398-403
- Palmas, F & S. Consentino (1990). Comparison between fungal airspore concentration at two different sites in the south of Sardinia. *Grana* 29: 87-95.
- Parry, M. L. (2000). *Assessment of Potential Effects and Adaptations for Climate Change in Europe: the Europe ACACIA Project*. Parry, M.L. (Ed.), Jackson Environment Institute, University of East Anglia, Norwich, UK, 320 p.
- Pejenaute, J. M. (2004). La ola calor de agosto de 2003 en Navarra. En: *El clima entre el mar y la montaña. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología* A.4: 105-114.
- Penel, V. & B. Sanjuán (2004). Impact of an extreme heatwave and drought on ragweed (*A. artemisiifolia*) pollination in Middle Rhone valley (France). *Polen* 14: 92
- Petersen, U. N. & I. Sandberg (1981). Diagnostics in allergic diseases by correlating pollen/fungal spore counts with patient scores of symptoms. *Grana* 20: 219-224.
- Pirard, P. (2003). Heat wave: a climatic deadly phenomena that can be prevented. *Enfermedades Emergentes* 5: 145-146.
- Ramsdale, C. D. & M. Coluzzi (1975). Studies on the infectivity of tropical African strains of *Plasmodium falciparum* to some southern European vectors of malaria. *Parassitologia* 17: 39-48.
- Reiter, P. (1998). Global-warming and vector-borne disease in temperate regions and at high altitude. *Lancet* 351: 839-840.
- Reiter, P. (2000). From Shakespeare to Defoe: Malaria in England in the Little Ice Age. *Emerging Infectious Diseases* 6: 1-11.
- Resano, A., M. L. Sanz. y A. Oehling (1998). Sensitization to *Alternaria* and *Cladosporium* in asthmatic patients and its vitro diagnostic confirmation. *Journal Investigational Allergology and Clinical Immunology* 8: 353-358.
- Rogers, C. A., P. Wayne, M. L. Muilenberg, C. Wagner, F. Bazzaz & P. Epstein. (2004). Spring germination date and CO₂ concentration influences pollen production in ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.). *Polen* 14: 91-92

- Romi, R., G. Sabatinelli & G. Majori. (2001). Could malaria reappear in Italy?. *Emerging Infectious Diseases*, 7: 915-919.
- Royes, V. K. J. (1987). Some components of the air spora in Jamaica and their possible medical application. *Grana*, 26: 151-157.
- Rubio, J. M; A. Benito, P. J. Berzosa, J. Roche, S. Puente, S., M. Subirats, R. López-Vélez, L. García & J. Alvar (1999). Usefulness of seminested multiplex PCR in surveillance of imported Malaria in Spain. *Journal of Clinical Microbiology* 37: 3260-3264.
- Rutherford, S., J. A. K. Owen & R. W. Simpson (1997). Survey of airspora in Brisbane, Queensland, Australia. *Grana* 36: 114-121.
- Sousa A. & P. García-Murillo (2003). Changes in the Wetlands of Andalusia (Doñana Natural Park, SW Spain) at the End of the Little Ice Age. *Climatic Change* 58: 193-217.
- Sousa A., P. García-Murillo, J. Morales González & L. García-Barrón (2006). Los humedales del SW de España (litoral oriental onubense) como vínculo entre la malaria y los cambios climáticos más recientes. En: *Clima, Sociedad y Medio ambiente*. Zaragoza. Asociación Española de Climatología. pp. 709-719.
- Subiza, E. & M. Jerez (1983). Concentración de esporas de hongos en la atmósfera de Madrid (Método volumétrico). En: Sole de Porta, N. & M. Suárez Cervera (eds): *Actas del IV Simposio de Palinología*: 277-293. Barcelona.
- Teranishi, H., T. Katoh, K. Kenda & S. Hayashi (2004). Global Warming and the earlier start of Japanese-cedar (*Cryptomeria japonica*) pollen season in Toyama, Japan. *Polen* 14: 90.
- Tobías, A., I. Galán, J. R. Banegas & E. Aranguéz (2003). Short term effects of airborne pollen concentrations on asthma epidemic. *Thorax* 58: 708-10.
- Valent, F., D. Little, R. Bertollini, L. E. Nemer, F. Barbone & G. Tamburini (2004). Burden of disease attributable to selected environmental factors and injury among children and adolescents in Europe. *Lancet* 363: 2032-2039.
- Vittal, B. P. R. & K. Krishnamoorti (1988). A census of airborne mold spores in the atmosphere of the city of Madras, India. *Annals of Allergy* 60: 99-101.
- White, J. N & J. G. Breman. (1994). Paludismo y babebiosis. En: *Harrison. Principios de Medicina Interna*. Isselbacher, K.J., E. Braunwald, J. D. Wilson, J. B. Martin, A. S. Fauci & D. L. Kasper (Eds.), págs. 1029-1041. Interamericana y McGraw-Hill. Madrid.

MITIGATION AND ADAPTATION

ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN

CHAPTER 12 / CAPÍTULO 12

***Scenarios and climate model
forecasting for 21st century***

**Escenarios y predicción de los
modelos climáticos para el siglo
XXI**

El cambio climático en Andalucía: evolución y consecuencias medioambientales
Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía): 229-246 (2007)
© Los autores. Sevilla. España. ISBN: 978-84-96 776-40-1

Scenarios and climate forecasting models for 21st century

Luis Fernando López Cotín

Centro Meteorológico Territorial de Andalucía Occidental y Ceuta. Instituto Nacional de Meteorología. Ministerio de Medio Ambiente. Avda. de Américo Vespucio, 3, Apdo. 709. Isla de la Cartuja.41071 Sevilla. l.cotin@inm.es

ABSTRACT

Based on the IPCC reports, global climatic model outputs are presented as well as regional ones according applied downscaling techniques. Physical retrieval and scenarios definitions are included for a better Climate Change understanding.

Key words: *climate change, climate modelling, scenarios.*

Escenarios y predicción de los modelos climáticos para el siglo XXI

Luis Fernando López Cotín¹

Centro Meteorológico Territorial de Andalucía Occidental y Ceuta. Instituto Nacional de Meteorología. Ministerio de Medio Ambiente. Avda. de Américo Vespucio, 3, Apdo. 709. Isla de la Cartuja.41071 Sevilla. lcotin@inm.es

RESUMEN:

Basado en los informes del IPCC, se analizan los resultados principales de los modelos climáticos para el siglo XXI, descendiendo desde un punto de vista global al regional basado en los estudios de downscaling pertinentes. Se aporta las bases físicas para la comprensión del cambio climático, y se describen los escenarios en los que se han desarrollado los modelos.

Palabras claves: cambio climático, modelos climáticos, escenarios.

INTRODUCCIÓN

- Consideraciones previas

Los contenidos de la comunicación están ligados a los aspectos científicos del Cambio Climático, dedicando una amplia introducción a los conceptos generales asociados al cambio climático que permitan comprender la dificultad de llegar a conclusiones definitivas y cuantificadas sobre el mismo. También se mencionan las características que se prevén para Andalucía. No se analizan los impactos que el cambio climático lleva asociado. Las figuras y tablas están extraídas de las fuentes que se citan al final del capítulo.

En relación al Instituto Nacional de Meteorología, es conveniente resaltar que representa la herramienta técnica que la Administración General del Estado a través del Ministerio de Medio Ambiente, se dota para realizar los estudios científicos e informes técnicos que contribuyen al

conocimiento del alcance del cambio climático en España.

- El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC)

El objetivo principal del IPCC es realizar evaluaciones periódicas del “estado del arte” y apoyar, con un enfoque científico y técnico, a los Órganos de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Así, su función fundamental es evaluar la información científica, técnica y socio-económica relevante para la comprensión de las causas y efectos del cambio climático, así como de las alternativas para la lucha frente a ellos.

El IPCC, por tanto, no desarrolla investigación en sentido estricto, ni realiza el seguimiento de los indicadores climáticos básicos. Su aportación consiste en la recopilación y evolución de la información publicada y la preparación de la más significativa para su difusión. Como

¹ El contenido de este capítulo refleja la opinión del autor.

resultado de esa actividad, emite Informes de Evaluación, concretamente en el 2007 -durante la redacción de estas líneas- se presentaba el 4º informe.

otros (ver Figura 1).

Las interacciones entre los distintos componentes del sistema climático se tuvieron en cuenta a partir de 1992, con la conclusión

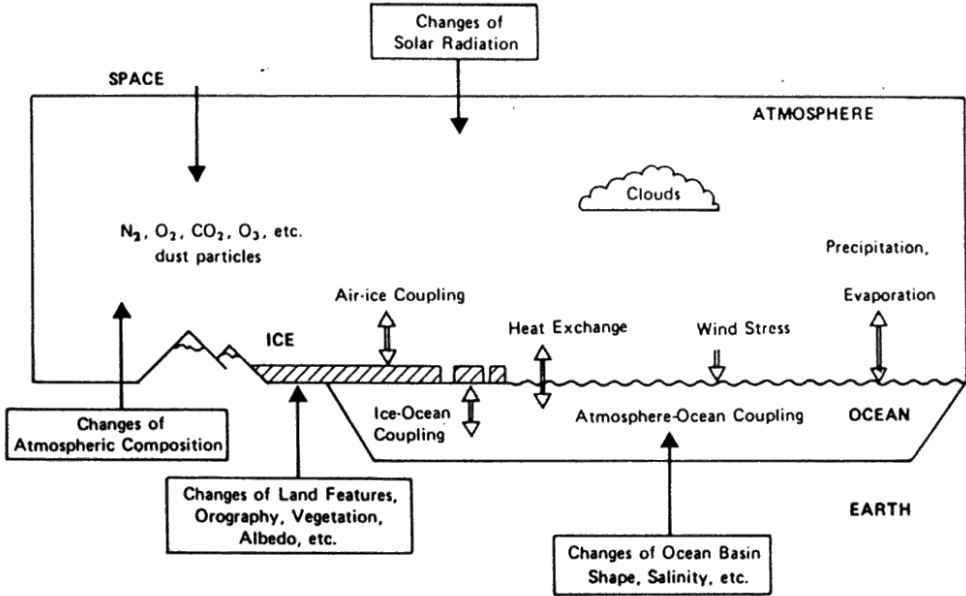


Figura 1. Componentes del Sistema Climático y sus interrelaciones (ver referencias al final del texto)

EL SISTEMA CLIMÁTICO

- Componentes del sistema climático

En el sentido más clásico, entendemos clima como tiempo promedio a lo largo de periodo de tiempo cronológico suficientemente largo como para que recoja las características y comportamientos atmosféricos en una determinada zona. No nos interesa ir más allá en definiciones, pero sí afirmar que la complejidad del sistema climático sólo se comenzó a desvelar científicamente, es decir con mediciones del sistema, a partir del *Global Atmospheric Research Programme* de OMM (GARP) que se llevó a cabo en 1975. No sólo se consideró la medición de los parámetros atmosféricos como temperatura, precipitación, humedad, etc., sino que se tuvo en cuenta en conjunto de sistemas como hielo, océano, química atmosférica y

de la existencia de fuerte acoplamiento entre los componentes.

Otra característica del sistema climático es la multiplicidad de escalas, desde un simple remolino de polvo hasta los grandes sistemas sinópticos.

- El clima, constante evolución

Es evidente la constante evolución del clima a lo largo de la historia de la Tierra. Sin embargo, el concepto de cambio climático, como es ahora utilizado, se refiere a la contribución antropogénica que parece ser definitiva.

Los testigos de hielo de la Antártida suministran unos datos valiosísimos para determinar los parámetros ambientales hace miles de años. La evolución de la temperatura a partir de registros directos (140 años aproximadamente) y los derivados son determinantes al significar, por un lado existencia de una variabilidad en los últimos 1000 años, así

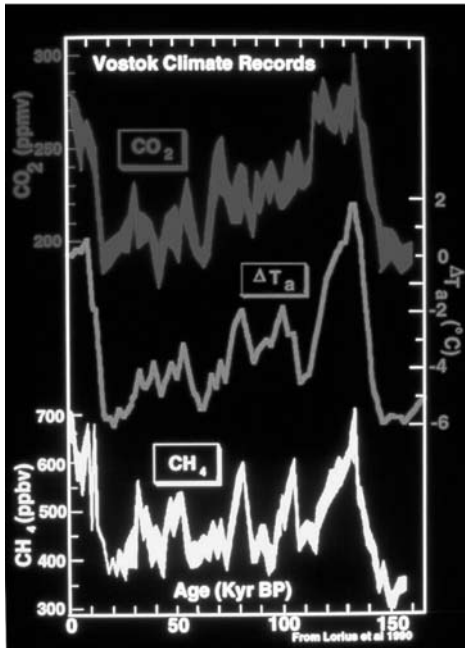


Figura 2. Comparación de la evolución temporal de los principales GEI y la temperatura media (Fuente: ver bibliografía adjunta).

como el fuerte incremento asociado a la Revolución Industrial.

- Los gases de efecto invernadero

El conocido efecto invernadero, básicamente la transmisión a través de la atmósfera de radiación de onda corta, de origen solar, y la absorción selectiva de radiación de onda larga emitida por la Tierra, se debe a la presencia de determinados gases, conocidos como GEI, en los que destacan el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4). La variabilidad de estos gases a lo largo de la historia conocida de la Tierra y su relación con la temperatura se pone de manifiesto en la Figura 2, que muestra una relación estrecha entre GEI y temperatura media global. El ascenso más reciente (a la izquierda de la gráfica) es mayoritariamente de origen antropogénico y se pueden asociar de una marea simple al consumo creciente de combustibles fósiles (CO_2) y la revolución verde agrícola, con un cambio fundamental del uso de tierra y aumento de las cabañas (CH_4).

- La observación y la evolución del clima

Aunque posiblemente entre los objetivos que llevaron a los países a organizar redes de observación del estado de la atmósfera no figuraba de una manera destacada el conocimiento del clima, sino más bien la determinación del tiempo presente con el objetivo de hacer predicciones sobre la evolución del mismo, lo cierto es que al cabo de varias decenas de años se tuvo un conjunto de datos muy valiosos para definir el clima de una región, entendiendo éste como algo estático, resultado de análisis estadísticos de los datos, básicamente de los valores medios y de la variabilidad de los mismos, es decir la desviación respecto al valor central o medio.

De esta manera se podría decir que el clima es lo que uno espera (en una determinada estación y en un territorio determinado) mientras que el tiempo es lo que uno encuentra. Naturalmente no coinciden porque el tiempo siempre muestra una variabilidad grande respecto a los valores diarios. Pero lo interesante es que el clima tampoco es constante y él mismo muestra una cierta variabilidad o tendencias lo que se ha puesto de manifiesto con medidas indirectas de registros históricos y prehistóricos, pero también a partir de los propios registros directos de las variables meteorológicas que se han llevado a cabo en los últimos pocos centenares de años. Las tendencias en el clima serían las que determinarían el cambio climático, como se recoge en la Figura 3 extraída de los informes del IPCC.

Al mencionar medidas indirectas se está haciendo referencia a las realizadas a partir de los testigos de hielo de barras de hielo extraídas de la Antártica, anillos de árboles centenarios, y otras, mientras que las medidas directas serían aquellas que realizan en los observatorios de los servicios meteorológicos, y que dejan

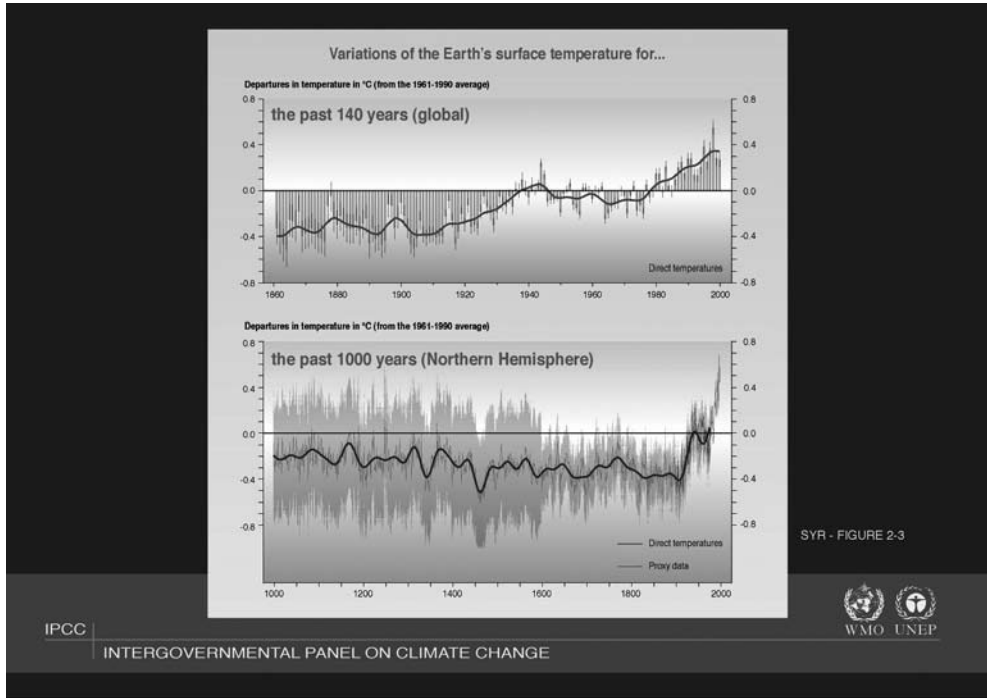


Figura 3. Evolución de la temperatura. Medida directa y registros indirectos. Fuente: Intergovernmental Panel Climate Change. <http://www.ipcc.ch>.

constancia directa de las variables como radiación, temperaturas, precipitación, cantidad e intensidad, humedad y otras.

Es necesario señalar que entre todas ellas, las variables por excelencia para la definición del clima son la temperatura y la precipitación.

FORZAMIENTOS DEL SISTEMA CLIMÁTICO

- Forzamientos naturales externos al sistema climático

El Sol es la fuente que principalmente actúa sobre el sistema climático. La radiación solar que llega a la Tierra no es absolutamente constante sino que presenta variaciones, algunas cíclicas, que influyen en la variabilidad del clima. Uno de los elementos considerados en este sentido es el número de manchas solares que son áreas con temperatura más baja que su alrededor.

Otros aspectos son debidos a las características de la órbita terrestre. Los ciclos de Milankovitch ponen se refieren a las precesión de los equinoccios, la excentricidad de la órbita terrestre y oblicuidad del eje de la Tierra, como se recopila en la Figura 4. Todos estos efectos tienen su influencia en la cantidad de radiación solar que recibe cada una de las zonas de la Tierra.

- Forzamientos naturales internos del sistema climático

Entendemos como forzamientos naturales internos aquellos que se desarrollan dentro del propio sistema climático, particularmente en la atmósfera (ver Figura 5). Muy concretamente hay que destacar los efectos que producen las erupciones volcánicas. Básicamente la cantidad de aerosoles emitida, cuando es de importancia, llega a disminuir la cantidad de radiación que penetra hasta el suelo, con disminución de la temperatura, tanto en tierra como sobre los océanos.

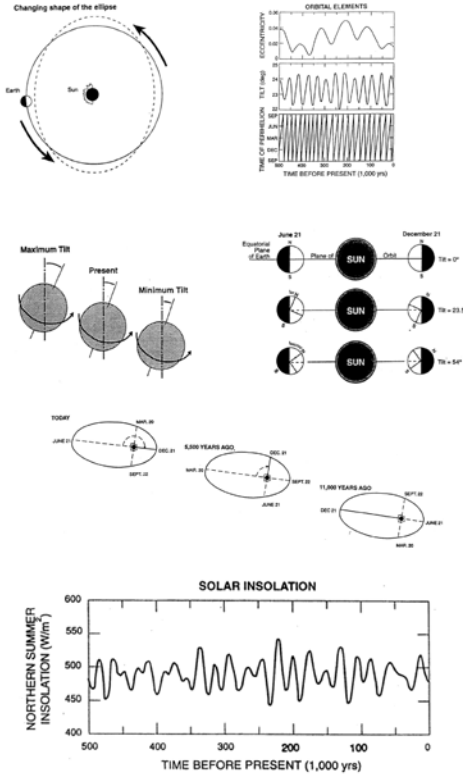


Figura 4. Forzamientos naturales externos del sistema climático (Fuente: ver bibliografía adjunta)

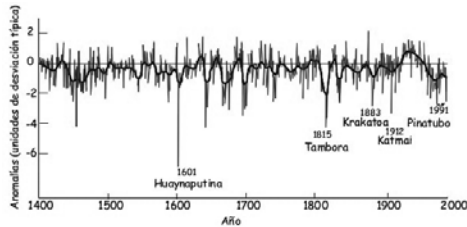


Figura 5. Erupción volcánica y evolución temporal de las mismas. Fuente: Uriarte (2003). <http://homepage.mac.com/uriarte/>

- Interacción océano- atmósfera: ENSO

Uno de los elementos que gobiernan los parámetros atmosféricos a gran escala es la interacción océano atmósfera que se pone de manifiesto especialmente en los fenómenos como El Niño y La Niña en el Pacífico ecuatorial. Las variaciones del patrón de comportamiento de estos fenómenos como también la oscilación del Atlántico Norte (diferencia de presión en

superficie en el Atlántico a bajas y altas latitudes del Hemisferio Norte), son elementos considerados en los estudios de cambio climático (Figura 6).

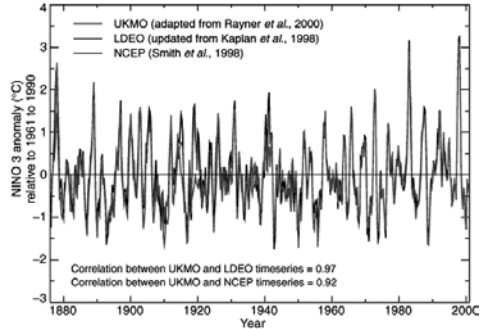


Figura 6. Variaciones de la temperatura de la superficie del océano entre 1876 y 2000 en la región 5° N a 5° S, 150° W a 90° W. Fuente: Intergovernmental Panel Climate Change. <http://www.ipcc.ch>

- Forzamiento antropogénico del sistema climático: “Cambio climático”

El proceso político arranca en 1972 con la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano (CNUMAH), emprendiendo las actividades necesarias para mejorar la comprensión de las causas naturales y artificiales de un posible cambio climático. En 1979 se convocó la Primera Conferencia Mundial sobre el Clima.

Más adelante, en 1983, se constituyó la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo conocida como Comisión Brundtland. Dicho informe subraya la necesidad de iniciar las negociaciones para un tratado mundial sobre el clima, investigar los orígenes y efectos de un cambio climático, vigilar científicamente el clima y establecer políticas internacionales para la reducción de las emisiones a la atmósfera de los gases de efecto invernadero.

Otro de los hitos importantes fue la creación en 1988 del Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), Agencia

especializada de las Naciones Unidas con el cometido de realizar evaluaciones periódicas del conocimiento sobre el cambio climático y sus consecuencias. Hasta el momento, el IPCC ha publicado tres Informes de Evaluación- en 1990, en 1995 y en 2001 dotados del máximo reconocimiento mundial, y en 2007 se está elaborando el cuarto informe, cuya publicación se espera inmediata en el momento de redactar estas líneas.

A finales de 1990, tuvo lugar la celebración de la Segunda Conferencia Mundial sobre el Clima, reunión clave para que la ONU arrancara el proceso de negociación que condujese a la elaboración de un tratado internacional sobre el clima.

Progresivamente, en los diferentes informes del IPCC, en las conferencias y congresos celebrados sobre Cambio Climático, se ha ido consolidando la idea de la influencia antropogénica en el proceso, quedando ya prácticamente fuera de duda el que el hombre ha ejercido y está ejerciendo una clara influencia en el comportamiento del sistema climático.

- El delicado equilibrio del ciclo del Carbono

Dado que el CO_2 juega un papel fundamental en el proceso de cambio climático, es de extraordinario interés conocer el ciclo del Carbono en la naturaleza y los efectos que produce la perturbación humana en el mismo. En la Figura 7 se indican los principales componentes del ciclo del carbono, reservorios y procesos interactivos (a), así como la perturbación antropogénica y sus efectos sobre el balance total (b). Una información más detallada se refiere al ciclo en el océano (c) y sobre tierra (d).

- Evolución Temporal del ciclo del carbono

La Figura 8 muestra la variación de la concentración de fondo de CO_2 . La naturaleza estacional de la señal

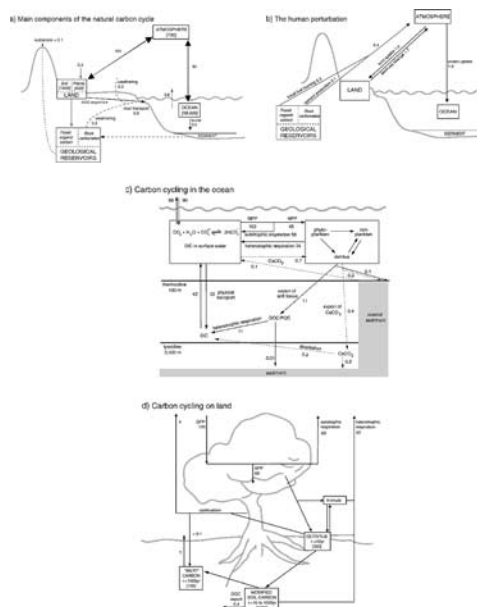


Figura 7. Los componentes naturales del ciclo de carbono y la perturbación antropogénica en el mismo (Fuente: ver bibliografía adjunta).

se debe al predominio de la señal del hemisferio norte donde se encuentra la mayor parte de tierras emergidas y por tanto donde la vegetación se desarrolla mayoritariamente.

- Evolución de los Gases de Efecto Invernadero

No sólo el CO_2 interviene en el cambio climático a través de la modificación del efecto invernadero en el conjunto de la Tierra, sino también hay que considerar el

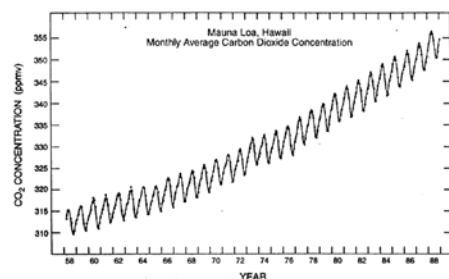
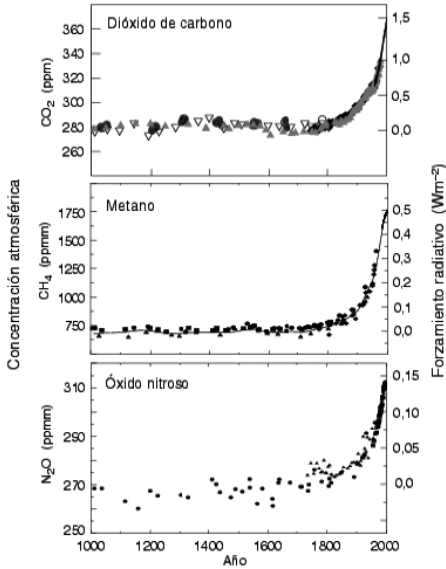


Figura 8. Variación de la concentración de fondo de CO_2 registrada en el observatorio de Mauna Loa, Hawaii (Fuente: ver bibliografía adjunta). Fuente: Intergovernmental Panel Climate Change. <http://www.ipcc.ch>

a) Concentraciones atmosféricas mundiales de tres gases de efecto invernadero (GEI) bien mezclados



metano y óxidos nitrosos entre otros. En la figura se representan la evolución de estos gases durante los últimos 1000 años. Es evidente en todos los casos el fuerte incremento que se ha registrado desde la revolución industrial como se aprecia en la Figura 9.

- **Resultados de los forzamientos en el sistema climático**

El resultado de los forzamientos natural y antropogénico aparecen bien reflejados en la Figura 10. En realidad, los resultados más consistentes, contrastados con los registros disponibles apuntan a una combinación de ambos factores que en definitiva tienen cuenta la variación solar, la actividad volcánica así como las emisiones de gases de efecto invernadero y los aerosoles sulfatados.

Figura 9. Evolución temporal de los gases de efecto invernadero. Fuente: Intergovernmental Panel Climate Change. <http://www.ipcc.ch>

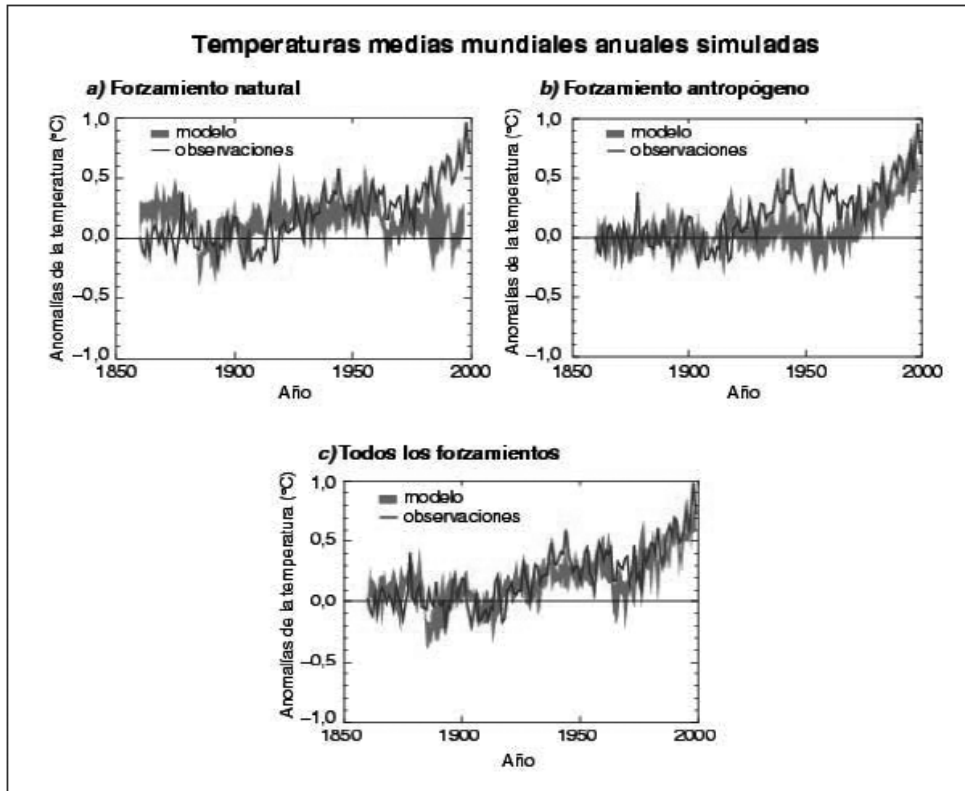


Figura 10. Temperaturas medias mundiales anuales simuladas. Fuente: Intergovernmental Panel Climate Change. <http://www.ipcc.ch>

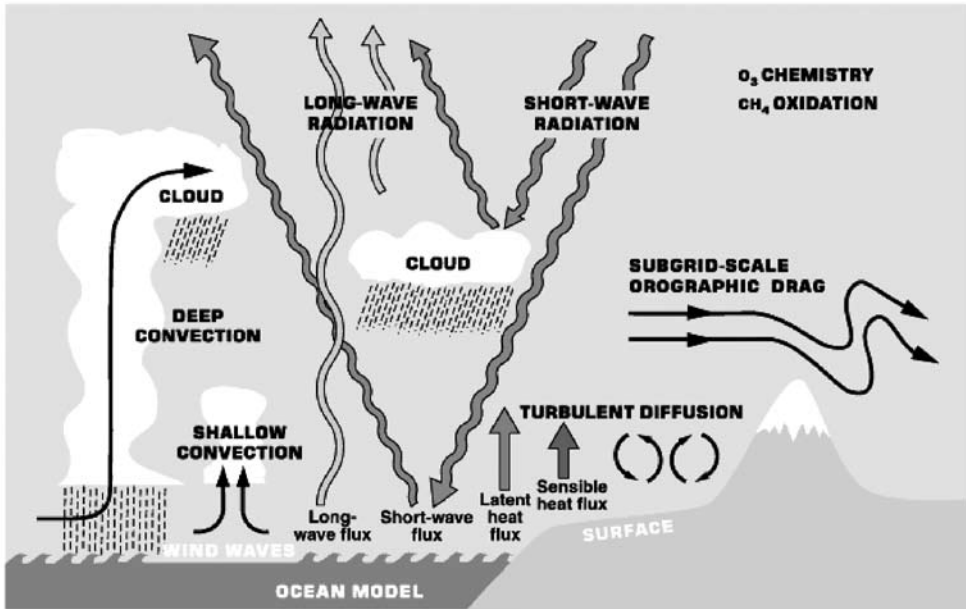


Figura 11. Procesos físicos considerados en los modelos climáticos. Fuente: Intergovernmental Panel Climate Change. <http://www.ipcc.ch>.

FUNDAMENTOS PARA LA MODELIZACIÓN DEL CLIMA

- Procesos físicos descritos por los modelos numéricos

El desarrollo de los modelos numéricos se fundamenta en el avance explosivo de la capacidad de computación. Los modelos expresan condiciones simplificadas de la realidad (ver Figura 11), pero contienen el máximo de información relativa a los procesos físicos que se desarrollan en el sistema climático. Particularmente consideran los fenómenos atmosféricos, incluida la química atmosférica, las condiciones oceánicas como salinidad, la distribución de hielos marinos y la superficie terrestre como vegetación, y otros.

- Ecuaciones primitivas

La resolución de los procesos físicos se determina por una serie de ecuaciones diferenciales que no tienen solución lineal y que deben ser abordadas por medio de discretización espacio temporal como se indica en la Figura 12.

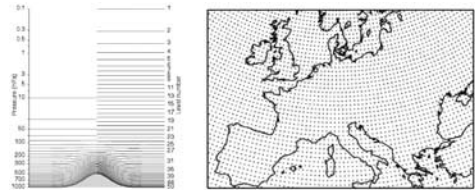


Figura 12. Discretización espacial de modelos numéricos. Fuente: Intergovernmental Panel Climate Change. <http://www.ipcc.ch>.

Uno de los elementos fundamentales para que los modelos den soluciones apropiadas es determinar con la mayor exactitud posible las condiciones iniciales. El algoritmo de asimilación (variables del modelo, interpolación, filtrado de escalas) es por tanto fundamental. Hoy en día el proceso de monitoreo de las condiciones atmosféricas se lleva a cabo desde observatorios sobre la superficie terrestre pero también obteniendo datos de las capas superiores de la atmósfera así como desde plataformas satelitales como se recoge en la Figura 13.

- Incertidumbres en la predicción de los modelos numéricos

De lo expresado anteriormente, la simplificación de los procesos y la toma

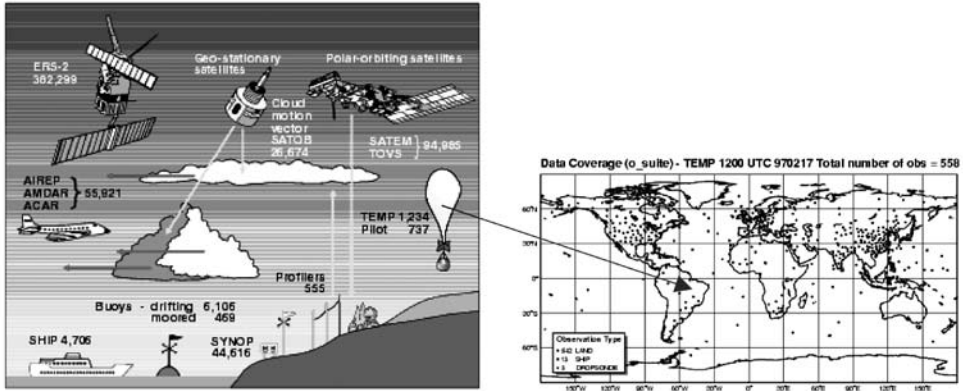


Figura 13. Monitoreo de la atmósfera para determinar las condiciones iniciales de los modelos numéricos. Fuente: Intergovernmental Panel Climate Change. <http://www.ipcc.ch>.

de datos necesariamente limitada, surge el concepto de incertidumbre en la predicción ofrecida por los modelos numéricos. Para minimizar el impacto de las incertidumbres se emplea la técnica de predicción por conjuntos (ensembles) ya que en lugar de una única predicción determinista se realizan muchas predicciones en paralelo, con análisis iniciales perturbados de manera que se obtienen estadísticos resultantes: valor central, predicción más probable o media y desviación de la misma es decir grado de incertidumbre. En definitiva se pasa a una predicción estadística o probabilística, más ajustada al tratamiento del problema (Figura 14).

A la pregunta de ¿cómo se generan los diferentes miembros de un ensemble? Se res-

ponde con varios criterios:

- . Uso de multimodelos
- . Análisis iniciales perturbados (pequeñas diferencias con respecto al análisis observado inicial)
- . Multianálisis: diferentes algoritmos
- . Multicondiciones de contorno: diferentes modelos o miembros de un mismo modelo
- . Multifísica (diferentes parametrizaciones)
- . Física estocástica

- Modelos numéricos para el clima

En los modelos numéricos para la evolución del clima, por su propia naturaleza de descripción de una situación a lo largo de un vasto periodo de tiempo, habrá que tener en cuenta no sólo las condiciones iniciales sino también la variación de los factores condicionantes (forzamientos) particularmente los antropogénicos ya que los naturales como la actividad volcánica es totalmente desconocida (Figura 15).

Por eso en la Figura 16 se indica bajo el título de *Climate Tools*, una doble pirámide que para ver las características de cada una de las vertientes procesos superficiales, dinámica y resolución, química o radiación que deben describir un modelo climático es necesario también contar con los factores que van a condicionar el punto de partida como son la economía, decisiones política, demografía o ecología. En definitiva se está

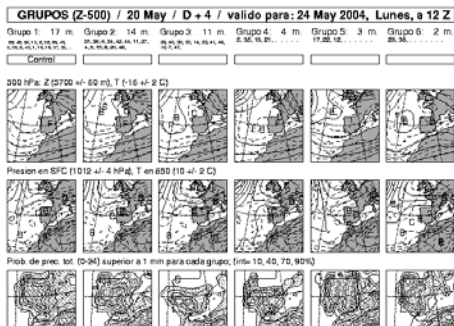


Figura 14. Típicos resultados de predicción estadística (Fuente: ver bibliografía adjunta).

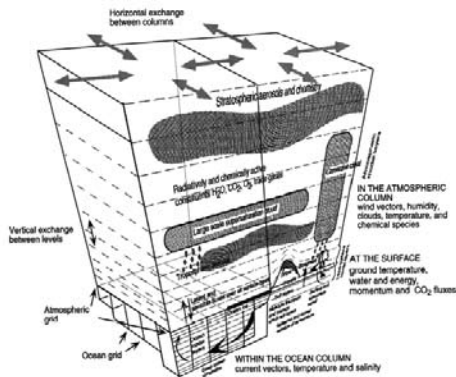


Figura 15. Componentes básicos de los modelos climáticos. Discretización en celdas, e interacción de los procesos entre ellas o internas a ellas (Fuente: ver bibliografía adjunta)

apuntando a la necesidad de fijar un marco donde evolucione el modelo climático. Estos entornos son conocidos como escenarios.

- Incertidumbres en las proyecciones climáticas

Respecto a las incertidumbres en las proyecciones climáticas, aún descartando la variabilidad de la naturaleza, hay que considerar:

- . Variabilidad en el forzamiento natural (sol, volcanes)
- . Variabilidad inter-escenario (de emisiones)
- . Variabilidad concentración
- . Variabilidad inter-modelos globales
- . Variabilidad interna de los modelos
- . Variabilidad por técnicas de regionalización

Lo que sintetiza en la Figura 17:

- Escenarios

Como se ha mencionado la modelización climática sólo tiene sentido si se fijan de antemano unas condiciones que van a influir en el sistema climático y que van a constituir diferentes forzamientos antropogénicos. Tienen en cuenta las hipótesis de población, evolución de la economía, el consumo de energía y uso de la tierra (prácticas agrícolas)

La definición de los distintos escenarios para la modelización del clima, tal y como

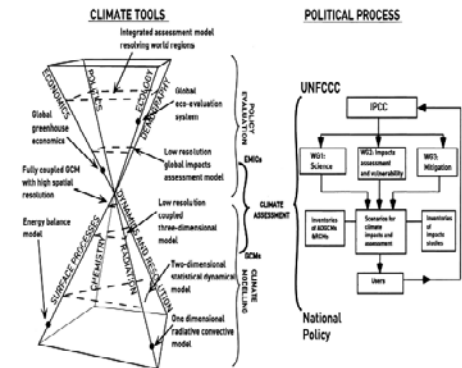


Figura 16. Herramientas climáticas, que marcan en definitiva los escenarios donde se va a desarrollar la evolución del sistema climático (Fuente: ver bibliografía adjunta).

los considera el IPCC vienen dados a continuación (<http://www.ipcc.ch>):

De forma gráfica estos escenarios se representan en la Figura 18:

ESCENARIOS Y PREVISIONES CLIMÁTICAS PARA EL SIGLO XXI

Según el 4º informe del IPCC, las evidencias del cambio climático se pueden resumir en:

- Las concentraciones globales de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso en la atmósfera han aumentado considerablemente como resultado de las actividades humanas desde 1750, y exceden, con mucho, los valores preindustriales determinados por testigos de hielo que abarcan varios miles de años. Los incrementos globales de las concentraciones de dióxido de carbono son debidos fundamentalmente al uso de combustibles fósiles y al cambio de uso de suelo, mientras que los aumentos en las concentraciones de metano y óxido nitroso se deben principalmente a la agricultura.

- El calentamiento del sistema climático es inequívoco, tal y como evidencian ahora las observaciones de los incrementos en las temperaturas medias del aire y los océanos, la fusión generalizada de hielo y nieve y el incremento medio global del nivel del mar.

La línea evolutiva y familia de escenarios **A1** describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo XXI y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Sus características distintivas más importantes son la convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales, acompañadas de una notable reducción de las diferencias regionales en cuanto a ingresos por habitante. La familia de escenarios A1 se desarrolla en tres grupos que describen direcciones alternativas del cambio tecnológico en el sistema de energía. Los tres grupos A1 se diferencian en su orientación tecnológica: utilización intensiva de combustibles de origen fósil (A1F), utilización de fuentes de energía de origen no fósil (A1T), o utilización equilibrada de todo tipo de fuentes (A1B).

La familia de líneas evolutivas y escenarios **A2** describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. Las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen muy lentamente, con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.

La familia de líneas evolutivas y escenarios **B1** describe un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza un máximo hacia mediados del siglo XXI y desciende posteriormente, como en la línea evolutiva A1, pero con rápidos cambios de las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y de la introducción de tecnologías limpias, con un aprovechamiento eficaz de los recursos. En ella se da preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a un desarrollo sostenible económico, social y medioambiental, así como a una mayor igualdad, pero con ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.

La familia de líneas evolutivas y escenarios **B2** describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a una economía, sociedad y medio ambiente sostenibles. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas B1 y A1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles locales y regionales.

- A escala continental, regional y de cuenca oceánica, se han observado numerosos cambios a largo plazo en el clima. Estos cambios incluyen cambios en el hielo y las temperaturas del Ártico, cambios generalizados en la cantidad de precipitación, salinidad de los océanos, patrones de viento, y aspectos de tiempo extremo, que incluyen sequías, precipitaciones fuertes, olas de calor e intensidad de ciclones tropicales.

Adicionalmente hay que señalar que en el mismo informe se indica que no se han observado cambios en algunos aspectos del clima:

. Las temperaturas del día y de la noche han aumentado en la misma magnitud.

. La extensión del hielo del mar de la Antártida continúa mostrando variabilidad interanual y cambios localizados, pero no muestra tendencias medias estadísticamente significativas,

. No hay evidencias suficientes para determinar si existen tendencias en la circulación meridional de retorno del océano o en fenómenos de pequeña escala como tornados, granizo, rayos y tormentas de polvo.

La información paleoclimática apoya la interpretación de que el calor de la última mitad del siglo pasado es inusual al menos en los últimos 1300 años. La última vez que las regiones polares fueron significativamente más cálidas que ahora por un periodo largo (hace aproximadamente unos 125.000

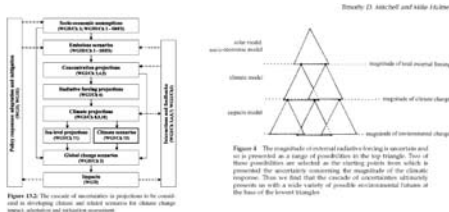


Figura 17. Cascada de incertidumbre en las proyecciones climáticas (Fuente: ver bibliografía adjunta).

años), las reducciones en el volumen de hielo polar produjeron un aumento del nivel del mar de 4-6 m.

La mayor parte del incremento observado en las temperaturas medias desde la mitad del siglo XX se debe, muy probablemente, al incremento observado en los gases de efecto invernadero antropogénicos. Las influencias humanas perceptibles se extienden ahora a otros aspectos del clima, incluyendo el calentamiento del océano, las temperaturas medias continentales, temperaturas extremas y patrones de viento.

Un elemento interesante del 4º informe del IPCC es la comparación entre las salidas de los modelos que utilizan únicamente forzamientos naturales al sistema climático de los que incluyen también los forzamientos

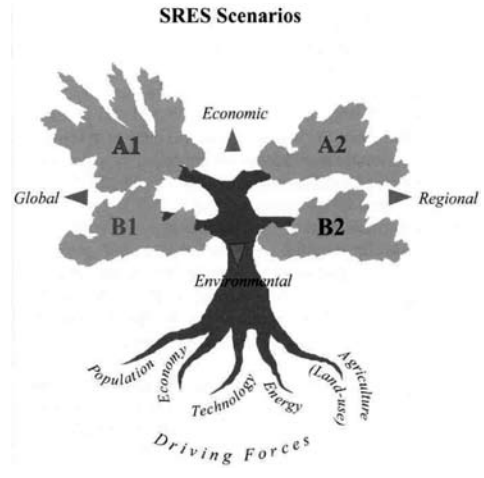


Figura 18. Escenarios para la modelización del clima. Fuente: Intergovernmental Panel Climate Change. <http://www.ipcc.ch>.

antropogénicos. El resultado es determinante, e indican resultados muy diferentes en uno u otro caso, como se aprecia en la Figura 19.

El análisis de los modelos climáticos junto con las limitaciones de las observaciones permite un dar un rango de probabilidad evaluado para la sensibilidad del clima por vez primera y proporcionan un aumento con-

Fenómeno ^a y dirección de la tendencia	Probabilidad de que la tendencia ocurriera a finales del siglo XX (generalmente después de 1960)	Probabilidad de influencia humana en las tendencias observadas ^(b)	Probabilidad de las tendencias basada en proyecciones para el siglo XXI usando escenarios IE-EE
Días y noches más cálidos y menos fríos en la mayoría de las superficies	Muy probable ^e	Probable ^d	Prácticamente cierto ^d
Días y noches más cálidos y más frecuentemente calurosos en la mayoría de las superficies	Muy probable ^e	Probable (noches) ^d	Prácticamente cierto ^d
Periodos cálidos/olas de calor. Incrementos de la frecuencia en la mayoría de las superficies	Probable	Más probable que improbable ^f	Muy probable
Episodios de precipitaciones fuertes. Incrementos de frecuencia (o proporción de pluviosidad total de lluvias fuertes) en la mayoría de las superficies	Probable	Más probable que improbable ^f	Muy probable
Incremento de las áreas afectadas por sequías	Probable en muchas regiones desde los años 70	Más probable que improbable	Probable
Incremento de la actividad de los ciclones tropicales intensos	Probable en algunas regiones desde 1970	Más probable que improbable ^f	Probable
Incremento de la incidencia de nivel del mar alto extremo (excluye tsunamis) ^g	Probable	Más probable que improbable ^h	Probable ⁱ

Tabla 1. Fenómenos y dirección de la tendencia de parámetros climáticos (4º informe IPCC). Fuente: Intergovernmental Panel Climate Change. <http://www.ipcc.ch>.

Caso	Cambio en la temperatura (°C en 2090-2099 con respecto a 1980-1999)*		Incremento del nivel del mar (m en 2090-2099 con respecto a 1980-1999)
	Mejor estimación	Rango de probabilidad	Rango basado en modelos excluyendo cambios dinámicos futuros rápidos en el flujo de hielo
Concentraciones constantes año 2000 ^b	0,6	0,3-0,9	NA
Escenario B1	1,8	1,1-2,9	0,18-0,38
Escenario A1T	2,4	1,4-3,8	0,20-0,45
Escenario B2	2,4	1,4-3,8	0,20-0,43
Escenario A1B	2,8	1,7-4,4	0,21-0,48
Escenario A2	3,4	2,0-5,4	0,23-0,51
Escenario A1FI	4,0	2,4-6,4	0,26-0,59

Tabla 2. Cambio en la temperatura según los diferentes escenarios establecidos por el IPCC. Fuente: Intergovernmental Panel Climate Change. <http://www.ipcc.ch>.

fianza en la comprensión en la respuesta del sistema climático al forzamiento radiativo.

Para las próximas dos décadas, a nivel global, las proyecciones apuntan a un calentamiento de unos 0.2 °C para un rango de escenarios de emisiones de IE-EE. Incluso si las concentraciones se hubieran estabilizado en los niveles del año 2000, podría esperarse un calentamiento de 0,1°C por década.

- Previsiones globales para clima para el siglo XXI

La Figura 20 presenta un resumen de las previsiones a escala planetaria. Las previsiones de los valores de temperatura dependen de los escenarios que se consideren, por tanto de la evolución del contenido de los GEI en la atmósfera.

De cualquier manera, es indudable el sentido creciente de todos los parámetros asociados al aumento de las emisiones y por tanto de las temperaturas y de sus efectos secundarios como el aumento del nivel del mar.

- Consenso en la variación de la temperatura pero gran dispersión en la proyección de la precipitación

La temperatura y la precipitación tienen un comportamiento muy diferente. Mientras que para la temperatura hay convergencia entre los modelos climáticos, la precipitación muestra una mayor divergencia de acuerdo con la distribución geográfica.

PROYECCIONES CLIMÁTICAS PARA ANDALUCÍA

- Escenarios climáticos regionales

Las proyecciones climáticas globales en los diferentes escenarios de emisión que se consideren no tienen suficiente resolución espacial para la actual demanda. De hecho, las proyecciones climáticas regionales son esenciales para la planificación estratégica de ciertos sectores sociales, y para los que las salidas a nivel global resultan excesivamente generales. En la comunidad científica, en general, se entiende por proyección climática regional a una extensa zona caracterizada por parámetros homogéneos, tal como el entorno mediterráneo. Sin embargo, es necesario descender a escalas más pequeñas, como fruto de estos estudios es posible analizar los resultados para Andalucía.

Así como en las previsiones a escala global existe una convergencia en los resultados, principalmente en la temperatura, a escala regional los distintos modelos ofrecen considerables diferencias en simulaciones con el mismo forzamiento externo. Las causas para ello son, entre otras, la resolución espacial de estos modelos que no exige una descripción de la topografía no disponible, distribución tierra-océano suavizada, la parametrización que debe ser adecuada también a estos modelos y no son necesari-

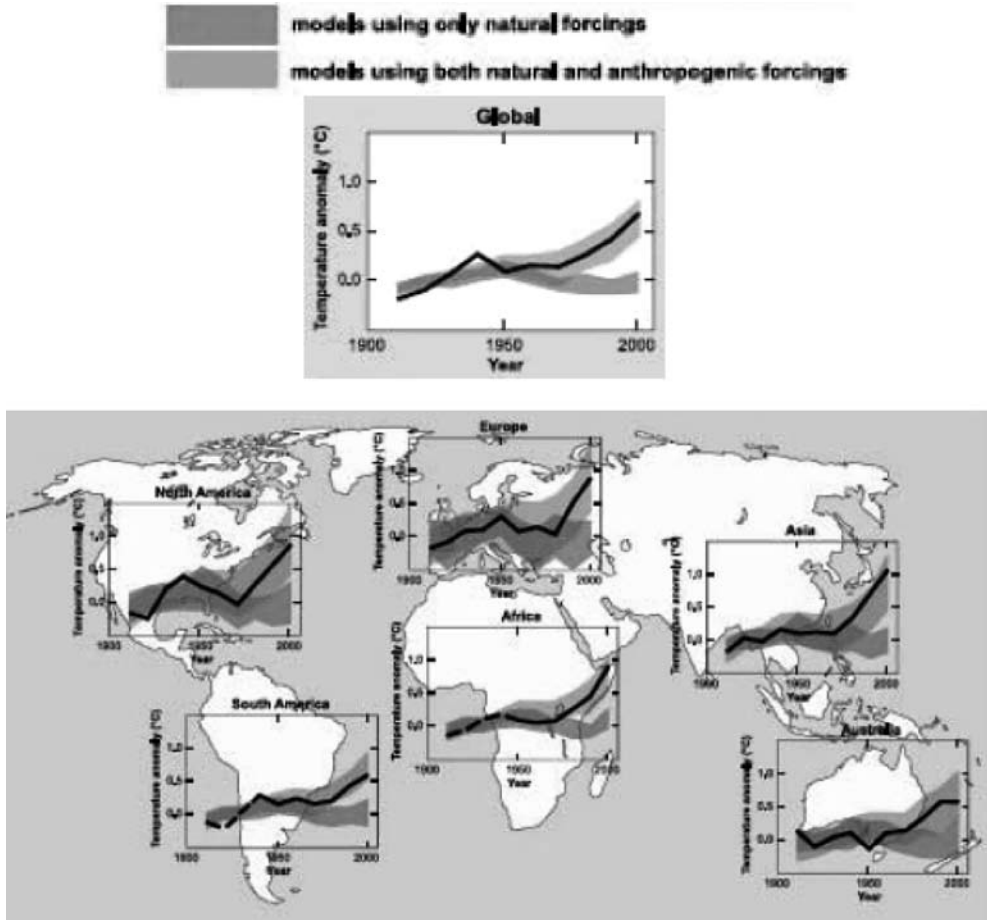


Figura 19. Resultado de modelos que utilizan únicamente forzamientos naturales al sistema climático y los que incluyen también los forzamientos antropogénicos. Fuente: Intergovernmental Panel Climate Change. <http://www.ipcc.ch>.

riamente iguales que las correspondientes a los modelos globales.

En definitiva, es posible simular el clima

global adecuadamente aunque los detalles regionales no se simulan de modo totalmente realista.

- Metodología del downscaling

El paso de proyecciones globales, con resoluciones espaciales del orden de 200-300 km, a las características regionales se hace por medio de diferentes técnicas de reducción de escala (*downscaling*). Estas técnicas adaptan las salidas de los modelos globales a las características fisiográficas de una determinada región (Wilby & Wigley, 1997).

Es importante tener también en cuenta que debido la variabilidad natural es mayor en las escalas regionales que en la global, y porque las técnicas de regionalización

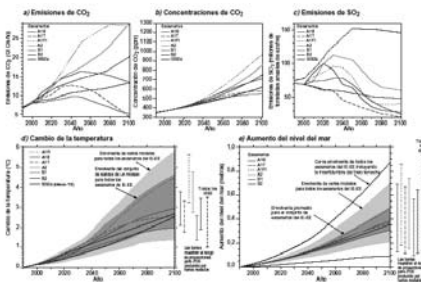


Figura 20. Resumen de previsiones para el siglo XXI, en función de los distintos escenarios, se fijan valores de GEI y de parámetros climáticos: temperatura y aumento del nivel del mar. Fuente: Intergovernmental Panel Climate Change. <http://www.ipcc.ch>.

introducen los detalles en las escalas no resueltas por la rejilla de los modelos globales es por lo que tienen mayor grado de incertidumbre.

Existen dos maneras de afrontar el problema, la regionalización dinámica y la regionalización estadística, para la predicción numérica del tiempo mediante el uso muy extendido de modelos atmosféricos de área limitada y de técnicas de adaptación estadística basadas en relaciones empíricas entre variables, tales como el MOS (Model Output Statistics) y el Perfect Prog (Perfect Prognosis), pero en los modelos climáticos además hay que tener en cuenta los procesos a escala interanual.

Las técnicas de regionalización dinámica son físicamente consistentes pero requieren un gran volumen de cálculo. Las técnicas estadísticas, que se basan en relaciones cuantitativas entre variables atmosféricas de gran escala (predictores) y las variables locales de superficie (predictandos), son relativamente simples y normalmente requieren poco cálculo, aunque los nuevos métodos no lineales desarrollados recientemente se basan en costosos algoritmos de optimización no lineal y requieren un tiempo mayor de cómputo.

- Resultados

En definitiva, hay que considerar que los estudios realizados para Andalucía, habría que considerarlos como susceptibles de revisión en los próximos años cuando las técnicas aplicadas se perfeccionen, pero aún así es interesante observar que ya los estudios actuales indican resultados de la regionalización sobre en Andalucía se muestran más acentuados que los correspondientes a los modelos globales.

Como se ha mencionado con anterioridad, los resultados dependen del escenario considerado. En las gráficas adjuntas se indican los incrementos en temperaturas máximas y mínimas, y de evolución de la precipitación obtenida a partir de técnicas de regionalización para los escenarios A2 y B2.

En resumen, la evolución media de las temperaturas máximas será más acusada, con una horquilla que va desde casi 6 °C a algo menos de 4°C dependiendo del escenario considerado. En relación a las temperaturas mínimas, de evolución más limitada, los valores esperados van desde unos 2 °C hasta algo más de 4 °C. De cualquier manera la tendencia de los datos de temperatura se manifiesta siempre en aumento, lo que se corresponde con la evolución de los modelos globales, como se aprecia claramente en la Figura 21.

En cambio para la precipitación, la divergencia de datos es mayor dependiendo de los escenarios. Sin embargo, la tendencia indica una disminución de la misma que podría llegar a ser del orden del 40% en el peor de los casos y tan sólo de un 10% en el caso más favorable, como se recoge en la Figura 22.

Esta divergencia de datos también está en perfecta concordancia con la tendencia que ofrecen los modelos globales, si bien, tanto al igual que en el caso de las temperaturas la acentúa las tendencias.

Por último, dentro de Andalucía, las mayores variaciones de las temperaturas hay que esperarlas en las comarcas del interior, mientras que en la zona atlántica, el aumento de las temperaturas evolucionará de manera más limitada.

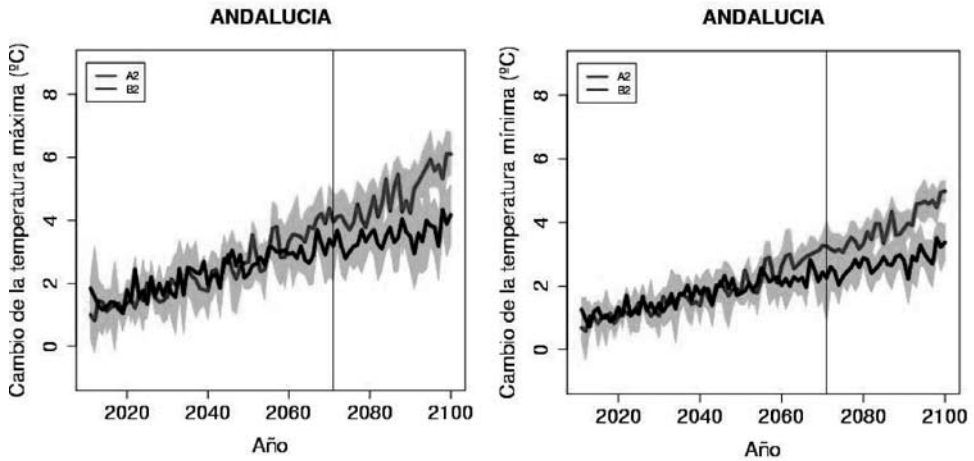


Figura 21. Evolución media temperaturas máximas y mínimas (técnicas dinámicas + estadísticas). Escenarios de emisión A2 y B2. Fuente: Estudio de Generación de Escenarios Climáticos en España. Instituto Nacional Meteorología. <http://www.inm.es>

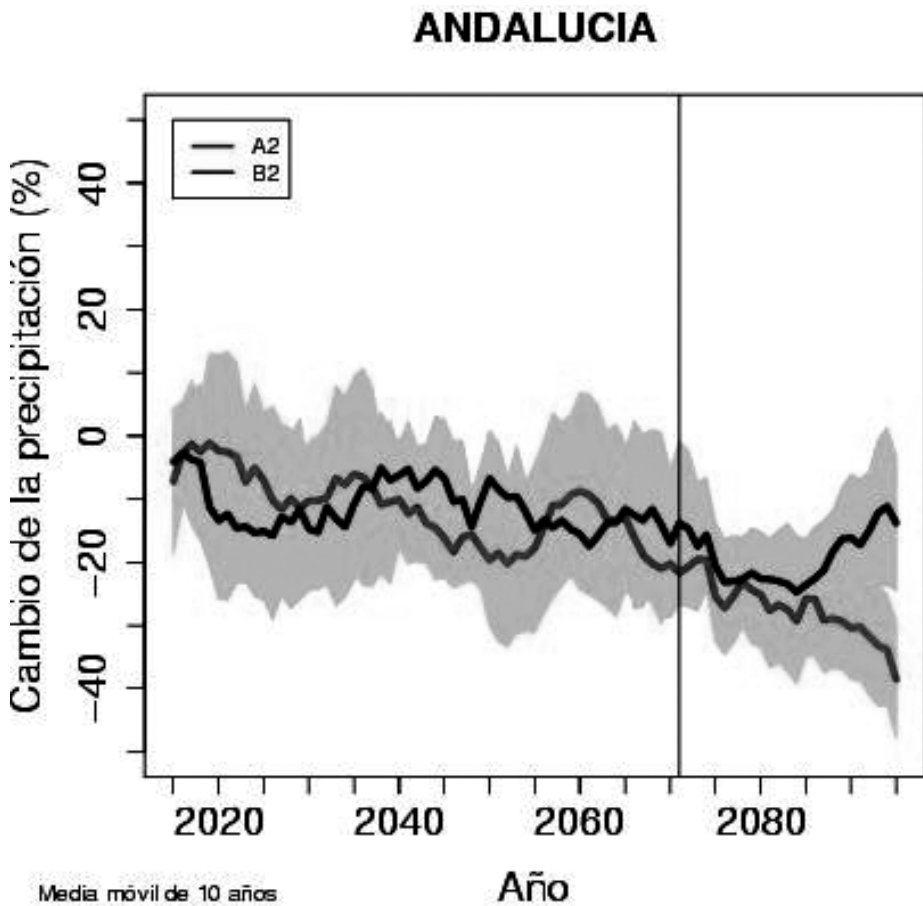


Figura 22. Evolución de la precipitación en porcentaje (técnicas dinámicas + estadísticas). Escenarios de emisión A2 y B2. Fuente: Estudio de Generación de Escenarios Climáticos en España. Instituto Nacional Meteorología. <http://www.inm.es>

BIBLIOGRAFÍA²

- Consejería Medio Ambiente. Junta de Andalucía. <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente>
- Estudio de Generación de Escenarios Climáticos en España. Instituto Nacional Meteorología. <http://www.inm.es>
- IPCC (2007). Summary for Policymakers. <http://www.ipcc.ch>
- Ministerio Medio Ambiente. <http://www.mma.es>
- Uriarte, A. (2003). Historia del clima de la Tierra). Ed. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Bilbao. 306 p. <http://homepage.mac.com/uriarte/>
- Wilby R. L. & T.M.L. Wigley (1997). Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. *Progress in Physical Geography* 21: 530-548.

2 En este apartado también se incluyen las principales fuentes de información de las que se han extraído las tablas y gráficas recogidas en este capítulo, cuyos derechos y copyright corresponde lógicamente a los autores que originalmente las elaboraron.

CHAPTER 13 / CAPÍTULO 13

***Information systems climatology: the
CLIMA (Andalusian Information
Subsystem for environmental
Climatology)***

**Los sistemas de información
climatológica: el CLIMA (sistema
de información de climatología
ambiental de Andalucía)**

Information systems climatology: the CLIMA (Andalusian Information Subsystem for environmental Climatology)

María Fernanda Pita López¹, Juan Mariano Camarillo Naranjo¹, Mariano Corzo Toscano² & José Ignacio Álvarez Francoso¹

¹Departamento de Geografía Física. Universidad de Sevilla. c/ María de Padilla s/n. 41004 Sevilla. mfrita@us.es; jmcamarillo@us.es; jose_afra@yahoo.es

²Empresa de Gestión Medioambiental, S.A (E.G.M.A.S.A). c/ Johan G. Gutenberg. Isla de la Cartuja. 41092 Sevilla. mariano.corzo.ext@juntadeandalucia.es

ABSTRACT

The meteorological variables are immersed in a wide spectrum of physical-environmental, territorial, social and economical factors which affect our societies. The production process of meteorological information has undergone, at the same time, an exponential increment in the last two decades throughout the Spanish territory. Also, the need for a quality, accessible, useful and complete information from the various studies and applications in which climatological and meteorological variables are integrated, have generated the need to approach the design and implementation of Information Systems that respond to these needs that have risen.

Andalusia has responded to this demand by launching the CLIMA, Andalusian Information Subsystem for environmental Climatology. This information system was designed to guarantee the integration of the existing observation stations and networks within the Andalusian territory (Instituto Nacional de Meteorología, Ministerio de Agricultura, Consejería de Agricultura y Consejería de Medio Ambiente, Instituto Nacional de Técnicas Aeroespacial, etc...), guarantee the homogeneity and quality of the huge amount of information generated in the last decades, ensure public access to this information and finally generate environmental managing applications based on the data integrated in the system.

This press release gathers basic information about the design and implementation of CLIMA, closely looking into the essential methodological aspects of the project: the observation network integration, the design of interpolation and validation methods applied to the different variables measured in the meteorological observatories and the usage of the current database as well as its broadcast on the internet. (www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/web).

Key words: *Information systems, environmental climatology, database, broadcast.*

Los sistemas de información climatológica: el CLIMA (sistema de información de climatología ambiental de Andalucía)

María Fernanda Pita López¹, Juan Mariano Camarillo Naranjo¹, Mariano Corzo Toscano² & José Ignacio Álvarez Francoso¹

¹Departamento de Geografía Física. Universidad de Sevilla. c/ María de Padilla s/n. 41004 Sevilla. mfrita@us.es; jmcamarillo@us.es; jose_afra@yahoo.es

²Empresa de Gestión Medioambiental, S.A (E.G.M.A.S.A). c/ Johan G. Gutenberg. Isla de la Cartuja. 41092 Sevilla. mariano.corzo.ext@juntadeandalucia.es

RESUMEN

Las variables meteorológicas se encuentran involucradas en un amplio abanico de los procesos físico-ambientales, territoriales, sociales y económicos que afectan a nuestras sociedades. Los procesos de producción de información meteorológica han sufrido, paralelamente, un incremento exponencial en las últimas dos décadas en el conjunto del territorio español. Por otro lado, las exigencias de una información completa, de calidad, accesible y útil por parte de los numerosos estudios y aplicaciones en los que las variables meteorológicas y climáticas se integran, han generado la necesidad de abordar procesos de diseño e implementación de Sistemas de Información que respondan a estas necesidades planteadas.

La respuesta a esta necesidad en Andalucía ha sido la puesta en marcha del Subsistema de Información de Climatología Ambiental de Andalucía (CLIMA). Dicho Sistema de Información debía garantizar la integración del conjunto de redes y estaciones de observación existentes en el territorio andaluz (Instituto Nacional de Meteorología, Ministerio de Agricultura, Consejería de Agricultura y Consejería de Medio Ambiente, Instituto Nacional de Técnicas Aeroespacial, etc...), garantizar la homogeneidad y calidad del ingente volumen de información generada en las últimas décadas, permitir el acceso público a dicha información y generar aplicaciones de gestión ambiental a partir de los datos integrados en el Sistema.

La comunicación recoge información básica sobre el proceso de diseño y puesta en explotación de CLIMA, deteniéndose en los aspectos metodológicos esenciales que presidieron dicho proceso: integración de redes de observación, diseño de los métodos de validación e interpolación aplicados a las distintas variables medidas en los observatorios meteorológicos y explotación del banco de datos actual y difusión del mismo a través de Internet (www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/web).

Palabras clave: sistemas de información, climatología ambiental, banco de datos, difusión.

INTRODUCCIÓN

El clima, como componente básico de nuestro sistema físico, se encuentra involucrado en una multitud de procesos físico-naturales, sociales y económicos. El papel que las distintas variables climáticas juegan en el desarrollo de estos procesos exigen un esfuerzo de medición y control que se ha multiplicado en las últimas dos décadas. Esta necesidad se ve reforzada ante fenómenos climáticos y meteorológicos adversos, entre los que destaca por su actualidad el Cambio Climático. La preocupación surgida en relación con la alteración del clima a nivel global ha trascendido el nivel científico y ha pasado a ser una preocupación que afecta a toda la sociedad. En este sentido, la administración autonómica ha puesto en marcha la Estrategia Andaluza ante el Cambio Climático (Consejería de Medio Ambiente, 2006) que, como complemento a la estrategia nacional, propone un gran número de medidas que involucran a diferentes organismos de la Administración. Este hecho ha derivado en el desarrollo de una red cada vez más densa y más compleja de observatorios meteorológicos que han generado un volumen de datos cada vez más importante. Tres han sido las características principales de este proceso en nuestros ámbitos:

- Un aumento de la densidad de las redes de observación que ha redundado en una mejor cobertura espacial en la medición y control de las variables climáticas. Este proceso ha sido muy evidente a partir de los años 80.

- La multiplicación de las redes de observación. Los múltiples procesos en los que las variables climáticas se encuentran involucradas y la propia estructura descentralizada del estado español, se han traducido, en la práctica, en la configuración de una red múltiple de observación

meteorológica y en la efectiva proliferación de observatorios pertenecientes a distintas administraciones y niveles competenciales. Instituto Nacional de Meteorología, Dirección General de Puertos y Costas, Dirección General de Carreteras, Ministerio de Agricultura, Consejerías de Medio Ambiente, Consejerías de Agricultura y Pesca, estas dos últimas en el nivel autonómico, Servicios Meteorológicos autonómicos, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, etc... son algunos de los organismos e instituciones que efectivamente han puesto en marcha redes de observación meteorológica. Esta multiplicidad de redes de observación y la necesidad de normalizar la información producida ha sido objeto, a instancias del propio Ministerio de Medio Ambiente, de la redacción de una Norma AENOR que afectará a toda la producción de información meteorológica del Estado español.

- La coexistencia en los distintos ámbitos espaciales de observatorios manuales y estaciones meteorológicas automáticas. Los primeros, pertenecientes prácticamente en su totalidad al Instituto Nacional de Meteorología, han generado las series de observación más largas que podemos encontrar en el conjunto del territorio español, de indudable valor desde la perspectiva del estudio y detección de las variaciones climáticas.

Las segundas han proliferado al calor del proceso anteriormente mencionado de constitución de las numerosas redes de observación actuales y constituyen una fuente de datos inestimable en los procesos de predicción y de control y monitorización en tiempo real del estado del tiempo atmosférico.

El resultado de este proceso ha supuesto la conformación de un volumen de información meteorológica y climática de enormes proporciones en las últimas dos décadas. Este volumen de datos, de

excepcional interés para la mejora de análisis, estudios y herramientas de gestión, plantea, en una segunda etapa, la necesidad de integrar la información meteorológica en Sistemas de Información complejos que aseguren el almacenamiento estructurado de los datos, la coherencia de los mismos, así como el desarrollo de las aplicaciones que compondrán la explotación de la valiosa información almacenada por los mismos.

Si en una primera etapa todos los esfuerzos se focalizaron en los procesos de producción de la información, esta segunda etapa se centra en el diseño e implantación de sistemas de gestión y explotación de la misma mediante el desarrollo de Sistemas de Información específicos. Respondiendo a este reto, la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía ha puesto en marcha el desarrollo de CLIMA, el Subsistema de Información Climatológica de Andalucía.

La puesta en marcha de CLIMA forma parte del esfuerzo realizado por la Dirección General de Planificación de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía para dar respuesta a las necesidades creadas tras la adopción en Andalucía de una Estrategia Autonómica ante el Cambio Climático y la progresiva constitución una Red de Información Ambiental en Andalucía (R.I.A.). La R.I.A. pretende aunar los esfuerzos de diversos centros productores y usuarios de información medioambiental, desde organismos de la administración hasta universidades y centros de investigación.

El objetivo fundamental de CLIMA es pues la homogeneización de los datos de las estaciones meteorológicas pertenecientes a redes distintas, de forma que éstos sean una fuente segura y fiable para el estudio de las diversas variables meteorológicas y para la elaboración de estudios de índole climática sobre la comunidad andaluza, como pueden

ser la obtención de indicadores ambientales que evalúen el estado del medio ambiente y, sobre todo, los posibles impactos y consecuencias del fenómeno del cambio climático en la región.

REDES INTEGRADAS EN EL CLIMA

El Sistema integra información meteorológica y climática procedente de tres redes de observación diferentes que operan en el conjunto de la Comunidad Autónoma. La mayor parte de la información procede del Instituto Nacional de Meteorología, el cual dispone de cerca de 2000 estaciones manuales y 50 automáticas bien distribuidas a lo largo de la región y representativas de la variabilidad climática regional. A este volumen de observatorios le suceden los adscritos a la Consejería de Agricultura y Pesca (CAP) de la Junta de Andalucía, con 170 estaciones automáticas ubicadas en espacios con dedicación agraria y especialmente en aquellos ocupados por superficies de regadío. Por su parte, la propia Consejería de Medio Ambiente (CMA) de la Junta de Andalucía cuenta con 100 estaciones de observación orientadas a la previsión de los incendios forestales, el control de las superficies forestales y a la vigilancia de la calidad del aire. Estas redes conforman un conjunto de más de 2100 observatorios, de los cuales más de 300 son estaciones meteorológicas automáticas. En la Tabla 1 se resumen las principales características de las estaciones meteorológicas de CLIMA. En las Figuras 1 y 2 se recogen mapas de distribución de las diversas redes: mientras que en la Figura 1 se recogen todas las estaciones meteorológicas automáticas y semiautomáticas integradas en el CLIMA independientemente de los organismos que las gestionan, en la Figura 2 se recogen las estaciones manuales, todas ellas dependientes del Instituto Nacional de Meteorología.

ORGANISMO	RED	TIPO	NÚMERO DE ESTACIONES
I.N.M.	EMAS	Automáticas	42
	COMPLETAS	Semiautomáticas	28
	DIARIAS	Manuales	1914
C.M.A.	INFOCA	Automáticas	32
	SIVA	Automáticas	43
C.A.P.	RAIFS	Automáticas	81
	RIAC	Automáticas	89
TOTAL	Automáticas		315
	Manuales		1914

Tabla 1. Redes de observatorios integradas en el S.I.C.A.

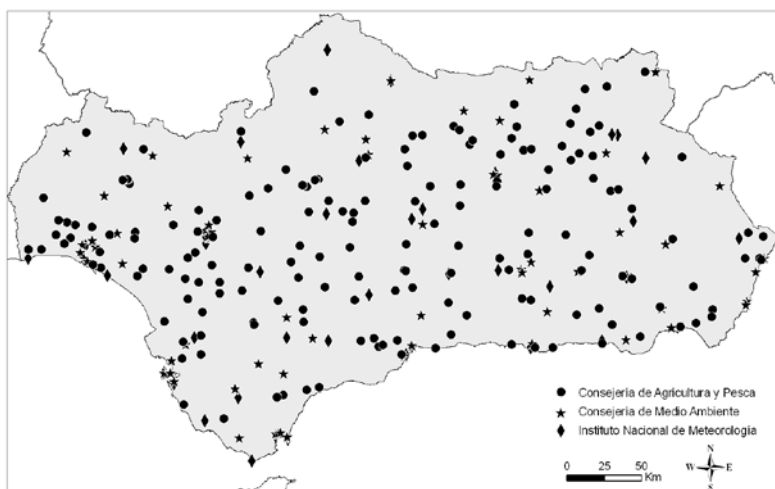


Figura 1. Estaciones Meteorológicas Automáticas integradas en CLIMA.

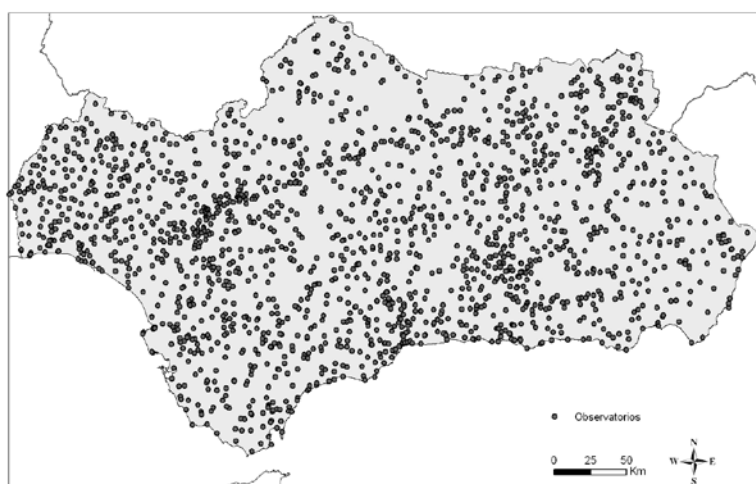


Figura 2. Estaciones meteorológicas manuales integradas en CLIMA.

El claro predominio de las estaciones manuales existentes en el INM y su casi exclusividad en lo concerniente a las series de observación históricas, nos ha impulsado a utilizar sus formatos como fuente de inspiración para el propio diseño de nuestro sistema, si bien éste integra también los rasgos propios de los formatos de las estaciones automáticas, dado que están destinadas a ser las protagonistas de la información meteorológica y climatológica en el futuro inmediato. Por otro lado, el Sistema es lo suficientemente abierto y flexible como para poder dar cabida en momentos posteriores a las nuevas necesidades de manejo de información meteorológica y climática que vayan sucediéndose en este ámbito.

LA ESTRUCTURA DEL BANCO DE DATOS Y LOS PROCESOS DE AGREGACIÓN

-La estructura del Banco de Datos y las variables seleccionadas

MAGNITUDES	Nº DE VARIABLES
Temperatura del aire	48
Temperatura del suelo y subsuelo	75
Precipitación	67
Humedad atmosférica	64
Nubosidad	22
Insolación	7
Evaporación	24
Evapotranspiración	12
Presión atmosférica	20
Viento	204
Radiación solar	108
TOTAL	651

Tabla 2. Las variables integrantes de CLIMA.

El diseño de la estructura del Banco de Datos Climáticos de CLIMA se basa en el propio diseño del formato utilizado por los datos contenidos en dicho Banco. El formato se inspiró, básicamente, en el utilizado

por el Instituto Nacional de Meteorología en su Red de Estaciones Completas, por ser este organismo el que dispone de una información climática más abundante, si bien recoge también elementos pertenecientes a formatos procedentes de otros organismos. Especial atención merecieron los formatos correspondientes a las Estaciones Meteorológicas Automáticas de las diferentes redes, destinadas a ser las protagonistas de la información climática en el futuro.

Dentro del Banco de Datos se contemplaron un total de 11 magnitudes con sus correspondientes variables climáticas divididas en 39 variables diferentes. Si a su vez tomamos en consideración las diferentes escalas temporales que puede adoptar cada una de las variables e incorporamos algunos parámetros de interés que se pueden derivar de ellas, obtenemos un total de 651 series de observación diferentes, a las cuales podemos considerar a su vez como variables, y que son las que, en realidad, componen el sistema que ahora presentamos (ver Tabla 2).

Queda claro a partir de estas cifras que es un sistema muy amplio y detallado, lo que refleja que en él se ha optado claramente por la elaboración de un sistema en el cual tiene cabida información redundante. Buena parte

de los sistemas informáticos, con el objetivo de ahorrar espacio, optan por la eliminación de la información redundante e incluyen los algoritmos necesarios para obtener información derivada de la información primaria incluida en el sistema cuando ello sea necesario. En nuestro caso, el ahorro de espacio en el sistema no ha sido un objetivo prioritario y sí lo ha sido, sin embargo, la rapidez y la facilidad de acceso a las consultas por parte de usuarios muy diversos, así como la facilidad y rapidez en el desarrollo de múltiples aplicaciones también muy diversas. Lógicamente, estas facilidades de consulta y aplicación se contrarrestan con mayores dificultades en el diseño de la estructura del sistema y en su gestión. En el caso de Andalucía se ha estimado que las necesidades físicas de almacenamiento para los datos

existente en las redes de observación tradicionales, y de enfatizar las variables a las que se reconoce unas mayores perspectivas de futuro, aún cuando en las redes tradicionales no fueran objeto de observaciones detallada (sería el caso, por ejemplo, de las variables relativas a la radiación solar o al viento).

- Las unidades de medida seleccionadas

Las unidades seleccionadas para cada variable han correspondido, en general, a las más utilizadas en las redes actuales de observación, pero se han implementado también los algoritmos necesarios para traducir a estas unidades otras posibles unidades existentes en otras redes. Este proceso de transformación de unidades ha sido requerido en numerosas ocasiones dado que son también muchos los formatos existentes en este sen-

VARIABLES	UNIDAD SELECCIONADA EN EL SICA
VARIABLES ASOCIADAS A LA TEMPERATURA DEL AIRE	°C
VARIABLES ASOCIADAS AL TOTAL DE PRECIPITACIÓN	mm
VARIABLES ASOCIADAS A LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA	HPa
VARIABLES ASOCIADAS A LA TENSIÓN DE VAPOR	HPa
VARIABLES ASOCIADAS A LA NUBOSIDAD	Octas
VARIABLES ASOCIADAS A LA INSOLACIÓN	Minutos
VARIABLES ASOCIADAS A LA DIRECCIÓN DEL VIENTO	Grados
VARIABLES ASOCIADAS A LA VELOCIDAD DEL VIENTO	Km/h
VARIABLES ASOCIADAS A LA RADIACIÓN SOLAR	W/m ² o KJ/m ²
VARIABLES ASOCIADAS A LOS HIDROMETEOROS	Campo lógico

Tabla 3. Variables que llevan incorporados mecanismos de conversión de unidades de medida.

en línea que participan en los procesos de control, agregación y análisis, exigirán un servidor propio en el que se mantendrán los datos registrados por estaciones automáticas durante el periodo comprendido por los tres últimos años, pasando a un formato de disco una vez superado ese límite temporal. Los datos históricos a escala diaria estarán permanentemente en el sistema.

Una vez asumido este principio general, la selección definitiva de las variables a considerar en el sistema se ha hecho a partir del objetivo de no perder ninguna de la informa-

ción en las diferentes redes (ver Tabla 3).

-Las escalas temporales

Las escalas más usuales de observación en las redes tradicionales (diaria, mensual y anual) se han mantenido, y sólo se han visto incrementadas por la aparición del total de precipitación, que se ha desarrollado también a la escala del año hidrológico. Pero los mayores problemas han surgido en la escala intradiaria, en la cual aparecen frecuencias de observación muy dispares, como los 10 minutos, que es la más usual, pero también los 15 o los 30 minutos, sin contar con las

observaciones trihorarias o cuatrihorarias que pueden aparecer en estaciones convencionales como la red de estaciones completas del INM o la red Synops.

En CLIMA se ha optado por la escala diez-minutaria para el valor intradiario y su agregación posterior a la escala diaria; en consecuencia, todas las variables observadas con frecuencias diferentes han sufrido procesos de adaptación. En este sentido existen tres tipos de variables diferentes; en primer lugar, las variables cuantitativas

Conviene destacar los procesos requeridos para adaptar las propias variables diarias del INM, que en algunos casos, como en la precipitación, tienen diferentes sistemas de agregación diaria (de 0 a 24 horas o de 7 horas de un día a 7 horas del día siguiente), entre los cuales ha habido que optar (en nuestro caso se ha optado por efectuar la agregación con arreglo al día civil, es decir, desde las 0 a las 24 horas de un día), así como los procesos requeridos para adaptar las variables trihorarias o cuatrihorarias del propio Instituto.

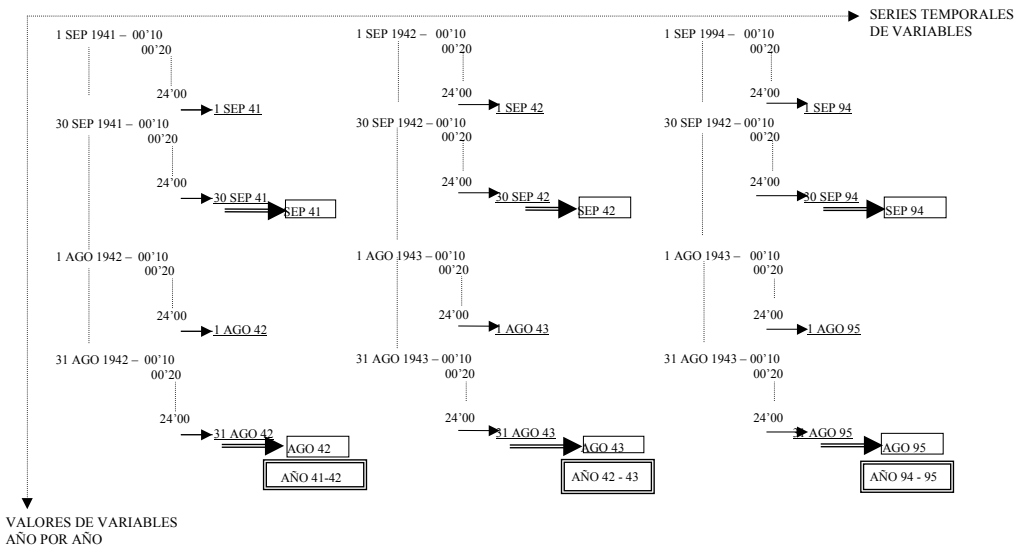


Figura 3. Esquema de la estructura del banco de datos.

en las que la agregación se realiza mediante medias aritméticas (temperatura, humedad etc.), en segundo lugar, las variables cualitativas o dicotómicas (tipo de nubes, que van codificadas, o algunos meteoros, en los que sólo se registra si se detectó o no se detectó) y en tercer lugar las variables cuantitativas, pero en las que la agregación se realiza mediante acumulación (total de precipitación, evapotranspiración, etc.). Cada una de ellas requiere métodos de agregación diferentes, que alcanzan los mayores niveles de dificultad en el caso de las últimas.

PRINCIPALES PROCESOS Y FLUJOS DE INFORMACIÓN EN CLIMA

Una vez adquiridos por las estaciones, los datos son transferidos a los concentradores de datos de las diferentes redes y, desde éstos, al concentrador de datos de CLIMA donde son convertidos a un formato común y homogéneo para todas las redes. Una vez que se superan un conjunto de criterios de validación, se corrigen los errores en la toma de datos y, si es posible, se rellenan las lagunas en las series, los datos pasan a formar parte

del Banco de Datos Climático definitivo. Los datos, ya integrados en CLIMA, pueden ser extraídos tabular, gráfica o cartográficamente. Por tanto podemos distinguir tres tipos de procesos:

- *Introducción de los datos en el sistema*, proceso que incluiría la adquisición, consulta y transmisión de los datos de las estaciones desde los concentradores de datos de las diferentes redes hasta el del propio CLIMA, trabajándose a partir de este momento con el gestor de base de datos ORACLE.

- *Análisis de los datos* recibidos, es decir, la conversión de los diferentes formatos en que se reciben los datos al formato único del CLIMA, la validación de los datos y la corrección de errores en los mismos.

- *Explotación* de los datos generados, procesos que comprenden desde la generación automática de estadísticas, gráficos y tablas hasta la espacialización de variables para periodos y áreas concretas, así como la exportación de los datos en diferentes formatos.

Estos procesos se materializan en los flujos de información descritos en la Figura 4.

de sus necesidades conduce a un elevado número de tipologías de estaciones meteorológicas que miden diferentes variables. Esta circunstancia es la que hace de CLIMA una herramienta de un gran valor dentro de la climatología actual. En la Tabla 4 se señalan las magnitudes y escalas temporales medidas en cada una de las redes de observación.

Al haberse diseñado por separado, cada una de estas redes almacena los datos con unos formatos propios y diferentes de los de las otras redes. Una serie de procedimientos permite la captura de los datos almacenados en los centros de control de cada una de las redes por parte de CLIMA, así como la conversión de los datos de esos formatos a uno común que es propio del Subsistema.

Los datos son capturados periódicamente en función de la escala temporal que tengan. Los diarios, procedentes de estaciones manuales, se cargan anualmente una vez han sido procesados por el I.N.M. En cambio, los interdiarios, si bien se pueden capturar en cualquier momento, se ha programado hacerlo a las 0:00 horas cada día de forma que los procesos desencadenados interfieran

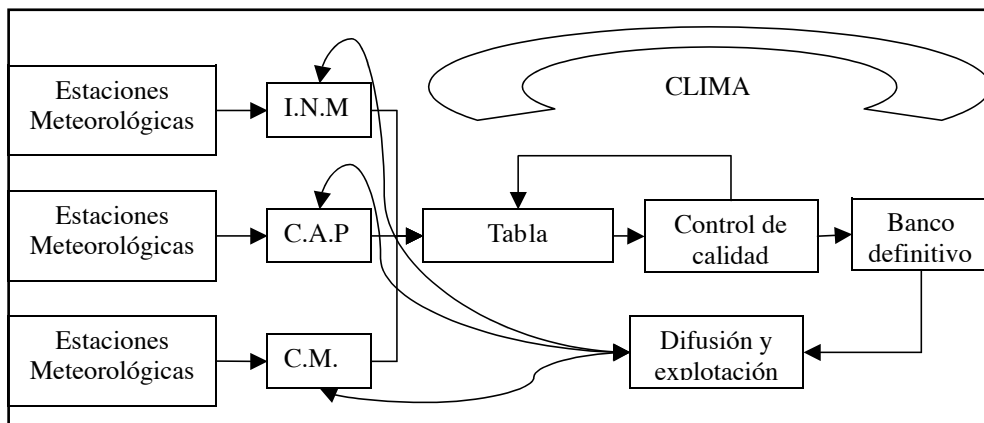


Figura 4. Flujos de información en CLIMA.

- Adquisición y carga de los datos.

Los tipos de estaciones meteorológicas integradas en CLIMA son bastante variados. La presencia de tres organismos distintos con diferentes redes cada uno de ellos en función

lo menos posible en las labores realizadas por cada organismo. En un primer momento, los datos quedan cargados en una base de datos temporal a la espera de que se pongan en marcha los mecanismos de validación, agregación e interpolación de lagunas;

RED	ESCALA TEMPORAL DE ADQUISICIÓN	MAGNITUDES (ver tabla 2)											
		P	T	V	H	N	I	R	E	A	S	O	
E.M.A.S. (I.N.M.)	INTERDIARIA	X	X	X	X								X
COMPLETAS (I.N.M.)	INTERDIARIA	X	X	X		X	X	X	X			X	X
DIARIAS (I.N.M.)	DIARIA	X	X										
INFOCA (C.M.A.)	INTERDIARIA	X	X	X	X			X					X
SIVA (C.M.A.)	INTERDIARIA	X	X	X	X			X					X
R.A.I.F.S. (C.A.P.)	INTERDIARIA												
R.I.A.C. (C.A.P.)	INTERDIARIA	X	X	X	X			X					

Tabla 4. Variables y escalas temporales en las diferentes redes integradas en CLIMA.

procesos que conducirán más tarde a la consolidación de los datos en el Banco de Datos Climático definitivo.

- El control de calidad de los datos meteorológicos: validaciones e interpolación de lagunas.

· Los métodos de validación de los datos
El proceso de validación de datos ha estado presidido por el objetivo general de no perder ninguna información potencialmente válida. Para ello los métodos a aplicar se han diseñado con criterios lo suficientemente amplios y laxos como para evitar la eventualidad de eliminar cualquier dato cierto, aún asumiendo el riesgo de que datos erróneos pudieran entrar en el sistema; por otro lado, los datos erróneos en ningún caso son eliminados del sistema, sino que quedan marcado como tales, si bien no participan en los tratamientos posteriores, siendo sustituidos para tal fin por lagunas o “no datos”. Además, y a pesar de la automatización del proceso, se ha introducido un segundo procedimiento de control a partir de la generación de un *informe de incidencias* en esta primera fase de validación. Este informe, que debe reflejar todos los errores y datos no válidos detectados automáticamente, únicamente es visible para el administrador cualificado del Sistema, de tal forma que éste pueda evaluar la validez última de los procesos llevados a cabo de forma automática. Asimismo, cada informe de incidencias debe ser almacenado directa

y automáticamente por el propio Sistema, garantizando su acceso posterior.

Otro condicionante fundamental en el diseño de estos métodos ha sido el hecho de que se trata de métodos destinados a ser aplicados en rutina y en tiempo real (a medida que los datos van entrando en el sistema) sobre una gran cantidad de variables muy diversas y que se desarrollan a su vez sobre un medio también muy diverso. Ello reduce las variables sobre las cuales se aplicarán a sólo aquellas que por sus características peculiares garantizan un éxito razonable; además, refuerza la necesidad de dotar de cierta laxitud a los métodos, y determina que éstos sean en todos los casos *tests* absolutos y no relativos, es decir, pruebas que en ningún caso utilicen la información procedente de observatorios vecinos, sino que se limiten a utilizar la información existente en el propio observatorio. Por otro lado, reduce también de algún modo la virtualidad del proceso en su conjunto, el cual lo único que pretende es eliminar los errores más groseros y los *outliers* más llamativos, pero de ningún modo tiene la pretensión de garantizar un banco de datos absolutamente exento de errores ni eximir a los estudiosos, investigadores o gestores del sistema de aplicar procesos de validación más minuciosos y concretos cuando ello se estime oportuno.

Los métodos de validación aplicados pueden agruparse en tres tipos diferentes:

1.- *Los rangos*: suponen la asignación a cada variable de un rango de posibilidad, que se ha inspirado en el conocimiento de la variabilidad natural de cada una de ellas en la región. Los máximos y mínimos históricos de cada una de las variables han sido el instrumento básico para asignarles unos filtros generosos, aunque realistas. Somos conscientes, no obstante, de que en algunas variables especialmente cambiantes a lo largo de la región (por ejemplo, la precipitación), la diversidad impone rangos muy abiertos, lo que reduce la virtualidad del control. En el futuro nada impide asignar a cada uno de los observatorios un rango específico basado en su propio comportamiento individual. Por el momento esta tarea era imposible y, por otro lado, hemos renunciado intencionadamente a establecer rangos inspirados en las desviaciones típicas de las series (es común utilizar como límite los valores que sobrepasen las tres o cuatro desviaciones típicas), dado que muchas de ellas no se ajustaban a curvas normales, lo cual reducía las garantías y la propia virtualidad del método.

Comentario especial merecen los rangos establecidos para las variables asociadas a la magnitud insolación, dado que en ellas el máximo posible de horas de sol varía a lo largo de los distintos días del año, y viene determinado por la latitud del observatorio; en las variables intradiarias, además, es preciso tener en cuenta el intervalo de tiempo sobre el cual se aplica la observación, el cual acaba convirtiéndose, en ocasiones, en el verdadero límite (en una serie diezminutaria el máximo valor que puede alcanzar la insolación es de 10 minutos).

También son destacables las variables que llevan implícita la dimensión temporal (como la intensidad de la lluvia, que se define como el total de precipitación recibido por unidad de tiempo), en las cuales hubo que establecer rangos flexibles, de manera que se pudieran adaptar a cualquier

intervalo temporal de medición (en la precipitación se fijó, por ejemplo, un límite genérico máximo de 400 mm/h, el cual habría de ser adaptado y variaría, lógicamente, en función del intervalo temporal considerado: precipitación diezminutaria, horaria, diaria, etc.).

2.- *Los filtros lógicos*: reciben su nombre del hecho de que se inspiran en los principios elementales de la lógica y, más concretamente, en el principio de no contradicción, e intentan evitar precisamente que cualquiera de los datos entrantes al sistema desafíe este principio. Aplicándolo y conociendo el funcionamiento de las variables y de los procesos de toma de datos, se pueden detectar fácilmente datos aberrantes, como por ejemplo la existencia de valores de precipitación negativa, o de días en que la temperatura máxima es inferior a la mínima o de días lluviosos con ausencia total de nubosidad etc. No se han aplicado filtros lógicos a todas las variables, porque no todas se adaptaban a este tipo de métodos, pero sí muchas de ellas (ver Tabla 3).

3.- *Los incrementos*: en algunas variables, por último, los filtros se han elaborado a partir del establecimiento de un límite en el incremento experimentado por dichas variables desde observaciones previas respecto a la observación considerada. Las variables que mejor se adaptan a este tipo de métodos son las variables continuas y dotadas de una cierta inercia, como la temperatura intradiaria; en ella se puede establecer un valor límite en el incremento experimentado desde un periodo de observación al siguiente, de manera tal que los incrementos que rebasen ese umbral pueden considerarse sintomáticos de error en la medición. En las variables en las que la inercia es aún mucho más acusada, como ocurre con la temperatura del subsuelo, estos límites en los incrementos pueden fijarse incluso respecto a los valores registrados el día anterior (ver Tabla 5).

MÉTODO DE VALIDACIÓN	VARIABLES
Filtros lógicos	<ul style="list-style-type: none"> - Temp. media diaria - Temp. mínima diaria - Temp. máxima diaria - Total de precip. en los 10 minutos de obs. - Existencia de precip. en forma de lluvia - Existencia de precip. en forma de nieve - Existencia de precip. en forma de granizo - Temp. del termómetro húmedo - Temp. del punto de rocío.
Incremento máximo desde la observación anterior	<ul style="list-style-type: none"> - Temp. del termómetro seco
Incremento máximo desde el día anterior	<ul style="list-style-type: none"> - Temp. a 0,05 m bajo el suelo - Temp. a 0,10 m bajo el suelo - Temp. a 0,15 m bajo el suelo - Temp. a 0,20 m bajo el suelo - Temp. a 0,15 m sobre el suelo
Rango variable en función del día del año	<ul style="list-style-type: none"> - Insolación intradiaria - Insolación diaria - Insolación mensual

Tabla 5. Variables con métodos de validación adicionales al método de asignación de rango.

Si tenemos en cuenta que, además de estos filtros, todas las variables se ven limitadas por rangos específicos, se puede pensar que, al menos, muchos de los posibles errores susceptibles de registrarse en los datos, serán detectados antes de su entrada en el sistema.

- Los métodos de interpolación de lagunas
A pesar de la dificultad y el riesgo implícitos en el diseño de métodos de interpolación de lagunas para su aplicación en rutina a datos muy heterogéneos, se ha considerado oportuno incluir algunos en el sistema dado que son muchas las ocasiones en las que se exige la continuidad de las series de observación para tratamientos posteriores o para la obtención de parámetros derivados. No obstante, sólo se han utilizado cuando la garantía de fiabilidad era alta y los beneficios de su aplicación muy claros. Por otro lado, siempre se advierte de la existencia de algún dato interpolado.

Los métodos de interpolación recomendados dependen de la escala temporal contemplada y de las pautas de comportamiento

espacio-temporal de la variable en cuestión. En general, para datos mensuales y anuales, en los cuales la variabilidad espacial está ya algo atenuada, y siempre que las variables se presten a ello, se recomienda la interpolación a partir de los valores adoptados por las variables mejor correlacionadas con la variable a interpolar. El procedimiento concreto de interpolación consiste en la sustitución del dato ausente por la media ponderada de los valores inferidos a partir de las tres series mejor correlacionadas con la que se pretende interpolar, siempre que haya un mínimo de 10 pares de valores y los coeficientes de correlación de Pearson alcancen valores superiores a 0,75.

Para la mayoría de los datos intradiarios se recurre más bien al ajuste de funciones polinómicas al ciclo diario de la variable en cuestión. En los datos diarios (y en algunos casos también intradiarios) se interpola mediante la media aritmética de los valores obtenidos por la misma variable en los días que preceden y que suceden al dato ausente (ver Tabla 6).

MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN	VARIABLES
Media aritmética de los dos valores intradiarios anteriores y los dos posteriores al valor a interpolar	<ul style="list-style-type: none"> - Temp. a 0,05 m bajo el suelo - Temp. a 0,10 m bajo el suelo - Temp. a 0,15 m bajo el suelo - Temp. a 0,20 m bajo el suelo - Temp. a 0,15 m sobre el suelo - Temp. termómetro seco (2º método)
Media aritmética de los dos valores diarios anteriores y los dos posteriores al valor a interpolar	<ul style="list-style-type: none"> - Temp. media diaria a 0,05 m bajo el suelo - Temp. media diaria a 0,10 m bajo el suelo - Temp. media diaria a 0,15 m bajo el suelo - Temp. media diaria a 0,20 m bajo el suelo - Temp. media diaria a 0,15 m sobre el suelo - Temp. media diaria - Temp. mínima diaria - Temp. máxima diaria - Evaporación diaria en Piché - Evaporación diaria en tanque - Evapotranspiración diaria en lisímetro
Función polinómica de orden 4 para datos intradiarios que siguen ciclos diurnos	<ul style="list-style-type: none"> - Temp. del termómetro seco - Evaporación con Piché - Evaporación en tanque - Evapotranspiración en lisímetro
Media ponderada de los valores inferidos a partir de las tres series mejor correlacionadas	<ul style="list-style-type: none"> - Temp. media mensual y anual - Temp. media de las mín. mensual y anual - Temp. media de las máx. mensual y anual - Amp. térm. diaria media mensual y anual - Precip. total mensual y anual - Nº días de precipitación al mes y al año - Evaporación mensual y anual Piché - Evaporación mensual y anual tanque - Evapotranspiración mensual y anual lisímetro

Tabla 6. Métodos de interpolación de lagunas asignados a las variables de CLIMA.

De cualquier forma, son muy pocas las variables que se someten a la interpolación de lagunas, porque somos conscientes de los grandes márgenes de error en que se mueven la mayoría de estas interpolaciones, lo que hace que sólo sean recomendables en los casos en los que el análisis riesgo/beneficio sea muy favorable a éste último.

-La explotación del banco de datos.

Como se dijo anteriormente uno de los objetivos fundamentales del Subsistema es el de que sirva para mejorar la calidad de los estudios en materia de climatología y meteorología y, sobre todo, los que evalúen el fenómeno del cambio climático. Por tanto, este

Subsistema se ha puesto a disposición de la comunidad científica y técnica que quiera abundar en esta materia. La obtención de información a partir de CLIMA puede realizarse de diferentes formas:

- Extracción en forma de tabla o gráficas de datos y estadísticas básicas correspondientes a estaciones y variables concretas para fechas determinadas (Figura 5). Estos datos pueden obtenerse en tiempo real de cara a la gestión de problemas ambientales, como los incendios forestales o la contaminación atmosférica.
- Espacialización de variables climáticas usando métodos de espacialización

predefinidos o personalizando los mismos, utilizando para ello un Sistema de Información Geográfica (ARC-INFO). Asimismo, los datos pueden ser empleados para alimentar modelos de simulación del

comportamiento atmosférico que permitan conocer y predecir el clima de la región (Figura 6).

- Exportación masiva de datos de estaciones y variables concretas para su análisis.

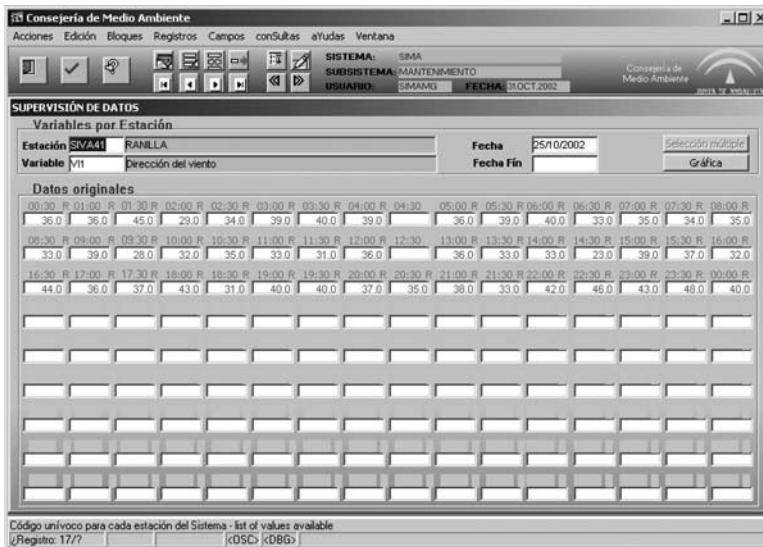


Figura 5. Extracción en forma tabular de datos en CLIMA.

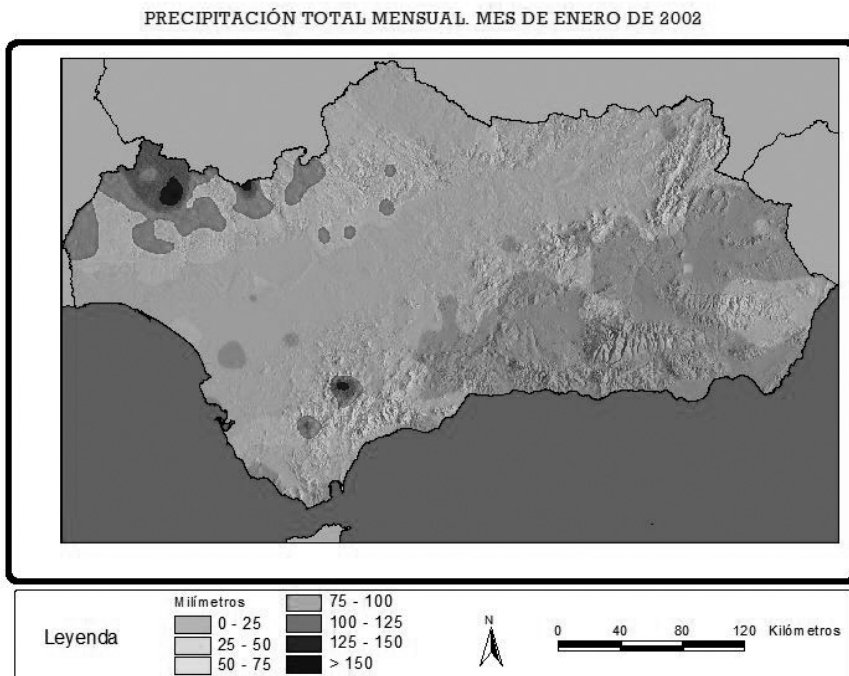


Figura 6. Precipitación total mensual. Enero de 2002.

Desarrollo de índices e indicadores ambientales de gestión basados en la información meteorológica y climática disponible: indicador ISSP de sequía, índices de calentamiento climático, cálculo de la erosividad de la lluvia (Figura 7).

- Extracción de las estadísticas básicas del comportamiento de nuestro clima especializadas para el conjunto de la Comunidad Autónoma.

CLIMA es accesible además a través de Internet en dos versiones distintas, una para usuarios básicos y acceso a la información meteorológica producida por la propia Consejería de Medio Ambiente y otra, más completa, para usuarios avanzados y acceso al total de datos producidos por el

conjunto de redes presentes en el Sistema. De esta forma, los usuarios pueden acceder a toda la información presente en el mismo, si bien existen restricciones de acceso en función de los distintos tipos de usuarios definidos.

CLIMA es sobre todo una herramienta eficaz para la integración de los datos de las estaciones meteorológicas existentes en Andalucía. Los procesos de carga y agregación así como los métodos para la validación de datos e interpolación de lagunas permiten dar homogeneidad a la información meteorológica adquirida de manera que esta puede ser empleada de forma conjunta en cualquier tipo de estudio.

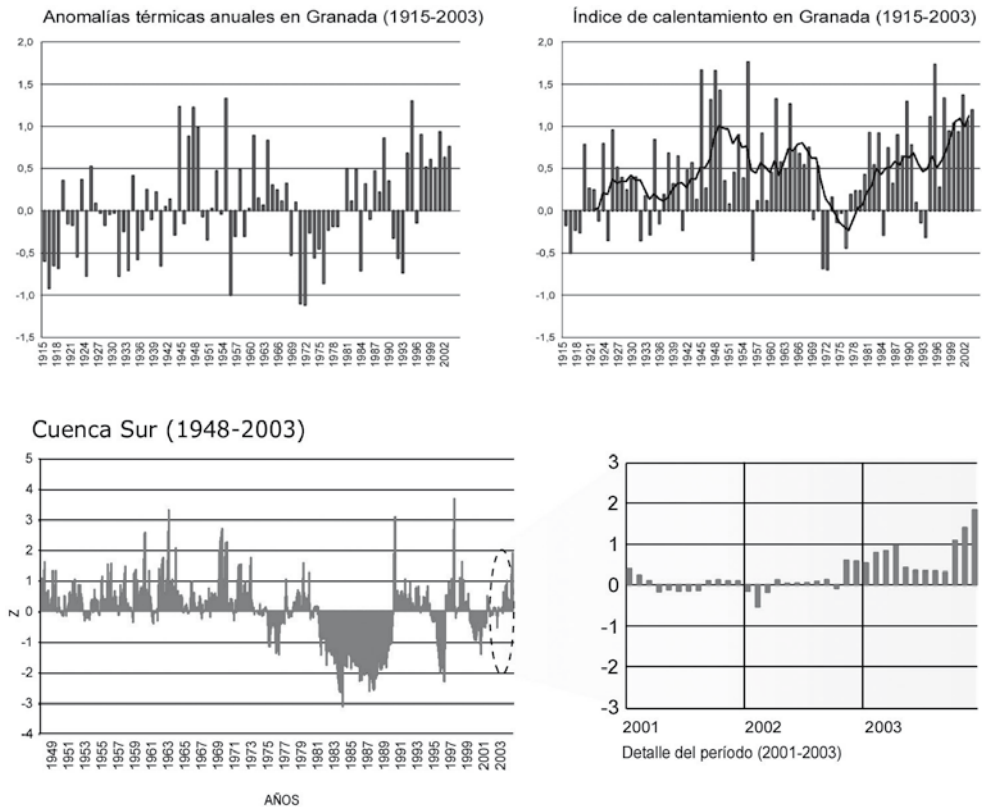


Figura 7. Índice de calentamiento global en la serie de Granada (arriba) e índice de sequía ISSP en la cuenca Sur de Andalucía (abajo).

BIBLIOGRAFÍA

- Almarza, C. & E. Gutiérrez-Marco (2001). El sistema de información geográfica con fines climatológicos del Instituto Nacional de Meteorología. En: *Actas del XIV Congreso de la Asociación Internacional de Climatología*. Pita, M. F. et al (ed).
- Comisión Europea (2001) COST 719. *The use of geographical information systems in Climatology and Meteorology*. Memorandum, Bruselas.
- Consejería de Medio Ambiente (2006). *Estrategia Andaluza ante el cambio climático. El camino recorrido mirando hacia el futuro*. Ed. Secretaría General de Sostenibilidad de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. 40 p.
- Pita López, M. F. (1999). *Diseño de una metodología de espacialización de variables climáticas, estructuración de bases de datos de clima y obtención de indicadores ambientales*. Informe elaborado por el Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional de la Universidad de Sevilla a petición de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Junta de Andalucía (2000). *Informe de Medio Ambiente de Andalucía*. Sevilla.

CHAPTER 14 / CAPÍTULO 14

*Introduction to the international
climate change regime*

**Introducción al régimen jurídico
internacional de cambio climático**

El cambio climático en Andalucía: evolución y consecuencias medioambientales
Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía): 267-280 (2007)
© Los autores. Sevilla. España. ISBN: 978-84-96 776-40-1

Introduction to the internacional climate change regime

Amalia Cordero Martínez*

Oficina Española de Cambio Climático (OECC). C/ Alcalá 92. 28009 Madrid.
acordero@mma.es

ABSTRACT

This chapter tries to describe, in an easy to understand way, the basic characters of the internacional climate change regime. It pays particular attention to the development of an international architecture regarding climate change and to the two main instruments developed: the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol to this Convention.

Key words: *climate change, international climate change regime, Kyoto Protocol, United Nations Framework Convention on Climate Change*

* Todos los contenidos y opiniones recogidos en este artículo son de la exclusiva responsabilidad de la autora.

Introducción al régimen jurídico internacional de cambio climático

Amalia Cordero Martínez*

Oficina Española de Cambio Climático (OECC). C/ Alcalá 92. 28009 Madrid.
acordero@mma.es

RESUMEN

Este capítulo trata de describir, desde un enfoque divulgativo, las características básicas del régimen jurídico internacional de cambio climático. Presta especial atención al desarrollo de la arquitectura judicial internacional de cambio climático y a los dos elementos fundamentales de dicha arquitectura: la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático y el Protocolo de Kioto a esta Convención.

Palabras clave: *cambio climático, régimen jurídico internacional del cambio climático, Protocolo de Kioto, Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático*

INTRODUCCIÓN. EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS EFECTOS

El cambio climático de origen antropogénico puede considerarse como el principal reto ambiental a que se enfrentan las sociedades a comienzo del siglo XXI. Aunque el clima mundial ha evolucionado siempre de forma natural, pruebas convincentes obtenidas en todo el mundo revelan que está en marcha un nuevo tipo de cambio climático, que permite prever repercusiones drásticas sobre las personas, las economías y los ecosistemas. Los niveles de dióxido de carbono y de otros gases de efecto invernadero en la atmósfera han aumentado vertiginosamente desde el comienzo de la era indus-

trial debido, básicamente, al consumo de combustibles fósiles y a la deforestación.

El Tercer Informe (2001) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) señaló que “*existen nuevas y más convincentes evidencias de que la mayor parte del calentamiento observado durante los últimos cincuenta años se puede atribuir a las actividades humanas*”. Este informe confirmó el aumento de la temperatura media global en la superficie en el último siglo. Constató asimismo el aumento de la frecuencia de los fenómenos climáticos extremos, el retroceso de glaciares y la subida del nivel del mar, entre otros fenómenos, confirmando cambios en el sistema climático global.

Si las previsiones del Tercer Informe eran enormemente alarmantes, las conclusiones

* Todos los contenidos y opiniones recogidos en este artículo son de la exclusiva responsabilidad de la autora.

de los Grupos I, II y III del IPCC, que se han reunido durante el primer semestre de 2007 para la elaboración del Cuarto Informe del IPCC, son aún más concluyentes tanto en la relación de la actividad humana con las alteraciones en el clima, como en cuanto a los impactos previstos durante los próximos años.

De acuerdo con los estudios llevados a cabo hasta ahora, el cambio climático puede resultar muy costoso en términos económicos. Así, según el Informe Stern, los costes del cambio climático para la economía mundial pueden alcanzar entre el 5% y el 20% de la renta mundial anual si se mantiene un crecimiento de las emisiones “business as usual”. La gravedad de estas previsiones se incrementa porque los impactos del cambio climático no es previsible que se distribuyan de manera equitativa entre los países y regiones. Como afirma el Informe Stern, “*las repercusiones del cambio climático no se distribuirán equitativamente, siendo los países y las poblaciones más pobres los que sufrirán las consecuencias antes y con mayor intensidad*”. Tal y como recoge el citado Informe, el cambio climático supondrá un obstáculo serio a superar por los países en desarrollo en la consecución de sus objetivos de desarrollo social y económico.

Todo ello hace evidente que no sólo desde un punto de vista estrictamente medioambiental, sino teniendo en cuenta consideraciones económicas, sociales y de equidad entre los distintos actores de la comunidad internacional, que la lucha contra el cambio climático debe ser una prioridad.

LA CONSTRUCCIÓN DEL RÉGIMEN JURÍDICO INTERNACIONAL DEL CAMBIO CLIMÁTICO

La preocupación por los cambios en el clima y su posible origen antropogénico no es cosa de ayer. Ya en los años 70 del pasado siglo

numerosos científicos empezaron a referirse a una posible injerencia humana en el funcionamiento del sistema climático, contribuyendo de este modo a que en 1979 se convocase la primera Conferencia Mundial sobre el Clima. En 1988 se crea el IPCC por la Organización Meteorológica Mundial y el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, como órgano encargado de examinar, evaluar, ordenar y poner a disposición de los responsables políticos y del público la mejor información científica en esta materia. El Primer Informe del IPCC puso de relieve que el cambio climático era un riesgo real. La gravedad para todos los miembros de la comunidad internacional de los efectos del cambio climático así como el hecho de que las soluciones sólo podían alcanzarse de una manera coordinada, puesto que el efecto en el clima de las emisiones de gases de efecto invernadero se produce sea cual sea su localización geográfica, hicieron evidente que era necesario construir un régimen jurídico internacional en materia de cambio climático.

Así, después del primer Informe del IPCC y en el Marco de la Cumbre de Río, en 1992, se procedió a la firma, junto con las otras dos Convenciones de Río –la de Biodiversidad y la de Desertificación-, de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC en adelante), origen del actual régimen jurídico internacional de cambio climático. Ya desde la firma de la Convención las Partes eran conscientes de que las disposiciones de la Convención debían ser completadas para ser plenamente eficaces en la lucha contra el cambio climático. Así, la Convención entró en vigor en 1994 y fue completada, en 1997, por el Protocolo de Kioto, que desarrolla y dota de contenido concreto las prescripciones genéricas de la Convención.

El Protocolo entró en vigor el 16 de febrero de 2005 tras un arduo proceso de ratificaciones que exigió, con carácter previo, el desarrollo de una serie de negociaciones al objeto

CONFERENCIAS MUNDIALES SOBRE EL CLIMA EN 1979 Y 1990
1990 primer informe del IPCC
1992 Cumbre de Río de Janeiro
1994 CONVENCIÓN MARCO SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO entra en vigor
1995 COP1: Berlín. Publicación del segundo Informe del IPCC
1996 COP2: Ginebra
1997 COP3: ADOPCIÓN DEL PROTOCOLO DE KIOTO
1998 COP4: Aprobación del Plan de Acción de Buenos Aires
1999 COP5: mensaje político: ratificación del Protocolo en 2002
2000 COP6: La Haya - fracaso de las negociaciones
2001 COP6 bis y COP7: Acuerdo político y técnico sobre las reglas de aplicación del protocolo.
2001 Tercer informe del IPCC
2002 COP8: Delhi
2003 COP9: Milán
2004 COP10: Buenos Aires
2005: ENTRADA EN VIGOR DEL PROTOCOLO DE KIOTO
2005 COP 11-COP/MOP1: Montreal
2006 COP 12-COP/MOP2: Nairobi
2007 COP 13-COP/MOP3: Bali, Cuarto informe del IPCC

Tabla 1. Cronología de las negociaciones en materia de cambio climático.

de completar el régimen jurídico por él establecido (ver Tabla 1). En este proceso revisten especial importancia los denominados “Acuerdos de Marrakech”, adoptados por las Partes de la Convención en su reunión anual de 2001, que desarrollan y hacen aplicables las disposiciones del Protocolo en materias tales como el régimen de cumplimiento o la articulación de los mecanismos de flexibilidad, elemento esencial y novedoso del marco jurídico establecido.

LA CONVENCIÓN MARCO DE NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO

- Objetivos

El objetivo último de la Convención es, de acuerdo con su artículo 2, “*la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a*

un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático”. Tal nivel debería lograrse con tiempo suficiente para permitir la adaptación natural de los ecosistemas a las nuevas circunstancias, la seguridad en la producción de alimentos y el desarrollo sostenible.

La Convención no establece un límite de emisiones que debería ser respetado para alcanzar este objetivo, no define cuál es la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera que supondría un riesgo para el sistema climático, ni hace referencia tampoco a cuáles son los principales gases de efecto invernadero. Sí recoge, no obstante, en su artículo 4.2 (a), un primer objetivo cuantificable en relación con las emisiones: las emisiones en 2000 de los países desarrollados no deberían superar las que tenían en 1990.

- Principios

La Convención se basa en una serie de principios recogidos en su artículo 3, bien comunes a los de las otras Convenciones de Río, bien de aplicación al cambio climático de otros principios de Derecho Internacional Público del Medio Ambiente. Entre estos principios cabe destacar los siguientes:

El principio de precaución – en caso de amenaza de daño grave o irreversible, no debería utilizarse la falta de total certidumbre científica como razón para posponer las medidas necesarias para conseguir una actuación eficaz-;

El principio de preservación del sistema climático en beneficio de las generaciones presentes y futuras, que concreta para el clima el concepto general de desarrollo sostenible - *“Aquel desarrollo que satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro, para atender sus propias necesidades”*- de conformidad con lo establecido en el principio 3º de la Declaración de Río.

El principio de equidad y de responsabilidades comunes pero diferenciadas, que se traduce en que todas las Partes contribuirán en la medida de sus posibilidades a la consecución del objetivo último de la Convención, siempre teniendo en cuenta que los países desarrollados son responsables de la mayor parte de las emisiones históricas y que deben, por ello, efectuar un mayor esfuerzo en la reducción de sus emisiones y liderar la lucha contra el cambio climático.

El derecho de las Partes al desarrollo económico sostenible y a la participación en el sistema económico mundial en términos no discriminatorios. Las medidas adoptadas para combatir el cambio climático, incluidas las unilaterales, no deberían constituir un medio de discriminación arbitraria o injustificable ni una restricción encubierta al comercio internacional.

- Compromisos

Para la fijación de los compromisos de las Partes, en aplicación del principio de responsabilidades comunes pero diferenciadas que se acaba de mencionar, la Convención crea dos grandes grupos de países, aunque pueden observarse modulaciones en cuanto a sus obligaciones dentro de cada uno de ellos por subgrupos. Podría decirse, simplificando sólo levemente, que las obligaciones de las partes siguen un esquema semejante a una pirámide en función del nivel de desarrollo alcanzado.

Así, los países recogidos en el Anexo I de la Convención son los países desarrollados, con las obligaciones más exigentes. Dentro del Anexo I, encontramos dos grupos de países diferenciados: los países con economías en transición (aquellos países que estaban experimentando las dificultades propias del cambio de una economía planificada a una economía de mercado) y los países pertenecientes a la OCDE, con menores dificultades económicas en general, relacionados en el Anexo II de la Convención.

Todos los países no recogidos en el Anexo I, a los que usualmente, en la jerga del cambio climático, se alude como los “no Anexo I”, son países en desarrollo, si bien es un grupo sumamente heterogéneo en el que se encuentran tanto las grandes economías emergentes como a los Países Menos Avanzados, así como multitud de países con circunstancias específicas en relación con el cambio climático –insularidad, dependencia económica de las exportaciones o importaciones de combustibles fósiles...- que los hacen especialmente vulnerables.

El artículo 4 de la Convención establece los compromisos de las Partes para la consecución del objetivo último de la Convención. Podría decirse, simplificando sólo levemente, que las obligaciones de las partes siguen un esquema semejante a una pirámide en función del nivel de desarrollo alcanzado por los distintos países y reflejado en la clasificación referida.

1°.- Compromisos generales

Todos los países, salvo en algunos casos los países menos adelantados, tienen la obligación, modulable en función de sus circunstancias específicas, de llevar a cabo actuaciones como las siguientes:

Elaboración de un inventario nacional de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Elaboración de comunicaciones nacionales sobre las medidas que están adoptando para aplicar la Convención (si bien es cierto que con distintas exigencias en cuanto a plazos, nivel de detalle y metodología).

Aprobación de programas nacionales, con referencia a actuaciones en materia de mitigación y adaptación, a la elaboración y transferencia de tecnologías ambientalmente sanas, a las medidas necesarias para garantizar la gestión sostenible de los sumideros de carbono, a las previsiones en relación con las investigaciones sobre el clima, la observación del sistema climático mundial y el intercambio de información, así como a la educación, formación y sensibilización del público.

2°.- Modulación de los compromisos para los países no Anexo I

Se trata de los países en desarrollo. Dentro de este grupo encontramos a los países especialmente vulnerables, tanto a los efectos del cambio climático como a los efectos de las medidas de respuesta. En relación con ellos se contemplan medidas de inversión, seguros y transferencia de tecnología. Además, las obligaciones de información y elaboración de inventarios son menos exigentes.

Como se ha mencionado con anterioridad, un grupo especial dentro de los no Anexo I son los Países Menos Avanzados, que se encuentran en el grupo de países más negativamente afectados por el cambio climático o por las medidas para paliarlo, junto con los pequeños países insulares o los productores de petróleo.

3°.- Los compromisos de los países Anexo I Estos países han de adoptar políticas y medidas relativas al cambio climático con el fin

de reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero a los niveles de 1990 no más tarde del año 2000.

Para los Países con Economías en Transición se establece una cierta flexibilidad, en particular en cuanto al año de referencia tomado como base para evaluar la evolución de las emisiones, tomando en consideración la severa crisis económica e industrial (existe una estrecha relación entre actividad industrial y emisiones) que estos países padecieron a finales de los 80 y principios de los 90.

4°.- Los compromisos de los países Anexo II Estos países pertenecientes a la OCDE, el selecto club de los más desarrollados, están sujetos al máximo nivel de compromisos: deben cumplir con los compromisos generales, con los compromisos de limitación de emisiones del Anexo I del cual también forman parte y con los compromisos adicionales en relación con los países en desarrollo, a los que deben apoyar en la tarea de hacer frente al cambio climático a través de la correspondiente ayuda financiera para la adaptación, la mitigación y el proceso de negociación internacional, así como facilitando la transferencia de tecnologías apropiadas a países en desarrollo.

- Organización institucional

En el marco establecido por la Convención desarrollan sus funciones distintas instituciones y órganos, unos establecidos en el propio texto de la misma y otros por acuerdos posteriores. Estas instituciones y órganos tienen una naturaleza heterogénea desde todos los puntos de vista. Así, unos órganos tienen naturaleza permanente y otros se constituyen para dar cumplimiento a tareas concretas, desapareciendo a la finalización de las mismas. También se diferencian en la extensión de su ámbito de actuación, puesto que además de grupos con tareas de carácter general, existen otros dedicados a temas muy concretos, como la transferencia de tecnologías o las necesidades de adaptación de los países en desarrollo.

Nos ocuparemos únicamente de las instituciones creadas directamente por la propia Convención: la Conferencia de las Partes (COP por sus iniciales en inglés), los órganos subsidiarios y la Secretaría de la Convención.

1º. La Conferencia de las Partes

El artículo 7.2 de la CMNUCC la define como el órgano supremo de la Convención. Es la máxima autoridad en lo referente a la toma de decisiones. El artículo 7.2 establece una serie de funciones que debe desempeñar la COP, entre los que se encuentran el examen periódico de la adecuación de los compromisos establecidos en la Convención para cumplir con su objetivo último a la luz de la experiencia y del estado de la ciencia, las tareas relativas a la revisión de la implementación de la Convención por las Partes y la adopción de informes al respecto, revisar los informes emitidos por los órganos subsidiarios y dirigir su actuación, así como ejercer cualquier otra función que le atribuya cualquier artículo de la Convención o que sea necesaria para cumplir el objetivo último de la misma.

La COP se reúne generalmente una vez al año para desarrollar sus funciones, en los últimos meses del año durante unas dos semanas. Las reuniones pueden llevarse a cabo bien en la sede de la Secretaría de la Convención en Bonn, bien en algún Estado parte que se ofrezca como sede de la reunión anual, previa aceptación por la COP del ofrecimiento y, normalmente, rotando equitativamente entre los cinco grupos de países de Naciones Unidas (África; Asia; América Latina y Caribe; Europa Central y Oriental; y Europa Occidental y otros).

La COP adopta decisiones de implementación de la Convención que en la práctica completan y desarrollan los contenidos de la misma, pero también declaraciones de carácter político y resoluciones. La importancia de las decisiones de la COP en el desarrollo del marco jurídico e institucio-

nal del cambio climático es enorme, como ponen de relieve, entre otros, los Acuerdos de Marrakech de 2001, o la decisión acerca de la iniciación del diálogo para el desarrollo del régimen del cambio climático después del periodo 2008-2012.

2º. Los órganos subsidiarios

La Convención crea dos órganos subsidiarios en sus artículos 9 y 10: el Órgano Subsidiario de Asesoramiento Científico y Tecnológico (SBSTA por sus iniciales en inglés) y el Órgano Subsidiario de Ejecución (SBI por sus iniciales en inglés). Se trata de órganos multidisciplinares que se reúnen dos veces al año para preparar la reunión anual de la COP, una a mitad del año y la segunda, normalmente, durante la reunión anual de la COP.

Al Órgano Subsidiario de Asesoramiento Científico y Tecnológico, de acuerdo con el artículo 9.1 de la Convención y con la Decisión 6/CP.1, le corresponden multitud de funciones en este marco, entre las que cabe destacar, por ejemplo, el desarrollo y mejora de metodologías comparables para la elaboración de los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, de la absorción por los sumideros, de las proyecciones de emisiones y de los efectos de las medidas nacionales adoptadas para dar cumplimiento a la Convención.

Al Órgano Subsidiario de Ejecución le corresponde, de acuerdo con el artículo 10 y con la Decisión 6/CP.1, el desarrollo de diferentes tareas de carácter administrativo y financiero, entre las que se encuentran las relativas al mecanismo financiero de la Convención y el examen y análisis de las comunicaciones nacionales.

3º. La Secretaría de la Convención

Está vinculada con todo el sistema de Naciones Unidas y vinculada por sus reglas de actuación. Tiene su sede en Bonn y desarrolla múltiples tareas referentes a la preparación de las reuniones anuales, apoyo a los órganos de la Convención, asistencia a

los países en desarrollo en el cumplimiento de sus objetivos, recopilación de documentos, elaboración de documentos oficiales de apoyo a la COP y coordinación con otros organismos y agencias del sistema de Naciones Unidas.

EL PROTOCOLO DE KIOTO

- Adopción y proceso hasta la entrada en vigor

Como se ha señalado con anterioridad, las Partes de la Convención fueron conscientes desde muy pronto de la necesidad de ir más allá de los compromisos adquiridos en la Convención. La primera Conferencia de las Partes, que tuvo lugar en Berlín en 1995, concluyó que los compromisos para los países desarrollados no eran adecuados y adoptó el Mandato de Berlín, base de las negociaciones posteriores que finalmente determinarían la adopción del Protocolo.

En 1996, el IPCC concluyó su segundo informe, más concluyente que el primero en cuanto a la influencia humana en el clima y en el que recomendaba la adopción de medidas coste-eficientes para hacer frente al cambio climático. Como resultado, en la COP.3, en Kioto, se adoptó el Protocolo de Kioto.

No obstante, el proceso desde la adopción y firma del Protocolo por las Partes de la Convención fue largo y costoso. Por un lado, el Protocolo, aunque más concreto en su contenido que la Convención, necesitaba la adopción de normas complementarias antes de que los Estados signatarios pudieran ratificarlo y comprometerse jurídicamente con pleno conocimiento del alcance real de sus obligaciones. Se trataba por tanto de llevar a cabo todo el desarrollo jurídico necesario para hacer del Protocolo una norma aplicable una vez se hubiese ratificado. Tal labor se ha desarrollado en sucesivas Conferencias de las Partes desde la firma del Protocolo. Entre ellas destaca la séptima Conferencia

de las Partes, que tuvo lugar en Marrakech en 2001, en la que se aprobó un paquete de decisiones conocidas como los Acuerdos de Marrakech, que contienen las disposiciones necesarias para que el Protocolo sea aplicable en diversos ámbitos.

Por otro lado, la entrada en vigor del Protocolo exigía la ratificación por al menos cincuenta y cinco países que fuesen Partes de la Convención y que representasen como mínimo el 55% de las emisiones mundiales en 1990. La negativa de Estados Unidos a ratificar el Protocolo, siendo como es uno de los mayores emisores de gases de efecto invernadero, al considerar que ponía en peligro la competitividad de su industria, dificultó enormemente la entrada en vigor del Protocolo. La ratificación por parte de Rusia permitió alcanzar el 55% de las emisiones de 1990 y por tanto la entrada en vigor del Protocolo el 16 de febrero de 2005. Actualmente, ciento setenta y cuatro países y organizaciones de integración regional han ratificado el Protocolo, representando el 61,6% de las emisiones del año base (1990).

En Montreal, en diciembre de 2005, tuvo lugar la undécima Conferencia de las Partes de la Convención, actuando por primera vez como Reunión de las Partes del Protocolo de Kioto. En la Cumbre de Montreal se adoptaron definitivamente los Acuerdos de Marrakech y se inició el diálogo para fijar los compromisos de reducción post-Kioto, es decir, para después del periodo de compromiso 2008-2012. En Nairobi, en noviembre de 2006, tuvo lugar la duodécima Conferencia de las Partes de la Convención y segunda Reunión de las Partes del Protocolo de Kioto. La tercera tendrá lugar en Bali en diciembre de 2007.

- Naturaleza y características

El Protocolo es un instrumento jurídico internacional adoptado en el marco de la Convención, que sólo tiene sentido en el marco por ésta establecido. Así, sólo pueden

ser Partes del Protocolo aquellos Estados y organizaciones de integración regional que previamente lo sean de la Convención. En el mismo sentido, cabe destacar que el Protocolo tiene como base los mismos principios que la Convención y que comparte sus instituciones, incluidos los órganos subsidiarios y la Secretaría. En el marco del Protocolo se habla de la Conferencia de las Partes actuando en calidad de Reunión de las Partes (COP/MOP según sus siglas en inglés).

Entre las novedades fundamentales del Protocolo respecto de la Convención pueden señalarse las siguientes:

Concreta los gases de efecto invernadero que se ven afectados por sus disposiciones. No se habla de “dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal” como en la Convención, sino que en su Anexo A se establece una cesta de cuatro gases (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hexafluoruro de azufre) y dos grupos de gases (hidrofluorocarbonos y perfluorocarbonos). Recoge compromisos concretos y cuantificados de reducción para los países desarrollados –recogidos en el anexo B del Protocolo- y un periodo de tiempo para su cumplimiento: el denominado periodo de compromiso 2008-2012.

Prevé el establecimiento de un sistema para el control del cumplimiento o incumplimiento de sus compromisos por las Partes a través de los mecanismos y procedimientos de cumplimiento y para determinar las consecuencias del incumplimiento.

Junto con las medidas de reducción de las emisiones e incremento de la absorción por los sumideros en que las Partes sujetas a objetivos cuantificados y vinculantes de reducción deben basar el cumplimiento de los mismos, recoge, siempre con sujeción al principio de complementariedad, la posibilidad de acudir a mecanismos de mercado

(los denominados mecanismos de flexibilidad del Protocolo de Kioto).

- Los compromisos cuantificados de reducción

Las Partes Anexo I de la Convención que ya la habían ratificado cuando se firmó el Protocolo en 1997 tienen establecidos compromisos cuantificados de reducción en el Anexo B del Protocolo. Sólo se establecen compromisos de reducción para los países desarrollados, que se recogen en la Tabla 2.

El compromiso de reducción a alcanzar por el conjunto de los países desarrollados es de un 5,2% durante el periodo 2008-2012 frente a las emisiones de 1990.

No obstante, los países con economías en transición (antiguo bloque comunista) pueden elegir otro año base en atención a la crisis económica experimentada durante los primeros años 90.

En relación con los gases fluorados que sustituyen a gases dañinos para la capa de ozono, afectados por el Protocolo de Montreal, puede elegirse, por todos los países con compromisos cuantificados de reducción, 1995 como año base.

Puede computarse también, a efectos de cumplimiento del Protocolo, la absorción por los sumideros, siempre que se deba a actividades humanas relacionadas con forestación, reforestación y deforestación realizadas desde 1990. Este tipo de actividades da lugar a las Unidades de Absorción (UDA).

Cabe, de conformidad con el artículo 4 del Protocolo, el cumplimiento conjunto por áreas de integración regional. Esta posibilidad fue utilizada por la Unión Europea, estableciéndose así la “*burbuja comunitaria*”. La Decisión del Consejo, de 25 de abril de 2002, *relativa a la firma por la Comunidad Europea de un Protocolo a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y la ejecución común de los compromisos derivados de la misma* establece el cumplimiento conjunto de la

PROTOCOLO DE KIOTO	
Compromiso cuantificado de reducción	
Países Desarrollados	Unión Europea
- 8% Unión Europea	- 28 % Luxemburgo
- 8% Liechtenstein, Mónaco, Rep. Checa, Bulgaria, Eslovaquia, Eslovenia, Estonia, Letonia, Lituania	- 21 % Alemania
- 7% Estados Unidos	- 21 % Dinamarca
- 6% Japón, Canadá, Hungría, Polonia	- 13 % Austria
- 5% Croacia	- 12,5% Reino Unido
0% Rusia, Ucrania, Nueva Zelanda	- 7,5% Bélgica
1% Noruega	- 6 % Países Bajos
8% Australia	0 % Finlandia
10% Islandia	0 % Francia
	+ 4 % Suecia
	+ 6,5% Italia
	+ 13 % Irlanda
	+ 15 % España
	+ 25 % Grecia
	+ 28 % Portugal

año base 1990

Tabla 2. Compromisos cuantificados de reducción de las Partes Anexo I (Protocolo + Burbuja Comunitaria). LOS

Comunidad, de conformidad con el artículo 4 del Protocolo, de modo que los Estados Miembros y la Comunidad son corresponsables del cumplimiento de los compromisos del Protocolo. Tanto la Comunidad como los Estados Miembros depositaron sus cartas de ratificación ante la Secretaría de la CMNUCC el 30 de mayo de 2002, de conformidad con lo establecido por la Decisión.

De este modo, aunque la Comunidad se compromete a reducir sus emisiones en un 8% respecto a las emisiones de 1990, el reparto de la carga de reducción dentro de la Comunidad diferencia entre unos y otros países, como puede observarse en la Tabla 2. Así, por ejemplo, Portugal puede aumentar sus emisiones en un 28% mientras que Luxemburgo se compromete a reducirlas en la misma medida. El compromiso cuantificado de reducción de España en el marco de la “*burbuja comunitaria*” es del 15% sobre las emisiones del año base.

compromisos cuantificados de reducción, establecidos en el Anexo B como porcentaje de las emisiones de cada Parte en el año base, han de ser convertidos en un número de toneladas de dióxido de carbono equivalente que cada Parte puede emitir en el periodo de compromiso del Protocolo (2008-2012). Para ello son relevantes, entre otras cuestiones, la elección del año base – todos los Anexo I pueden hacerlo en relación con los gases fluorados y los países con economías en transición en relación con todos los gases-; la cuantificación exacta de las emisiones en el año base y el potencial de absorción por los sumideros. Esta cuantificación da lugar al total de Unidades de Cantidad Asignada (UCA) de cada una de las Partes Anexo I. Cada UCA representa el derecho a emitir una tonelada de dióxido de carbono equivalente.

El cálculo de las UCA correspondientes a cada Parte del Anexo I se lleva a cabo mediante un proceso complejo en el que el

elemento inicial es el Informe de Cantidad Asignada, que cada Parte debe remitir, de conformidad con la Decisión 13/CMP.1, antes del 1 de enero de 2007 o, si ratificase el Protocolo con posterioridad, en el plazo de un año desde la entrada en vigor del Protocolo para esa Parte.

- El cumplimiento de los objetivos cuantificados de reducción

Las Partes que, de acuerdo con lo establecido por el Anexo B del Protocolo, asumen compromisos cuantificados de reducción deben basar el cumplimiento en la adopción de políticas y medidas internas de mitigación de las emisiones, de forma que los mecanismos de flexibilidad actúen con un carácter meramente complementario, de conformidad con el principio de complementariedad, recogido en la Decisión 15/CP.7 *sobre los principios, carácter y objeto de los mecanismos previstos en los artículos 6, 12 y 17 del Protocolo de Kioto*.

El principio de complementariedad establece que la utilización de los Mecanismos ha de ser complementaria a las medidas internas para la reducción o limitación de emisiones de gases de efecto invernadero. Este principio responde a la preocupación de evitar que los mecanismos se convirtieran en un instrumento para la no adopción de políticas y medidas nacionales de lucha frente al cambio climático. Cabe señalar que el principio de complementariedad tiene un claro carácter cualitativo, puesto que en la Decisión 15/CP.7 antes mencionada no se menciona ninguna limitación cuantitativa al uso de los mecanismos. En este sentido, el cumplimiento o no de este principio por parte de los Estados debe evaluarse teniendo en cuenta multitud de elementos, que configuran las circunstancias nacionales propias de cada uno.

1°. Políticas y medidas internas de reducción de las emisiones

Las políticas y medidas internas que pueden adoptar los Estados para el cumplimiento

de los objetivos cuantificados de reducción son muy diversas. Entre ellas pueden mencionarse, entre otras: el fomento de la eficiencia energética en los sectores; el aumento del uso de energías renovables y la investigación y promoción de las tecnologías de secuestro y almacenamiento de carbono; la protección y mejora de los sumideros y la promoción de prácticas sostenibles de gestión forestal; las medidas para limitar y/o reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero sujetos al Protocolo en el sector transporte, residuos, residencial, comercial e institucional; así como la reducción progresiva de las posibles incoherencias entre la política fiscal general de los Gobiernos y el objetivo de reducción de las emisiones, evitando incentivos fiscales, exenciones tributarias y subvenciones contrarias al objetivo de reducción.

2°. Los mecanismos de flexibilidad

Los mecanismos de flexibilidad tienen un doble objetivo:

Por un lado se trata de facilitar el cumplimiento de los países desarrollados con sus compromisos de reducción o limitación de las emisiones, al menor coste posible.

Por otro lado, se considera que los mecanismos son un buen instrumento para promover el desarrollo sostenible de los países en desarrollo, a través de los flujos de inversión y las posibilidades de transferencia tecnológica que conlleva el desarrollo de los proyectos, así como de la capacitación técnica que puede proporcionar la participación en su gestión

Se prevén en el Protocolo tres mecanismos de flexibilidad distintos:

El mecanismo de desarrollo limpio se recoge en el artículo 12 del Protocolo. Permite la inversión de un país Anexo I (países industrializados) en un país no incluido en el Anexo I (país en desarrollo), en proyectos de reducción de emisiones o de fijación de carbono. El país

Anexo I recibe los créditos (Reducciones Certificadas de Emisiones o RCE) del proyecto, que utiliza para alcanzar sus compromisos dimanantes del Protocolo. Cada uno de estos créditos supone la posibilidad de emitir una tonelada de dióxido de carbono equivalente.

El mecanismo de aplicación conjunta se recoge en el artículo 6 del Protocolo. Permite la inversión de un país desarrollado (Anexo I) en otro también desarrollado (Anexo I) en proyectos de limitación de emisiones o de fijación de carbono. El mecanismo de aplicación conjunta genera como créditos las Unidades de Reducción de Emisiones (URE), que dan derecho, como las RCE, a la emisión de una tonelada de dióxido de carbono equivalente. Puesto que los proyectos de aplicación conjunta se desarrollan en el territorio de Partes Anexo I, que cuentan con un compromiso cuantificado de reducción o limitación de emisiones y con un número de UCA (unidades de cantidad asignada), el país en que se desarrolla el proyecto debe descontarse tantas UCA como URE vaya a transmitir al país inversor. Los países receptores por antonomasia, bajo el ámbito de este mecanismo serán los países con economías en transición, tanto por sus escenarios de emisiones, como por su estructura económica que convierte en atractivas y eficientes las inversiones en estos países.

El comercio de derechos de emisión se recoge en el artículo 17 del Protocolo. Este mecanismo permite a las Partes Anexo I adquirir créditos de otras Partes Anexo I para alcanzar, de forma eficiente desde el punto de vista económico, los compromisos adquiridos en Kioto. De esta manera, los que reduzcan sus emisiones más de lo comprometido podrán vender los créditos de emisiones excedentarios a los países que consideren más difícil o más oneroso satisfacer sus objetivos. Bajo este régimen, los países Partes del Anexo I, o

aquellas personas jurídicas a las que éstos hayan autorizado, pueden intercambiar en el mercado, los distintos tipos de unidades contables reconocidos por el Protocolo de Kioto: URE, RCE, UCA y UDA.

- El mecanismo de cumplimiento del Protocolo de Kioto

El artículo 18 del Protocolo establece que *“en su primer período de sesiones, la Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Protocolo aprobará unos procedimientos y mecanismos apropiados y eficaces para determinar y abordar los casos de incumplimiento de las disposiciones del presente Protocolo, incluso mediante la preparación de una lista indicativa de consecuencias, teniendo en cuenta la causa, el tipo, el grado y la frecuencia del incumplimiento. Todo procedimiento o mecanismo que se cree en virtud del presente artículo y prevea consecuencias de carácter vinculante será aprobado por medio de una enmienda al presente Protocolo”*.

En los Acuerdos de Marrakech, la Decisión 24/CP.7 adoptó un borrador de decisión en cumplimiento de este precepto del Protocolo, estableciendo los procedimientos y mecanismos relativos al cumplimiento, que sería adoptado en la primera Conferencia/Reunión de las Partes tras la entrada en vigor del Protocolo de Kioto. Durante el proceso de negociación posterior a Marrakech han existido desacuerdos entre las Partes del Protocolo acerca del instrumento jurídico adecuado –decisión de la COP/MOP o enmienda del Protocolo- para la adopción de estos mecanismos, por efecto de la última frase del artículo 18, que establece que en caso de que se prevean consecuencias vinculantes para las Partes el instrumento deberá ser aprobado por enmienda. En la COP/MOP de Montreal, primera tras la entrada en vigor del Protocolo se adoptó

la Decisión 27/CMP.1, que establece los procedimientos y mecanismos relativos al cumplimiento y que pospone la posibilidad de adopción de una enmienda en el mismo sentido a la COP/MOP.3.

Lo más relevante, no obstante, es que la Decisión 27/CMP.1 crea el Comité de Cumplimiento que entra en funcionamiento ya en 2006. El Comité cuenta con un Plenario, una Mesa y dos Grupos especializados: el Grupo de facilitación, encargado del asesoramiento, asistencia y alerta temprana a las Partes con dificultades para cumplir sus compromisos y el Grupo de cumplimiento, encargado de evaluar el cumplimiento o incumplimiento una vez transcurrido el periodo de compromiso, con capacidad para aplicar medidas a las Partes tales como: la deducción de tantas toneladas de dióxido de carbono equivalente de la cantidad asignada del periodo de compromiso siguiente como resulte de multiplicar el exceso de emisiones por 1.3; requerir a la Parte para que formule un plan de acción para el cumplimiento y suspender la elegibilidad para participar en el comercio de emisiones.

CONCLUSIÓN. EL FUTURO DEL RÉGIMEN INTERNACIONAL DE CAMBIO CLIMÁTICO

El Protocolo de Kioto no establece compromisos cuantificados de reducción más allá de 2012. Las negociaciones sobre el régimen post-Kioto se están desarrollando a través de tres vías: el artículo 3.9 del Protocolo, sobre los futuros compromisos de las Partes Anexo I; el artículo 9 del Protocolo, en relación con la revisión y evaluación de la implementación del Protocolo y el Diálogo sobre acción Cooperativa en el marco de la Convención.

En este proceso hay que tener en cuenta que la evolución prevista de las

emisiones en los países en desarrollo, particularmente en las grandes economías emergentes, hace evidente que no se puede luchar efectivamente contra el cambio climático sólo con la actuación de los países desarrollados. Es necesaria una respuesta global, en la que todos participen de conformidad con el principio de responsabilidades comunes pero diferenciadas.

Las negociaciones sobre el régimen futuro deberían estar presididas por las siguientes ideas-fuerza: debe alcanzarse un marco justo y flexible, basado en la equidad en el reparto de esfuerzos y en la compatibilidad con las circunstancias nacionales; es indispensable ampliar la participación sobre la base del principio de responsabilidades comunes pero diferenciadas; debe hacerse frente, a través de las necesarias medidas de adaptación, a los efectos ya inevitables del cambio climático. Todo lo anterior debería construirse sobre la base de la experiencia ganada y los éxitos alcanzados en la aplicación del Protocolo de Kioto, incluyendo lo relativo a los mecanismos de flexibilidad, gran novedad del Protocolo respecto a otros instrumentos medioambientales.

Cabe destacar, para terminar, que la lucha contra el cambio climático no sólo es estrictamente necesaria en términos medioambientales, económicos, sociales y geopolíticos, sino que puede considerarse una oportunidad relevante para los principales implicados. La lucha contra el cambio climático está promoviendo una revolución silenciosa en la que las tecnologías bajas en carbono y los cambios en la estructura económica van posibilitando la desvinculación de las emisiones de gases de efecto invernadero del crecimiento económico. Frenar el cambio climático no ha de suponer una renuncia al crecimiento económico.

BIBLIOGRAFÍA

- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.
- Protocolo de Kioto a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático.
- United Nations Framework Convention on Climate Change: Handbook. Bonn: Alemania. 2006. Intergovernmental and Legal Affairs. Climate Change Secretariat.
- Acuerdos de Marrakech. Documento FCCC/Kyoto Protocol Reference Manual on Accounting of Emissions and Assigned Amounts. Climate Change Secretariat. 2007.

CHAPTER 15 / CAPÍTULO 15

***Forest and environmental education
campaigns about climate change***

**Bosques y educación ambiental
ante el cambio climático**

El cambio climático en Andalucía: evolución y consecuencias medioambientales
Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía): 283-292 (2007)
© Los autores. Sevilla. España. ISBN: 978-84-96 776-40-1

Forest and environmental education campaigns about climate change

Vicente Jurado Doña

Dirección General de Educación Ambiental y Sostenibilidad. Avda. de Manuel Siurot, 50. Consejería de Medio Ambiente (Environmental Council of the Andalusian Government). 41071 Seville. vicente.jurado@juntadeandalucia.es

ABSTRACT

In this article are mentioned a few of the most relevant aspects related to the Climate Change from an environmental point of view.

Desertification of the Sahel, disappearance of mountain glaciers in the world, alterations of coral reefs are some examples of this phenomenon.

We must emphasize the role of the Mediterranean forest of Andalusia that capture emissions of CO₂ and keep carbon out of the atmosphere and reverse global warming.

Andalusian Regional Government's Environmental Ministry contributes with environmental education campaigns about Climate Change and its effects.

Keywords: *mediterranean forest of Andalusia, climate change, environmental education campaigns*

Bosques y educación ambiental ante el cambio climático.

Vicente Jurado Doña

Dirección General de Educación Ambiental y Sostenibilidad. Avda. de Manuel Siurot, 50. Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía). 41071 Sevilla. vicente.jurado@juntadeandalucia.es

RESUMEN

En el presente artículo se mencionan algunos de los aspectos más importantes en relación con el cambio climático desde la perspectiva medioambiental: desertificación del Sahel, desaparición de los glaciares de montaña en todo el mundo, alteraciones en los arrecifes coralinos.

Dada la capacidad de fijación de CO₂ por los bosques, se destaca el papel de los bosques mediterráneos andaluces en la absorción de este gas y la importancia de poner en marcha campañas de educación y sensibilización medioambiental sobre el cambio climático y sus efectos.

Palabras clave: *bosques mediterráneos de Andalucía, cambio climático, campañas de educación ambiental*

INTRODUCCIÓN

La Cumbre de la Tierra celebrada en Río de Janeiro en 1992, supuso el impulso y aprobación de 2 Convenios internacionales jurídicamente vinculantes: el Convenio sobre el Cambio Climático y el Convenio sobre la Conservación de la Biodiversidad.

La Convención Marco sobre Cambio Climático (Convenio) entró en vigor en marzo de 1994. No contenía calendario ni plazos de ejecución ni tampoco compromisos de reducción de GEI (Gases de Efecto Invernadero).

No será sino hasta 1997, en la 3ª Conferencia de las Partes, cuando se adopte el 1^{er} Protocolo que desarrolle el Convenio, el denominado Protocolo de Kyoto que ya presentaba un calendario de actuación y sobre todo supone un compromiso vinculante para

los países firmantes de reducir las emisiones de GEI para los 38 países industrializados.

El acuerdo obliga a limitar las emisiones conjuntas de 6 gases respecto a las del año 1990 durante el período 2008-2012 en proporciones diferentes:

Así para el conjunto de la UE la reducción acordada es de un 8 %, para EEUU un 7 % y para Japón, Ucrania, la Federación Rusa y Nueva Zelanda un 6 %.

En conjunto la reducción global acordada es un de 5,2 % para el conjunto de los países industrializados. El Protocolo entró en vigor, tras la ratificación de Rusia, el 16 de febrero de 2005, como se ve, años después de su redacción.

En España las emisiones de gases de efecto invernadero aumentaron un 32 % entre 1990 y 2001; en Alemania en cambio se redujeron en un 18,3 %, en el Reino Unido un 12 %

y en conjunto de la UE han disminuido un 2,3 %.

Hoy ya superamos el tope de emisión asignado por el Protocolo (en 1998 en el Consejo Europeo se llegó a un acuerdo político sobre el reparto de la carga entre los estados miembros concretándose el compromiso de España en la posibilidad de crecimiento de las emisiones en un 15 % respecto a 1990). Para la UE, tal y como se ha mencionado anteriormente, el compromiso de reducción era del 8 %.

Numerosos estudios científicos muestran una clara correlación entre el aumento generalizado de la temperatura media de la Tierra y el incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero (CO₂, metano y otros)

Las predicciones hasta el año 2100 (Tercer Informe Científico de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático; IPCC, 2001) apuntan hacia una subida entre 1,4° C y 5,8° C. (la previsión anterior era de un incremento máximo de 3,5° C) En los dos últimos siglos, la concentración de dióxido de carbono (CO₂), el más importante de los gases de efecto invernadero -por su volumen de emisiones (un 77 % del total)-, en la atmósfera, ha pasado de 280 partes por millón (ppm) a 380 ppm -según los últimos datos oficiales en 2005-, debido a la actividad humana, con un ritmo de incremento, en la última década, de un 2 % anual. La concentración atmosférica de CO₂ supera lo alcanzado en los últimos 650.000 años según muestran los testigos de hielo (IPCC, 2007). A pesar de todo llama la atención la velocidad del cambio y la persistencia del mismo.

Los efectos ya se están sintiendo, como indican los datos a nivel global: la temperatura media de la superficie terrestre se ha incrementado en algo más de medio grado, desde 1976, y once de los últimos doce años (1995-2006) están en el ranking de los doce años más calurosos en los registros de tem-

peraturas de superficie terrestre instrumentados desde 1850 (IPCC, 2007). Y ello está generando un deshielo acelerado del polo norte (los datos de satélite desde 1978 muestra una reducción de la extensión de hielo marino en el Ártico de un 27 % por década; IPCC, 2007), un aumento de los episodios de sequía, lluvias torrenciales y huracanes en diferentes zonas del planeta -que entre los años 2004 y 2005, ha afectado a más de 300 millones de personas-, y una clara elevación del nivel del mar. Es decir, un brusco cambio de los ecosistemas de la tierra, lo que va a afectar profundamente a todas las formas de vida.

Pero lo que está por venir es mucho peor. Según el informe Stern encargado por el Gobierno británico en 2005 y presentado a fines del 2006 en la Royal Society de Londres, la elevación de tan sólo un grado de la temperatura media del planeta -que se alcanzará cuando se llegue a 430 ppm CO₂ (lo que, al actual ritmo de incremento de las emisiones, sucederá en 2010)- supondrá el incremento de la desertificación en el Sahel (donde viven más de cien millones de personas), la desaparición de los glaciares de montaña en todo el mundo (lo que generará problemas de agua a los 50 millones de personas que viven en su entorno), graves daños para los ecosistemas de los arrecifes coralinos y, en general, una notable reducción del rendimiento de los cultivos en muchas regiones pobres, lo que incrementará el riesgo de hambre en millones de personas y, por tanto, una indudable presión migratoria hacia otras zonas.

Una elevación de las temperaturas de hasta tres grados, fruto de concentraciones de CO₂ de 550 ppm supondría que los desastres naturales serían la situación común en grandes áreas del planeta. Tan sólo en el año 2005 las catástrofes naturales (huracanes, ciclones, tsunamis...) causaron daños económicos por valor de 187.188 millones de euros, de los cuales 66.555 millones fueron

reembolsados por las compañías de seguros, lo que representa la mayor pérdida de bienes asegurados de la historia, en gran parte debido al huracán Katrina (El País, 2005). La situación probablemente empeorará en los años venideros si la concentración de gases no se estabiliza.

La desaparición de los grandes glaciares del Himalaya supondría, aparte del deterioro ambiental y paisajístico, la escasez de agua para unos quinientos millones de hindúes y chinos que viven en los alrededores de la cordillera. También se prevé con una concentración de 550 ppm, una reducción severa de los cauces de los ríos mediterráneos y de África del sur y el inicio del colapso del bosque amazónico. Las selvas tropicales -África ecuatorial, Amazonía y sureste asiático- serán de los ecosistemas más alterados por los nuevos escenarios climáticos que podrían sustituir a los actuales climas (IPCC, 2007).

Tomar las medidas necesarias para limitar la concentración de CO₂ a 550 ppm costará un 1 % del PIB mundial, pero no hacerlo supondrá una reducción del PIB mundial del 20 %, con efectos catastróficos para miles de millones de personas. La reducción de emisiones no supondrá una inmediata reversión del proceso, ya que las altas concentraciones de CO₂ en la atmósfera necesitarán muchos años para reducirse, tiempo durante el cual los efectos en el clima seguirán sufriendose, pero tenemos que limitarlas cuanto antes. Es posible, e imprescindible, detener la concentración de gases de efecto invernadero, en un nivel inferior a 450 ppm, pero eso supone hacer un fuerte esfuerzo de reducción de las emisiones de CO₂ y de los otros gases de efecto invernadero. Pese a la gravedad del problema y el espectacular aumento de la conciencia ciudadana, lo cierto es que la acción política, a todos los niveles, está muy por detrás de la magnitud del problema.

A nivel regional se ha constatado que los pequeños arroyos litorales del entorno de

Doñana (Huelva), han tenido una importante regresión durante los últimos siglos en consonancia con otros humedales de la zona (Sousa, 2004) y en relación con una intensificación de los procesos erosivos vinculados inicialmente a una disminución de los años húmedos y un incremento de los años secos, y a los diversos procesos relacionados con la Pequeña Edad de Hielo y su finalización (Sousa & García-Murillo, 2003). A ello habría que añadir el incremento detectado de las temperaturas medias de las mínimas y la disminución de la precipitación primaveral probablemente en relación con el cambio global (García Barrón, 2000). Estos fenómenos podrían estar relacionados igualmente con “la seca de las quercíneas” ya que el principal factor de incitación o detonación en el decaimiento de las especies del género *Quercus* es la sequía, o mejor dicho, la alternancia de sequías con períodos de precipitaciones abundantes y concentradas (Navarro et. al., 2004). La mortalidad no es un fenómeno nuevo sino que aparece y desaparece y en su evolución intervienen factores de predisposición, que son permanentes y van mermando la salud y el vigor del arbolado, y factores desencadenantes como los ataques de insectos defoliadores o la sequía que aparecen de forma intensa durante períodos más o menos cortos (Muñoz et. al., 1996). En la mortalidad juegan un papel importante el insecto perforador *Platypus cylindricus*, que vive en los tejidos leñosos de los alcornoques, y los hongos *Hipoxylon mediterraneum* y *Phytophthora cinnamomi*, que atacan a los árboles tras períodos de larga sequía como el de los años 1992-95. Estos hongos suelen atacar el arbolado con mayor intensidad en los años húmedos que siguen a los años secos. Algunos de los términos municipales más afectados en los últimos años son Los Barrios y Castellar de la Frontera/Almoraima (Montoya & Mesón, 1993).

La seca es quizá uno de los principales problemas de nuestros encinares y alcornoques y está motivando una seria preocupación entre científicos, propietarios de fincas y políticos. Pero veamos el papel que juegan nuestros ecosistemas forestales en todo este proceso.

EL PAPEL DE LOS BOSQUES ANDALUCES ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

La superficie forestal actual en Andalucía es de 4.658.105 ha lo que supone el 53 % del territorio regional, un porcentaje importante si se compara con el de toda España (17 %) y con el de la UE (31 %). La superficie arbolada supone el 52 % y el resto está ocupado por terrenos desarbolados (matorrales diversos, formaciones herbáceas y cultivos marginales). La otra mitad de la superficie total andaluza estaría constituida por terrenos agrícolas de diversa calidad y productividad.

Gran parte de las masas arboladas de Andalucía (al igual que en el resto del Estado español), no pueden catalogarse sin embargo, de auténticos bosques en equilibrio dinámico con las condiciones climáticas y ecológicas del medio. El bosque autóctono, constituido fundamentalmente por encinares y alcornoques (género *Quercus*), supone en la actualidad algo más de 1,2 millones de ha, la mayor parte de las cuales son encinares y alcornoques adheridos con una cobertura inferior al 25 %, que se consideran restos de los bosques y selvas mediterráneas que cubrirían amplios territorios a lo largo y ancho de toda la Península Ibérica, tras el máximo glacial hace unos 18.000 años.

Junto a encinas y alcornoques aparecen otras formaciones vegetales que, aunque en menor extensión, cumplen variadas funciones ecológicas y paisajísticas. Así, los bosques de pinsapos (*Abies pinsapo*) de las serranías de Cádiz y Málaga, constitu-

yen uno de los endemismos vegetales más singulares de la Península. Estos originales abetales, de extensión muy reducida, están emparentados con los bosques de las montañas del norte de Marruecos y de otras áreas (Grecia, sudeste de Turquía) y prefieren las exposiciones de umbría y altas tasas pluviométricas anuales (más de 1000 litros/m²) constituyendo en la actualidad un espacio forestal único.

Tenemos que destacar asimismo la existencia en Andalucía de bosquetes de acebuches (*Olea europaea*) sobre sustratos de vertisoles típicos de algunas áreas de campiñas que fueron intensamente deforestadas desde hace milenios. Los acebuches se asocian con lentiscos, palmitos y otras especies arbustivas, originando uno de los paisajes más característicos del piso termomediterráneo andaluz. Los pinares (hasta 6 especies diferentes del género *Pinus*) suponen el 32 % de la superficie forestal arbolada andaluza, lo que indica su gran importancia en cuanto a extensión. Independientemente de su significado autóctono o naturalizado, lo cierto es que los pinares han adquirido un peso importante por su destacado papel en las repoblaciones efectuadas en las últimas décadas en gran parte de la geografía andaluza y algunos enclaves montañosos suponen paisajes de elevado valor ecológico.

Junto a esta variada representación de las formaciones boscosas de Andalucía, que destacan por su biodiversidad y por su importancia socioeconómica y paisajística, encontramos además extensas y variadas formaciones de matorral que desempeñan un importante papel tanto en la amortiguación de los frecuentes procesos erosivos, como en relación con el establecimiento de nichos ecológicos para la avifauna migratoria (Jurado, 1999). Los matorrales, tan denostados no hace tanto tiempo por los gestores forestales, aparecen asociados a etapas maduras de la sucesión forestal, o bien formando parte de comunidades menos

maduras como consecuencia de la acción destructora y continuada del hombre sobre el territorio. Recientemente diversos estudios destacan el papel de la vegetación arbustiva como plantas nodrizas, incrementando la humedad del suelo, disminuyendo la elevada radiación y creando en definitiva un nuevo escenario que mejora la supervivencia de los plantones y la regeneración del arbolado en repoblaciones forestales (Zamora, et. al., 2001).

El Plan Forestal Andaluz (PFA) es el instrumento válido de gestión de las masas forestales de Andalucía. Se aprobó por Acuerdo del Consejo de Gobierno de 7 de febrero de 1989 y fue ratificado por Resolución del Parlamento Andaluz en noviembre de 1989. El PFA define la estrategia de la política forestal andaluza para un horizonte de 60 años, dadas las características de las acciones a emprender en los ecosistemas forestales (Jurado, 2002). Se estableció que su ejecución se llevara a cabo en fases decenales con actualizaciones cada 5 años. En julio de 2003 se aprobó la *Adecuación del PFA* a las nuevas orientaciones y directrices en materia de desarrollo forestal y de política ambiental para el período 2003/07. Se trata en realidad de la 2ª actualización (revisión) que se realiza y que básicamente pretende la adecuación del PFA a las demandas de la situación nacional e internacional incluyendo la necesidad de investigar el importante papel de los bosques y matorrales frente al calentamiento global. El plazo de vigencia es de 5 años (2003/07) e incluye una Programación financiera. Dicho Documento recoge entre sus objetivos “la gestión de los recursos naturales y su aprovechamiento de forma sostenible”. Entre las Estrategias para conseguirlo (estrategia 2.6) se incluye la *Valoración del monte mediterráneo como instrumento de fijación del CO₂ atmosférico*. Frente a la baja productividad de los ecosistemas forestales mediterráneos, su valor como fijadores de CO₂

les dota de un valor poco reconocido pero mucho más importante para la humanidad, un valor que es necesario transmitir al conjunto de la sociedad, para concienciarla de la necesidad de conservación y mejora de esos ecosistemas.

ASPECTOS CLAVE EN RELACIÓN A LOS BOSQUES ANDALUCES

- Importancia económica

El subsector forestal supone en Andalucía sólo el 2 % de la producción final agraria, aunque esta cifra quizá no responda a la realidad, pues algunos productos son difícilmente cuantificables y otros se incorporan a la cadena del mercado y ya no se consideran de índole forestal. Si bien basándonos sólo en las cifras estadísticas podríamos llegar a la conclusión de que los bosques son algo absolutamente marginal y residual desde el punto de vista económico, estos datos no reflejan la importancia de los recursos forestales a nivel territorial, social y ecológico porque la mayoría de los aprovechamientos forestales siguen jugando un papel socioeconómico destacado. Recientemente la Consejería de Medio Ambiente ha presentado un documento titulado *1ª Valoración Económica integral de los Ecosistemas Forestales de Andalucía* que recoge y cuantifica tres aspectos: productivo, recreativo y ambiental. El valor total estimado supera los 24 mil millones de €, de los que un 25,3 % corresponden a los elementos constituyentes del aspecto productivo (madera, corcho, castaña, piñón, pastos, caza y viento), un 15,2 % a los elementos del aspecto recreativo (áreas y paisaje) y el 59,5 % restante a los elementos constituyentes del aspecto ambiental: absorción de carbono y no-uso. Habría que destacar de dicho estudio el peso que adquiere la función ambiental de los ecosistemas forestales (casi el 60 % del total) frente a los otros aspectos incluido el productivo.

- Captura de CO₂ y cambio climático

Las plantas absorben el anhídrido carbónico a través de los estomas para la síntesis de carbohidratos y lo pierden como consecuencia de la respiración. Es necesaria la luz del sol para llevar a cabo parte de una serie de reacciones químicas complejas que se realizan en los cloroplastos de las células vegetales. El proceso de transformación del CO₂ en azúcares (primero azúcares simples y luego más complejos) requiere de la intervención de un enzima especializado denominado rubisco, que junto con la clorofila desempeña un papel crucial en la fotosíntesis, el proceso fundamental para el mantenimiento de la vida en la Tierra.

La importancia de los ecosistemas forestales en cuanto sumideros netos de carbono y por ello su papel primordial en cuanto a la mitigación del aumento de gases de efecto invernadero es conocida desde hace décadas. El Protocolo de Kyoto sobre Cambio Climático ratificado por España, (que entró en vigor el 16 de febrero de 2005) alude expresamente a la necesidad de proteger y mejorar las masas forestales en consonancia con su función en la lucha contra el calentamiento global (Jurado, 2006). Además, gran parte de nuestros bosques mediterráneos han sido sabiamente aprovechados y se consideran en parte como modelos de desarrollo sostenible (Jurado, 2007).

Fruto de este Protocolo fue el Programa Europeo sobre el Cambio Climático. Andalucía dispone en la actualidad de una Estrategia ante el Cambio climático que fue adoptada en septiembre de 2002 y se ha creado un Panel de Seguimiento de la Estrategia constituido por expertos de diversas disciplinas. Según datos recientes, los ecosistemas forestales andaluces fijan 151 millones de toneladas de dióxido de carbono, de las cuales 112 se acumulan en la biomasa aérea y 39 millones en la biomasa radical. La encina con el 36 %, el pino piñonero (11,6 %) y el alcornoque (10,7 %)

serían las especies con más capacidad de fijación, probablemente por la gran cantidad de árboles (número de pies) existentes de estas especies (EGMASA, 2005). Esta estimación mejorará notablemente al incluir en los próximos estudios el carbono contenido en el suelo, especies arbustivas, herbáceas y biomasa muerta junto con todo el proceso de evaluación de la Estrategia Andaluza ante el Cambio Climático. En la misma se incluyen acciones de gestión forestal, restauración y mejora en 800.000 hectáreas tanto en los ecosistemas terrestres como en las praderas de fanerógamas del litoral marino de la comunidad y en la vegetación de zonas húmedas.

A nivel mundial los bosques fijan grandes cantidades de carbono, retirándolo de la atmósfera. Se estima que las plantas asimilan 120×10^{15} g de carbono de los aproximadamente 730×10^{15} g de carbono que hay en la atmósfera (Peñuelas, 2004). En Europa, a finales de los 90 se estimaba que existían casi 6.000 millones de toneladas de madera que contenían unos 3.000 millones de toneladas de carbono (Terradas, 1997). Los suelos de los ecosistemas forestales albergan además cantidades muy superiores de carbono, que se podrían liberar en parte debido a la acción antropogénica (Peñuelas, 2004). Desgraciadamente el secuestro de carbono por los bosques es mucho menor que el total de carbono emitido por la quema de combustibles fósiles. Los cambios previstos en los modelos de simulación señalan que, en promedio, el 33 % del área forestal mundial se verá afectada por cambios en la frecuencia e intensidad de los incendios forestales, la distribución del agua y la diversidad de la vida silvestre (IPPC, 2001; Peterson et. al., 2001). Así pues, la recurrencia de incendios, la sequía y los eventos climáticos extremos producirán cambios en las comunidades vegetales e incluso se provocarán fenómenos locales de extinción de las especies peor adaptadas (Valladares et. al., 2004). Si bien

a nivel general en la Península los bosques han recuperado superficies importantes dado el abandono de las prácticas agrosilvopastorales y el aumento de las repoblaciones forestales, los modelos predicen que nuestros bosques se transformarán en emisores netos de carbono en la segunda mitad del presente siglo (Gracia et al., 2005).

En Andalucía, dada la gran importancia de los ecosistemas mediterráneos en cuanto extensión y calidad y, dado el grado de incertidumbre que se cierne sobre ellos y su capacidad de resistencia y adaptabilidad a los futuros cambios, se está llevando a cabo un inventario de captaciones de CO₂ por los bosques y pastizales (no se han considerado los matorrales). El avance preliminar del estudio (aún no finalizado y que ha desarrollado una metodología propia diferente de la utilizada por el INIA) nos ofrece el dato de casi 60 millones de toneladas de carbono de cambio neto total para el período 1991/1999. Es decir, esa cantidad nos indica la diferencia entre las captaciones totales y las emisiones en el período considerado. La media de captaciones está en cerca de 5 t/ha de formación arbolada. Aunque se trata de un avance y los datos han de mejorar, en el estudio se destaca la importancia de los bosques de Andalucía en la mitigación del calentamiento global. A nivel europeo se ha creado recientemente una red de observación a largo plazo constituida por numerosos científicos que pretenden el establecimiento de un sistema de alerta temprana, que permita anticipar los cambios en los ecosistemas y que facilite el flujo de información ecológica.

LA EDUCACIÓN AMBIENTAL COMO HERRAMIENTA DE SENSIBILIZACIÓN

Nos encontramos quizá ante el mayor reto ambiental al que se enfrenta la Humanidad y serán necesarios grandes esfuerzos cien-

tíficos y una concienciación ambiental de todos los sectores de la sociedad. Es por ello que desde la Consejería de Medio Ambiente hemos iniciado -en colaboración con la Consejería de Educación- un Programa de Educación Ambiental con la intención de sensibilizar al alumnado y al profesorado sobre la necesidad de ahorrar energía y luchar contra el cambio climático. El Programa se inserta en la Estrategia Andaluza ante el Cambio climático y pretende facilitar al profesorado la tarea de incluir en su programación actividades orientadas a la toma de conciencia sobre la gravedad de este problema. Del mismo modo, pretende generar en los centros educativos actitudes y comportamientos favorecedores del ahorro energético y respetuosos con el medio ambiente.

El Programa se va a poner en marcha de manera experimental en 16 centros educativos andaluces. Aunque todos presentan características muy diferentes, tienen en común que pertenecen a la Red Andaluza de Ecoescuelas, una red de centros ya consolidada y con un nivel de concienciación medioambiental muy elevado. El Programa Kyoto Educa, que así se llama, pretende incorporar en los centros docentes buenas prácticas ambientales dirigidas a una reducción de las emisiones de CO₂. Se ha elaborado una completa Guía didáctica a la que ya se puede acceder a través de la web (www.kiotoeduca.org).

Desde luego entendemos que la campaña de educación ambiental y concienciación ha de dirigirse no sólo al sector educativo sino también al resto de la ciudadanía. Como consumidores podemos exigir de las empresas eléctricas que aumenten su porcentaje de electricidad generada procedente de fuentes energéticas renovables: solar, eólica, biomasa. También podemos hacer oír nuestras voces en el ámbito político. Las consecuencias ecológicas, económicas y sociales del cambio climático

no van a pasar desapercibidas a nuestros gobernantes, y prueba de ello es la repercusión que el tema tiene tanto en los medios internacionales, como nacionales y locales (Asunción, 2006). De hecho el pasado 1 de febrero representantes de Los Verdes y de Iniciativa per Catalunya-Els Verds presentaron en el Congreso de los Diputados un *Compromiso legislativo contra el cambio climático* al que invitaron a representantes de distintas asociaciones ecologistas y sindicales del Estado español.

Para conseguir el apoyo y la solidaridad de la sociedad, la sensibilización ambiental, utilizando diferentes técnicas, se vislumbra como una herramienta fundamental. De hecho en el artículo 6 de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, se establece que las Partes, en el cumplimiento de los compromisos fijados por la Convención, promoverán y facilitarán:

- La elaboración y aplicación de programas de educación y sensibilización del público sobre el cambio climático y sus efectos.
- El acceso del público a la información sobre el cambio climático y sus efectos.

- La participación del público en el estudio del cambio climático y sus efectos, y
- La formación del personal científico, técnico y directivo.

En la reunión de las Partes de Montreal (COP 11, noviembre-diciembre de 2005) y en las conclusiones relativas al artículo 6 de la Convención, se anima a las partes a que designen *puntos focales o centros de enlace* para las actividades relacionadas con ese artículo. Para España, el punto focal se lleva conjuntamente entre la Oficina Española para el Cambio Climático y el Centro Nacional de Educación Ambiental (CENEAM), ambos del Ministerio de Medio Ambiente (Garrote, 2006).

En este sentido y, conscientes de que las políticas de mitigación y adaptación frente al cambio climático no tienen sentido sin la colaboración activa de la ciudadanía, la Consejería de Medio Ambiente está trabajando igualmente en una estrategia de Comunicación y Participación que facilite pistas que permitan mejorar la concienciación y participación ambiental de tod@s en el grave problema del cambio climático con vistas a obtener posibles soluciones futuras.

BIBLIOGRAFÍA

- Asunción, M. (2006). La opción del ciudadano: campaña cambia de energía. *Ciclos. Cuadernos de comunicación, interpretación y educación ambiental* 18: 29-31.
- EGMASA (2005). *Inventario de captaciones de CO₂ por los principales sumideros en Andalucía* (Informe inédito, 71 pp + anexos), Consejería de Medio Ambiente, Sevilla.
- EL PAÍS (2005). *Las catástrofes han causado 187.000 millones de pérdidas en 2005* (21 de diciembre), Efe, Zurich.
- García, Barrón L. (2000). *Análisis de series termopluviométricas para la elaboración de modelos climáticos en el suroeste de España*, Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla. 160 pp.
- Garrote, I. (2006). El artículo 6 de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático: educación, formación y sensibilización del público. *Ciclos. Cuadernos de comunicación, interpretación y educación ambiental* 18: 25-28.
- Gracia, C., L. Gil & G. Montero. (2005). Impactos sobre el sector forestal. En: *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del Cambio Climático. Informe final*. J. M. Moreno (dir/coord.): pp. 399-435. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

- IPCC (2001). *Cambio climático 2001. Impactos, adaptación, vulnerabilidad*. Tercer Informe de Evaluación. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio climático. <http://www.ipcc.ch>
- IPCC (2007). Summary for Policymakers. <http://www.ipcc.ch>
- Jurado, V. (1999). El Matorral mediterráneo en Andalucía. En: *El Medio Forestal. Naturaleza de Andalucía*. V. Jurado (coord.): 127-169. Ediciones Giralda, Sevilla.
- Jurado, V. (2002). *Los Bosques de las Sierras del Aljibe y del Campo de Gibraltar (Cádiz-Málaga). Ecología, transformaciones históricas y gestión forestal*. Consejería de Medio Ambiente, Sevilla.
- Jurado, V. (2006). Los bosques andaluces ante el cambio climático: Reflexiones y propuestas. En: *La Gestión forestal próxima a la Naturaleza. Actas de las Jornadas sobre Bosques, Biodiversidad y Educación Ambiental*. P. A. Tiscar (coord.): pp. 41-46. Prosilva-Consejería de Medio Ambiente, Jaén.
- Jurado, V. (2007). Aprovechamientos tradicionales de los bosques mediterráneos: aspectos históricos y situación actual. En: *Los montes andaluces y sus aprovechamientos: experiencias históricas y propuestas de futuro*. Araque, E. & J. D. Sánchez (eds): pp. 177-203. Universidad de Jaén.
- Montoya, J. M. & M. L. Mesón. (1993). *Estudio monográfico sobre "La seca de los Quercus"*, ICONA. Madrid.
- Muñoz, C., P. Cobos, G. Martínez, C. Soldevilla & M. Díaz. (1996). *Micoflora y patología del alcornoque (Quercus suber L.)*, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.
- Navarro, R., P. Fernández, A. Trapero, P. Caetano, M. Romero, M. Sánchez, A. Fernández, I. Sánchez & G. López (2004). Los procesos de decaimiento de encinas y alcornoques. En: Borrero, G. y M. J. Arias (coords.), Consejería de Medio Ambiente. Sevilla.
- Peñuelas, J. (2004). Las emisiones de compuestos orgánicos volátiles como paradigma de la interacción del bosque con la atmósfera. En: *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. F. Valladares (ed.): pp 281-308. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Peterson C. J., V. H. Dale, D. Simberloff, L. A. Joyce, F. J. Swanson, S. McNulty, B. J. Stocks, R. P. Neilson, B. M. Wotton, M. P. Ayres, M. D. Flannigan, P. J. Hanson, L. C. Irland & A. E. Lugo. (2001). Climate change and forest disturbance. *Bioscience*: 51: 723-734.
- Sousa, A. (2004). *Evolución de la vegetación higrofitica y de los humedales continentales asociados en el litoral onubense oriental*, Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla, 550 pp.
- Sousa, A. & P. García-Murillo (2003). Changes in the Wetlands of Andalusia (Doñana Natural Park, SW Spain) at the End of the Little Ice Age. *Climatic Change* 58: 193-217.
- Terradas, J. (1997). Bosques, silvicultura y desafíos ambientales. *Ecosistemas* 20/21: 8-13.
- Valladares, F., A. Vilagrosa, J. Peñuelas, R. Ogaya, J. Camarero, L. Corcuera, S. Sisó & E. Gil-Pelegrín. (2004) Estrés hídrico: ecofisiología y escalas de la sequía. En: *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. F. Valladares (ed.): pp 163--190. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Zamora, R., J. Castro, J. M. Gómez, D. García, J. A. Hódar, L. Gómez & E. Baraza (2001). Papel de los matorrales en la regeneración forestal en ambientes mediterráneos: aplicaciones para la restauración. *Quercus*: 187: 40-47

CHAPTER 16 / CAPÍTULO 16

*Andalusian Climate Action Plan:
140 measures to fight climate change
in Andalusia*

**Plan de Acción por el Clima: 140
medidas para combatir el cambio
climático desde Andalucía**

El cambio climático en Andalucía: evolución y consecuencias medioambientales
Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía): 295-302 (2007)
© Los autores. Sevilla. España. ISBN: 978-84-96 776-40-1

Andalusian Climate Action Plan: 140 measures to fight climate change in Andalusia

Andrés Sánchez Hernández

Secretario General de Sostenibilidad. Avda. de Manuel Siurot, 50. Consejería de Medio Ambiente (Environmental Council of the Andalusian Government). 41071 Seville. sgs.cma@juntadeandalucia.es

ABSTRACT

Climate change is already a reality, with growing consequences not only in nature, but also on the economy, quality of life and health of people. This is the reason why we must act: firstly, reducing the problem, avoiding the worst scenarios by means of the reduction of green house gases emissions (mitigation policies). Secondly, managing the effects of climate change by reducing our exposure to the impacts and minimizing the risks (adaptation policies).

The efforts are, and need to be, realised at global scale. But we also must transfer them to the European, state, regional, local and even individual level. In September 2002, the Andalusian Regional Government approved the Andalusian Strategy in the face of climate change, which was the first institutional initiative in Spain aimed at combining a series of actions and measures to fight climate change. This Strategy constituted the basis of the Andalusian Climate Action Plan (PAAC).

The Andalusian 2007–2012 Climate Action Plan: Mitigation Programme was adopted by agreement of the Junta de Andalucía Government Council on 5th June, 2007. It is the result of a common work of the Andalusia Government and it enjoy the consensus and support of 40 researchers and experts from different climate change scientific disciplines. We hope that the PAAC application supposes a significant reduction of GHG emissions: specifically, we hope to reduce 4 millions tones in addition to the reduction included in every plan, policy or measure officially adopted that has any effect in atmospheric emissions. This is, in terms of GHG emissions per capita, Andalusian people would go from 8 tons of CO₂-eq in 2004 to 6,5 tons of CO₂-eq in 2012.

Keywords: *Andalusian Climate Action Plan (PAAC), mitigation policies, adaptation policies, Andalucía, climate change*

El cambio climático en Andalucía: evolución y consecuencias medioambientales
Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía): 295-302 (2007)
© Los autores. Sevilla. España. ISBN: 978-84-96 776-40-1

Plan de Acción por el Clima: 140 medidas para combatir el cambio climático desde Andalucía

Andrés Sánchez Hernández

Secretario General de Sostenibilidad. Avda. de Manuel Siurot, 50. Consejería de Medio Ambiente. 41071 Sevilla. sgs.cma@juntadeandalucia.es

RESUMEN

El cambio climático ya es una realidad, con consecuencias crecientes no sólo en la naturaleza, sino también en la economía, en la calidad de vida y en la salud de las personas. Por eso debemos actuar: en primer lugar, reduciendo el problema, evitando los escenarios más negativos al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (políticas de mitigación). Segundo, gestionando las consecuencias del cambio climático, reduciendo nuestra exposición a sus impactos y minimizando los riesgos (políticas de adaptación).

Los esfuerzos son y tienen que ser globales. Pero también deben trasladarse a la escala europea, estatal, regional, local, e incluso individual. Andalucía fue la primera comunidad autónoma en definir una Estrategia propia ante el Cambio Climático, aprobada en septiembre de 2002, y que puso las bases del Plan Andaluz de Acción por el Clima (PAAC).

El Programa de Mitigación 2007/2012 del PAAC fue aprobado por Acuerdo del Consejo de Gobierno de la Junta de Andalucía el 5 de junio de 2007. Es el resultado del trabajo común de la Junta de Andalucía, y ha contado también con la supervisión y participación de un grupo de cuarenta expertos de distintos ámbitos y sectores sobre Cambio Climático. Esperamos de la aplicación de este plan una reducción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero: en particular, reducir 4 millones de toneladas de CO₂ equivalente adicionales a las previstas en otros planes estatales y autonómicos ya en marcha. Así, los andaluces pasaremos de emitir 8 toneladas por habitante y año en 2004 a 6,5 en 2012.

Palabras claves: *Plan Andaluz de Acción por el Clima (PAAC), políticas de mitigación, políticas de adaptación, Andalucía, cambio climático*

INTRODUCCIÓN

El pasado 5 de junio el Consejo de Gobierno de la Junta de Andalucía aprobaba el programa de mitigación del Plan Andaluz de Acción por el Clima. Andalucía confirma así su compromiso en la lucha contra el cambio climático, que comenzaba en septiembre de 2002 siendo la primera comunidad autónoma en España en aprobar una estrategia propia para abordar el reto del cambio climático. De hecho, esta estrategia se adelantaba en dos años a las primeras acciones que desarrollaría el gobierno español para asumir sus compromisos internacionales en la lucha contra el calentamiento global.

La comunidad internacional ya ha alcanzado un consenso sobre el hecho de que estamos viviendo un cambio climático originado por causas humanas. El Grupo Internacional de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, en sus siglas en inglés), constituido en 1988 por científicos designados por los Estados miembros de Naciones Unidas, está haciendo público durante 2007 su Cuarto Informe de Evaluación, que no deja lugar a dudas sobre la magnitud del problema al que nos enfrentamos: define como “inequívoco” el calentamiento global, da cuenta de las evidencias del mismo, como el incremento de la temperatura media del planeta en 0.74 °C en los últimos 100 años o la reducción de la superficie helada del Ártico en un 2,7 % por década.

No es la primera vez que en los millones de años de existencia de la Tierra se han producido cambios bruscos en el sistema climático; lo que caracteriza al cambio climático que estamos viviendo es que no puede ser explicado por factores naturales, sino que sus causas son humanas. Por la utilización de combustibles fósiles (7.200 millones de toneladas de dióxido de carbono anualmente entre 2000 y 2005 en todo el planeta), pero también por la deforestación y el cambio de uso del suelo (1.600 millones de toneladas

de CO₂ al año), las emisiones de metano y óxido nitroso originados en la actividad ganadera y agrícola, o por la inadecuada gestión de los residuos, las emisiones de halocarbonos en procesos industriales...

En definitiva, estos factores han provocado cambios sustanciales en la composición de la atmósfera, haciendo que el dióxido de carbono pase de 280 partes por millón en la era preindustrial a 379 en 2005; el metano de 0,7 a 1,8 y el óxido nitroso de 0,27 a 0,32. El forzamiento radiativo de estos gases, que es una forma de medir el efecto invernadero como la variación de la energía por unidad de superficie en las capas bajas de la atmósfera, se ha incrementado en un 21,5 % desde 1990, y los niveles de CO₂ en la atmósfera son hoy superiores a los registrados, al menos, en los últimos 600.000 años.

Estos cambios en el clima están teniendo consecuencias sobre los sistemas naturales, sociales y económicos: el grupo de trabajo de impactos del IPCC establecía en su informe de abril de 2007 que el 30 % de las especies están amenazadas de extinción por el cambio climático, incluso en escenarios no extremos. Millones de personas van a ver su supervivencia básica amenazada: entre 75 y 250 millones de personas en África sufrirán de una mayor carencia de agua en una fecha tan temprana como 2020, y se prevé también la aparición de millones de personas desplazadas en Oceanía y Asia fundamentalmente por la elevación del nivel del mar. E incluso los hipotéticos “ganadores” con el cambio climático tendrán como correlato más perdedores, lo que incrementará la presión para definir mecanismos de redistribución global: los incrementos proyectados de hasta el 20 % en las cosechas de cereales en el Asia Oriental se acompañarán de descensos de hasta el 30 % en el Sur de Asia, y las ventajosas de temperaturas más templadas en el norte de Europa se traducen en olas de calor, pérdidas de productividad agraria o mayor riesgo de incendios forestales en la Europa

mediterránea. Vamos a tener que definir de nuevo nuestros sistemas de solidaridad internacional, para ocuparnos ahora ya no sólo de refugiados políticos o económicos, sino también de refugiados climáticos.

El cambio climático no sólo supone una amenaza ambiental o social: también lo es económica. Ya se está comenzando a definir la contabilidad del cambio climático: el gobierno británico evaluaba los costes de la no acción contra el cambio climático entre un 5 % y un 20 % del PIB anual global. Por su parte, el coste de las medidas de mitigación, es decir, de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, se ha estimado por los más de 700 científicos que han participado en el tercer grupo de trabajo del IPCC en un 0,12 % del PIB anual mundial para estabilizar la concentración de gases de efecto invernadero en unas 500 partes por millón de CO₂ equivalente. Es decir: la mitigación no es un coste, sino una inversión, que va a permitir fuertes ahorro de costes en el futuro, además de poner las bases para un desarrollo económico más sostenible, justo, eficiente y limpio.

ANDALUCÍA FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO

Andalucía fue la primera comunidad autónoma española en definir políticas contra el cambio climático. En septiembre de 2002 el Consejo de Gobierno de la Junta de Andalucía aprobaba la Estrategia Andaluza ante el Cambio Climático (EACC), coincidiendo con la Cumbre de Johannesburgo con la que se avanzaba en el progreso hacia el desarrollo sostenible global, abierto en la Cumbre de Río en 1992. Con dicha Estrategia, se coordinaban las políticas de seis consejerías para combatir el cambio climático.

Entre las medidas, destacaban las relativas a la promoción de las energías renovables y del ahorro y la eficiencia energética (con la

aprobación del Plan Energético de Andalucía 2003/2006), con el objetivo de conseguir que en 2010 el 15 % de las necesidades energéticas de nuestra comunidad se satisficieran con fuentes renovables. Políticas de reforestación, de manejo ecológico en la agricultura, de fomento del transporte público, de mejora de la información sobre condiciones climáticas y sobre las emisiones de gases de efecto invernadero, así como de seguimiento de los impactos del cambio climático en la salud humana completaban dicha Estrategia. Las medidas supusieron en la evaluación realizada en 2005 un ahorro de 1.360.000 toneladas de CO₂ equivalente. Sin embargo, la evolución de las emisiones (un incremento desde los 37 millones de toneladas de CO₂ equivalente en 1990 á 61,8 en 2004) obligaba a marcarse objetivos más ambiciosos.

Por otro lado, la realidad científica y política del cambio climático no ha hecho sino avanzar desde 2002. Hoy se da tanta importancia a la mitigación del cambio climático (reducir las emisiones de gases GEI y potenciar los sumideros naturales de carbono para evitar que el cambio climático presente llegue a niveles catastróficos) como a la adaptación, es decir, a dar por hecho que el cambio climático se está produciendo, y que corresponde definir los ámbitos naturales, sociales y económicos más vulnerables al mismo para definir medidas de adaptación reduciendo así los riesgos y costes. El Protocolo de Kioto es una realidad desde febrero de 2005, y se ha traducido en Europa en una política de comercio de derechos de emisiones de GEI, que limita éstas en grandes instalaciones (206 en Andalucía, que suponen unas emisiones de más de 32,3 millones de toneladas de CO₂ equivalente, aproximadamente el 55 % del total de emisiones en nuestra comunidad); más problemas para el control suponen los denominados “sectores difusos”: pequeñas fuentes (como los vehí-

culos de motor, o el consumo de energía doméstico o en pequeñas industrias y servicios) que al agregarse son equivalentes prácticamente a las grandes fuentes fijas. Además, el crecimiento en estos sectores es superior a la media (un 94 % aumentan las emisiones en el transporte en carretera entre 1990 y 2004, más de 30 puntos sobre el crecimiento medio). Por último, la preocupación social sobre el cambio climático ha aumentado: mientras que en 2001 el 36,8 % de los andaluces consideraban el cambio climático uno de los principales problemas ambientales en el planeta, en 2006 han sido el 43 %, como se puede ver en la Figura 1.

reducir los impactos, e incorporar en ello a la sociedad, a todas las administraciones, a la comunidad científica y a las empresas.

MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL PLAN ANDALUZ DE ACCIÓN POR EL CLIMA 2007/2012

En la elaboración de este programa han colaborado todas las Consejerías del Gobierno andaluz, y un Panel de Expertos en Cambio Climático: 40 científicos reconocidos, convocados por el Presidente de la Junta de Andalucía para asesorar y hacer

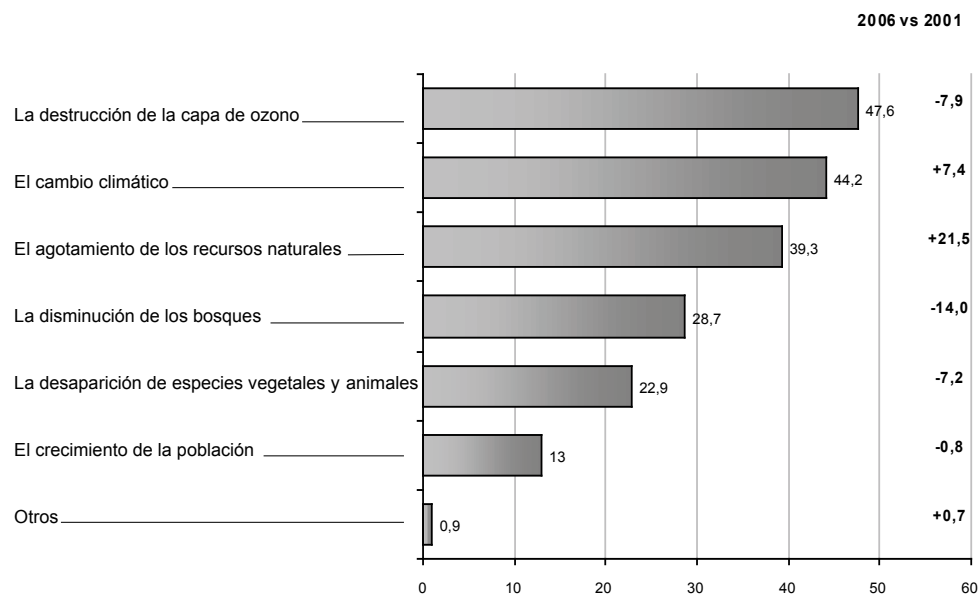


Figura 1. Preocupación social de los andaluces por temas medioambientales. Fuente: Ecobarómetro de Andalucía (IESA/Consejería de Medio Ambiente) 2001 y 2006.

Por todo ello se ha elaborado el Plan de Acción por el Clima, con tres programas: el de mitigación (aprobado por Acuerdo del Consejo de Gobierno del 5 de junio de 2007), de adaptación y de comunicación y participación (actualmente en elaboración). Es necesario afrontar las políticas contra el cambio climático reduciendo las emisiones, ante el cambio climático adaptándonos para

propuestas en “la batalla por el clima”. Los objetivos del programa de mitigación del PAAC son los siguientes:

- Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de Andalucía. En valores per cápita, una reducción del 19 % de las emisiones de 2012 (6,5 toneladas de CO₂ equivalente por habitante y año) respecto de las de 2004 (8 toneladas).

- Contribuir al cumplimiento de los objetivos del Protocolo de Kioto para España. Las políticas aprobadas por el gobierno central y acordadas con la Junta de Andalucía suponen reducir las emisiones en Andalucía en cinco millones de toneladas de CO₂ equivalente. Las 140 medidas adicionales del PAAC restarán otros cuatro millones de toneladas.

- Incrementar la capacidad de los sumideros naturales en Andalucía.

- Desarrollar herramientas de análisis, conocimiento y gobernanza para actuar frente al cambio climático, en particular favoreciendo la implicación de ciudadanas y ciudadanos, pequeñas y medianas empresas y administración local.

El diagnóstico de las emisiones en Andalucía nos muestra un perfil bastante parecido al español en componentes (Figura 2), si bien algo inferior en valores per cápita (8 toneladas de CO₂ equivalente por habitante en Andalucía, frente a 9,9 en España y 13 en la UE-25). La transformación de energía, fundamentalmente para la generación de electricidad, es el primer responsable de las emisiones de GEI (31 %), seguido del transporte (25 %) y de los procesos industriales (22 %). La agricultura supone aproximadamente un 8 %, los resi-

duos un 3 % y el resto de actividades, con porcentajes inferiores, concentra el 11 %.

Los escenarios de futuro, con proyecciones hasta 2012 (Figura 3), año final del Protocolo de Kioto, nos muestran que, de no tomar medidas, Andalucía superaría las 76 millones de toneladas de CO₂ equivalente, un 107 % más que en 1990. El escenario de ahorro, a partir de las políticas consideradas por el Gobierno español, el nivel de emisiones descendería hasta los 56,8 millones de toneladas de CO₂ equivalente, y las medidas adicionales aprobadas en el programa de mitigación del PAAC reducirían el total a 52,8 millones.

El programa de mitigación del PAAC incluye 140 medidas de mitigación, ordenadas en 12 áreas de intervención (ver Tabla 1). La finalidad de este programa es hacer que la lucha contra el cambio climático no sea una política sectorial, sino que afecte al conjunto de políticas de gobierno, pues las emisiones GEI (y la captación por sumideros naturales) dependen de cientos de actividades. Queda por tanto más que justificado que la lucha contra el cambio climático sea una política de gobierno, y dirigida además a conseguir la coordinación y participación de otros agentes.

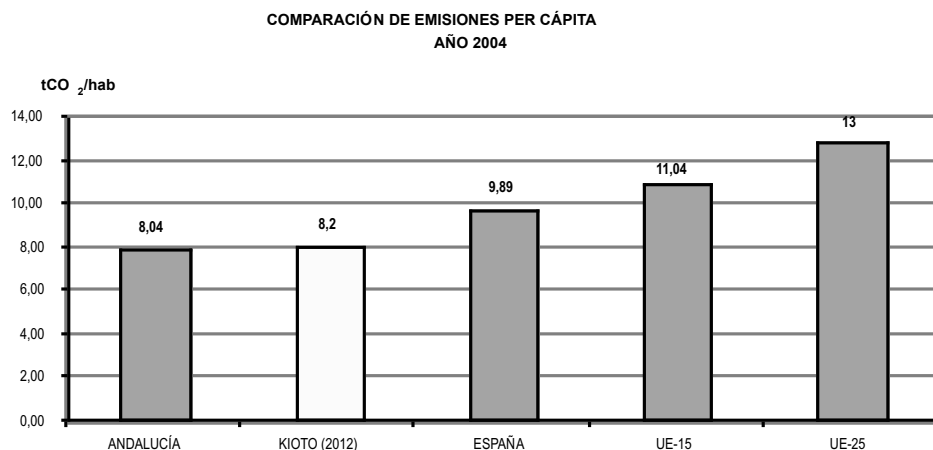


Figura 2. Emisiones de toneladas de CO₂ equivalente por habitante en Andalucía en comparación con España y la Unión Europea.

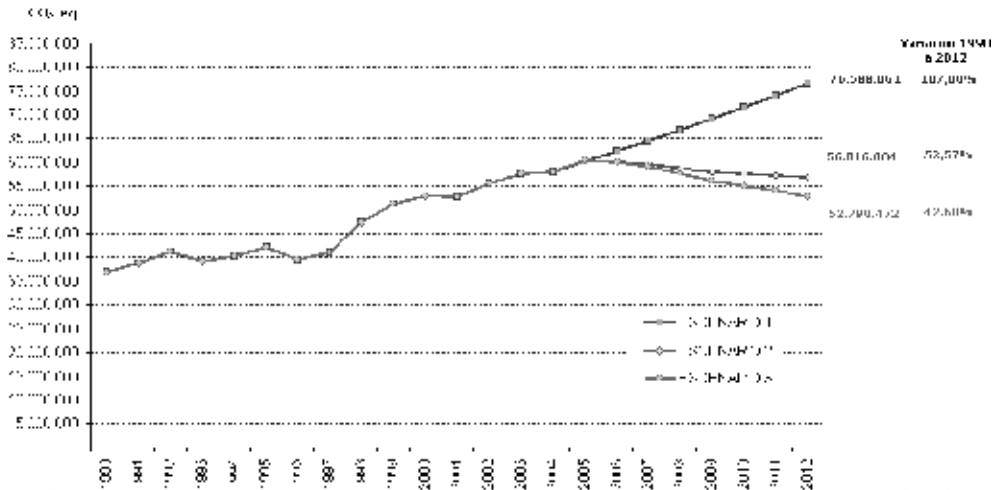


Figura 3. Representación Resumen de Escenarios de GEI. Andalucía. Periodo 1990–2012. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del Inventario de Emisiones de GEI de España del MMA sin considerar LULUCF.

Gracias al programa de mitigación del PAAC, los planes territoriales y urbanísticos deberán considerar su impacto en emisiones de GEI, y plantear medidas correctoras. Asimismo, en la construcción de viviendas se adoptarán principios de bioclimatismo y de utilización activa de zonas verdes para reducir las necesidades de iluminación y climatización.

Los centros de trabajo tendrán que definir planes de movilidad sostenible, los centros públicos facilitarán el acceso en bicicleta instalando aparcamientos y el parque móvil de la Junta y las flotas de vehículos públicos se “ecologizarán” al sustituirse por híbridos y utilizar biocarburantes. Se premiará a aquellos vehículos con alta ocupación, dándole paso prioritario frente a los ocupados por sólo una o dos personas, y los biocarburantes llegarán a las estaciones de servicio.

Habrà planes para reducir la generación de residuos, para multiplicar las tasas de reciclaje y para el aprovechamiento energético de los gases procedentes de la descomposición orgánica en vertederos.

Las grandes superficies comerciales estarán condicionadas a lograr unos mínimos

de eficiencia energética y de movilidad sostenible, habrá planes específicos de apoyo al comercio local y se hará un uso masivo de energías renovables en instalaciones deportivas y equipamiento público.

La agricultura ecológica seguirá apoyándose, y se mejorarán sustancialmente prácticas agrarias para evitar emisiones innecesarias en el sector, potenciando por el contrario su capacidad para captar carbono de la atmósfera. Se utilizarán más energías renovables en instalaciones ganaderas, y se hará una gestión eficiente de los residuos agropecuarios.

Las ayudas a la industria dependerán de que se consigan reducciones significativas de las emisiones de gases de efecto invernadero, y se formará al personal para implantar buenas prácticas.

Las instalaciones públicas y dependientes de la Junta de Andalucía se someterán a auditorías energéticas, e implantarán planes de ahorro y eficiencia en su gestión de la energía. El certificado energético andaluz se implantará, y se sustituirán millones de bombillas incandescentes (e ineficientes) por bombillas de bajo consumo.

ÁREA	Medidas incluidas
Ordenación del territorio y vivienda	8
Movilidad y transporte	27
Residuos	8
Turismo, comercio y servicios públicos	9
Agricultura, Ganadería y Pesca	17
Procesos industriales	4
Ahorro y eficiencia energética	13
Energías renovables	8
Sumideros	8
Investigación	14
Comunicación, sensibilización y formación	10
Gobernanza	14

Tabla 1. Número de medidas incluidas en el programa de mitigación del PAAC según las doce áreas de intervención

Se ayudará al sector de las energías renovables, pero no sólo para la generación eléctrica, sino también para usos finales: biocarburantes, climatización e incluso desalación de agua.

Andalucía aprovechará una de sus grandes riquezas, nuestro patrimonio natural, para fomentar su papel como sumidero de carbono, combatiendo la erosión, evitando los incendios y añadiendo miles de hectáreas forestales a las actuales.

Se apoyará la investigación sobre cambio climático, se facilitará la información disponible y habrá participación de todos los sectores en el seguimiento de las

políticas frente al cambio climático, y se hará un gran esfuerzo en coordinación institucional, no sólo dentro de la Junta, sino también con otras administraciones (como la local y la estatal), incluso fuera de nuestras fronteras.

Éste es el reto que Andalucía se marcó en 2002, y que en 2007, con el Plan de Acción por el Clima, recibe un impulso definitivo. El cambio climático no es sólo una amenaza: es también una llamada al cambio en las formas de producir, de consumir, de gobernar, de participar, de investigar... y estamos a tiempo de superar la prueba. Ese es nuestro empeño.

Epilogue / **Epílogo**

Epilogue

Climate change in Andalusia from a multidisciplinary standpoint

Arturo Sousa¹, Vicente Jurado Doña² & Leoncio García Barrón³

¹ Department of Plant Biology and Ecology, University of Seville, Profesor García González, 2. Apdo. E-41012 Seville. asousa@us.es

² Dirección General de Educación Ambiental y Sostenibilidad. Avda. de Manuel Siurot, 50. Consejería de Medio Ambiente (Environmental Council of the Andalusian Government). 41071 Seville. vicente.jurado@juntadeandalucia.es

³ Department of Applied Physics II. University of Seville; Avda. Reina Mercedes, 2. EUAT. 41011 Seville. leoncio@us.es

INTRODUCTION

Recent planetary warming is a fact that - with some qualifications- is indisputable from analysis of instrumental data series for the last 100 or 150 years. Anthropogenic effects are superimposed on a background of natural climatic variability, which it can attenuate or amplify (Rodrigo, 2007). The interpretation of this trend therefore requires an in-depth analysis, which is much more difficult to codify the more detailed the scale of approach to the problem. This makes the regional perspective of this monograph a novel contribution, and -as a result- not without difficulty. According to Aguilar (2007), the quantification and understanding of climate changes at regional scale is one of the most important topics in the debate on global change. Because climatic magnitudes are so fluctuating and variable, the problem lies in identifying the moment at which climate stability breaks down and climate change appears (Pita, 1997).

Because of the disparity of the topics dealt with in this monograph, we thought it would be useful for the reader if we closed with a reflection that includes a small recapitulation -as oblique as possible- of the results published by various experts from very dif-

ferent fields. However, we still recommend, for a more exact interpretation, the conclusion of each author in the corresponding chapter.

Although we now have appropriate tools to study the impact of global warming at global (<http://www.ipcc.ch>), European (Parry, 2000), and even national (Moreno, 2005) scales, it is less common to find a good tool for the multidisciplinary tackling of the problem in the regional sphere.

It must not be forgotten that the Iberian and Andalusian climatic realities are complex: the geographic diversity of the territory - with the widest-ranging altitudes in Iberia, exposures of relief, maritime influences, etc.- creates a complex jig-saw of climate subtypes and microclimates (Martín Vide, 2007). The complexity of the climatic system impedes an exact understanding of the different climate patterns, their temporal variations, and the magnitudes and frequencies of their extreme manifestations (Barriendos, 2007).

As remarked in the Introduction to this monograph (García Barrón et al., 2007), the aim of the book was not to provide an expert report similar to earlier ones, but one for the Andalusian sphere. A review of the various chapters gives, for the first time, a

more holistic view of global warming in Andalusia.

Studies analysing changes in current climatic conditions are few (Peñuelas & Boada, 2003) compared with those investigating climate changes in remoter epochs, and are often restricted to more-northern latitudes (Peñuelas et al., 2002). The reasons for the scarcity of this type of analysis are diverse, but the basic problem lies in having a long-term sequence or collection of data (Peñuelas & Filella, 2001; Valladares et al., 2005; Álvarez Cobelas, 2007). A good example of this, from the field of hydrogeology, is the scarcity of palaeoclimate studies sufficiently detailed to be interpretable as palaeorecharging of the aquifers (Custodio et al., 2007).

Today, there are numerous research groups making progress in this line, and in the coming decades we will probably begin to have significant and much more complete results of past climatic trends and their consequences. This will help us to understand much better the anticipated future changes. What we do know today, with great reliability, are the most-recent historical climatic trends, both in general and at the specifically Andalusian level.

CHANGES IN CLIMATIC VARIABLES IN ANDALUSIA

The temporal behaviour of the meteorological series is one of the determinants of climate change. Predictions made using hypotheses based on global models give an understanding of the variability taking place in the past, especially that recorded during the instrumental period (García Barrón, 2007). According to the Andalusian Environmental Climatology Information System (CLIMA), developed by the Environmental Agency of the Junta de Andalucía, there are more than 2000 weather stations in this autonomous community, most of which are manual (Pita

et al., 2007). This tool -with the usual limitations of this type of data- is a source of really comprehensive information for the whole Andalusian territory.

Some of the longest and most-complete series of such data have been used in various chapters of this monograph (Aguilar, 2007; Castro-Díez et al., 2007; García Barrón, 2007) to analyse the most-recent climatic trends and compare them with the known patterns for the Iberian Peninsula and the northern hemisphere. One of the main problems in studying trends is the availability of sufficiently long data series; this sometimes means not using the denser data bases -the ideal choice- whose temporal coverage would impede studying perspectives of change of at least a century (Castro-Díez et al., 2007).

- Temperature

Throughout the XXth century, the Iberian Peninsula shows a warming greater than 1 °C (> 1.5 °C if the end of the XIXth century is included). In the specific case of Andalusia, the warming is of the order of 1 °C (Castro-Díez et al., 2007). The rise is especially pronounced during the second half of the XXth century, and more specifically from the 1970s (Castro-Díez et al., 2007). In contrast to the general pattern in the northern hemisphere, for the Spanish series the rise is more recent and with a lower degree of significance, due to its great variability (Castro-Díez et al., 2007). Thus, the pattern of warming in Andalusia is comparable to that of the whole Iberian Peninsula, but with a milder trend during the first two thirds of the XXth century, and -in contrast- the warming is more marked from the 1970s on.

In south-western Andalusia, the mean increase, in the last 50 years, in the minimum temperatures is 0.037 °C/year, remaining almost constant through the annual cycle, against just 0.018 °C/year for the maximum temperatures, with a marked intra-annual

irregularity (García Barrón, 2007). These results coincide with those of earlier studies evidencing that the temperatures in western Andalusia are displaying a process of warming (García-Barrón & Pita, 2004).

- Precipitation

In Andalusia, precipitation is strongly linked to the position and intensity of the Azores anticyclone and to the value of the North Atlantic Oscillation Index (NAO). More specifically, the season most affecting the annual course of precipitation is winter (followed by autumn and spring), with summer precipitation of little importance in the annual course (Castro-Díez et al., 2007), above all that for July (Aguilar et al., 2007).

Despite this, the spring is a season essential for the completion of biological cycles with regard to vegetation and wetlands, so that any alteration in its regime can have a considerable impact on phenology and plant growth, and (secondarily) on the rest of the trophic chain that depends on primary producers.

The data of Castro-Díez et al. (2007) are a general revelation that Andalusia presents a decreasing trend in the spring and annual series (the latter close to the limits of significance). García Barrón (2002a, 2002b and 2007 in this volume) demonstrate that the reduction in spring precipitation -for the weather stations in the south-west of the Iberian Peninsula- has been approximately 1/3 of the total seasonal one (average reduction of around 60 L/m² through the present century against the zonal average of spring precipitation, which fluctuates around 160 L/m²).

More specifically -at monthly level- the analysis of Aguilar (2007) demonstrates that this decreasing trend is particularly striking during March in the whole of Andalusia (although with qualifications depending on the geographic gradient), as in the Iberian western facade. The decreasing trend is

more marked from the 1960s to the 1990s in Andalusia, and generally in the Iberian Peninsula (Aguilar, 2007).

- Climatic variability. Historical climatic trends

The shifts in the temporal course of the climatic phenomenon are irregular (García Barrón, 2007). During the current epoch, the South-East of the Iberian Peninsula has been immersed in a phase of progressively increasing pluviometric irregularity, measured both by the variability and by the disparity (García Barrón, 2007). In the last thirty years there has been a markedly rising phase of disparity. Complementary studies (García-Barrón & Pita, 2004) show not only a foreseeable increase in the variability of precipitation but also in its interannual disparity, so that it is more probable that there will be years of very scarce precipitation and other very wet ones -sometimes in consecutive years.

In general, projections of the future climate show different patterns for temperature and precipitation. As indicated by López Cotín (2007), climate models converge in the future scenarios for temperature (at both global and Andalusian levels), while those for precipitation show a greater divergence, depending on the geographic distribution.

Independently of the model developed, it is essential to know the pattern of the instrumental period in a wider historical context (Rodrigo, 2007). It is fundamental, in discussing the interpretation of the most-recent climatic trends (grouped under the term "global warming"), to be able to contextualise within the framework of past evolution, supported on palaeoclimatic data and sources. Palaeoclimate studies recover evidence of the past climate as orientation to future uncertainties and to improve as much as possible the working of climate models (Barriendos, 2007). Thereby, analytical elements become available for validating climate models, and for evaluating the mag-

nitude of anthropogenic influence on the climate of Andalusia (Rodrigo, 2007).

As indicated by García Barrón (2007), the first series of systematic records originated with the start of the activity of weather stations, during the XIXth century, within a warm recovery period following a much colder phase (the “Little Ice Age”) over the previous centuries. Therefore, it cannot be ruled out that the current natural process, independently of coadjutant effects from anthropogenic activity, is tending towards a warming. More specifically, 1890 is considered to be the year in which the Little Ice Age ended in Andalusia (Castro-Díez et al., 2007). This period provides the best opportunity for investigating the natural mechanisms that can affect the climate at time scales between the decade and the century during a climatic phase when the anthropogenic mechanism is ruled out, enabling the investigation of climatic fluctuations of natural origin (Rodrigo, 2007).

Historical climatology shows that during the last 500 years in Andalusia the pattern of precipitation fluctuates, with alternate dry and wet periods (Rodrigo et al., 1999; Rodrigo, 2007).

The palaeoclimatic and historical climatology data available to date suggest that wet (dry) periods in Andalusia would be related with cold (warm) periods in the northern hemisphere (Rodrigo, 2007). From a reconstruction of the hygrophytic vegetation and of the wetlands in the Doñana zone, Sousa & García-Murillo (2003) state that it is probable that the effects of the Little Ice Age at Mediterranean latitudes were clearly different from those at more-northern latitudes. The severe winters noted by most of the works studying colder latitudes were probably milder at southern latitudes. As stressed by Rodrigo et al. (2000), the Little Ice Age was generically characterised in the south of the Iberian Peninsula by an increase in precipitation. In this regard, the methodo-

logical limitation recognised by Barriendos (2007) could be illuminating: the historical information for Andalusian latitudes is not sensitive enough for the detection of small pluviometric and thermic variations, perhaps because of the very nature of the mediterranean climate.

The implications that this hypothesis -which, as pointed out by Rodrigo (2007), is still an open topic and subject to future research- could have great importance if verified. In fact, if the periods of greater winter severity in Central Europe -as in the Little Ice Age- correspond to periods that are wetter and with milder temperatures, the effects of global warming could also be different in the centre and south of Europe. In Spanish latitudes this would mean an aridisation in mediterranean climates, as predicted by the Spanish panel of experts (Fernández González et al., 2005), and -as we have seen- as happened at the end of the Little Ice Age in the Doñana wetlands (Sousa et al., 2007). Undoubtedly, historical climatology could be an essential tool for confirming and continuing to look deeper into these hypotheses, and, as summarised by Barriendos (2007), for finding references that help to manage future uncertainties better.

Once we know -in a contextualised way- what the climatic trends in Andalusia have been, we can further investigate their consequences.

ENVIRONMENTAL CONSEQUENCES

Research outside the boundaries of strictly climatic disciplines can contribute information of great value in questions regarding climate changes (García Murillo, 2007). A good example of this is the studies that, taking demonstrated climate change as a basis, interpret its effects on the flora, the fauna, or the wetlands. In this regard, the study of García Murillo (2007) on the flora

of Doñana, or that of Sousa et al. (2007) on the coastal wetlands of Huelva, illustrate the possibility of using biological variables for detecting and understanding the climatic crisis and global change.

There have been constant changes in the vegetation through the history of the biosphere, and they have taken place at a varying rate. Thus, the Andalusian flora -its floristic and biogeographic spectrum- reveals a history of extinctions, invasions, and reorganisation of the communities (García Murillo, 2007). As that author points out, the climatic conditions were responsible for a great part of these changes, until man came on the scene.

However, it is extremely complex to establish unequivocal claims with regard to evolution in natural systems versus global warming. In hydrogeology, Custodio et al. (2007) state that it is not known what the most probable trend will be, although some reduction can be expected in the recharging of aquifers in the currently most-accepted scenarios of climate change. This aspect is very important, as aquifer depth depends on the mean recharge and its fluctuations. Moreover, as indicated by Custodio et al. (2007), this determines the basal flow of rivers, the permanence of the lakes, lagoons and wetlands, and the subsistence of areas of phreatophyte vegetation. However -for those authors- focusing the impact just on climate change reflects only one part of the problem of global change.

This assertion can also be supported on the fact that past climatic changes have had quantitatively less weight in the modification and desiccation of the wetlands of the Doñana Natural Park (Sousa & García-Murillo, 2003; Sousa et al. 2006 and 2007 in this volume) than anthropic activity (Sousa & García-Murillo, 2001). Thus, recent times have seen a shrinkage of the flow of the Arroyo de La Rocina in its contribution to the Guadalquivir marshes, and the hydrope-

riod of some shallow lagoons in the Doñana zone has also changed, the main motors of degradation being the extraction of water for irrigation and to a lesser extent for the water supply, and territorial changes (Custodio et al., 2007).

In various areas of the world where the floral record is much more exhaustive than in Spanish latitudes, the extinction of autochthonous species, the invasion of exotic ones, and, in particular, the homogenisation of the habitat have all been detected (García Murillo, 2007). Perhaps the most striking case is that of the flora of the United Kingdom: the studies reviewed by García Murillo (2007) demonstrate that the rate of extinction increased progressively as the end of the XXth century approached, to an average rate of one species becoming extinct every two years.

The aquatic ecosystems most vulnerable to climate change include endoreic environments, highland lakes and lagoons, coastal wetlands, and environments depending on subterranean waters (Álvarez Cobelas, 2007). The recent history of the wetlands of the Doñana Natural Park (Sousa & García-Murillo, 2003; Sousa et al., 2006) and of the peridunar lagoons of the Doñana National Park (Sousa & García-Murillo, 2005) illustrate very well the impact of climatic and anthropic modifications on the Andalusian wetlands.

Although there are various well-proven studies demonstrating the effects of global warming on the phenology, the physiology, and the development of biological communities (Peñuelas & Filella, 2001; Peñuelas & Boada, 2003; Valladares et al., 2005; to cite some significant studies), the results are not always evident. This might be the case of "sea spiders" -a group of sea chelicerates known as pycnogonids. Results from the study of Cano & López-González (2007) reveal that the possible impact of climate change on the Andalusian pycnogonid fauna

is not due to direct physiological stress, rather to the alteration and loss of its habitats. As indicated by Hugues (2000), some examples of the biological consequences of global change are more convincing than others. In any case, Hugues (2000) demonstrates a certain inclination for the scientific journals to publish results that illustrate the effects of climatic change versus those from which no conclusion can be made; the nature of scientific publishing is such that positive trends are more likely than negative or inconclusive ones to be both submitted and published.

Although in this particular publication we have tried to limit such caveats, this and other reasons explain that, at times, the question is raised as to whether some signals of deterioration of natural ecosystems -as a consequence of global change- are being interpreted as effects of climate change. Perhaps one of the keys to this discussion lies in the selection of the species or taxa of fauna and flora studied. In the earlier case of the pycnogonid fauna, they present a varying tolerance to the environmental characteristics (Cano & López-González, 2007). The same is true of some hygrophytic scrubland species of the Doñana zone -known locally as "Monte Negro" (*Erica scopariae-Ulicetum australis*)- which, on being more tolerant to fluctuations of the phreatic level (less stenohydric than the communities of southern Atlantic marshy heaths of *Erica ciliaris*), not only tend not to disappear with the general aridisation of the Doñana zone, but are favoured.

Moreover, the predicted increase in maximum temperatures, coinciding with the dates of the start of spring, is noteworthy for its possible environmental effects. The influence of the total annual precipitation may not be so important, because of seasonal offsetting, except for those plant species and dryland farming crops whose production is determined by the spring rainfall

(García Barrón, 2007). In this same connotation, Álvarez Cobelas (2007) claims that the extreme sensitivity of the Andalusian aquatic ecosystems is linked to the fact that the immense majority have a short water-residence time, and thus depend on the annual, or even the seasonal, precipitation. This notion is reaffirmed by the heterogeneous impact that the reduction in precipitation following the Little Ice Age had on the Doñana wetlands, depending on whether they were fed epigenically or hypogenically (García Murillo, 2007; Sousa et al., 2007). From the last wet phase of the Little Ice Age (whose maximum was reached around the end of the XIXth century), there was a progressive decrease in precipitation until the 1960s (Rodrigo et al., 2000).

The reduction in precipitation during March can also have considerable repercussions for agriculture, hydrological planning, and the vegetation, if it continues over time. As stated by Aguilar (2007), the possible impact lies not only in the reduced contribution to the annual total, but also because March is a key month, being the last one with a water surplus. Thus -according to that author- a marked reduction of water in March (with the water balance being negative, as the water lost by evapotranspiration exceeds that gained by precipitation) means an earlier start of the unfavourable season (from April to March). In fact, and at least from the standpoint of the vegetation, this means an increase in the conditions of mediterraneity (with a prolonged summer period), and thus a more- or less-marked trend towards aridisation.

With regard to human health, the results reviewed by Morales (2007) demonstrate certain risks linked to infectious diseases, heat waves, or airborne allergens. An interesting case is the potential re-emergence of certain infectious diseases, such as malaria, with their possible link to climatic trends

and to the Andalusian wetlands (Morales, 2007).

From this, it might be wondered what measures can be taken to minimise, or at least palliate, much of the impact reviewed in this section.

ADAPTATION AND MITIGATION

The concern about alteration of the climate at global level has transcended the scientific sphere and has become a matter affecting all of society (Pita et al., 2007). The situation is summarised by Martín Vide (2007), who asserts that the current warming is unequivocal, unusual, anthropic, and -glimpsing its future effects- worrying. It requires the community of scientists and technicians involved in the field to contribute solutions and measures against its impact; such problems, solutions, and measures are beset by the difficulties derived from the uncertainty faced by any rigorous study of future climatic trends. This carries the risk that, because of the widespread dogmatic concept of science in our society, the uncertainties that are formulated will be perceived as simple ignorance (García Barrón et al., 2007), and consequently, fail to provoke a commitment to adopt personal and collective measures in the face of climate change.

The Stern report reveals that the costs of climate change for the world economy could reach between 5% and 20% of the annual world income if the growth of greenhouse gas (GG) emissions is maintained (Cordero, 2007; Jurado, 2007; Sánchez Hernández, 2007); the impact will probably be strongest on the poorest countries.

Today, the expected evolution of the climatic system presents two basic characteristics: the current uncertainty about the magnitude of possible impacts at regional scale and the possible irreversibility (García Barrón, 2007). Decisions to prevent irreparable

environmental and social consequences for the future should be based on extending the understanding of the natural medium and of the effects induced in it by human activity. Only thus will it be possible to mitigate the consequences of climate change and adapt progressively to them (García Barrón, 2007).

Like all the problems facing humanity, there are always some positive aspects. One of these is the growth over a very few years of the investment in research on the topic, increasing the understanding of the working of the climatic system and its relationships with the rest of the biosphere. Interestingly, as claimed by Cordero (2007), it has also meant a silent revolution in that low-carbon technologies and changes in the economic structure are making it possible to dissociate GG emissions and economic growth.

One of the measures possibly of greatest ecological and (indeed) conservational interest is the capture or “sequestration” of the excess GGs from the atmosphere to the pedosphere, using natural ecosystems (such as peat bogs, or mature forest masses with a high gross primary production and a low net primary production).

The forest area in Andalusia today is estimated at more than 4.6 million ha, some 53 % of the total of the Andalusian territory. This figure is very important, as the mediterranean forest ecosystems have a high value as CO₂-fixers, still little recognised (Jurado, 2007). According to recent estimates collected by Jurado (2007), this means that these ecosystems fix around 151 million tons of CO₂, the average capture of the forest mass being around 5 t/ha¹.

Contrarily, the pattern of emissions in Andalusia is similar to that for Spain (8 tons of CO₂ equivalent per inhabitant of Andalusia), with electricity generation, transport, and industrial processes accu-

¹ These data are preliminary, and currently under review.

mulating some 78 % of the total emissions (Sánchez Hernández, 2007).

As indicated by Martín Vide (2007), adaptation consists of adjusting as well as possible to the new climatic and general conditions, and seeking, above all, to reduce the effects of the growing climatic risks and rise above the unfavourable situations. A good example of this is the options of adaptation collected by Álvarez Cobelas (2007) for the Andalusian continental aquatic ecosystems, for better management of water supply and demand (encouraging saving in agriculture, recycling of sewage, stimulating the recharging of the aquifers, recovery of the hydrographic basins, etc.).

Among such measures, the Environmental Agency put in motion the Andalusian strategy for climate change, which -as a complement to the national strategy- proposes a great number of measures involving different organisms of the Administration (Pita et al., 2007).

The national strategy is itself framed within that of the Kyoto Protocol² -of which Spain is a signatory- although sadly this agreement took more than 10 years to be approved by the international community. To date, 164 countries and regional organisations have ratified the Protocol, representing 61.6 % of the basal emissions of 1990 (Cordero, 2007). Although the European Union is committed to a reduction of around 8 % (taking 1990 as base year), Spain was still permitted to increase its level of emissions by 15 %, as it was not at that date one of the EU countries with the highest degree of industrialisation (Cordero, 2007).

This is one of the reasons -but not the only one- why GGs emissions in Spain increased some 32 % between 1990 and 2001, in con-

² At the time of writing, the meeting of Bali (Indonesia) is about to start. This includes the 13th Conference of the Parties (COP-13) at the CMNUCC and the 3rd Meeting of the Parties (COP/MOP-3) at the Kyoto Protocol, which will draw up the future lines of action at international level.

trast to the case of other countries of the European Union, such as Germany and the United Kingdom, which have reduced them (Jurado, 2007).

Despite the improved models, today there is still great uncertainty in the Mediterranean Basin about the future pattern of precipitations, due to -among other factors- the difficulty of integrating its rough and complex topography in the models (Aguilar, 2007). However, this difficulty should not be used as an excuse for not acting. The measures taken for adaptation to conditions of extreme water shortage must be structural and forward-looking, both technologically and in terms of good everyday habits on the part of the citizen, rather than being interim ones merely for sporadic saving (Martín Vide, 2007).

The studies on future scenarios carried out to date in Andalusia will have to be re-examined in coming years (López Cotín, 2007), but are a first step in the complex transition -in terms of scientific methodology- from global scenarios to regional ones. In any case, the thermic variables show a clear upward trend (López Cotín, 2007), in contrast to precipitation, which presents a greater fluctuation (depending on the scenarios A2 or B2).

Today, as much importance is given to mitigation as to adaptation, which explains why recently the Junta de Andalucía has approved the Action Plan for the Climate (Sánchez Hernández, 2007) as a tool in this regard. Among the measures approved is the impact of GGs emissions, derived from territorial and urbanistic plans, plans of sustainable mobility or energy audits (Sánchez Hernández, 2007).

The heterogeneity of the impact of climate change in different parts of the planet -not always considered in discussions on the repercussions of recent climatic trends- demonstrates the interest of this monograph. The regional aspect is a contribution

to understanding the global working of the atmosphere, and of the biosphere in general. As indicated by Aguilar (2007), atmospheric changes at grand scale are not necessarily translated into changes that are the same from zone to zone.

It is also necessary to consider the complexity of the phenomenon that we have to denominate -with some inaccuracy- "climate change", because, as indicated by Custodio et al. (2007), such complexity lies in the fact that, besides the anthropic effect, there is a natural change. A good proof of this is the effect that human activity has had on the Doñana wetlands, and which has been superimposed on global warming and the end of the Little Ice Age, in what is termed post-Little Ice Age warming, to use the Anglo-Saxon terminology (Sorvari et al., 2002). This has led some authors to consider it more appropriate to speak of "global change" than "climate change", which would be just one part of the problem (Custodio et al., 2007).

Perhaps the discrepancy about terminology -from the standpoint of the study of the environmental consequences- arises from the difficulty in distinguishing the changes due to natural causes from those due to anthropic causes. Such difficulty can be overcome only with the *ad hoc* development of methods, with complex studies in the laboratory, with all the variables rigorously controlled, or on specific natural spaces with conditions especially optimised for this type of analysis.

Nevertheless, it must also be considered that the strong impact that anthropic activity has had, and the increased vulnerability of many systems to human action, could be partially masking the effects that background climatic trends are having (Sousa et al., 2006; García Murillo, 2007). For all this it is essential to increase research in these topics, in particular to obtain long series of data, which in many cases involves the *ad hoc* develop-

ment of methods (Peñuelas & Filella, 2001; Álvarez Cobelas et al., 2005 and 2007 in this volume; Valladares et al., 2005).

In any case, the two aspects are intimately linked. Álvarez Cobelas (2007) points out that -despite the difficulty in estimating the impact of global warming in Andalusia- it seems clear that one of its consequences on the continental aquatic ecosystems will be the intensification of the existing patterns due to human impact, not directly associated to climate change.

As pointed out by Martín Vide (2007), adaptation also means taking advantage of the new opportunities that the coming climatic scenarios will provide. In earlier centuries, warmer climatic phases in central Europe -such as the Medieval Climatic Optimum- enabled the vine to be grown even in Great Britain. Thus, an appropriate management of the adaptation to global warming in Andalusia could enable the spread of crops to areas where at present they are limited by frosts, or foster the deseasonality of tourism (Martín Vide, 2007).

We have to be aware that the policies of mitigation and adaptation regarding climate change have no sense without the active collaboration of the citizens, and coherent decisions on the part of the public authorities. Thus, the Environmental and Education Agencies of the Junta de Andalucía are incorporating good environmental practices, aimed at reducing GGs emissions, such as the Kyoto Educa program (www.kiotoeduca.org; Jurado, 2007), into the teaching centres. Undoubtedly, the environmental education of the general population, and of the administrations and political and technical managers, must be one of the mainstays in tackling this problem in the immediate future.

Independently of causality or of the shared participation of the natural and anthropogenic potentiation, there is clearly a statistically significant sustained increase in tem-

peratures and pluviometric irregularity in Andalusia (García Barrón, 2007).

As indicated in the Presentation of this monograph, the mitigatory actions of 8 million Andalusians are not going to change the climatic fate of the planet, but any thorough, communal, and ethical action regarding a global problem requires agreement and the

putting into practice of mitigatory measures and actions on the part of all (Martín Vide, 2007). This obviously concerns every administration, but also scientists, technicians, and all citizens, each from his or her patch.

REFERENCES³

- Álvarez Cobelas, M., J. Catalán & D. García de Jalón (2005). Impactos sobre los ecosistemas acuáticos continentales. In: Moreno, J. M. (Ed.). *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del Cambio Climático*. Ministerio de Medio Ambiente, pp. 109-142.
- Fernández-González, F., J. Loidi & J. C. Moreno (2005). Impactos sobre la biodiversidad vegetal. In: Moreno, J. M. (Ed.). *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del Cambio Climático*. Ministerio de Medio Ambiente, pp. 183-248. Ministerio de Medio Ambiente.
- García Barrón, L. (2002a). Evolución del régimen de precipitaciones en el oeste de Andalucía. *Aestuaría* 8: 219-240.
- García Barrón, L. (2002b). Un modèle pour l'analyse de la sécheresse dans les climats méditerranéens. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie* 14: 67-73.
- García-Barrón, L. & M. F. Pita (2004) Stochastic análisis of time series of temperature in the South-West of the Iberian Peninsula. *Atmósfera* 17: 225-244.
- Hugues L. (2000). Biological consequences of global warming: is the signal already apparent?. *Trends in Ecology and Evolution* 15: 56-61.
- Moreno, J. M. (Ed.) (2005). *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del Cambio Climático*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. 822 pp.
- Parry, M. L. (2000). *Assessment of Potential Effects and Adaptations for Climate Change in Europe: the Europe ACACIA Project*. Parry, M. L. (Ed.), Jackson Environment Institute, University of East Anglia, Norwich, UK, 320 pp.
- Peñuelas, J. & I. Filella (2001). Responses to Warming World. *Science* 294: 793-795.
- Peñuelas J., I. Filella & P. Comas (2002). Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region. *Global Change Biology* 8: 531-544.
- Peñuelas J. & M. Boada (2003). A global change-induced biome shift in the Montseny mountain (NE Spain). *Global Change Biology* 9: 131-140.
- Pita, M. F. (1997). Los cambios climáticos. In: *Climatología*. Cuadrat, J. M. & M. F. Pita (Eds.), págs. 387-458. Editorial Cátedra, Madrid.
- Rodrigo F. S., M. J. Esteban-Parra, D. Pozo-Vázquez & Y. Castro-Díez (1999). A 500 year precipitation record in Southern Spain. *International Journal of Climatology*: 19: 1233-1253.
- Rodrigo F. S., M. J. Esteban-Parra, D. Pozo-Vázquez & Y. Castro-Díez (2000). Rainfall variability in Southern Spain on decadal to centennial times scales. *International Journal of Climatology* 20: 721-732.

³ Only those publications not mentioned specifically in this monograph are cited. The rest can be consulted in the index of each chapter.

- Sorvari S., A. Korhola & R. Thompson (2002). Lake diatom response to recent Arctic warming in Finnish Lapland. *Global Change Biology* 8: 171-181.
- Sousa, A. & P. García Murillo (2001). Can place names be used as indicators of landscape changes? Application to the Doñana Natural Park (Spain). *Landscape Ecology* 16. 391-406.
- Sousa, A. & P. García Murillo (2003). Changes in the wetlands of Andalucía (Doñana Natural Park, SW Spain) at the end of the Little Ice Age. *Climatic Change* 58: 193-217.
- Sousa A. & P. García Murillo (2005). *Historia ecológica y evolución de las lagunas peridunares del Parque Nacional de Doñana*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 170 pp.
- Sousa, A., L. García-Barrón, J. Morales & P. García Murillo (2006). Post-Little Ice Age warming and dessication of the continental wetlands of the Aeolian sheet in the Huelva region (SW Spain). *Limnetica* 25: 57-70.
- Valladares F., J. Peñuelas & E. Luis Calabuig (2005). Impactos sobre los ecosistemas terrestres. In: Moreno, J. M. (Ed.). *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del Cambio Climático*. Ministerio de Medio Ambiente, pp. 65-112.

El Cambio Climático en Andalucía desde una perspectiva multidisciplinar

Arturo Sousa¹, Vicente Jurado Doña² & Leoncio García Barrón³

¹Departamento de Biología Vegetal y Ecología. Facultad de Farmacia. Universidad de Sevilla. C/ Profesor García González, 2. Apdo. E-41012 Sevilla. asousa@us.es

²Dirección General de Educación Ambiental y Sostenibilidad. Avda. de Manuel Siurot, 50. Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía). 41071 Sevilla. vicente.jurado@juntadeandalucia.es

³Departamento de Física Aplicada II. Universidad de Sevilla; Avda. Reina Mercedes, 2. 41011 Sevilla. leoncio@us.es

INTRODUCCIÓN

El reciente incremento térmico en el planeta es un hecho que -con diversas matizaciones- no cabe discutir a tenor del análisis de las series de datos instrumentales de los últimos 100 ó 150 años. Sin embargo la influencia antropogénica sobre el clima se superpone a un fondo de variabilidad climática natural, a la cual puede atenuar o amplificar (Rodrigo, 2007). Por ello la interpretación de esta tendencia requiere un análisis en profundidad, que resulta mucho más difícil de precisar, cuanto más detallada es la escala de aproximación al problema. Esto hace que la perspectiva de esta monografía, desde el ámbito regional, constituya una aportación novedosa, y precisamente por ello, no está exenta de dificultad. Y es que, como señala Aguilar (2007), la cuantificación y el conocimiento de los cambios climáticos a escala regional es uno de los temas más relevantes en el debate del cambio global. Dado que las magnitudes climáticas son tan fluctuantes y variables, el problema radica en identificar el momento en que se produce la ruptura de la estabilidad de los climas y la aparición del cambio climático (Pita, 1997).

Dado el amplio abanico de temas tan dispares que se desarrollan en esta monografía nos ha parecido útil, para el lector, cerrarla con una reflexión que incluya -desde una perspectiva lo más transversal posible- una pequeña recapitulación de los resultados elaborados por los diferentes expertos de campos muy dispares. Sin dejar por ello de recomendar, para una interpretación más exacta, lo que cada autor concluye en su capítulo correspondiente.

Aunque a escala global (<http://www.ipcc.ch>), europea (Parry, 2000) e incluso nacional (Moreno, 2005), ya se cuentan con instrumentos muy bien pergeñados sobre el impacto del Calentamiento Global, resulta menos frecuente encontrar un buen instrumento que, de forma multidisciplinar, aborde la problemática del Calentamiento Global en el ámbito regional.

No se debe de obviar que la realidad climática ibérica y la andaluza son complejas, la diversidad geográfica del territorio, con el mayor abanico de altitudes del ámbito ibérico, exposiciones del relieve, influencias marítimas, etc. crea un complejo rompecabezas de subtipos climáticos y microclimas (Martín Vide, 2007). La complejidad del sistema climático dificulta la comprensión

precisa de los diferentes comportamiento climáticos, sus variaciones en la dimensión temporal y las magnitudes y frecuencias de sus manifestaciones extremas (Barriendos, 2007).

Como se comentaba en la Introducción a esta monografía (García Barrón et al., 2007) no ha sido el objetivo de este libro un informe de expertos, equivalente a los anteriores, pero en el ámbito andaluz. Sin embargo la revisión de los diferentes capítulos permite obtener, por primera vez, una visión más holística del Calentamiento Global en Andalucía.

Esto se debe a que los estudios que reconocen y analizan cambios en las condiciones climáticas presentes son más escasos (Peñuelas & Boada, 2003), y con frecuencia están limitados a latitudes más septentrionales (Peñuelas et al., 2002). Las causas de la escasez de este tipo de análisis -frente a aquellos estudios que investigan los cambios climáticos en épocas más remotas- son diversas, pero el problema de fondo radica en poder disponer de una secuencia o colección de datos a largo plazo (Peñuelas & Filella, 2001; Valladares et al., 2005; Álvarez Cobelas, 2007). Buen ejemplo de ello, en el campo de la hidrogeología, lo constituye la escasez de estudios paleoclimáticos con suficiente nivel de detalle para que sean interpretables como paleorecarga de los acuíferos (Custodio et al., 2007).

En la actualidad existen numerosos grupos de investigación que avanzan en esta línea, y probablemente en las próximas décadas comencemos a tener resultados relevantes y mucho más completos de las tendencias climáticas pretéritas y de cuales fueron sus consecuencias. Esto ayudará a entender mucho mejor los cambios que se avecinan en el futuro. De cualquier modo lo que sí conocemos hoy día, con una gran fiabilidad, son las tendencias climáticas históricas más recientes tanto en general, como a nivel particular en Andalucía.

EVOLUCIÓN DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS EN ANDALUCÍA

El comportamiento temporal de las series meteorológicas constituye una de las bases en que se fundamentan las formulaciones acerca del cambio climático. Ya que las predicciones basadas en las hipótesis de los modelos globales tienen su origen en el conocimiento de la variabilidad ocurrida en el pasado y especialmente de la registrada durante el período instrumental (García Barrón, 2007). Según el Sistema de Información de Climatología Ambiental de Andalucía (CLIMA), desarrollado por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, en esta comunidad autónoma hay distribuidas más de 2000 observatorios meteorológicos, la mayor parte de ellos manuales (Pita et al., 2007). Esta herramienta -con las limitaciones propias de este tipo de datos- supone una fuente de información realmente completa para todo el territorio andaluz.

De ellas, algunas de las más largas y completas han sido empleadas en diversos capítulos de esta monografía (Aguilar, 2007; Castro-Díez et al., 2007; García Barrón, 2007), para analizar las tendencias climáticas más recientes, y compararlas con los patrones conocidos para la Península Ibérica y el hemisferio norte. Uno de los principales problemas a la hora de abordar el estudio de las tendencias es la posibilidad de emplear series lo suficientemente largas, lo cual obliga a veces a no emplear base de datos más densas -como sería óptimo- pero cuya cobertura temporal impediría el estudio de perspectivas de cambio de al menos un siglo (Castro-Díez et al., 2007).

- **Temperatura**

En la Península Ibérica, a lo largo del S. XX, se detecta un calentamiento superior a 1 °C (> 1.5 °C si se incluye el final del S. XIX). En el caso concreto de Andalucía este calen-

tamiento es del orden de 1 °C (Castro-Díez et al., 2007). Este ascenso es especialmente pronunciado, durante la segunda mitad del S. XX, y más concretamente desde los años 70 del pasado siglo (Castro-Díez et al., 2007). A diferencia del patrón general del hemisferio norte, en las series españolas este ascenso es más reciente y tiene menor grado de significación comparado debido a su gran variabilidad (Castro-Díez et al., 2007). Por tanto el patrón de incremento térmico en Andalucía es comparable al de toda la Península Ibérica, pero con una tendencia más suavizada durante los dos primeros tercios del S. XX, y en cambio un incremento térmico más marcado a partir de los años 70.

En el suroeste de Andalucía el incremento promedio experimentado, durante los últimos 50 años, por las temperaturas mínimas es de 0,037 °C/año, mantenido casi uniformemente a lo largo del ciclo anual, frente a sólo 0,018 °C/año de las temperaturas máximas con marcada irregularidad intra-anual (García Barrón, 2007). Estos resultados coinciden con estudios precedentes que muestran que las temperaturas en Andalucía occidental están sometidas a un proceso de calentamiento (García-Barrón & Pita, 2004).

- Precipitación

En Andalucía la precipitación está muy ligada a la posición e intensidad del anticiclón de las Azores y al valor de la oscilación del Atlántico Norte (NAO). Más concretamente el invierno es la estación que más influye en el curso anual de la precipitación (después vendrían el otoño y la primavera), siendo la precipitación estival de escasa importancia en el curso anual (Castro-Díez et al., 2007), sobre todo el mes de julio (Aguilar et al., 2007).

A pesar de ello la primavera, desde el punto de vista de la vegetación y de los humedales es una estación fundamental para completar sus ciclos biológicos, por lo que cualquier

alteración en su régimen puede tener un impacto considerable en la fenología y el crecimiento de los vegetales, y secundariamente en el resto de la cadena trófica que depende de los productores primarios.

Los datos de Castro-Díez et al. (2007) revelan, de forma general, que en Andalucía se detecta una tendencia decreciente en las series de primavera y anual (ésta última ajustada a los límites de significación). García Barrón (2002a, 2002b y 2007 en este volumen) pone de manifiesto que -para los observatorios del suroeste de la Península Ibérica- la disminución de la precipitación primaveral ha sido de aproximadamente 1/3 del total estacional (disminución media del orden de 60 l/m² a lo largo del presente siglo frente al promedio zonal de la precipitación de primavera que oscila en torno a 160 l/m²).

Más concretamente -a nivel mensual- los análisis de Aguilar (2007) demuestran que esta tendencia decreciente es especialmente destacada durante el mes de marzo en toda Andalucía (aunque con matizaciones según el gradiente geográfico), al igual que ocurre con la fachada occidental Ibérica. Esta tendencia decreciente es más acentuada desde los años 60 a los 90 del S. XX en Andalucía, y en general en la Península Ibérica (Aguilar, 2007).

- Variabilidad. Tendencias climáticas seculares

La irregularidad comprende al conjunto de manifestaciones en que pueden detectarse alteraciones en la uniformidad del desarrollo temporal del fenómeno climático (García Barrón, 2007). Actualmente el suroeste de la Península Ibérica está inmerso, durante la última época, en una fase de progresivo incremento de la irregularidad pluviométrica, medida tanto por la variabilidad como por la disparidad (García Barrón, 2007). Así en el último treintenio se produce una fase marcadamente ascendente de la disparidad hasta la actualidad. Estudios complementa-

rios (García-Barrón & Pita, 2004) muestran no sólo el previsible incremento de la variabilidad de la precipitación sino de la disparidad interanual, de tal forma que serán más probables años de precipitación muy escasa frente a otros muy lluviosos, y ello -en ocasiones- en años consecutivos.

En general, las proyecciones climáticas futuras muestran un comportamiento diferente para la temperatura y la precipitación. Tal como se recoge López Cotín (2007), en los escenarios futuros para la temperatura hay una convergencia en los modelos climáticos (tanto a nivel global, como andaluz), y sin embargo los de precipitación muestran una mayor divergencia de acuerdo a la distribución geográfica.

Independientemente del modelo desarrollado es esencial conocer el comportamiento del periodo instrumental en un contexto histórico más amplio (Rodrigo, 2007). Es fundamental, en relación con la discusión sobre la interpretación de las tendencias climáticas más recientes (agrupadas bajo el término “Calentamiento Global”), poderlas contextualizar en el marco de la evolución secular, con el apoyo de los datos y fuentes paleoclimáticas. La paleoclimatología debe recuperar testimonios del clima del pasado para disponer de referentes ante incertidumbres futuras y mejorar en lo posible el funcionamiento de los modelos climáticos (Barriandos, 2007). De esta forma se pueden ofrecer elementos de análisis para la validación de los modelos climáticos, y, en consecuencia, para la evaluación de la magnitud de la influencia antropogénica en el clima de Andalucía (Rodrigo, 2007).

Como señala García Barrón (2007), el inicio de la actividad, durante el siglo XIX, de los observatorios meteorológicos -y por tanto, de las primeras series de los registros sistemáticos- se inscribe en un periodo de recuperación cálida, posterior a una fase relativamente muy fría, “la Pequeña Edad del Hielo”, acaecida durante los siglos ante-

rios. Por tanto, no es descartable que en el presente, con independencia de efectos coadyuvantes de origen antropogénico, el proceso natural tienda hacia un incremento térmico. Más concretamente 1890 se considera como el año en que finaliza la Pequeña Edad del Hielo en Andalucía (Castro-Díez et al., 2007). Este período proporciona la mejor oportunidad para investigar los mecanismos naturales que pueden afectar al clima en escalas temporales entre la década y el siglo, durante una fase climática donde el mecanismo antropogénico queda descartado, y ello posibilita investigar las fluctuaciones climáticas de origen natural (Rodrigo, 2007).

La climatología histórica muestra que durante los últimos 500 años en Andalucía las precipitaciones tienen un comportamiento fluctuante, con alternancia de período secos y húmedos (Rodrigo et al., 1999; Rodrigo, 2007).

Los datos paleoclimáticos y de climatología histórica, hasta ahora disponibles, hacen pensar que períodos húmedos (secos) en Andalucía estarían relacionados con períodos fríos (cálidos) en el Hemisferio Norte (Rodrigo, 2007). Basándose en la reconstrucción de la vegetación higrofitica y de los humedales del entorno de Doñana Sousa & García-Murillo (2003) afirman que es probable que los efectos que la Pequeña Edad del Hielo tuvo sobre las latitudes mediterráneas, en comparación con latitudes más septentrionales, fueran claramente diferentes. La severidad de inviernos, que apuntan la mayoría de los trabajos realizados en latitudes más frías, se convierte probablemente en inviernos más suaves en latitudes meridionales. Como destacan Rodrigo et al. (2000) la Pequeña Edad del Hielo se caracterizó en el sur de la Península Ibérica, de forma genérica, por un incremento de la precipitación. En este sentido puede ser esclarecedora la limitación metodológica que aprecia Barriandos (2007), cuando constata que la

información histórica de nuestras latitudes es poco sensible en la detección de variaciones pluviométricas de menos magnitud y variaciones térmicas, quizás por las propias características del clima mediterráneo.

Las implicaciones que esta hipótesis –que como señala Rodrigo (2007)- es todavía un tema abierto y sujeto a futuras investigaciones, pueden tener un gran calado si llegan a verificarse. En efecto, si los períodos con una mayor severidad invernal en Centroeuropa –como la Pequeña Edad del Hielo- corresponden a períodos más húmedos y con temperaturas más suaves, los efectos del Calentamiento Global pueden ser también diferentes en el centro y sur de Europa. De forma que en nuestra latitudes supongan una aridización en los climas mediterráneos, tal y como predice el panel de expertos español (Fernández González et al., 2005), y como se ha visto que ha ocurrido al final de la Pequeña Edad del Hielo en los humedales de Doñana (Sousa et al., 2007). Sin duda la climatología histórica puede ser una herramienta clave para confirmar y seguir profundizando en estas hipótesis y, como resume Barriendos (2007), para encontrar referentes que ayuden a gestionar mejor las incertidumbres futuras.

Una vez que conocemos -de forma contextualizada- cuales han sido las tendencias climáticas en Andalucía se puede profundizar en sus consecuencias.

CONSECUENCIAS MEDIOAMBIENTALES

Las investigaciones fuera de los límites de las disciplinas estrictamente climáticas pueden aportar información de gran valor en cuestiones relativas a cambios en el clima (García Murillo, 2007). Un buen ejemplo de ello lo constituyen aquellos estudios, que tomando la evolución climática constatada como base de referencia, interpretan sus efectos sobre la flora, la fauna o los hume-

dales. En este sentido los estudios de García Murillo (2007) sobre la flora de Doñana o los de Sousa et al. (2007) sobre los humedales del litoral onubense ilustran la posibilidad de emplear variable biológicas para conocer y detectar las crisis climáticas y el cambio global.

Los cambios en la vegetación han sido una constante en la historia de la biosfera y se han sucedido a un ritmo desigual, así la flora andaluza -su espectro florístico y biogeográfico- revela una historia de extinciones, invasiones y reorganización de las comunidades (García Murillo, 2007). Como destaca este autor las condiciones climáticas son responsables de gran parte de estos cambios, hasta que el hombre apareció en escena.

Sin embargo resulta extremadamente complejo establecer aseveraciones inequívocas en relación con la evolución de los sistemas naturales frente al Calentamiento Global. En relación con la hidrogeología Custodio et al. (2007) señalan que no se sabe cual será la tendencia más probable, si bien puede esperarse cierta reducción de la recarga de los acuíferos bajo los escenarios de cambio climático de mayor aceptación en la actualidad. Este aspecto adquiere una gran relevancia ya que la profundidad de los acuíferos depende de la recarga media y de sus oscilaciones. Y como señalan Custodio et al. (2007) ésta condiciona el caudal de base de ríos, la permanencia de los lagos, las lagunas, los humedales y la subsistencia de áreas de vegetación freatófita. Sin embargo –para estos autores- centrar el impacto sólo en el cambio climático refleja sólo una parte del problema del cambio global.

Esta aseveración también se puede apoyar en el hecho de que los cambios climáticos pasados han tenido cuantitativamente un menor peso en la modificación y desecación de los humedales del Parque Natural de Doñana (Sousa & García-Murillo, 2003; Sousa et al. 2006 y 2002 en este volumen), que la actividad antrópica (Sousa & García-Murillo,

2001). Así se ha asistido, en tiempos recientes, a la merma de los caudales del Arroyo de La Rocina en su contribución a las marismas del Guadalquivir, y también ha cambiado el hidroperíodo de algunas lagunas de Doñana y su entorno, debido a las extracciones de agua para regadío y en menor grado para abastecimientos y por cambios territoriales (Custodio et al., 2007), como principales motores de la degradación.

En diferentes áreas del mundo donde el registro florístico es mucho más exhaustivo que en nuestras latitudes se ha detectado la extinción de especies autóctonas, la invasión de exóticas y, en definitiva, la homogeneización del hábitat (García Murillo, 2007). Quizás el caso más llamativo sería el de la flora del Reino Unido, ya que los estudios que recopila García Murillo (2007) demuestran que la velocidad de extinción se incrementa progresivamente a medida que se acerca el final del S. XX, hasta una tasa media de una especie extinguida cada dos años.

Entre los ecosistemas acuáticos más vulnerables en relación con el cambio climático se incluyen los ambientes endorreicos, los lagos y lagunas de alta montaña los humedales costeros y los ambientes dependientes de aguas subterráneas (Álvarez Cobelas, 2007). La historia reciente de los humedales del Parque Natural de Doñana (Sousa & García-Murillo, 2003; Sousa et al., 2006) y de las lagunas peridunares del Parque Nacional de Doñana (Sousa & García-Murillo, 2005), pueden ilustrar muy bien el impacto de modificaciones climáticas y antrópicas sobre los humedales andaluces.

Aunque existen diferentes estudios bien contrastados que ponen de manifiesto los efectos del Calentamiento Global sobre la fenología, la fisiología y el desarrollo de las comunidades biológicas (Peñuelas & Filella, 2001; Peñuelas & Boada, 2003; Valladares et al., 2005; por citar algunos estudios significativos), los resultados no siempre son

inequívocos. Este podría ser el caso de las “arañas de mar” un grupo de quelicerados marinos conocido como picnogónidos. Los resultados del estudio de Cano & López-González (2007) revelan que el impacto que el cambio climático pueda causar sobre la fauna de picnogónidos andaluces no se debe a estrés fisiológico directo, sino más bien a la pérdida y alteración de sus hábitats. Como señala Hugues (2000) algunos ejemplos sobre las consecuencias biológicas del cambio global son más convincentes que otros. En cualquier caso -Hugues (2000)- pone de manifiesto un cierto sesgo en las revistas científicas hacia la publicación de los resultados que sí demuestran los efectos de cambios climáticos, frente a los que no pueden concluir nada.

Aunque en esta publicación concreta hemos intentado limitar este sesgo, ésta y otras razones explican que, a veces, se cuestione si se están interpretando algunas señales de deterioro de los ecosistemas naturales -que son consecuencia de un cambio global- como efectos del cambio climático. Tal vez una de las claves de esta discusión radique en la selección de las especies o de los taxones de fauna y flora que se estudian. En el caso anterior de la fauna de picnogónidos presentan una tolerancia variable a las características ambientales (Cano & López-González, 2007). Lo mismo ocurre con algunas especies de matorral higrofitico del área de Doñana -conocido localmente como “Monte Negro” (*Erico scopariae-Ulicetum australis*)- que al presentar una mayor tolerancia a la fluctuaciones del nivel freático (menos estenohídricas que las comunidades de brezales húmedos atlánticos meridionales de *Erica ciliaris*), no sólo no tienden a desaparecer con la aridización general del entorno de Doñana sino que se ven favorecidas.

También, por sus posibles efectos ambientales, destaca el previsto incremento de las

temperaturas máximas coincidiendo con las fechas de inicio de primavera, ya que el efecto de la precipitación anual total puede no ser tan relevante por las compensaciones estacionales, pero sí para aquellas especies vegetales y cultivos de secano cuyo producción esté regulada por las lluvias de primavera (García Barrón, 2007). En este mismo sentido Álvarez Cobelas (2007) asevera que la extremada sensibilidad de los ecosistemas acuáticos andaluces está ligada a que la inmensa mayoría tiene un tiempo bajo de residencia del agua, y por tanto depende de la precipitación anual o, incluso de la estacional. Esta idea queda reafirmada por el heterogéneo impacto que tuvo la disminución de las precipitaciones tras el final de la Pequeña Edad del Hielo sobre los humedales de Doñana, según tuvieran una alimentación epigénica o hipogénica (García Murillo, 2007; Sousa et al., 2007). Desde la última fase húmeda de la Pequeña Edad del Hielo (cuyo máximo se alcanzó aproximadamente a finales del S. XIX), tiene lugar un progresivo descenso en las precipitaciones hasta la década de los años 60 (Rodrigo et al., 2000).

La disminución de las precipitaciones durante el mes de marzo también puede tener importantes repercusiones para la agricultura, la planificación hidrológica y la vegetación, si se mantuviera constante en el tiempo. Como señala Aguilar (2007), el posible impacto no sólo radica en la disminución de sus aportaciones en el total anual, sino en que es un mes clave, al tratarse del último mes con un balance hídrico excedentario. Por tanto -según esta autora- fuertes descensos hídricos en el mes de marzo suponen el adelanto del inicio de la estación desfavorable (al ser el balance hídrico negativo, ya que supera la pérdida de agua por evapotranspiración a la entrada por precipitación), del mes de abril al mes de marzo. De facto, y al menos desde el punto de vista de la vegetación,

este hecho supone incrementar las condiciones de mediterraneidad (al prolongar el período de estío), y por tanto una tendencia más o menos marcada hacia la aridización. Desde el punto de vista de la salud humana los resultados revisados por Morales (2007), ponen de manifiesto determinados riesgos vinculados a enfermedades infecciosas, olas de calor o aeroalérgenos. Un caso interesante lo constituye el riesgo de re-emergencia de algunas enfermedades infecciosas como el paludismo o malaria, por su posible vinculación a las tendencias climáticas y a los humedales andaluces (Morales, 2007).

A partir de aquí cabe preguntarse que medidas se pueden emplear para paliar o al menos minimizar gran parte de los impactos revisados en este apartado.

ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN

La preocupación surgida en relación con la alteración del clima a nivel global ha trascendido el ámbito científico y ha pasado a ser una preocupación que afecta a toda la sociedad (Pita et al., 2007). El estado de la cuestión la resume Martín Vide (2007), al aseverar que el calentamiento actual es inequívoco, inusual, antrópico y, atisbando sus efectos futuros, inquietante. Esta demanda requiere, del colectivo de científico y de técnicos implicados en este tema, una aproximación donde se aporten soluciones y medidas frente a este impacto; problemas, soluciones y medidas que lógicamente tienen la dificultad derivada de la incertidumbre que lleva cualquier estudio riguroso de la evolución futura de las tendencias del clima. Esto conlleva el riesgo de que la concepción dogmática de la ciencia, generalizada en nuestra sociedad, conduce a veces a que las incertidumbres formuladas sean percibidas como simple desconocimiento (García Barrón et al., 2007), y consecuentemente, no provoca el

compromiso de adoptar medidas personales y colectivas ante el cambio climático.

El informe Stern revela que los costes del cambio climático para la economía mundial pueden alcanzar entre el 5 % y el 20 % de la renta mundial anual si se mantiene el crecimiento de las emisiones de los GEI (Cordero, 2007; Jurado, 2007; Sánchez Hernández, 2007), este impacto afectará probablemente de forma más intensa a los países más pobres.

A día de hoy la evolución esperable del sistema climático presenta dos características fundamentales: la incertidumbre actual de la magnitud de los posibles impactos a escala regional y la posible irreversibilidad (García Barrón, 2007). La toma de decisiones que eviten que se produzcan en el futuro consecuencias ambientales y sociales irreparables, debe basarse en la profundización del conocimiento del medio natural y de los efectos inducidos en el mismo por la actividad humana. Únicamente así será posible mitigar las consecuencias del cambio climático y adaptarse progresivamente a las mismas (García Barrón, 2007).

Como todos los problemas con que se enfrenta la humanidad, siempre tienen algunos aspectos positivos. Uno de ellos ha sido el incremento en muy pocos años de la inversión sobre la materia en investigación y, por tanto, un aumento del conocimiento del funcionamiento del sistema climático y de sus relaciones con el resto de la biosfera. Curiosamente, como asevera Cordero (2007), también ha supuesto una revolución silenciosa en las que las tecnologías bajas en carbono y los cambios en la estructura económica van posibilitando la desvinculación de las emisiones de gases de efecto invernadero del crecimiento económico.

Una de las medidas con mayor interés ecológico y para la conservación -en sí misma puede ser la captación o “secuestro” del excedentario de gases de efecto invernadero desde la atmósfera a la pedosfera, mediante

la utilización de los ecosistemas naturales (como puedan ser turberas, o masas forestales maduras con una alta producción primaria bruta y una baja producción primaria neta).

La superficie forestal de Andalucía actualmente se estima en más de 4.6 millones de ha, lo cual supone un 53 % del total del territorio andaluz. Esta cifra es muy relevante por cuanto los ecosistemas forestales mediterráneos tienen un alto valor como fijadores de CO₂, todavía poco reconocido (Jurado, 2007). Esto permite que, según estimaciones recientes recopiladas por Jurado (2007), estos ecosistemas fijen alrededor de 151 millones de toneladas de CO₂, estando la captación media de la masa arbolada alrededor de las 5 t/ha⁴.

En contraposición el diagnóstico de emisiones en Andalucía muestra un perfil parecido al español (8 toneladas de CO₂ equivalente por habitante de Andalucía), acumulando la generación de electricidad, el transporte y los procesos industriales el 78 % de las emisiones totales (Sánchez Hernández, 2007).

Como señala Martín Vide (2007) la adaptación consiste en ajustarse del mejor modo a las nuevas condiciones climáticas y generales derivadas, buscando, sobre todo, disminuir los efectos de los crecientes riesgos climáticos y sobreponerse a las situaciones desfavorables. Buen ejemplo de ello son las opciones de adaptación recogidas por Álvarez Cobelas (2007) para los ecosistemas acuáticos continentales andaluces, gestionando mejor tanto la oferta de agua como su demanda (estimulación del ahorro en agricultura, reciclado de aguas residuales, estimulación de la recarga de los acuíferos, recuperación de las cuencas hidrográficas, etc.).

Entre este tipo de medidas la Consejería de Medio Ambiente puso en marcha la Estrategia Andaluza ante el Cambio Climático, que

⁴ Estos datos son preliminares y actualmente están en revisión.

como complemento a la estrategia nacional propone un gran número de medidas que involucran a diferentes organismos de la Administración (Pita et al., 2007).

La estrategia nacional -por su parte- se enmarca dentro del Protocolo de Kyoto⁵ -del que España es signataria- aunque este convenio tardó desgraciadamente más de 10 años en ser ratificado por la comunidad internacional. En la actualidad han ratificado este Protocolo 164 países y organizaciones de integración regional, lo que representa el 61.6 % de la emisiones base del año 1990 (Cordero, 2007). Aunque el compromiso de reducción de la Unión Europea está entorno al 8 % (tomando como año base 1990), en el caso español todavía se permitía incrementar su tasa de emisiones en un 15 %, dado que no era uno de los países con mayor grado de industrialización de la UE en esa fecha (Cordero, 2007).

Esta es una de las razones -no la única- de que en España las emisiones de gases de efecto invernadero aumentarían un 32 % entre 1990 y 2001, a diferencia de otros países de la Unión Europea, como Alemania y Reino Unido, que las han reducido (Jurado, 2007).

A pesar de la mejora de los modelos todavía hoy existe una gran incertidumbre en la cuenca mediterránea sobre el comportamiento futuro de las precipitaciones debido -entre otros factores- a la dificultad de integrar en los modelos su accidentada y compleja topografía (Aguilar, 2007). Sin embargo esta dificultad no debe de emplearse como excusa para no actuar. La adaptación a condiciones de escasez hídrica extrema debe afrontarse con medidas estructurales y visión de futuro, tanto tecnológicas como de una buena práctica cotidiana del ciudadano,

⁵ En el momento de redactar estas líneas está a punto de comenzar la reunión de Bali (Indonesia) que incluye la 13ª Conferencia de las Partes (COP-13) en la CMNUCC y la 3ª Reunión de las Partes (COP/MOP-3) en el Protocolo de Kyoto que dirimirá las líneas futuras de actuación a nivel internacional.

y no sólo coyunturales, de mero ahorro episódico (Martín Vide, 2007).

Los estudios, sobre escenarios futuros, realizados hasta la fecha en Andalucía, hay que considerarlos como susceptibles de revisión en los próximos años (López Cotín, 2007), pero suponen un primer paso en la compleja transición -desde el punto de vista de la metodología científica- desde escenarios globales a escenarios regionales. De cualquier modo las variables térmicas muestran una tendencia clara hacia el ascenso (López Cotín, 2007), a diferencia de lo que ocurre con la precipitación que presenta una mayor oscilación (en función de los escenarios A2 o B2).

Hoy día se da tanta importancia a la mitigación como a la adaptación, lo que explica que recientemente la Junta de Andalucía haya aprobado el Plan de Acción por el Clima (Sánchez Hernández, 2007), como una herramienta en este sentido. Entre las medidas aprobadas se incluye el impacto de las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de los planes territoriales y urbanos, planes de movilidad sostenible o auditorías energéticas (Sánchez Hernández, 2007).

La heterogeneidad del impacto de los cambios climáticos sobre diferentes zonas del globo -algo que no siempre es considerado en algunas discusiones sobre las repercusiones de las tendencias climáticas recientes- pone de manifiesto el interés que tiene esta monografía. Ya que la perspectiva regional supone una aportación para la comprensión del funcionamiento global de la atmósfera, y de la biosfera en general. Como señala Aguilar (2007) los cambios atmosféricos a gran escala no necesariamente se traducen en cambios uniformes en el espacio.

También es necesario considerar la complejidad del fenómeno que tendemos a denominar -con cierta inexactitud- “Cambio Climático”, ya que como señalan Custodio et al. (2007) la complejidad del problema

reside en que, además del efecto antrópico, existe una evolución natural. Buena prueba de ello son los efectos que la actividad humana han tenido sobre los humedales de Doñana, y que se han sobreimpuesto sobre el Calentamiento Global y el final de la Pequeña Edad del Hielo en lo que se denomina calentamiento posterior a la Pequeña Edad del Hielo (Sousa et al., 2006 y 2007) o “post-Little Ice Age warming”, si seguimos la terminología anglosajona (Sorvari et al., 2002). Esto conduce a que algunos autores consideren más apropiado hablar de “cambio global” que de “cambio climático”, el cual sería una sola parte del problema (Custodio et al., 2007).

Quizás la discrepancia terminológica -desde el punto de vista del estudio de las consecuencias medioambientales- provenga de la dificultad de discriminar los cambios que se deben a causas naturales de los que se deben a causas antrópicas. Dificultad sólo superable con el desarrollo de metodologías *ad hoc*, con complejos estudios en el laboratorio con todas las variables rigurosamente controladas, o sobre determinados espacios naturales con condiciones especialmente óptimas para este tipo de análisis.

No obstante, también hay que considerar que el intenso impacto que ha tenido la actividad antrópica, y el incremento de la vulnerabilidad de muchos sistemas por la acción humana, puede estar enmascarando parcialmente los efectos que están teniendo las tendencias climáticas de fondo (Sousa et al., 2006; García Murillo, 2007). Por todo ello resulta imprescindible incrementar el grado de investigación de estos temas, sobre todo obteniendo series largas de datos, que en muchos casos implican desarrollar metodologías *ad hoc* (Peñuelas & Filella, 2001; Álvarez Cobelas et al., 2005 y 2007 en este volumen; Valladares et al., 2005).

De cualquier forma ambos aspectos están íntimamente ligados. Álvarez Cobelas (2007) destaca que -a pesar de la dificultad

de estimar el impacto del Calentamiento Global en Andalucía- parece claro que una de sus consecuencias sobre los ecosistemas acuáticos continentales será la intensificación de las pautas existentes debidas a los impactos humanos, no directamente asociados al cambio climático.

Adaptarse -como señala Martín Vide (2007)- supone también aprovechar las nuevas oportunidades, que habrá, de los escenarios climáticos venideros. En siglos pasados fases climáticas más cálidas en centroeuropa -como el Óptimo Climático Medieval- permitió que el cultivo de la vid llegara hasta Gran Bretaña. Así una gestión adecuada de la adaptación al Calentamiento Global en Andalucía puede permitir extender cultivo en áreas donde estaban limitadas por las heladas, o favorecer la desestacionalización del turismo (Martín Vide, 2007).

Hay que ser conscientes de que las políticas de mitigación y adaptación frente al cambio climático no tienen sentido sin la colaboración activa de la ciudadanía, además de la toma de las decisiones consecuentes por las administraciones públicas. De ahí que las Consejerías de Medio Ambiente y de Educación de la Junta de Andalucía estén incorporando en los centros docentes buenas prácticas ambientales, dirigidas a una reducción de la emisiones de los gases de efectos invernadero, como el programa Kyoto Educa (www.kiotoeduca.org; Jurado, 2007). Sin duda la Educación Ambiental de la población en general, y de las administraciones y gestores políticos y técnicos, debe ser uno de los pilares para abordar este problema en el futuro inmediato.

Independientemente de la causalidad o de la participación compartida del forzamiento natural y antropogénico, en Andalucía se detecta claramente un sostenido incremento térmico y de la irregularidad pluviométrica estadísticamente significativos (García Barrón, 2007).

Como se señala en la Presentación de esta monografía, las acciones de mitigación de los 8 millones de andaluces no van a cambiar el destino climático del planeta, pero cualquier acción cabal, solidaria y ética con la realidad de un problema global pasa por el

acuerdo y la puesta en práctica de medidas y acciones de mitigación por parte de todos (Martín Vide, 2007). Sin duda esto incumbe a todas las administraciones, pero también a científicos, técnicos y a todos los ciudadanos, cada uno desde su parcela.

BIBLIOGRAFÍA⁶

- Álvarez Cobelas, M., J. Catalán & D. García de Jalón (2005). Impactos sobre los ecosistemas acuáticos continentales. En: Moreno, J. M. (Ed.). *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del Cambio Climático*. Ministerio de Medio Ambiente, pp. 109-142.
- Fernández-González, F., J. Loidi & J. C. Moreno (2005). Impactos sobre la biodiversidad vegetal. En: Moreno, J. M. (Ed.). *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del Cambio Climático*. Ministerio de Medio Ambiente, pp. 183-248. Ministerio de Medio Ambiente.
- García Barrón, L. (2002a). Evolución del régimen de precipitaciones en el oeste de Andalucía. *Aestuaría* 8: 219-240.
- García Barrón, L. (2002b). Un modèle pour l'analyse de la sécheresse dans les climats méditerranéens. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie* 14: 67-73.
- García-Barrón, L. & M. F. Pita (2004). Stochastic análisis of time series of temperature in the South-West of the Iberian Peninsula. *Atmósfera* 17: 225-244.
- Hugues L. (2000). Biological consequences of global warming: is the signal already apparent?. *Trends in Ecology and Evolution* 15: 56-61.
- Moreno, J. M. (Ed.) (2005). *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del Cambio Climático*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. 822 pp.
- Parry, M. L. (2000). *Assessment of Potential Effects and Adaptations for Climate Change in Europe: the Europe ACACIA Project*. Parry, M. L. (Ed.), Jackson Environment Institute, University of East Anglia, Norwich, UK, 320 pp.
- Peñuelas, J. & I. Filella (2001). Responses to Warming World. *Science* 294: 793-795.
- Peñuelas J., I. Filella & P. Comas (2002). Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region. *Global Change Biology* 8: 531-544.
- Peñuelas J. & M. Boada (2003). A global change-induced biome shift in the Montseny mountain (NE Spain). *Global Change Biology* 9: 131-140.
- Pita, M. F. (1997). Los cambios climáticos. En: *Climatología*. Cuadrat, J. M. & M. F. Pita (Eds.), págs. 387-458. Editorial Cátedra, Madrid.
- Rodrigo F. S., M. J. Esteban-Parra, D. Pozo-Vázquez & Y. Castro-Díez (1999). A 500 year precipitation record in Southern Spain. *International Journal of Climatology*: 19: 1233-1253.
- Rodrigo F. S., M. J. Esteban-Parra, D. Pozo-Vázquez & Y. Castro-Díez (2000). Rainfall variability in Southern Spain on decadal to centennial times scales. *International Journal of Climatology* 20: 721-732.
- Sorvari S., A. Korhola & R. Thompson (2002). Lake diatom response to recent Arctic warming in Finnish Lapland. *Global Change Biology* 8: 171-181.

⁶ Sólo se citan aquellas publicaciones no recogidas específicamente en esta monografía. El resto se pueden consultar en el propio índice de capítulos.

- Sousa, A. & P. García Murillo (2001). Can place names be used as indicators of landscape changes? Application to the Doñana Natural Park (Spain). *Landscape Ecology* 16. 391-406.
- Sousa, A. & P. García Murillo (2003). Changes in the wetlands of Andalucía (Doñana Natural Park, SW Spain) at the end of the Little Ice Age. *Climatic Change* 58: 193-217.
- Sousa A. & P. García Murillo (2005). *Historia ecológica y evolución de las lagunas peridunares del Parque Nacional de Doñana*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 170 pp.
- Sousa, A., L. García-Barrón, J. Morales & P. García Murillo (2006). Post-Little Ice Age warming and dessication of the continental wetlands of the Aeolian sheet in the Huelva region (SW Spain). *Limnetica* 25: 57-70.
- Valladares F., J. Peñuelas & E. Luis Calabuig (2005). Impactos sobre los ecosistemas terrestres. En: Moreno, J. M. (Ed.). *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del Cambio Climático*. Ministerio de Medio Ambiente, pp. 65-112.

