

— TEORÍA Y MÉTODOS EN GEOGRAFÍA FÍSICA

# 1 TEORÍA Y MÉTODOS EN GEOGRAFÍA FÍSICA

M.<sup>a</sup> SALA  
RAMON J. BATALLA

Colección ESPACIOS Y SOCIEDADES  
Serie General, n.º 1

Dirección Editorial:

D. RAFAEL PUYOL

Catedrático de Geografía Humana de la  
Universidad Complutense de Madrid

D. JULIO VINUESA

Profesor Titular de Geografía Humana  
de la Universidad Autónoma de Madrid

# TEORÍA Y MÉTODOS EN GEOGRAFÍA FÍSICA

*A Ramón Grau*

*Con admiración, gratitud y afecto*

María Sala  
Ramon J. Batalla



EDITORIAL  
SÍNTESIS

Impreso en España - Printed in Spain  
Depósito legal: M-28730-1997  
ISBN: 84-7738-284-7  
<http://www.sintesis.com>  
Teléfono 91 383 30 98  
Valdemoro, 28 28012 Madrid  
© EDITORIAL SÍNTESIS S. A.  
- Ramon J. Batalla Vinuesa  
© María Sala Vinuesa

CAPÍTULO 1. GEOGRAFÍA FÍSICA	11
1.1. Introducción	11
1.2. Precedentes históricos	16
1.3. Perspectiva actual	17
1.4. Problemática	17
1.5. Áreas de conocimiento	17
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA	21
2.1. Introducción	21
2.2. El método	26
2.3. El método científico	34
2.4. El método geográfico	35
2.5. El método sociológico	35
2.6. Ejercicios y programas de investigación	36
2.7. Discusión	37
CAPÍTULO 3. CLIMATOLOGÍA	41
3.1. Introducción	41
3.2. Evolución histórica	44
3.2.1. Precedentes	44
3.2.2. Consolidación	45
3.2.3. Desarrollo	47
3.3. Situación actual	52
3.3.1. Sistematización	52
3.3.2. Controversia	55
3.4. Áreas de conocimiento	55
3.4.1. Principios y fundamentos	55
3.4.2. Métodos y técnicas	56

Colección: **TEORÍA Y MÉTODOS**  
 Dirección Editorial: **BN**  
**GEOGRAFÍA FÍSICA**  
 D. RAMON J. BATALLA  
 Catedrático de Geografía Humana de la  
 Universidad Complutense de Madrid  
 D. JULIO VINUEZA ANGLU  
 Profesor Titular de Geografía Humana  
 de la Universidad Complutense de Madrid  
 Ramon J. Batalla

Primera reimpresión: octubre 1999  
 Diseño de cubierta: JV Diseño gráfico

© María Sala  
 Ramon J. Batalla

© EDITORIAL SÍNTESIS, S. A.  
 Madrid



Impreso en España - Printed in Spain

# Índice

<b>CAPÍTULO 1: GEOGRAFÍA FÍSICA .....</b>	<b>13</b>
1.1. Introducción .....	13
1.2. Precedentes históricos .....	16
1.3. Perspectiva actual .....	19
1.4. Problemática .....	22
1.5. Áreas de conocimiento .....	24
<b>CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA CIENTÍFICA .....</b>	<b>29</b>
2.1. Introducción .....	29
2.2. El empirismo .....	29
2.3. El racionalismo .....	31
2.4. El racionalismo crítico .....	33
2.5. El enfoque sociológico .....	35
2.6. Lakatos y los programas de investigación .....	36
2.7. Discusión .....	37
<b>CAPÍTULO 3: CLIMATOLOGÍA .....</b>	<b>41</b>
3.1. Introducción .....	41
3.2. Evolución histórica .....	44
3.2.1. Precedentes .....	44
3.2.2. Consolidación .....	46
3.2.3. Desarrollo .....	49
3.3. Situación actual .....	52
3.3.1. Sistematización .....	52
3.3.2. Controversia .....	55
3.4. Áreas de conocimiento .....	58
3.4.1. Principios y fundamentos .....	58
3.4.2. Métodos y técnicas .....	58

3.4.3. Climatología analítica .....	60
3.4.4. Climatología dinámica .....	61
3.4.5. Climatología sinóptica .....	62
3.4.6. Climatología regional .....	63
3.4.7. Climatología histórica .....	64
3.4.8. Climatología ambiental .....	65
<b>CAPÍTULO 4: HIDROLOGÍA .....</b>	<b>67</b>
4.1. Introducción .....	67
4.2. Evolución histórica .....	69
4.2.1. Precedentes .....	69
4.2.2. Consolidación .....	71
4.2.3. Sistematización .....	72
4.2.4. Desarrollo .....	73
4.2.5. Perspectivas .....	76
4.3. Los grandes temas hidrológicos .....	77
4.3.1. El ciclo hidrológico .....	77
4.3.2. La cuenca como sistema .....	79
4.3.3. Morfometría .....	80
4.3.4. Experimentación y modelos .....	81
4.4. Áreas de conocimiento .....	83
4.4.1. Principios y fundamentos .....	83
4.4.2. Métodos y Técnicas .....	84
4.4.3. Hidrología de vertientes .....	85
4.4.4. Hidrología subterránea .....	86
4.4.5. Hidrología fluvial .....	86
4.4.6. Hidrología de lagos y mares .....	87
4.4.7. Hidrología histórica .....	87
4.4.8. Hidrología regional .....	88
4.4.9. Hidrología ambiental .....	88
<b>CAPÍTULO 5: GEOMORFOLOGÍA .....</b>	<b>91</b>
5.1. Introducción .....	91
5.2. Evolución histórica .....	95
5.2.1. Precedentes .....	95
5.2.2. Desarrollo .....	95
5.2.3. Consolidación .....	96
5.2.4. Sistematización .....	98

5.2.5. Controversia .....	99
5.2.6. Perspectivas .....	101
5.3. Tendencias actuales .....	102
5.3.1. La teoría de sistemas .....	102
5.3.2. El estudio de procesos .....	104
5.3.3. Las técnicas cuantitativas y experimentales .....	105
5.3.4. La modelización .....	108
5.3.5. El concepto de escala .....	109
5.3.6. El estudio ambiental .....	110
5.4. Áreas de conocimiento .....	111
5.4.1. Conceptos y métodos .....	111
5.4.2. Geomorfología estructural .....	111
5.4.3. Geomorfología dinámica o de procesos .....	112
5.4.4. Geomorfología climática .....	112
5.4.5. Geomorfología histórica .....	113
5.4.6. Geomorfología ambiental .....	113
5.4.7. Geomorfología regional .....	114
<b>CAPÍTULO 6: EDAFOLOGÍA .....</b>	<b>115</b>
6.1. Introducción .....	115
6.2. Evolución histórica .....	118
6.2.1. Precedentes .....	118
6.2.2. Desarrollo .....	119
6.2.3. Consolidación .....	120
6.2.4. Clasificaciones .....	122
6.2.5. Controversia .....	124
6.3. Tendencias actuales .....	125
6.3.1. El suelo como un sistema .....	125
6.3.2. El estudio cuantitativo de los procesos edáficos .....	127
6.3.3. El estudio ambiental .....	128
6.3.4. Perspectivas .....	130
6.4. Áreas de conocimiento .....	133
6.4.1. Principios generales .....	133
6.4.2. Métodos y técnicas .....	133
6.4.3. Propiedades de los suelos .....	134
6.4.4. Procesos edafológicos .....	134
6.4.5. Clasificaciones .....	135
6.4.6. Distribución regional y geográfica .....	135
6.4.7. Problemática ambiental .....	136

<b>CAPÍTULO 7: BIOGEOGRAFÍA</b> .....	137
7.1. Introducción .....	137
7.2. Evolución histórica .....	139
7.2.1. La tradición espacial .....	139
7.2.2. Las bases ecológicas .....	142
7.2.3. El papel del hombre .....	145
7.2.4. Sistematización .....	146
7.2.5. Perspectivas .....	148
7.3. Tendencias actuales .....	149
7.3.1. El estudio espacial .....	149
7.3.2. El estudio eco-sistémico .....	150
7.3.3. El enfoque histórico .....	152
7.3.4. La acción humana .....	153
7.3.5. La cuantificación .....	153
7.4. Áreas de conocimiento .....	154
7.4.1. Principios y conceptos .....	154
7.4.2. Métodos y técnicas .....	155
7.4.3. Corología: distribución espacial .....	156
7.4.4. Biocenología: las comunidades de organismos .....	156
7.4.5. Ecología: las relaciones con el medio .....	157
7.4.6. Biogeografía histórica .....	157
7.4.7. Biogeografía ambiental .....	157
<b>CAPÍTULO 8: MODELIZACIÓN Y EXPERIMENTACIÓN</b> .....	159
8.1. Introducción .....	159
8.2. La función de los modelos .....	160
8.2.1. Los modelos en ciencia y en ingeniería .....	160
8.2.2. Los modelos en Geografía Física .....	161
8.3. Modelos y fuentes de error .....	163
8.3.1. Modelos determinísticos y modelos estocásticos .....	164
8.3.2. Modelos en relación a teorías .....	165
8.3.3. Modelos físicos y modelos abstractos .....	165
8.4. Principales tipos de modelos .....	166
8.4.1. Modelos naturales representativos .....	166
8.4.2. Modelos físicos a escala .....	167
8.4.3. Modelos analógicos .....	169
8.4.4. Modelos matemáticos .....	169
8.5. Construcción y verificación de modelos .....	181

8.6. El control y la experimentación en el desarrollo de modelos y de teorías científicas .....	185
8.6.1. Mediciones y teoría científica .....	186
8.6.2. Mediciones y estadística en ciencia .....	187
8.6.3. Diseño experimental .....	189
8.6.4. El papel de la técnica en la obtención de datos .....	192
8.6.5. La cuenca de drenaje como marco de control en Geografía Física .....	193
<b>CAPÍTULO 9: MÉTODOS Y TÉCNICAS DE CONTROL Y EXPERIMENTACIÓN</b> .....	197
9.1. Introducción .....	197
9.2. Métodos y técnicas de trabajo de campo .....	198
9.2.1. Precipitación y evaporación .....	198
9.2.2. Propiedades del suelo .....	202
9.2.3. Características de la vegetación .....	204
9.2.4. Procesos fluviales .....	208
9.3. Métodos y técnicas de laboratorio .....	219
9.3.1. Preparación y conservación de muestras .....	219
9.3.2. Determinaciones químicas .....	220
9.3.3. Análisis físico de materiales .....	225
9.4. Proceso de datos .....	228
9.4.1. Precipitación .....	228
9.4.2. Evapotranspiración potencial .....	230
9.4.3. Frecuencia de caudales .....	231
9.4.4. Probabilidad de caudales extremos .....	233
9.4.5. Concentración de sedimento .....	235
9.4.6. Distribución granulométrica .....	235
9.4.7. Carga de sólidos .....	237
9.5. Consideraciones finales .....	238
<b>CAPÍTULO 10: LA DOCENCIA</b> .....	241
10.1. Objetivos .....	241
10.2. Métodos docentes .....	243
10.2.1. Clases teóricas .....	245
10.2.2. Trabajo de campo .....	250
10.2.3. Proyectos .....	252

10.3. Técnicas docentes .....	253
10.4. Evaluación .....	254
<b>CAPÍTULO 11: LA GEOGRAFÍA FÍSICA EN ALGUNAS UNIVERSIDADES EUROPEAS.....</b>	<b>257</b>
11.1. La Universidad de Amsterdam .....	257
11.2. La Universidad Libre de Berlín .....	260
11.3. La Universidad de Saint Andrews .....	263
11.4. La Universidad Louis Pasteur de Strasbourg .....	266
11.5. La Universidad de Liège .....	268
11.6. Recapitulación .....	271
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>273</b>
<b>ÍNDICE DE MATERIAS .....</b>	<b>297</b>

# 1.

---

## Geografía física

---

### 1.1. Introducción

Las definiciones clásicas de Geografía se refieren a ella como la disciplina que trata de la tierra como morada de la humanidad, del medio físico y de las interacciones entre éste y la sociedad, de la organización espacial que todo ello comporta. Abarca pues el ámbito natural y el ámbito social. Según Finch y Trewarthe (1949) puesto que la superficie de la tierra, que es el foco del estudio geográfico, está compuesta por rasgos naturales y culturales, es obvio que la Geografía no puede ser exclusivamente Ciencia Natural o Social ya que pertenece a ambas. No obstante, según estos autores, es enteramente factible para un investigador tratar solamente uno de estos grandes temas, es decir, Geografía Física o Geografía Humana. Añaden que la Geografía Física tiene una perspectiva humana puesto que usualmente analiza sus temas entendidos como recurso.

Según Davis (1898) el desarrollo de la Geografía, considerada como el estudio de la tierra en relación al hombre, debe fundarse en la Geografía Física. Otro geomorfólogo norteamericano, Bryan (1935) opina que la Geografía Física tiene un carácter unitario cuando es vista desde la perspectiva de la Geografía Humana pero en cambio, para el propio geógrafo físico, está compuesta por un grupo de ciencias, cada una de ellas con sus propios objetivos.

También Hugué del Villar (1921) considera que la Geografía debe fundamentarse en la Geografía Física, y con ella en las ciencias físico-naturales, dada la influencia que el medio tiene en la vida humana. Para ello propone una nueva disciplina geográfica, la Ecética, que estudiaría la actividad de las

sociedades humanas en relación a la mejor utilización de sus recursos. El valor ecético de un país, es decir, su habitabilidad en función de sus recursos, depende tanto de las condiciones físicas del territorio como del nivel cultural y técnico de la sociedad. Se plantea por tanto el problema de las relaciones entre el factor humano y el medio natural, y cree que hay que resolverlo en el terreno de la ciencia positiva.

Para De Martonne (1925-1927) la Geografía Física comprende tres elementos, atmósfera, hidrosfera, litosfera. Tanto o más que de estas propiedades debe ocuparse de las relaciones que resultan de ellas en la superficie de la tierra, dominio propio del geógrafo. Por otra parte los organismos contribuyen a los cambios incesantes del mundo físico y por esto no podemos separar las plantas y animales del dominio de la Geografía Física. Así pues, los hechos que estudia la Geografía Física son complejos y para llegar a una clara comprensión de ellos es necesario desglosar las cuestiones y estudiar separadamente los fenómenos, los de la atmósfera, los de la hidrosfera, los del relieve, y los de la vegetación. De Martonne es consciente de que este método analítico tiene el inconveniente de destruir las realidades complejas que son el objeto propio de la Geografía, pero permiten sin embargo entender los mecanismos subyacentes. No se puede comprender la marcha de una máquina sin haber aislado previamente cada una de sus piezas. Añade que no hay que desperdiciar ninguna oportunidad de reconstruir los conjuntos y de dar resúmenes sobre la realidad. El mismo De Martonne (1939) afirma posteriormente que el carácter científico de la Geografía lo adquiere al precio de apelar a disciplinas no geográficas, como la Geología, la Meteorología, la Botánica, la Estadística, la Historia. El peligro de dispersión sólo puede evitarse a condición de tener una conciencia muy clara del propio objeto de la Geografía.

Para Birot (1959) la Geografía Física es el estudio de la epidermis de un ser único, la Tierra. Se trata de una epidermis de paisajes naturales, tal como se hubieran aparecido a un observador al recorrer el globo antes de toda intervención del hombre. Pero si los objetos a estudiar son pequeños (del metro al kilómetro), su explicación exigirá a veces utilizar todos los matices del análisis físico-químico, el cual trata de los fenómenos elementales. Por otro lado, puesto que las leyes físicas se consideran inmutables, el experimentador puede provocar series de sucesos según su voluntad, y entonces la justificación de las combinaciones complejas que constituyen los paisajes se sitúa en el plano histórico y a una escala cronológica completamente diferente a la de la vida humana. Las apariencias de la superficie del globo no son más que un corte en la evolución continua, en el curso de la cual el suelo se deforma y se desgasta, el nivel del mar sube y baja, el clima se modifica y provoca una secuencia de cambios en la cobertura vegetal y en la desgastación de las rocas. Estas modificaciones tienen lugar en el mar-

co de ciclos casi cerrados, las mismas series de elementos se repiten a intervalos de algunas decenas de miles o a algunas decenas de millones de años. Si bien para el geólogo todos estos episodios son importantes, para el geógrafo sólo interesan los que son útiles en la explicación de la situación actual en que vive el hombre.

Como puede verse, tanto en De Martonne como en Birot aparecen los conceptos de estudio global del medio entendido como paisaje, pero también la necesidad de un estudio especializado. Lo importante es ver este doble carácter sintético y analítico, la necesidad de una visión global pero también la de recurrir a análisis especializados cuando se quiera profundizar en un tema.

Según Strahler (1951) la Geografía Física es el estudio descriptivo de una selección de principios básicos de Ciencias de la Tierra, que nos dan una visión de la naturaleza del medio ambiente en que se mueve el hombre y de sus variaciones espaciales. Otra definición interesante es la de Ahnert (1962) para quien la Geografía Física por un lado sirve a la Geografía Humana, cuando trata de las relaciones causales de las diferencias entre áreas, pero por el otro tiene un objetivo propio cuando investiga los fenómenos físicos en sí mismos.

Al tratar del papel de la Geografía Física en los planes docentes S. Gregory (1978) define el objetivo de la Geografía Física en la Universidad como una preparación para que los estudiantes sean competentes en el estudio de los problemas de la superficie de la tierra, y para mejorar nuestra comprensión de los procesos y sus efectos; las propiedades físicas de la superficie de la tierra son su campo de estudio, el cual sólo puede ser comprendido y explicado a través de la Física, la Química, la Biología y las Matemáticas (quizá por el hecho de ser climatólogo olvida el tema geológico). Según este autor la Geografía Física debería ser enseñada a dos niveles, una firmemente basada en ciencias para aquellos que quieran dedicarse específicamente a la Geografía Física, y otro basado en las ramas tradicionales de la Geografía Física (Geomorfología, Climatología, etc.) para aquellos estudiantes que sólo necesiten conocer esta disciplina de forma complementaria y descriptiva. Este fue también el criterio de Davis.

Aunque en la actualidad hay un mayor número de temas, más enfoques y métodos donde elegir, el gran tema de la Geografía sigue siendo el carácter físico de la tierra, la ocupación del hombre y su uso de los recursos (Wise, 1977). Dentro de este contexto la Geografía Física es el estudio del entorno natural en que se mueve el hombre, y su razón de ser no está en ser el soporte de la Geografía Humana sino por sí misma en cuanto estudio del medio humano.

Finalmente, añadir el testimonio de Ehlers (1994), estudioso de la Geografía Humana, quien remarca el carácter dual de la Geografía como Cien-



cia Natural y Ciencia Social. Este carácter dual resulta sin duda problemático y ventajoso al mismo tiempo, y ha sido reflejado por el trabajo de los geógrafos desde la existencia de la Geografía.

También a nivel internacional este carácter dual queda claramente reflejado en la pertenencia de la UGI (Unión Geográfica Internacional) a dos Uniones Científicas, por un lado en el ICSU (International Council for Scientific Unions) que aglutina asociaciones del ámbito de la Ciencias Puras y de las Ciencias Naturales, y por el otro en el ISSC (International Social Science Council), que aglutina asociaciones del ámbito de las Ciencias Sociales. Ello se debe al interés de los geógrafos en integrar los aspectos de ambas ciencias, las físicas y las humanas. Riviere (1991) destaca el interés en la cooperación entre los aspectos naturalistas y sociales en temas tan actuales como la investigación en el cambio global.

Desgraciadamente en España no existe este interés en aunar Ciencias Naturales y Ciencias Sociales sino más bien el de integrar toda la Geografía, incluida la Física, en las Ciencias Históricas y Sociales. Quizá la poca aceptación de la Geografía en muchas universidades, y su práctica desaparición de las escuelas, se deba precisamente a un excesivo énfasis en favor de temas sociales, regionales y globales en lugar de temas basados en un enfoque naturalista y especializado.

En cuanto al papel de la Geografía Física en los últimos cincuenta años dentro del contexto general de la Geografía, quisiéramos destacar el hecho de que la revolución cuantitativa en Geografía Humana de los años setenta sigue a la de la Geografía Física de los años cincuenta, cuando tiene lugar su ruptura con los estudios meramente históricos, sobre todo en Geomorfología, para orientarse al estudio de procesos. Fue la aplicación de las leyes de Horton a las redes de drenaje, y las leyes físicas, la estadística y la teoría de sistemas a la Geomorfología a través de Strahler. Muchos de los geógrafos humanos, entusiasmados con los textos de Chorley y Haggett durante los años setenta, ignoraban que Chorley era un eminente geomorfólogo británico que había estudiado en EEUU con Strahler, del que aprendió las ideas sobre la base física, la cuantificación y la teoría de sistemas aplicadas a la Geomorfología, que luego transmitió a la Geografía en general. Así pues, como destaca Holt-Jensen (1980), lo mismo que durante sus inicios en la segunda mitad del siglo XIX, el desarrollo de la Geografía Física ha proporcionado las principales innovaciones en Geografía.

## 1.2. Precedentes históricos

A lo largo de este texto se dedica considerable espacio a trazar los orígenes y evolución histórica de cada una de las ramas de la Geografía Física

(Climatología, Hidrología, Geomorfología, Edafología y Biogeografía). Por otro lado existen publicaciones que tratan ampliamente el tema para el conjunto de la Geografía (Hartshorne, 1966; Holt-Jensen, 1980; Capel, 1981; Vila Valenti, 1983; Grau y López, 1984). Por todo ello aquí sólo nos interesa ocuparnos del tema de los orígenes de la Geografía en cuanto a recalcar su vinculación a la Geografía Física. Un texto que resulta muy útil para resaltar la base Física de la Geografía es el de Holt-Jensen (1980).

Si bien tanto la necesidad de explicar el medio físico, como la idea de la influencia de este medio sobre el hombre y sobre las sociedades, forma desde muy antiguo parte de los intereses humanos, y encontraríamos precedentes de ello en todas las culturas antiguas, la Geografía Física es, como ciencia, relativamente joven y muchos de sus fundamentos aparecen durante el último siglo.

La base de las ramas especializadas de la Geografía se encuentra en la *Geographia Generalis* (1650) del holandés Varenio, quien define los problemas y el marco de la Geografía científica. Divide la Geografía en tres partes principales: 1) Geografía absoluta o matemática en que se trata de las dimensiones de la tierra y sus movimientos en el espacio; 2) Geografía relativa o climática que comprende el estudio de las causas e influencias de las zonas climáticas y los cambios estacionales; 3) Geografía comparativa que comprende el estudio de las grandes divisiones de los rasgos físicos de la tierra.

El progreso de las Ciencias Naturales influye decisivamente en el desarrollo de la Geografía. La base fundamental de la Geografía, y especialmente de la Geografía Física se encuentra en la obra de Alexander von Humboldt (1769-1859), quien describió con extraordinario detalle formas del relieve y condiciones climáticas, indicando con precisión y acierto las relaciones entre estos factores físicos y la distribución y carácter de animales y plantas. A Humboldt, naturalista y cosmógrafo alemán, se debe el establecimiento de la temática de la Geografía general, especialmente de las ramas de Climatología y Biogeografía, y el inicio de los estudios regionales.

Karl Ritter (1779-1859), en base al trabajo de sus predecesores, especialmente en los cuidadosos informes geográficos de Humboldt, establece la moderna Geografía Física científica, fundamentada en la sistematización de sus amplios campos. Introdujo el estudio de las relaciones del medio físico y el hombre y su actividad al considerar a éste como una parte más de la tierra. Ritter fue el primer profesor de Geografía universitaria, con lo cual crea escuela y convierte a la Geografía alemana en la pionera de la Geografía universitaria.

La influencia de esta escuela, que tuvo una clara tendencia hacia la Geografía Física, se extendió por la Europa central y norte, Rusia y EEUU. Los máximos representantes fueron Oscar Peschel (1826-1875), Richthofen (1833-1905) y Ratzel (1844-1904). Richthofen procedía del campo de la Geo-

logía, y se dedicó a la Geomorfología y a la definición y métodos de la Geografía. Ratzel era zoólogo y dio un gran énfasis al medio físico y a su papel determinante en la actividad y desarrollo de las sociedades humanas. Otros importantes exponentes de la escuela alemana fueron Hann (1839-1921) y Köppen (1846-1940) ambos meteorólogos, Albrecht Penck (1858-1945) geomorfólogo glaciarista, Passarge (1867-1958) geomorfólogo que se dedicó al estudio del paisaje, Hettner (1859-1941), también geomorfólogo e interesado en la historia y la teoría de la disciplina. A ellos siguieron otros grandes geógrafos físicos como Haushofer, Lautensach y Troll.

La escuela geográfica rusa se inicia también en base a la Geografía Física. Lomonosov (1711-1765) era geólogo, y fue el director del departamento de Geografía de la Academia de ciencias. Dokuchaev (1846-1903) es el creador de la Ciencia del Suelo, y Voeikov (1842-1916) cultiva la Climatología. Anuchin (1843-1923) defiende un enfoque integrado y basado en el estudio de conjuntos regionales. Es la visión de la Geografía como ciencia de síntesis, tema recurrente entre los geógrafos. Por ejemplo, tuvo un gran auge entre los geógrafos soviéticos y entre los geógrafos marxistas, especialmente en Francia y España.

Los primeros representantes de la escuela británica son Mary Somerville (1780-1872), que publica el primer texto en lengua inglesa de Geografía Física en 1848, y T. H. Huxley, biólogo darwinista, que publica una Fisiografía, y que es partidario de una Geografía basada en la observación de los fenómenos locales, de la experimentación y del trabajo de campo. Herbertson (1865-1915) es el iniciador del estudio regional, con una visión de las regiones naturales como macro-organismos. Gracias a la Commonwealth su influencia se extiende por todos los ámbitos de habla inglesa. Se caracteriza por un enfoque eminentemente práctico y empírico. Entre los geógrafos físicos más modernos destacan Miller, Barry, Dickinson, Hall, Monkhouse y Chorley.

En EEUU la influencia de la escuela alemana es muy notable y se centra especialmente en las ideas deterministas de Ratzel, que llegan a través de Ellen Semple (1863-1932). En la misma línea se encuentra Huntington (1876-1947). Griffith Taylor (1880-1963), australiano que enseñó en Canadá y EEUU, predijo acertadamente, en base a criterios deterministas, el patrón de los asentamientos humanos en Australia. George Perkins Marsh, en 1864, trata el tema de la Geografía Física desde el punto de vista de las modificaciones que imprime en el medio la acción humana, es decir, muy en la línea de los estudios medio ambientales actuales. Pero quien consolida la Geografía Física es William Morris Davis (1850-1934), cuya sistematización de la Geomorfología en base al ciclo de erosión, que llamó ciclo geográfico, es bien conocida y formaba hasta hace pocas decenas de años el cuerpo de doctrina geomorfológico y por tanto geográfico.

La escuela francesa ejerció una gran influencia en los países mediterráneos. Su más destacado representante es Vidal de la Blache (1845-1918) que estudia el medio físico como conjunto de posibilidades que la naturaleza ofrece al hombre para utilizar en su propio desarrollo. Sus aportaciones se centran en gran parte en la Geografía Humana y en la Geografía Regional, y por tanto sus raíces están más cerca de la historia. En Geografía Física destacan posteriormente De Martonne (1873-1955) y Baulig (1877-1962), a los que siguen, entre otros, Cholley, Birot, Dresch y Tricart.

En España los primeros trabajos de Geografía Física son más tardíos, y se deben a Huguet del Villar (1871-1950) botánico y edafólogo y a Dantin Cereceda (1886-1943) naturalista. Les siguen los de Hernández Pacheco (1932) y Solé Sabarís y Llopis Lladó (1952) todos ellos procedentes del campo naturalista.

El primer congreso de Geografía se celebró en 1871 en Bélgica (Amberes) bajo la denominación de Congreso Internacional para el progreso de las Ciencias Geográficas. A partir de entonces se celebran otros de manera mas o menos regular, hasta que en 1923 se crea la Unión Geográfica Internacional, con lo que el asentamiento de la Geografía como disciplina académica queda firmemente instituido.

### 1.3. Perspectiva actual

Para Chorley (1971a) la Geografía Física se encuentra ante el dilema de tener que elegir entre tener un papel relevante como base de la Geografía Humana o ser una Ciencia de la Tierra. Y sin embargo, visto desde una perspectiva actual, la Geografía Física ha resuelto este dilema cuando ha dejado los estudios históricos por los estudios de procesos y éstos la han conducido al estudio medio ambiental. No ha hecho falta ninguna ruptura, las circunstancias han llevado a la Geografía Física al enfoque medio ambiental en el que se unen ciencia y servicio a los intereses del hombre. Si a Chorley le parecía que la Geografía Física podía ser superada a causa de la creciente urbanización e industrialización, lo cierto es que la preocupación por el medio ambiente que esta intensa utilización del territorio ha generado no ha hecho más que beneficiar a la Geografía Física.

Así, años más tarde, Goudie (1994) ya no se plantea ningún problema sobre el papel de la Geografía Física sino que simplemente señala temas que pueden considerarse centrales, y que como podemos ver están todos ellos relacionados con el medio ambiente. Estos temas son: la descripción y comprensión de los paisajes; la diversidad regional y la sensibilidad ambiental; la identificación de fluctuaciones ambientales; los humanos como agentes del cambio ambiental pasado, presente y futuro; las interrelaciones entre

procesos humanos y naturales; el medio ambiente como riesgo; el determinismo ambiental; la utilidad y aplicación de las aptitudes geográficas.

Puesto que todo crecimiento comporta una ramificación, un desarrollo de cada una de las partes que componen el todo, éste ha sido el devenir de la ciencia geográfica. Lo mismo que ha sucedido en todas las ciencias que han llegado a un estadio científico avanzado, como pueden ser la Geología (con ramas como la Tectónica, Estratigrafía, Petrología, etc.), la Biología (subdividida en Botánica, Ecología, Zoología, etc.), la Geografía Física también ha desarrollado varias ramas: la Climatología, la Hidrología, la Geomorfología, la Edafología y la Biogeografía. Lo cierto es que en la actualidad, un curso de Geografía Física general representa fundamentalmente un curso introductorio a las ramas de la misma, al igual que lo es para un geólogo un curso de Geología general.

En paralelo a este desarrollo temático, en los años ochenta ha habido un resurgimiento de la producción de textos de Geografía Física que intentan cubrir la totalidad de la disciplina. Dado el crecimiento de la misma se ha hecho inevitable que los libros fuesen cada vez más amplios en contenidos. Pero la realidad es que en la práctica se hace cada vez más difícil cubrir en un único curso toda la temática, y de hecho la disciplina se imparte en muchos casos por temas separados, de los que también han ido apareciendo textos. Sin embargo es posible encontrar nexos de unión entre las distintas ramas de la Geografía Física en relación a algunos centros de interés comunes a todas ellas. Gregory (1985) identifica seis temas principales dentro del ámbito de la Geografía Física:

- 1) El cronológico, es decir, el estudio de la evolución de los paisajes y el ambiente de la Tierra, el cual, aunque puede decirse que su origen arranca de Davis, ha progresado mucho con el advenimiento de nuevas técnicas de datación.
- 2) El estudio de procesos, o sea, el análisis y comprensión de los mecanismos que gobiernan los diferentes aspectos de la Naturaleza.
- 3) Los efectos de la actividad humana sobre el medio físico y sobre los procesos medioambientales.
- 4) El concepto de sistema, considerado como el principal paradigma subyacente tanto en la Geografía Física en conjunto como en cada una de sus ramas.
- 5) La interpretación del cambio temporal del medio físico, lo cual se hace posible gracias al estudio de procesos.
- 6) El aspecto de aplicación o ambiental, puesto que los geógrafos físicos cada vez son más conscientes del papel que pueden jugar en el sentido de proporcionar información útil para la planificación ambiental.

Sea cual sea el tema de Geografía Física elegido, hay unos aspectos que son básicos en todo estudio (Gregory, 1985), y que se desprenden de las ideas científicas que se expondrán a continuación (Haines-Young y Petch, 1986):

- a) *La denominación y la clasificación.* Según la visión clásica de la ciencia son un pre-requisito para el estudio científico. De hecho la clasificación es imposible sin una teoría previa sobre cómo las cosas se comportan y qué propiedades tienen. En la práctica los objetos reciben un nombre con el grado de certeza que requiere el problema a resolver, y puesto que las teorías cambian también lo hacen los sistemas de clasificación, así como las propiedades o ideas que los nombres implican. Si las cosas se clasifican en base a propiedades que son teorías que no pueden probarse entonces tales objetos están fuera del reino de la ciencia.
- b) *La medición.* Es el proceso de asignar propiedades a los objetos en función de ciertas reglas. Las mediciones son representaciones abstractas de las cosas. La cantidad de información que una medición puede representar depende de la escala numérica que se use, la cual dice la precisión con la que las predicciones pueden hacerse a partir de las teorías, y el rigor con que estas teorías pueden ser probadas. La manera en que se toman las mediciones debe depender de la teoría científica que se intenta probar y de la teoría estadística que se pretende aplicar. La teoría científica determina el parámetro a medir, las circunstancias de la medición, y por tanto la teoría está en la base de la elección del problema a investigar. La teoría estadística explica la relación entre medición y error y determina el repertorio de estructuras de relaciones entre las variables. Muchos miran la medición como el no va más de la ciencia. Están equivocados. La medición es solamente un producto paralelo de la necesidad de probar y refinar teorías, pero esto no quiere decir que la medición no sea importante.
- c) *El diseño experimental.* Se trata del planeamiento teórico y práctico de la actividad a realizar, es la base de toda medición. Los problemas a resolver en la ciencia empírica necesitan experimentos controlados a fin de probar las teorías. Varios procedimientos han sido llamados experimentos, incluyendo los que se realizan para confirmar ideas previas o meramente para ver cómo sucede algo. Los experimentos válidos requieren la prueba crítica de teorías establecidas, bien por observación empírica bien por análisis deductivo. El diseño y ejecución de experimentos requiere una secuencia coordinada de operaciones, empezando con un planteamiento claro del problema. Esto incluye la selección del método analítico y una con-

sideración anticipada de los resultados. Las mediciones se toman de tal manera que se puedan controlar los efectos externos a la teoría y un elemento esencial en su control es la consideración de la importancia del factor aleatorio. La interpretación se centra en la decisión de rechazar o no la hipótesis, y aunque la teoría estadística enfoca el problema mediante el uso de probabilidades, al final se trata de una cuestión de criterio.

d) *Los modelos.* Son instrumentos utilizados para hacer predicciones y por tanto medios para probar teorías. Es importante distinguir entre su papel en ciencia, donde se utilizan para probar teorías, y en ingeniería, donde sirven para hacer predicciones. Las situaciones de prueba se diseñan para permitir que se ponga de manifiesto el conflicto entre teoría y observación. Esto depende de si son determinísticos, es decir, cuando una entrada produce una salida, o estocásticos, es decir, cuando una entrada puede producir más de una salida, o si están total o parcialmente especificados por la teoría. En la práctica el uso de modelos puede ser muy complejo, especialmente cuando requieren calibración u optimización de parámetros, y siempre existe el problema de juzgar si la predicción generada con la prueba es suficientemente cercana a la observación para llegar a una conclusión sobre la teoría. Haggett y Chorley (1967) consideran que un modelo puede ser una teoría, una ley, una hipótesis o una idea estructurada, siempre una representación idealizada o simplificada de la realidad.

#### 1.4. Problemática

La Geografía Física es, en primer lugar, una parte de la Geografía puesto que su objetivo es el hombre y sus relaciones con el medio. Pero, como ya se ha discutido, forma parte de las Ciencias Naturales porque debe conocer cuáles son las características de este medio en que se desenvuelve el hombre. Pero el medio natural engloba aspectos muy variados, y por tanto determina una gran diversidad interna de la disciplina. Ambos aspectos, la dualidad de raíces y la variedad temática determinan problemas que es necesario conocer.

Ya hemos visto como los orígenes de la Geografía se forjan en el seno de las Ciencias Naturales. La situación actual es en muchos casos la inversa, como en el caso de España, puesto que la Geografía se cultiva desde el ámbito de las disciplinas históricas y sociales, lo cual puede plantear conflictos a la Geografía Física.

Así, por un lado, los geógrafos físicos se encuentran inmersos en el área de las ciencias históricas y sociales, donde en muchos aspectos no encuentran

las facilidades necesarias para su labor profesional, y por otro lado sus relaciones y trabajos científicos dependen del ámbito de las Ciencias Naturales, para lo cual necesitan cada vez más poseer conocimientos del área de ciencias.

A causa de esta posición de la Geografía Física entre las Ciencias Sociales y las Ciencias Naturales, Worsley (1985) opina que los problemas con que se enfrenta en nuestros días la Geografía Física se centran en: a) sus relaciones con las disciplinas afines; b) su situación en relación a los fondos que las instituciones dedican a la investigación; c) su situación en relación a los fondos para docencia; d) el papel que se le ha asignado en la enseñanza media.

En su relación con las disciplinas afines, el problema real estriba en la falta de preparación tanto en Ciencias Naturales como en ciencias básicas, y no es por ello extraño que se haya hecho necesario escribir libros para estudiantes de Geografía que no tienen una base en ciencias. Por otro lado, al estar clasificada como Ciencia Social, no se reciben fondos suficientes para desarrollar la labor naturalista que le es propia, con lo cual la Geografía Física es cada vez menos competitiva en relación a las ciencias afines. Lo cierto es que cada vez hay menos geógrafos físicos en el conjunto de la Geografía, tanto en números absolutos como en relación al conjunto de geógrafos.

En el Reino Unido (Johnston, 1985) la Geografía es claramente considerada como la disciplina que cabalga entre las Ciencias Sociales y las Ciencias Naturales, y en la cual por tanto se sintetiza el conocimiento de la tierra, en oposición a las disciplinas más especializadas y sistemáticas que fragmentan el conocimiento en partes más fácilmente manipulables. Por tanto una combinación entre Geografía Física y Geografía Humana es lo que proporciona tanto el núcleo como la razón de ser de la disciplina. No puede haber Geografía sin las dos, y sin Geografía el conocimiento de la tierra queda fragmentado y no es por tanto satisfactorio. Sin embargo es un hecho que en algún momento hubo geógrafos, como en el caso de Worsley (1985), que manifestaron que para la Geografía Física seguir junto a la Geografía Humana representaba un lastre.

En EEUU (Johnston, 1985) la Geografía Física había sido en gran parte eliminada del contexto de la disciplina, sólo es utilizada a nivel descriptivo, y por tanto no incluye estudios de dinámica. Sin embargo, no es menos cierto que en estos últimos años está siendo reintroducida, fundamentalmente en lo que se refiere al estudio de procesos. Ello se debe al interés que estos estudios tienen en Geografía aplicada, pero también al hecho de que el enfoque global propio de la disciplina, así como su base dual, le dan una mayor relevancia ante los problemas medioambientales de nuestros días, y por tanto es capaz de atraer tanto a estudiantes como recursos económicos. Así pues, la Geografía en EEUU está en un proceso de revalorización de su papel en la sociedad.

Sabemos que tradicionalmente la Geografía se ha basado en una amplia visión del mundo a escala global y regional, en el estudio de los paisajes, y en la interrelación de los aspectos físicos y humanos. Sin embargo es innegable que desde las últimas décadas asistimos a un incremento de la especialización. Paralelamente a la especialización se ha producido un mayor énfasis en el estudio de procesos dentro de todas las especialidades, lo cual puede hasta cierto punto convertirse en un elemento unificador. Es el caso del estudio de procesos en sistemas abiertos como la cuenca de drenaje, lo cual involucra la comprensión de sistemas más amplios como el que incluye la respuesta del hombre y su impacto en tales sistemas, y también varios subsistemas, como el formado por las vertientes y por el curso fluvial, ellos a su vez conformados por otros subsistemas, como el suelo, la vegetación y el agua en las vertientes. Estos estudios agrupan muchos aspectos de la Geografía Física y tienen un interés creciente en los problemas medio ambientales.

Algunos consideran (Gregory, 1987) que puede ser que todavía falte un principio que esté por encima de la especialización, una visión general y aceptada de lo que debe ser la Geografía Física. Por un lado existe un sentimiento de que debe darse una mayor precisión a las antiguas y amplias definiciones como la de Hartshorne, de que la Geografía es la descripción científica de la tierra como morada del hombre. Pero las preocupaciones básicas siguen estando esencialmente relacionadas con el carácter físico de la tierra y con su ocupación por el hombre y con el uso y revaloración de sus recursos. Es necesario recordar que existe continuidad en el punto de vista y en la materia de la Geografía. A lo largo de la historia se ha buscado entender y poner orden en el universo, relacionar al hombre con su medio tanto en términos de interdependencia como de modificación, y entender la expresión cambiante de estos objetivos en el paisaje y en el uso de recursos.

### 1.5. Áreas de conocimiento

Una forma simple y objetiva de comprobar la amplitud temática de una disciplina es a través del análisis de sus libros de texto (Grau y Sala, 1982, 1984). Puesto que no se trata aquí de llevar a cabo un estudio exhaustivo del contenido de la Geografía Física sino de vislumbrar su situación actual, se han seleccionado de entre los manuales que tratan alguno de los temas de que se compone la materia los que en su título llevan explícito el título de Geografía Física, por considerar que por lo menos existe en ellos la intención de abarcar toda la materia y por consiguiente proporcionan una visión de lo que en su momento se consideraba el ámbito de la misma. De dichos manuales se ha analizado el contenido temático y el peso específico que se otorga a cada una de las ramas de la Geografía Física.

Observamos que los tratados más antiguos se caracterizan por otorgar un peso mayoritario a la Geología y a la Geomorfología, incluyendo, eso sí, una parte más o menos extensa sobre el clima y a menudo sobre Hidrografía, pero no tratan casi nunca el tema biogeográfico. Dando pues por sentado que el tema geomorfológico está siempre extensamente tratado, vamos a analizar cómo y cuándo aparecen los otros temas.

En el texto de Davis y Snyder (1898), aunque fundamentalmente dedicado a Geomorfología, tienen no obstante cabida los temas atmosféricos e hidrográficos. Más adelante, en la versión alemana de esta Geografía Física los temas de Cosmografía, Meteorología, Oceanografía, Geología están a cargo de Braun (1917) y constituyen todo el primer volumen, mientras que la totalidad del segundo volumen está dedicado a Morfología. Los grandes apartados en que Marr (1900) divide su obra son la litosfera, la hidrosfera y la atmósfera, mientras que en el texto de Philippon (1921) los aspectos temáticos y los atmosféricos de la Geografía están ampliamente tratados en el primer volumen de la obra.

La aparición de los temas biogeográficos es menos frecuente, y generalmente basado en el estudio de la vegetación, aunque a veces puede incluir algún tema sobre fauna, pero nunca aparece el tema de los suelos. Así, en el tratado escrito por Leipoldt con los manuscritos dejados por Peschel (Peschel y Leipoldt, 1880) se dedica un volumen a los contenidos no sólo de clima y aguas sino que aparece también el aspecto biogeográfico al tratar, aunque someramente, el tema de los seres vivos en un capítulo dedicado a vegetación y fauna. Richthofen (1886) incluye apartados sobre clima y biología, pero sólo como aspectos introductorios en la gran masa de información geomorfológica. También los británicos Somerville (1848) y Huxley (1877) introducen el tema de los seres vivos, pero únicamente en relación a los efectos de su actividad en la distribución de los sólidos, fluidos y gases terrestres (como en los depósitos constituídos por restos de plantas), y en la formación de relieves (corales y foraminíferos). Es interesante advertir cómo Supan, mientras que en su primer texto (1884) sigue la corriente de añadir temas sobre la atmósfera y la hidrosfera al bloque central de Geomorfología, en la obra que prepara en colaboración con Obst (Supan y Obst, 1927-1930), dedica un volumen entero a la atmósfera y los mares, mientras que en el volumen sobre morfología, después de presentar los temas endógenos, exógenos y de relieve, dedica una segunda parte a la Biogeografía, concretamente a la Geografía de las plantas, la cual está a cargo de Leik.

El caso De Martonne es realmente novedoso puesto que ya en su primer texto presentaba toda la gama temática, (De Martonne, 1909), y más adelante en varios volúmenes, con uno dedicado a nociones generales, clima e Hidrología (1925) otro dedicado al relieve (1926) y un tercero para tratar el tema biogeográfico (1927), éste en colaboración de Chevalier y

Cuenot. Se trata por tanto de un precedente de lo que posteriormente ha llegado a ser la Geografía Física en los libros de texto.

En España, el estudio de Martí Henneberg (1984) muestra como Hugué del Villar, en su Geografía General (1909), y en el apartado que denomina Geografía Analítica o especial, trata separadamente, y por este orden, temas cosmográficos, meteorológicos, geológicos y botánicos. Más adelante, en el Archivo geográfico de España (1916), organiza el material bajo los temas siguientes: relieve, suelo, clima, aguas, plantas y animales. También según Martí Henneberg (1984) Hugué del Villar influye en el trabajo de los hermanos Joaquín y Juan Izquierdo Croselles, responsables del manual de Geografía General utilizado en la escuela militar de artillería, del que escribió el prólogo. En la última edición (Izquierdo, 1945) se traza un esquema de las partes que constituyen la Geografía General, y que son: Cosmografía, Fisiografía (litosfera, hidrosfera, atmósfera), Biogeografía y Antropogeografía. El texto incluye sólo los dos primeros apartados, dejando para un posible segundo tomo los dos restantes. Por su parte Dantín Cereceda (1912) trata primero, y más extensamente, los temas estructurales y geomorfológicos, para pasar luego a las aguas, el clima y los seres vivos, incluyendo en este último apartado la agricultura y una Antropogeografía.

En resumen, puede decirse que el núcleo central de la Geografía Física ha sido tradicionalmente el estudio del relieve, con sus factores endógenos y exógenos. En segundo lugar aparece el estudio del clima y de las aguas. En cambio la inclusión del estudio de los seres vivos ha sido más tardía, probablemente a causa, como opinaba Davis (1902), de lo problemático de la sistematización de las infinitamente variadas respuestas de los organismos vivos a su medio. Es interesante señalar que Davis estudió, trabajó e investigó en Meteorología, puesto que estuvo durante tres años en el Servicio Meteorológico del Observatorio Nacional de Argentina en Córdoba, y escribió un número bastante elevado de artículos sobre temas meteorológicos, como puede verse en la relación de publicaciones incluida en King y Schumm (1980). Quizá sea por esto que Davis veía dos grandes clases de hechos en Geografía, los relacionados con el medio inorgánico y los relacionados con las respuestas con que los habitantes de este medio, de los más simples a los más complejos, se adaptan a él. A los primeros les llama Geografía Física mientras que para los segundos sugiere el vocablo de "Ontografía", que considera similar a la Ecología pero incluyendo el estudio de la estructura y fisiología de individuos y especies.

En la actualidad la producción de libros de texto de Geografía Física muestra bien claramente que están plenamente asentadas todas sus ramas, es decir, el estudio del clima (Climatología), las aguas (Hidrología), el relieve (Geomorfología), los suelos (Edafología) y la vegetación (Biogeografía), temas que ya aparecen en los clásicos de los años cincuenta como los de Bi-

rot (1959) y Strahler (1951). Pero, lo que es más importante y significativo, han aparecido muchos libros de texto en cada una de estas ramas, especialmente en lengua inglesa. Es por ello que nos ha parecido conveniente, al escribir sobre Teoría y Métodos en Geografía Física, no sólo dedicar un apartado a cada una de los grandes temas, sino tratar de equilibrar su peso para dejar constancia de la importancia de todos ellos en el ámbito de la Geografía Física de nuestros días.

## Metodología científica

### 2.1. Introducción

En la década de los sesenta, en plena expansión de los métodos cuantitativos en Geografía, Harvey (1969) se dio cuenta de que la llamada revolución cuantitativa implicaba a su vez una revolución filosófica. Era la filosofía del método científico la que estaba imponiendo la cuantificación puesto que determinaba a su vez los temas de la propia disciplina.

También la regionalización ha llevado a los geógrafos a un acercamiento cada vez mayor a las fuentes y métodos de las disciplinas afines. Existe una nueva apreciación de las interrelaciones y de las interdependencias entre disciplinas, pero no sólo a nivel de métodos sino también de conceptos científicos.

Algunos geógrafos talos como Hanner Young y Peck (1986) opinan que para que esta ciencia alcance el rango que le corresponde dentro de las ciencias de la tierra es necesaria estar a su nivel tanto en teoría como en la metodología, y escribir, como en cuanto al método científico, y ver sus aplicaciones en nuestra disciplina. A continuación citamos parte del texto de Hanner Young y Peck (1986) y del de Harvey (1969) algunos textos sobre las bases del pensamiento científico y su evolución.

### 2.2. El empirismo

Para la ciencia clásica o empírica, cuyos fundamentos puso Francis Bacon (1561-1626), el conocimiento científico es seguro porque se basa en la

# 2. Metodología científica

## 2.1. Introducción

En la década de los sesenta, en plena expansión de los métodos cuantitativos en Geografía, Harvey (1969) se dio cuenta de que la llamada revolución cuantitativa implicaba a su vez una revolución filosófica. Era la filosofía del método científico lo que estaba implícito en la cuantificación puesto que ésta obliga a seguir las normas de la lógica científica.

También la especialización ha llevado a los geógrafos a un acercamiento cada vez mayor a las fuentes y métodos de las disciplinas afines. Existe una nueva apreciación de las interrelaciones y de las interdependencias entre disciplinas, pero no sólo a nivel de métodos sino también de conceptos científicos.

Algunos geógrafos físicos como Haines-Young y Petch (1986) opinan que para que esta ciencia alcance el rango que le corresponde dentro de las ciencias de la tierra es necesario estar a su nivel tanto en todo lo referente a conocimientos y técnicas, como en cuanto al método científico, y ver sus aplicaciones en nuestra disciplina. A continuación entresacamos del texto de Haines-Young y Petch (1986) y del de Harvey (1969) algunos temas sobre las bases del pensamiento científico y su evolución.

## 2.2. El empirismo

Para la ciencia clásica o empírica, cuyos fundamentos puso Francis Bacon (1561-1626), el conocimiento científico es seguro porque se basa en la

experiencia, en datos procedentes de la percepción por los sentidos. Implica la idea del *argumento inductivo*, es decir, de afirmaciones generales sobre el mundo a partir de *observaciones repetidas* de sucesos particulares. Esta observación repetida se basa fundamentalmente en una experimentación paciente de los hechos inicialmente observados. Se considera que el conocimiento es seguro a causa de la verificación empírica acumulada.

Es el nivel más elemental de conocimiento. Parte de una masa desordenada de observaciones que posteriormente se van ordenando con el uso de palabras y símbolos que la describen. Después, mediante el proceso de definición, medición y clasificación se puede agrupar esta información en categorías y ordenar racionalmente los datos. Finalmente, una asociación regular entre dos clases de suceso pueden sugerir una ley empírica, y el conjunto de leyes empíricas constituir un cuerpo de conocimiento que puede utilizarse para explicar otros eventos. Las leyes establecidas de esta manera se llaman leyes inductivas. En los primeros estadios del desarrollo científico la ordenación y clasificación de datos es la actividad principal. El defecto de este procedimiento es la asunción de que esta ordenación y estructuración de datos es independiente de la teoría final.

Este enfoque basado en la inducción comporta los siguientes pasos en el quehacer científico: 1) observación y registro de hechos; 2) ordenación y clasificación de estos hechos; 3) derivación de generalizaciones a partir de los hechos mediante inducción; 4) construcción de leyes y teorías.

El conocimiento así obtenido se considera especialmente seguro porque en los dos primeros pasos no se asumen hipótesis sobre como los hechos observados pueden estar interconectados. Sus principios básicos son tres: 1) el de *acumulación*, que implica que el conocimiento científico consiste en la conjunción de hechos bien establecidos, y que el conocimiento crece mediante la acumulación gradual de otros hechos bien probados; 2) el de *inducción*, que sugiere que hay una forma de razonar que permite obtener leyes verdaderas a partir de un conjunto de observaciones de hechos; 3) el de *confirmación*, que implica que la plausibilidad de una ley es proporcional al número de instancias que se ha observado se ajustan a la ley; sólo mediante observaciones repetidas pueden obtenerse y justificarse generalizaciones sobre el mundo. Así Darwin, en su introducción al *Origen de las especies*, escribe que su trabajo se basa en la paciente acumulación de toda suerte de hechos relacionados con el tema y sólo pasados cinco años de trabajo se permitió especular sobre ello.

Este enfoque tiene varios puntos débiles, ya que no existen principios de verificación o de inducción seguros, y no se tiene en cuenta la dependencia teórica que tienen todas las observaciones, puesto que en la práctica la observación sin teoría es imposible. Sin embargo, en su momento significó una ruptura con el principio de autoridad y con el método deductivo sin ba-

se de datos, por lo que el conocimiento empírico representó el inicio del desarrollo científico.

### 2.3. El racionalismo

Los fundamentos del racionalismo moderno proceden de los principios y el método establecidos por Descartes (1596-1650). Se considera que el conocimiento proviene de la razón más que de los sentidos, y por tanto, es un camino hacia la invención y el descubrimiento, puesto que se basa en el principio de duda metódica (dudar de todo excepto de la propia capacidad de razonar) y no en una mera ordenación lógica de hechos.

Los objetivos de la ciencia racionalista son ambiciosos en el sentido de que aspiran a poder llegar a hacer predicciones u observaciones acertadas, formular teorías verdaderas, y llegar con ello a explicar como funciona el mundo. Esto conlleva hacer juicios, a elegir entre teorías contrastadas. Por esto es necesario probar lo certero de las predicciones o la fiabilidad de las observaciones. Cualquiera que sea la situación, el racionalista asume no sólo que hay alguna base racional y lógica que guía estos juicios, sino también que hay una realidad externa en la que las ideas pueden confrontarse, probarse, utilizando la experiencia como base para llevar a cabo juicios sobre ideas y explicaciones.

Para los racionalistas la explicación es el proceso de hacer las cosas inteligibles mediante la relación entre el mundo de las ideas y el mundo de lo observable. Las explicaciones están relacionadas con el mundo de lo observable por medio de *teorías* y de *juicios* que los científicos hacen sobre estas teorías de forma *deductiva*, es decir, en base a una estructuración lógica del pensamiento, en la que se parte de un conjunto de afirmaciones consistentes y relacionadas. En esta deducción lógica hay tres premisas: la primera es una afirmación o ley general (también conocida como modelo deductivo-nomológico), y la segunda se refiere a las condiciones iniciales particulares del hecho a explicar. Las premisas primera y segunda implican lógicamente la tercera o conclusión. Por tanto, si las premisas son verdaderas también lo es la conclusión. Cuando una explicación tiene esta forma, entonces se dice que es deductivamente válida. Existe pues una asociación entre dos tipos de afirmación: una ley universal obtenida de alguna teoría, y una afirmación sobre casos particulares, lo cual permite que la teoría sea aplicada a un caso específico.

Este enfoque añade una base teórica previa al conocimiento empírico. Se reconoce la naturaleza apriorística de mucho del conocimiento científico pues incluye imágenes y nociones abstractas. Comporta los pasos siguientes: 1) modelo conceptual inicial; 2) formulación de hipótesis; 3) diseño experi-



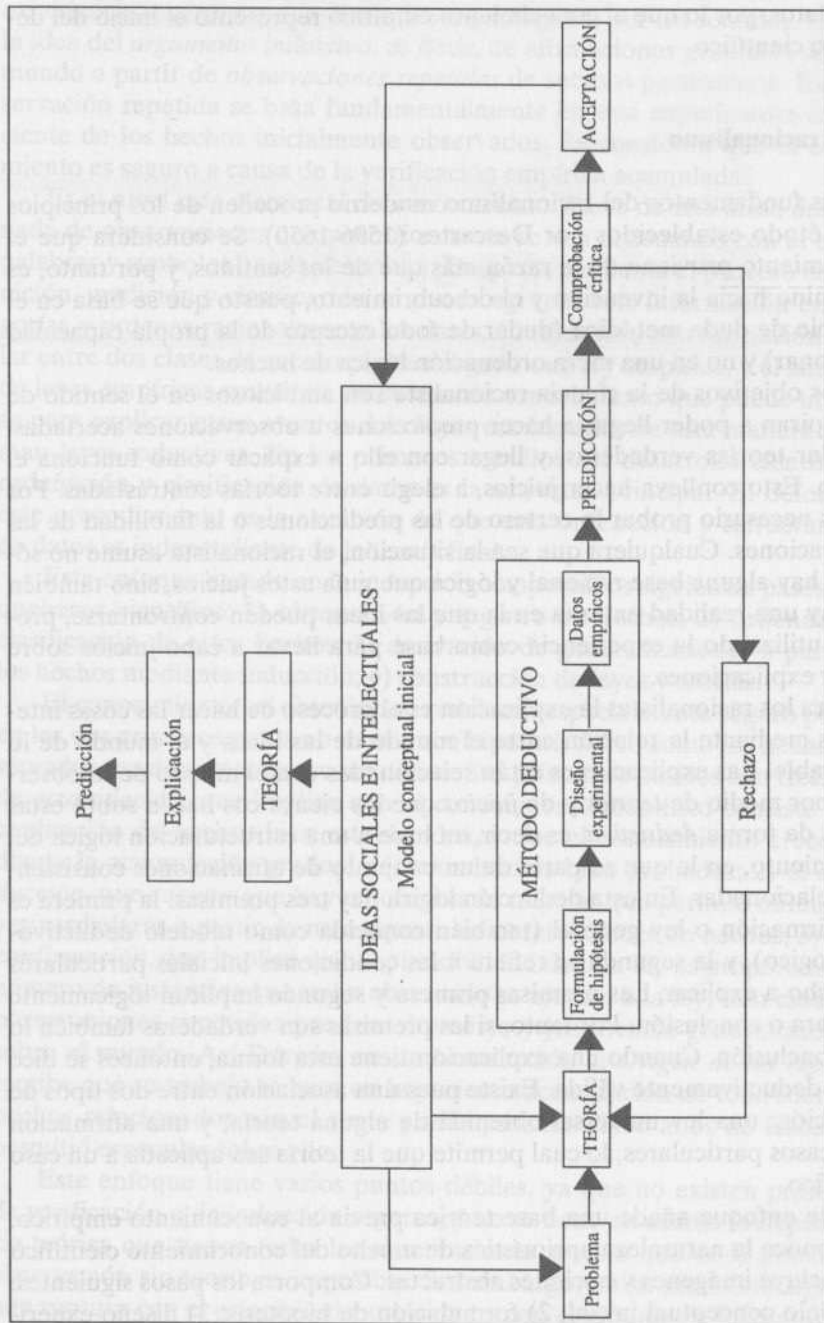


Figura 2.1. Esquema de metodología científica desde un enfoque racionalista.

mental de observaciones; 4) obtención de datos empíricos; 5) elaboración de predicciones; 6) comprobación crítica o verificación (si es negativa hay que rehacer el modelo de partida); 7) construcción de leyes y teorías; 8) retroacción sobre el modelo conceptual (Figura 2.1).

Las hipótesis se prueban con datos empíricos y cuantas más hipótesis se puedan comprobar más seguro se podrá estar de la validez de la teoría que resulte positiva. En muchos casos es necesario desarrollar un diseño experimental para comprobar una hipótesis para acumular evidencia específica sobre el problema a resolver. A pesar de las críticas que como veremos han recibido empirismo y racionalismo, lo cierto es que han generado progresos fundamentales en el conocimiento del mundo y de las cosas.

#### 2.4. El racionalismo crítico

Pensadores posteriores llevaron a cabo importantes revisiones del racionalismo, las cuales desembocan en lo que ha venido en llamarse el *racionalismo crítico*. Se acepta la tradición racionalista pero se busca dar una justificación más rigurosa a este enfoque, pues ahora la búsqueda y la creencia deben restringirse a lo que pueda ser firmemente establecido.

Ya en el siglo XVIII Hume reconoció que no había una base lógica para la inducción, que no se podía aprender nada a partir de la experiencia y la observación, que no existía una creencia racional; no podemos dejar de creer, pero ninguna creencia puede basarse en la razón. Incluso Darwin llega a decir que todas las observaciones, para ser útiles, deben estar a favor o en contra de un punto de vista y que había que dejar que la teoría guiase las observaciones.

Popper (1934, 1972) ha mostrado que los puntos débiles del enfoque clásico pueden evitarse sustituyendo la lógica inductiva por el razonamiento deductivo, y reconociendo que la verificación no es lógicamente posible, mientras que la falsificación sí que lo es. Esta es la base del racionalismo crítico, es decir, que el conocimiento científico viene dado por la deducción de las consecuencias de las teorías y después por el intento de exponer su falsedad mediante pruebas críticas. Si una teoría sobrevive a los intentos de falsificación entonces sólo puede concluirse que la evidencia la corrobora, pero no que está probada.

Los supuestos básicos del racionalismo crítico son:

- 1) El *principio de falsabilidad*, es decir, que las afirmaciones y teorías universales sólo pueden ser refutadas pero no verificadas.
- 2) El *principio del criticismo*, lo que significa que todo el conocimiento científico es especulativo y la actitud racional adoptable es la crítica,

y su crecimiento debe ser por un proceso de ensayo y error más que por la gradual acumulación de hechos.

- 3) El *principio de demarcación*, o que el carácter esencial de las afirmaciones científicas es que pueden probarse empíricamente, pero sólo en la medida en que son potencialmente falsificables su correspondencia con la verdad puede ser probada por la investigación crítica.

Un aspecto clave del racionalismo crítico es la idea que no hay manera de probar la veracidad de ninguna afirmación. Si esto es así, entonces la idea de falsificación como base de todo juicio aparece impracticable. La paradoja se resuelve no obstante cuando se consideran los diferentes papeles de la lógica y el enjuiciamiento en el proceso científico. Aunque las afirmaciones científicas puedan ser falsificables (refutadas), el hecho de que sean realmente refutadas (falsificadas) por una determinada prueba es otra cuestión. El que una teoría sea falsificada depende del juicio particular que formamos sobre los resultados del experimento crítico. Todo trabajo científico es especulativo pues no sólo nuestras teorías no llegan a ser nunca bien establecidas sino que los resultados de las observaciones y experimentos también son sólo tentativos. El proceso de observación y experimentación está gobernado y guiado por la teoría, depende de las ideas teóricas previas y comporta conceptos abstractos, aunque en apariencia trate de sucesos particulares.

Las decisiones que un científico puede tener que afrontar si un conjunto de resultados experimentales resulta ser contradictorio con la teoría son: 1) rechazar la teoría; 2) rechazar la evidencia negativa; 3) desarrollar una teoría nueva, o modificarla de tal manera que explique las predicciones de la antigua y al mismo tiempo explique los resultados de las nuevas observaciones.

En general el científico no trabaja con una sola hipótesis sino que debe decidir entre hipótesis contrapuestas, es decir, trabaja con hipótesis múltiples. A fin de eliminar el error deben hacerse solamente las observaciones o experimentos que ayuden a decidir entre estas hipótesis. Para que una teoría pueda ser probada es necesario que la afirmación excluya algo, de manera que sea posible hacer observaciones que entren en conflicto con la teoría y ésta pueda ser, si es necesario, refutada, y entonces proceder a considerar una hipótesis alternativa. Gilbert, en tantos aspectos padre de la Geomorfología moderna, ya utilizaba el método de las hipótesis de trabajo múltiples, y sus observaciones ilustran el papel que el trabajo de campo debe tener en los estudios ambientales. Gilbert no recoge innumerables datos como en la tradición clásica (empirista), sino que intenta hacer solamente las observaciones que le ayuden a decidir entre hipótesis contrastadas, por lo que el carácter de sus observaciones está guiado por el contenido de las teorías que intenta probar.

## 2.5. El enfoque sociológico

Kuhn (1962) discute la idea de que la ciencia sea totalmente una actividad racional y afirma que hay otras fuerzas que modelan el pensamiento científico, y por tanto que las categorías de verdadero o falso tengan el significado que les atribuyen los racionalistas. Por el contrario, lo que es aceptado o rechazado depende en gran parte de las características sociales o intelectuales del científico o de la comunidad científica. Estas ideas representan una forma de *relativismo*, puesto que implican que los juicios se hacen en relación a algún conjunto de normas aceptadas por la comunidad más que por una total referencia a una realidad externa.

Ninguna teoría da solución a todas las cuestiones que se presentan en un momento determinado, por lo que siempre hay motivos para rechazarlas. El que sea o no aceptada depende de factores sociológicos y psicológicos, y la historia muestra como el desarrollo científico se ha modelado por fuerzas diferentes a las de la razón. Un estudio de la estructura de la mayoría de disciplinas probablemente revelaría la existencia de períodos de consenso y períodos de crisis dentro de la comunidad científica. Estas alternancias parecen ser la esencia del progreso científico.

La mayor parte de la ciencia puede caracterizarse como representativa de algún tipo de consenso. En este caso la investigación está firmemente basada en logros científicos del pasado, los cuales definen los problemas y métodos legítimos del campo de la investigación, y son lo suficientemente abiertos para proporcionar objetivos para trabajos posteriores. Se trata de *paradigmas*, es decir, modelos aceptados en los que se basa el trabajo de investigación, que incluyen ley, teoría, aplicación e instrumentación, y forman parte de lo que Kuhn llama *ciencia normal*.

El trabajo que se lleva a cabo durante los períodos de ciencia normal tienen la siguiente secuencia: 1) aprendizaje, comprensión y aceptación por parte del científico de un paradigma dominante; 2) reconocimiento de los problemas que plantea el paradigma; 3) intento de solucionar estos problemas usando los conceptos y técnicas que proporciona el paradigma; 4) aceptación o rechazo de la solución propuesta por la comunidad científica.

A pesar de que la mayor parte del desarrollo científico tiene lugar durante las épocas de ciencia normal, también hay períodos de cambio o *revoluciones científicas*. Estas revoluciones se desarrollan como resultado de la acumulación de anomalías en el paradigma dominante, es decir, rompecabezas que no pueden solucionarse con los conceptos y técnicas tradicionales, y a los que en vez de arrinconar se intenta solucionar con el desarrollo de otro paradigma. Durante algún tiempo se utilizan los dos paradigmas, pero si el nuevo es lo suficientemente atractivo y abierto puede eventualmente reemplazar al anterior, y establecerse así un nuevo consenso en base a él,

con lo cual lo que era un movimiento revolucionario pasa a ser la nueva tradición científica institucionalizada. Kuhn describe el cambio de paradigma como análogo a un diagrama gestáltico, es decir, una ilusión visual en la cual un objeto es visto al mismo tiempo como dos o más cosas diferentes. Las dos interpretaciones del diagrama no pueden ser vistas simultáneamente, pero una vez vistas ambas, el observador puede pasar fácilmente de una visión a la otra. Para Kuhn, una revolución científica representa un radical y fundamental cambio de perspectiva, un marco totalmente distinto e incompatible con el anterior.

El modelo de Kuhn, con sus conceptos de paradigmas, ciencia normal y revoluciones periódicas, ha sido ampliamente aceptado en Geografía (Hagggett y Chorley, 1967). En el campo de la Geomorfología, uno de los paradigmas lo constituye el modelo davisiano de la cronología de la denudación, basado en un enfoque cualitativo e histórico para interpretar el paisaje en función de la estructura geológica, el proceso climático y el tiempo transcurrido. Para Strahler (1950) en cambio el paradigma davisiano sólo es útil y atractivo para personas con pocos conocimientos en ciencias físicas básicas, y también como parte de las bases para la comprensión de la Geografía Humana, pero como rama de las ciencias de la tierra le parece superficial e inadecuado. Por ello, publicó una serie de artículos con el fin de colocar a la Geomorfología sobre bases sólidas para la investigación cuantitativa de principios fundamentales, basados en mecánica y dinámica de fluidos (Strahler, 1952a).

## 2.6. Lakatos y los programas de investigación

Lakatos (1970) intenta resolver las posiciones contrapuestas de Popper y Kuhn y producir una metodología que combine los puntos fuertes de cada uno. Si se utiliza el principio de falsación como guía de los juicios, entonces todas las teorías nacen refutadas. Pero no son las teorías individuales las que modelan el crecimiento del saber sino bases de pensamiento más amplias como los programas de investigación. Estos programas guían la actividad científica porque contienen algunos elementos clave que no están reconocidos explícitamente en la idea de paradigma de Kuhn. Según Lakatos los programas de investigación contienen dos elementos heurísticos distintos (utiliza la palabra heurístico en el sentido de manera de hacer las cosas, de metodología). Un elemento heurístico negativo es el que dice al científico cuáles son los caminos de investigación que debe evitar, lo cual implica que determinados postulados clave de la investigación no serán cuestionados porque se darán como buenos. Un elemento heurístico positivo es el que sugiere los caminos a seguir dentro de este conjunto de bases aceptadas, o sea las cuestiones sobre las que la comunidad científica adopta una actitud

más flexible. Es dentro de este conjunto de hipótesis auxiliares donde puede tener lugar la refutación, aunque de manera que no se cuestione el núcleo fundamental.

El progreso científico no puede depender de teorías individuales, puesto que muchas de ellas deberían ser eliminadas al ir acumulando anomalías, mientras que si se toma un marco de postulados base la investigación puede dirigirse hacia las anomalías parciales sin que se venga abajo todo el entramado.

Los programas de investigación pueden ser progresistas o degenerativos en relación a si conducen o no a descubrir nuevas cosas. Es progresivo en tanto que su conjunto de hipótesis auxiliares puede ser modificado, a fin de explicar los nuevos datos de manera que puedan conducir a la predicción de nuevos hechos. Si esto no es así los científicos tenderán a buscar otro programa base. Para Kuhn la elección entre paradigmas rivales es una cuestión de fe o de psicología, mientras que para Lakatos la decisión se basa en un enjuiciamiento de la actuación, y por tanto no se trata de un acto irracional. En el caso de la Geomorfología puede decirse que el enfoque proceso-respuesta pasó a ser más ampliamente aceptado que el enfoque histórico clásico al apreciarse su mayor potencial.

## 2.7. Discusión

El hecho de que al geógrafo físico se le planteen problemas en relación al concepto y métodos de su disciplina debe servir de acicate, de estímulo en la búsqueda de nuevos horizontes. Como mínimo debe afrontarse el problema, definirlo y asumirlo, aunque seguramente deba dejarse a las nuevas generaciones el intento de solucionarlo. Así pues, a lo largo de este texto lo que se pretende es dejar constancia cuando proceda del problema, de la situación actual, pero sin olvidar lo que ha sido hasta aquí ni la tradición geográfica en general ni la tradición de la Geografía Física en particular. Es decir, asumiendo aciertos y errores puesto que sólo así puede realmente progresarse con firmeza. Se da el caso de que en Geografía, antes de haber empleado y superado la fase empírica, se han introducido acerbias críticas a este método. Si bien es cierto que la simple acumulación de datos no es suficiente para el avance científico, también lo es que no hay avance posible sin la paciente acumulación de datos procedentes de la propia observación. Este método está en la base de toda iniciación y evolución científica, paso fundamental para la introducción posterior en el campo de la confirmación o refutación de teorías.

Si bien Feyerabend (1975) rehúsa la idea de que pueda ser identificado un método científico y ataca todas las metodologías, se trata de un punto de

vista que no aporta nada positivo en términos de ciencia para los geógrafos físicos. Es innegable que la ciencia es fundamentalmente una actividad lógica, objetiva, capaz de proporcionar visiones más profundas del mundo. Esto es lo importante y no las razones particulares que se encuentran detrás del progreso científico.

Por lo que hace a la relación entre la Geografía Física y la tradición crítica, según Haines-Young y Petch (1986), queda claro que existen problemas en la metodología que usan los geógrafos físicos, principalmente porque la disciplina carece de una tradición crítica. Por ello, creen en la necesidad de introducir esta tradición mediante un estudio a fondo de la filosofía y los métodos científicos. Según estos autores, la historia reciente de la materia muestra como lo que algunos han considerado avances no son más que cambios de moda, pues solamente podrían ser considerados avances si hubiera habido desarrollo de problemas científicos a través de la prueba crítica de ideas. En cambio, en disciplinas paralelas como la Geología, la Ecología y la Meteorología se han producido en los últimos tiempos cambios conceptuales importantes, nuevas teorías y descubrimientos. Si bien es verdad que algunos de estos avances forman también parte de la Geografía Física, no puede decirse sin embargo que sean productos de la Geografía Física. La disciplina, tal como es enseñada y practicada, no puede fomentar avances por falta de una tradición crítica, de interesarse por los aspectos problemáticos. Además, la mayoría de revistas y textos avanzados todavía contienen material que es o bien meramente descriptivo, o un intento de modelar algún fenómeno por medio de ecuaciones estadísticas o matemáticas simples similares a las que usan los ingenieros.

Los avances que se han conseguido en ciencia han implicado teorización, experimentación, discusión y, sobre todo, crítica, elementos que forman parte de la tradición científica y que no siempre se encuentran en la Geografía Física. El método científico comporta conocimientos de cómo pensar y hacer que puedan ser adquiridos y mejorados. Si bien hay partes del proceso científico, tales como la introducción de nuevas ideas y conceptos, que no son racionales y no pueden ser enseñadas, la prueba crítica de teorías y el reconocimiento de problemas son procesos racionales y pueden ser por tanto desarrollados en el alumno. Si la Geografía Física ha de progresar hay que preguntarse cuáles son los problemas a resolver, tratar de descubrir qué es lo que preocupa a la gente, y por tanto qué temas se deben estudiar.

Desde el punto de vista sociológico, en la Geografía Física española se da el caso de que, puesto que hasta hace muy poco no había relación con las corrientes científicas europeas, excepto las francesas, los postulados aceptados no coincidían, y en muchos casos todavía no coinciden, con los aceptados por la comunidad científica internacional, de la que la francesa se en-

cuentra muy marginada por su obsesión de utilizar el francés, en lugar del inglés, como lengua de comunicación.

Creemos que no puede haber progreso en nuestra Geografía Física sin seguir paso a paso la metodología científica, desde la paciente recogida de datos, la observación y la experimentación a partir de una hipótesis de trabajo o de la formulación de una pregunta, hasta la crítica a fondo del sentido que puede darse a los resultados. En cuanto a los criterios de Kuhn y Feyerabend, si bien es verdad que todos en algún momento nos encontramos frente a limitaciones impuestas por los esquemas de la comunidad científica, no es menos cierto que suele tratarse de limitaciones temporales, de inercia, pero siempre finalmente superables.

### 3.1. Introducción

La única gran cosa que distingue nuestra planeta tiene un papel determinante en relación a la vida que en él se desarrolla. No es de extrañar por tanto que desde la antigüedad el hombre se haya interesado en su conocimiento y en las diferencias espaciales y temporales que le afectan. Pero hay dos maneras fundamentalmente distintas y a la vez complementarias de enfrentarse al conocimiento de la atmósfera, una de lugar a la Meteorología y la otra a la Climatología. Ahora bien, mientras que definir la Meteorología no comporta mayores problemas, es la ciencia que estudia los cambios o climatos atmosféricos, sus características y funcionamiento, la definición de Climatología no se ha universalmente aceptada, puesto que está condicionada por el desarrollo histórico de la misma.

Así, en 1882 Hann (Pöschelstein, 1987) definió el clima como el conjunto de los fenómenos meteorológicos que caracterizan el estado medio de la atmósfera sobre un punto de la superficie terrestre, y también como la totalidad de los estados verdaderos de la atmósfera, cuando el conjunto de tipos de tiempo lo que sea el clima y no sólo los medios de sus elementos. Para Köppen (1974) el clima es el estado medio y el proceso ordinario del tiempo en un lugar determinado, teniendo en cuenta que el tiempo cambia pero el clima se mantiene constante, definición que lleva implícita el carácter climático de las situaciones atmosféricas. Además, además, que es la suma total de las condiciones atmosféricas que hacen que un lugar de la superficie terrestre sea más o menos habitable para los seres humanos, animales y plantas. Mikolajewicz (1986) respalda, asimismo, la concepción dinámica del



clima puesto que en su definición habla de secuencia habitual de tipos de tiempo. Sorre (1934) propone como definición que el clima es el ambiente atmosférico constituido por la serie de estados de la atmósfera en un lugar determinado y su sucesión habitual. En este caso no se habla del estudio analítico de los elementos climáticos sino de la síntesis de ellos y, por otro lado, se admite que esos estados atmosféricos varían en el tiempo con un cierto ritmo. Es decir, se añan dos concepciones de la Climatología, la analítica y la dinámica, que más tarde dieron lugar a métodos de trabajo distintos.

En la actualidad se dan definiciones sobre la Climatología mucho más complejas pero que se adaptan mejor a sus finalidades actuales, además de incorporar las clásicas. Así Hufty (1984) afirma que esta ciencia es el estudio del intercambio energético entre la superficie de la tierra y la atmósfera (Climatología física o Climatonomía), en función de la frecuencia estadística de los acontecimientos meteorológicos (Climatología estadística y Climatología dinámica), cuya acción influye en la vida de los seres (Climatología aplicada o ambiental). En esta definición se apuntan algunos de los grandes problemas que quedan aún por resolver en esta ciencia. Uno de ellos, el fundamental, es la complejidad del sistema de flujos de energía entre la atmósfera y la tierra cuya comprensión requiere trabajos precisos sobre la baja atmósfera. Mather (1980) se expresa en términos parecidos al decir que la Climatología geográfica debe investigar sistemáticamente los cambios energéticos, y añade el interés del estudio de los que ocurren en o cerca de la superficie terrestre, centrando la atención en la topoclimatología y los procesos de transferencia.

En síntesis, y según Lockwood (1985), tradicionalmente la Climatología se ha ocupado de la recopilación y estudio de datos que indican el estado predominante de la atmósfera. Este estudio implica la elaboración de valores medios y extremos, frecuencias, etc., de los diferentes elementos climáticos. La Climatología moderna se interesa además en la aplicación, a menudo en términos físicos y matemáticos, de las causas que determinan los climas, tanto presentes como pasadas. El cultivo de la Climatología ha pasado de estar considerado como una parte de la Meteorología a constituir un estudio geográfico. En sus comienzos, coincidiendo con la invención de los primeros aparatos de medición y el enunciado de leyes y teorías, es esencialmente, parte de la Meteorología, pero más adelante pasa a ser, más bien, un saber eminentemente geográfico, precisamente por la aparición de las primeras clasificaciones climáticas y los análisis relativos a la distribución de los climas sobre la superficie terrestre. Esta etapa clasificatoria y regional fue muy fructífera si se considera en su momento histórico, aunque posteriormente se la ha visto como excesivamente descriptiva. Es en los años sesenta cuando la Climatología y la Meteorología comienzan a delimitar sus

respectivos campos y a formar disciplinas independientes aunque evidentemente interrelacionadas.

En estos momentos existe un inmenso campo de estudio para la Climatología geográfica, siendo los dos aspectos fundamentales de su cuerpo científico, según Marzol (1989), el estudio espacial de los elementos climáticos en la superficie terrestre, y el análisis de las conexiones entre los diferentes elementos y entre éstos y los restantes componentes del medio geográfico. Ambos estudios deben constituir el punto de partida para poder obtener la elaboración de hipótesis de comportamientos y teorías que se puedan extrapolar a otros espacios con similares características. Dado el tipo de fenómenos hacia los que se dirige esta ciencia, es lógico que coincida en gran medida con los objetivos de la Meteorología. Pero a la Climatología le interesan los estados de la atmósfera resultantes de la combinación de ciertas variables, así como la sucesión temporal y habitual de esos estados atmosféricos en una región determinada. Mientras que la primera parte de estos objetivos corresponden a la tradición de la Climatología clásica, donde el clima se define como un estado medio, la segunda parte es el inicio de una Climatología moderna, más interesada en la explicación de los fenómenos atmosféricos habituales.

Todos los autores de la especialidad coinciden en afirmar que los cambios sufridos por la Climatología, dentro de la evolución general que ha sufrido la Geografía Física y la Geografía en general a lo largo de los últimos decenios, han ido unidos a la incorporación de nuevas técnicas de recogida y análisis de datos, a la predicción, pero también a cambios en los métodos y finalidades de la investigación. Hasta hace muy pocos años, la escasez de trabajos específicos sobre cuestiones de Climatología realizados por geógrafos ha sido muy marcada. Este hecho se refleja tanto en el reducido número de comunicaciones o ponencias sobre esta materia que se presentan en los congresos geográficos, como en lo referente a la falta de manuales generales, o en el desconocimiento casi total que se tiene todavía del clima de algunas zonas de la tierra.

En España, según López Gómez (1986), la Climatología como objeto de investigación geográfica es un fenómeno bastante reciente, pero su desarrollo actual, comparándose con tiempos pasados, cuando la Climatología se configuraba como una disciplina propia de la Meteorología o se estudiaba como una de las lecciones en el curso de Geografía, puede calificarse como un paso decisivo de cara a la autonomía de la disciplina o, al menos, a configurarse como objeto de estudio independiente de cualquier otra materia. Buen ejemplo de ello lo constituyen las reuniones científicas como los Coloquios de Geografía en los que, especialmente desde el celebrado en Pamplona en 1981, el número de ponencias y comunicaciones presentados sobre temas exclusivamente de la Climatología ha ido en aumento.

En nuestra opinión, los climatólogos geógrafos, al igual que los geomorfólogos geógrafos, han conseguido labrarse una parcela de trabajo propia dentro del ámbito de las Ciencias de la Tierra, con lo cual, y en la más clásica tradición geográfica, su campo de acción está por un lado plenamente integrada en el área de las ciencias experimentales, y por el otro en el área de las ciencias sociales.

El desarrollo más tardío que ha tenido la Climatología, e incluso el haber ocupado un lugar secundario con respecto a otras ramas de la Geografía Física, se debe en gran parte a sus orígenes ligados a ciencias ni geográficas ni históricas, como la Meteorología, la Astrofísica y la Física. Sin embargo en el último decenio el cultivo de la Climatología dentro de la Geografía Física ha experimentado un singular avance, por lo que seguramente ya no podría decirse ahora, como Muñoz (1979), que la Climatología es uno de los más importantes problemas de inadecuación interna que presenta la Geografía Física. A nuestro parecer ha jugado un importante papel en este avance de la Climatología la cooperación que muchos de nuestros climatólogos vienen realizando con físicos del aire y matemáticos, de la misma manera que lo ha sido para los geomorfólogos la colaboración con geólogos, hidrólogos y agrónomos.

## 3.2. Evolución histórica

### 3.2.1. Precedentes

Como muchas otras ciencias, los orígenes de la Climatología pueden trazarse hasta tiempos remotos, y sus primeros pasos hallarse en la Astrología, la Religión y la Medicina, tal como señalan los autores que han tratado el tema y de los que sacamos la información que sigue (Albentosa, 1975; Marzol, 1989; Lamb, 1972-1977; López Gómez, 1986; Wigley *et al.*, 1981). Hasta nosotros han llegado numerosos ejemplos del sentido religioso que se aplicaba a ciertos fenómenos atmosféricos, como en el caso de Homero, quien alrededor de 900 a. de C., culpaba a los dioses de los cambios meteorológicos, y el inverso de Aristóteles, que llegó a estar en la cárcel por afirmar que la lluvia procedía de las nubes y no de Júpiter.

Es interesante señalar que en la antigua Grecia existen numerosas muestras de la preocupación que se tenía por las relaciones hombre-atmósfera, encuadradas muchas de ellas, según Pattison (1964), en la más pura tradición ecológica y que, en algunas ocasiones, pueden ser un claro exponente de las ideas preconizadas mucho más tarde, en el siglo XIX, por la escuela determinista. Así Hipócrates, en el 400 a. de C., en su obra *Los aires, aguas y lugares* recomienda estudiar la influencia que ejerce la atmósfera en

el hombre, señalando que el aire fresco y el sol tienen efectos terapéuticos eficaces en la salud. También Estrabón, en su tratado *Geographiká*, en el siglo I a. de C., cuenta como los cántabros son gente con un carácter feroz y brutal a causa de la aspereza del país en el que viven y del rigor del clima. Séneca, en su libro del año 60 *Questiones Naturales*, escribe sobre la mala calidad del aire en la ciudad de Roma, lo cual podemos considerar como una preocupación por un problema tan actual como el de la polución atmosférica.

Fue en China donde se llevaron a cabo las primeras observaciones atmosféricas de tipo científico, ya que se tienen noticias que durante la dinastía Yin (1300 a. de C.) se tomó nota durante diez días seguidos de la nubosidad, la nieve y el viento, llegando más tarde a medir la altura de la capa de lluvia. Pero es a Aristóteles a quien se le reconoce el mérito de fijar las primeras bases que formarán el cuerpo teórico de la futura Climatología, al tratar en su obra *Los Meteoros* de los fenómenos que ocurren en el aire, además de los de la tierra, y establecer las relaciones causa-efecto entre esos fenómenos atmosféricos y la existencia de zonas climáticas. En este tiempo se confeccionaban calendarios en los que se registraban la sucesión de acontecimientos atmosféricos a lo largo del año. De igual forma se realizaron previsiones del tiempo, algunas de las cuales, como ocurría en la etapa anterior, hoy no se consideran válidas. Por ejemplo, Teofrasto, discípulo de Platón y Aristóteles, en sus obras *Los vientos* y *Signos del tiempo*, escritas en el año 300 a. de C., establece reglas para predecir el tiempo teniendo en cuenta los cambios y las fases de la luna; lo mismo hace Varrón, un erudito romano, en el año 60 a. de C. Por esos años, Eudoxio sugiere que existe una periodicidad en los fenómenos atmosféricos y Arato de Soli escribe un tratado titulado *Prognóstica*.

En el período de tiempo que va desde los primeros años de esta era hasta comienzos del siglo XVII asistimos a tímidos descubrimientos relacionados con la atmósfera, tanto en lo referente a teorías como en lo que concierne a los aparatos de medida, así como al desvanecimiento de conocimientos antiguos que se sustentaban sólo en las creencias religiosas de la época. Dentro de esta amplia etapa hay que señalar que durante la Edad Media, al igual que ocurrió en otras muchas ciencias, se produjo un período de estancamiento y retroceso en el estudio del medio atmosférico. La obra más destacada de la Meteorología Medieval es la realizada por el inglés Merle en 1137 como resultado de recoger datos durante siete años seguidos. Además escribió un tratado sobre la predicción del tiempo.

En el año 1304 Dietrich de Freiburg formula la primera teoría sobre el arcoiris y se comienza a utilizar el pluviómetro de forma generalizada en China y Corea. En el año 1450 Léone Battista Alberti construye el primer anemómetro y el matemático alemán Nicolas Cryfts considera la posibili-

dad de medir la humedad con una pelota de lana. Cincuenta años más tarde Leonardo da Vinci diseña un higrómetro y los planos de una veleta. Galileo, a finales del siglo XVI, comienza sus trabajos sobre la medición de la temperatura que le llevarán a concebir el termómetro. En el año 1536 aparece el primer mapa en el que los vientos se señalan por N, NE, E, etc., en lugar de los antiguos nombres y figuras míticas, y se comienzan a vislumbrar los profundos cambios que se van a experimentar en el seno de esta ciencia a partir de ese momento.

### 3.2.2. Consolidación

Es a partir del siglo XVII cuando se produce un importante avance de esta disciplina. Los motivos de ello son varios. En primer lugar la formulación de teorías sobre el funcionamiento de los elementos atmosféricos, en base a los avances de las ciencias físicas, que permiten el desarrollo teórico de numerosas leyes que explican el funcionamiento de la atmósfera, y de las matemáticas como su instrumento para la formulación apropiada de las mismas. En segundo lugar, la proliferación de mediciones con las que pueden probarse o refutarse las teorías previamente establecidas, y fundamentalmente gracias al desarrollo de instrumentos de medida. En tercer lugar, como resultado de la obtención de datos y de los inicios del tratamiento estadístico de los mismos, se inicia la elaboración de los primeros mapas sobre la distribución media de algunos elementos climáticos. La obtención de datos se vio intensificada, consolidada y sistematizada con la creación de una red, nacional primero e internacional después, de estaciones de medición. Finalmente también es digno de destacar la proliferación de publicaciones sobre temas meteorológicos y climatológicos.

En cuanto a los descubrimientos en el dominio de la teoría atmosférica, se realizan trabajos que constituyen la base para la comprensión y medición de los fenómenos atmosféricos (Dettwiller, 1982). En este sentido destacan las teorías y trabajos de Robert Boyle, quien en 1659 establece la ley sobre la relación que existe entre el volumen y la presión, los de George Hadley al desarrollar en 1735 su teoría sobre la influencia de la rotación de la tierra en la circulación de los alisios. En 1805 Laplace formula su ley sobre la variación de la presión con la altitud y en 1822 Dove descubre que las tempestades se originan precisamente cuando las masas de aire polar y tropical entran en contacto. En 1835 el matemático francés Gustave de Coriolis enuncia su teorema sobre la aceleración de los cuerpos en movimiento, teoría imprescindible para comprender el movimiento de las masas de aires en la tierra. Ferrel propone en 1856 un esquema de circulación general atmosférica que modifica el de Hadley (Figura 3.1), y en

1860 Buys-Ballot establece la relación del viento y la distribución de la presión, y anuncia su regla sobre el giro del viento en función de la presión. Teisserenc de Borg, en 1902, descubre la existencia de otra capa atmosférica, la estratosfera, por encima de la conocida hasta entonces, la troposfera. En 1880 Aitken publica un trabajo sobre las partículas en suspensión en la atmósfera que sirven de núcleos de condensación del vapor de agua. Sin este estudio hoy no podríamos entender por qué se forman las gotas de lluvia en una nube.



Figura 3.1. Circulación atmosférica (modelo de Hadley-Ferrel).

Entre los aparatos construidos durante estos años, muchos de los cuales todavía se utilizan, hay que destacar el higrómetro de Fernando II de Toscana y de Saussure, el termómetro florentino y de Cronwell, el barómetro de Torricelli, el heliógrafo de Campbell y el pluviómetro de Beckley. Destacan trabajos como los realizados en 1742 por Anders Celsius y por Huygens, los cuales propusieron el sistema de medición de la temperatura y su escala desde los cero grados (congelación del agua) hasta los cien grados centígrados (ebullición del agua); la escala para medir la fuerza del viento inventada por Beaufort en 1806; las averiguaciones de Saussure de que la mejor forma de medir la humedad del aire era a través del cabello humano.

La acumulación y sistematización de datos, generados gracias a la existencia de instrumentos para medir los fenómenos atmosféricos, permite rea-



lizar los primeros mapas de distribución de algunos elementos climáticos. Así, en 1769 Benjamin Franklin diseña un mapa en el que se indica el recorrido de la corriente del Gulf Stream en el Atlántico, en 1843 Elías Loomis realiza el primer mapa sinóptico en el que se representa una tormenta sobre el este de EEUU, en 1817 Alexander von Humboldt publica un mapa de isotermas a escala mundial, en 1845 Maury realiza las célebres cartas de vientos y corrientes para uso de navegantes. En 1864, Renou traza la primera carta de isobaras medias en el territorio francés. En 1869, Buchant realiza la primera carta acerca de la distribución de la presión a escala mundial. Entre 1878 y 1882, Köppen y J. van Beber trazan las trayectorias de las tempestades ciclónicas y realizan mapas mundiales del reparto de las temperaturas medias y de la dirección y velocidad media de los vientos en superficie. En 1886, Teisserent de Bort realiza el primer mapa mundial de la distribución anual y mensual de la nubosidad. En estos años, Loomis prepara su primer planisferio de precipitaciones y Edmund Halley publica un mapa de los vientos alisios.

La existencia de tan variada información, obtenida a través de las observaciones meteorológicas llevadas a cabo en muchos países, hace ver la necesidad de su sistematización y organización. Y es en 1817 cuando un médico alemán, Johann Kanold, propone la creación de una red internacional de observaciones meteorológicas, propuesta que cristaliza en 1847 cuando se funda el Instituto Meteorológico prusiano bajo la iniciativa de A. von Humboldt. A partir de este momento se crean Institutos o Servicios Meteorológicos en muchos países europeos, como la Royal Meteorology Society de Londres (1850), el Instituto Meteorológico de Cristianía en Oslo (1866), el Instituto Meteorológico de Dinamarca (1872), el Instituto Meteorológico de Estocolmo (1873), el Bureau Central Météorologique de París (1878). En este año se crea también la Organización Meteorológica Internacional y a partir de ello se va consiguiendo una extensa red de estaciones meteorológicas permanentes repartidas por todo el mundo.

En el caso de nuestro país se tiene constancia de que en 1737 la Real Academia Médico-Matritense determinó que se empezaran las observaciones diarias de la presión y la temperatura. A finales de este siglo, Rodríguez Campomanes dispuso que los corregidores y alcaldes de las ciudades del reino remitiesen a Madrid noticias quincenales sobre el temple del aire, las lluvias, nieblas, vientos, nubes, rocíos, tempestades y demás meteóros que se observasen, señalando su influencia en la vida vegetal y sobre las cosechas (García Pedraza y Giménez de la Cuadra, 1985). En 1790, por mandato del rey Carlos IV, se crea el Observatorio Astronómico de Madrid, pero hasta 46 años más tarde, en 1836, no se creó en Instituto Central Meteorológico. En 1911 adopta el nombre de Servicio y además de sus labores investigadoras se dedica a proporcionar los datos necesarios para es-

tudios climatológicos a personas y entidades. De todas sus finalidades, la dirigida a los medios de transporte (aéreo y marítimo) fue la más importante, no en vano el Servicio pertenecía al Ministerio del Aire. En la actualidad, al ser traspasado al Ministerio de Transportes y Comunicaciones, vuelve a llamarse Instituto y sus finalidades siguen siendo las de investigar, predecir e informar.

Otra característica a destacar durante esta etapa en la historia de la Climatología es la publicación de gran cantidad de almanaques del tiempo y de los primeros tratados sobre esta ciencia, algunos de ellos muy importantes y vigentes todavía. Por ejemplo, en 1883, Julius Hann publica su *Handbuch der Klimatologie*, obra fundamental en el posterior desarrollo de la Climatología y que sigue estando presente en la bibliografía actual de muchos manuales. Otras muestras las ofrecen la *Geographie* de A. Hettner en 1901, el *Traité de Géographi* de E. de Martonne en 1909 o el *Handbuch der Klimatologie* de R. Geiger en 1930. También se incluyen apartados dedicados al clima en publicaciones de temática más amplia. Es el caso del *Diccionario geográfico, histórico y estadístico de España* de Pascual Madoz (1845-1850) que antes de describir cada provincia española alude a los rasgos climáticos de la misma. En algunos casos, la crónica de fenómenos atmosféricos excepcionales ocurridos con anterioridad a ese momento suponen una base de información de gran valor.

### 3.2.3. Desarrollo

Esta etapa se caracteriza por el desarrollo de dos aspectos climáticos. Por un lado la elaboración de clasificaciones de los diversos climas de la tierra, y por el otro el conocimiento cada vez más notable de la estructura vertical de la atmósfera. El primer aspecto es esencialmente climático, mientras que el segundo pertenece al terreno de la Meteorología, pero sus repercusiones han sido fundamentales en la manera cómo se entiende y estudia el clima en la actualidad.

A finales del siglo XIX y comienzos del XX surgen las primeras clasificaciones climáticas basadas, casi siempre, en uno o dos elementos (esencialmente temperatura y lluvia), sobre los que se realiza un tratamiento cuantitativo sencillo y, a menudo, elaboradas sobre bases de confines biogeográficos. Es en estos momentos cuando la Climatología se acerca más a la Geografía puesto que se aplican sus métodos y clasificaciones a la superficie terrestre, mientras que hasta entonces lo que había predominado era la ciencia meteorológica con estudios eminentemente físicos de la atmósfera.

Entre las primeras clasificaciones climáticas es necesario destacar las realizadas por Angot en la primera década del siglo XX, por Köppen sobre la

relación entre clima y vegetación en 1918, o la elaborada por De Martonne en 1909, sin lugar a dudas la más geográfica porque las denominaciones de los diferentes tipos climáticos se refieren a zonas de la superficie terrestre. A continuación surgen gran cantidad de clasificaciones e índices climáticos con finalidades muy dispares, generalmente basadas en operaciones matemáticas complicadas y cuyo resultado, al ser aplicados a zonas de la tierra distintas de las que se utilizaron en su elaboración, no era siempre fiable. Prácticamente la totalidad de estas clasificaciones, cuya base es esencialmente el trabajo estadístico y analítico, no tuvieron en cuenta que el clima es el resultado de realidades físicas que obedecen a leyes determinadas. Sin embargo, años más tarde surgirán clasificaciones relacionadas exclusivamente con la atmósfera y sin tener en cuenta ningún parámetro climático. Entre ellas destacan las realizadas por Alissov, Schinze, Lürke, Dinies, Austin, Flöhn o Pone.

Paralelamente a estos estudios, se inicia, de forma sistemática, el estudio de la estructura vertical de la atmósfera (Figura 3.2). Es evidente que el conocimiento de lo que realmente ocurre en la alta atmósfera no se consigue hasta los años sesenta de este siglo con el lanzamiento de satélites, pero los orígenes de tales trabajos los encontramos a principios del siglo XIX cuando, con los medios que se contaba en ese momento, se potencian las mediciones en los observatorios de alta montaña y se inicia el registro de algunos elementos climáticos por medio de lanzamiento de globos. Las primeras ascensiones en globo de que se tienen noticias son la de Gay-Lussac y Biot en 1804, quienes llegaron hasta los 3.500 m de altitud en su medición de temperaturas, y las de Piazzzi-Smyth en 1858 a la cima del Teide para medir la temperatura y la humedad. En 1892 Hermitte y Besançon lanzan 14 globos de papel con termómetros de mínimas y máximas y un barógrafo, los cuales llegaron hasta los 15.000 m de altitud. A partir de este momento se realizan frecuentes sondeos aerológicos de las primeras capas atmosféricas en los que se mide la presión, humedad y temperatura. El interés por el conocimiento de lo que ocurra en la alta atmósfera lleva a establecer, el 11 de noviembre de 1896, el día aerológico internacional, en el que se lanzaron de forma simultánea globos sonda en París, Berlín, Estrasburgo, Munich, Varsovia y San Petersburgo. Se puede considerar que éste es el origen de los actuales sondeos aerológicos, realizados dos veces al día a la misma hora en todo el mundo, gracias a los cuales se pueden elaborar los mapas sinópticos.

En 1917, Pierre Idrac experimenta la forma de transmitir los datos de viento y temperatura desde el globo a la tierra sin necesidad de recuperar el material lanzado. También Stüve, en 1927, idea la forma de representar gráficamente, a través de un diagrama termodinámico que llevará su nombre, el estado vertical de la atmósfera a una hora determinada con los datos que proporcionan los globos-sonda que, en estos años, ya alcanzaban los 25 Km

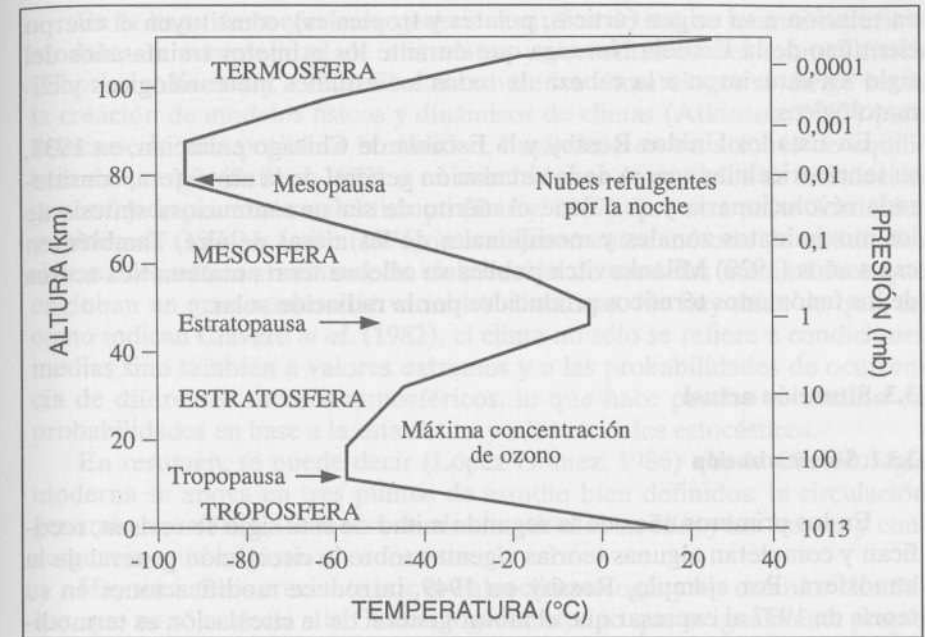


Figura 3.2. Estructura vertical de la atmósfera.

de altitud. Con todos estos avances tecnológicos y científicos a los que se han hecho referencia se ofrece una imagen de la atmósfera bien distinta de la que se tenía hasta entonces; se comienza a relacionar lo que ocurre en la superficie terrestre con lo que acontece en el seno de las capas altas atmosféricas.

Entre 1915 y 1950 asistimos a un notable desarrollo de la aviación y de la estrategia militar que facilitan y, a la vez, demandan un mayor conocimiento de la atmósfera. Por eso se entiende la creación, por iniciativa del ejército, de los servicios meteorológicos militares, del uso de la radio y los radares meteorológicos, de las investigaciones que se realizan con una clara finalidad estratégica (estudios acerca de las nieblas, la nubosidad, las tormentas, etc.), algunas de las cuales dieron frutos como por ejemplo el descubrimiento de la corriente en chorro. En estos años es cuando se entra en un período de esplendor en el conocimiento de esta ciencia, gracias también a los avances experimentados en otros muchos campos científicos. En 1917, Bjerknes formula la teoría del Frente Polar y dos años más tarde describe con detalle la vida de las depresiones templadas (llamadas por él ciclones) y define la oclusión de las masas de aire y frentes. Estos trabajos de Bjerknes, junto con los de Bergeron en 1928 sobre la clasificación de las masas de aire

en relación a su origen (árticas, polares y tropicales), constituyen el cuerpo científico de la Escuela Noruega que durante los primeros treinta años del siglo XX estuvieron a la cabeza de todos los estudios meteorológicos y climatológicos.

En Estados Unidos Rossby y la Escuela de Chicago enuncian, en 1937, su teoría tricelular acerca de la circulación general de la atmósfera, considerada revolucionaria y que tiene el mérito de ser una minuciosa síntesis de los movimientos zonales y meridionales de las masas de aire. También en estos años (1920) Milankovitch publica su célebre teoría matemática acerca de los fenómenos térmicos producidos por la radiación solar.

### 3.3. Situación actual

#### 3.3.1. Sistematización

En los primeros años de la segunda mitad de este siglo se revisan, rectifican y completan algunas teorías vigentes sobre la circulación general de la atmósfera. Por ejemplo, Rossby, en 1949, introduce modificaciones en su teoría de 1937 al expresar que el motor general de la circulación es termodinámico y que la clave de ello se encuentra en las latitudes medias y no en los ascensos térmicos ecuatoriales como en un principio habían mantenido él y sus discípulos. Con estas innovaciones de Rossby se sustituye el modelo de circulación basado exclusivamente en principios térmicos por otros donde los procesos de origen termodinámico son fundamentales.

También en estos años se produce otro gran hito en este campo cuando el 1 de abril de 1960 se lanza el primer satélite meteorológico artificial, el TIROS 1, que sólo tuvo una vida de 89 días pero que fue el inicio de la puesta en órbita de otros muchos (Nimbus, Meteosat, HCMN, NOAA, ERTS, etc.). Hoy día no se concibe una predicción meteorológica, a corto y a largo plazo, ni un estudio de climatología dinámica, sin acudir a la inmensa información que ofrecen las imágenes de gran resolución de estos satélites sobre las temperaturas del suelo y del agua, la nubosidad, la trayectoria de las masas de aire, de los ciclones o de cualquier fenómeno anómalo, etc. Por otro lado se continúan los trabajos en la mejora de la información que aportaban los globos-sonda al ser enviados a la atmósfera.

En estos momentos la Climatología adquiere un enfoque esencialmente dinámico, es decir, fundamentado en el reconocimiento de la atmósfera como una unidad física. Como consecuencia de ello surgen nuevas formas de explicar los climas, precisamente en función de los movimientos y estados del aire en la atmósfera y su relación con los parámetros climáticos, es decir, un enfoque sinóptico.

En la línea de la corriente general científica actual, se intenta reducir a modelos la complejidad de elementos y mecanismos del mundo físico (Chorley y Kennedy, 1971). El esfuerzo de los climatólogos se dirige hacia la creación de modelos físicos y dinámicos de climas (Atkinson, 1985) para acercarse lo más posible a la realidad, basándose en ecuaciones de equilibrio de energía (Sellers, 1973) o en simulaciones de modelos de circulación general y de pronósticos del tiempo (Barry, 1967). Por otra parte Schneider y Dickinson (1974) y Leith (1975) introdujeron como método de estudio los sistemas climáticos mediante la elaboración de modelos matemáticos que engloban un gran número de variables climáticas. No hay duda de que, tal como indican Clavero *et al.* (1982), el clima no sólo se refiere a condiciones medias sino también a valores extremos y a las probabilidades de ocurrencia de diferentes sucesos atmosféricos, lo que hace preciso el estudio de probabilidades en base a la estadística y a los modelos estocásticos.

En resumen, se puede decir (López Gómez, 1986) que la Climatología moderna se apoya en tres puntos de estudio bien definidos: la circulación general atmosférica, las masas de aire implicadas en ella, y los frentes y convergencias que originan sus contactos.

Hay un interés creciente por la Paleoclimatología y los cambios climáticos, que no sólo afecta a la Climatología en sí, sino que es igualmente propio de otras disciplinas como la Arqueología y la Geomorfología del Cuaternario. Los datos que informan de Paleoclimatología proceden de diversas fuentes según las épocas. Así, los datos más antiguos se basan en testimonios fósiles, tales como paleosuelos, análisis palinológicos, dendrocronología y paleoformas climáticas erosivo-acumulativas. A partir de la Edad Moderna se basan en relatos, dibujos, rogativas, evolución de precios agrarios, etc., hasta el siglo XIX, en que ya hay posibilidad de datos instrumentales. Es importante la bibliografía existente sobre estos temas, destacando a Le Roy-Ladurie (1967), Lamb (1972-1977), Gribbin (1978), Wigley *et al.* (1981), Budyko (1982), y Harding (1982).

Dentro de la temática de los cambios climáticos se incluye la intervención humana en el proceso y la evolución futura del clima mundial, sobre lo cual hay diversas versiones (Lamb, 1972-1977; Hardy *et al.*, 1983). Respecto a los ligeros cambios locales, generados por estimulación de lluvia artificial, defensa contra heladas, granizo, lucha contra los ciclones tropicales, nieblas, etc., su influencia en el clima es todavía escasa, pero en un futuro no muy lejano planteará problemas incluso jurídicos (Albentosa, 1984) entre diferentes países y regiones, pues se trata de modificaciones en la distribución espacial que afecta a unos positiva y a otros negativamente.

Finalmente, surgen cada vez con más ímpetu los estudios que tienen un enfoque aplicado o medio-ambiental, los cuales se convierten en uno de los campos de acción principales de los climatólogos. Se produce pues una

reacción (Atkinson, 1985) al retroceso experimentado en el tratamiento de estos temas a causa de los ataques al determinismo climático, es decir, a tratar de la relación entre la actividad humana y el clima, lo que influyó negativamente en el desarrollo de una aplicación de la Climatología. Como resultado de ello, aparece un interés por los medios áridos, por la desertización, por la puesta en regadío de grandes extensiones de tierras secas, especialmente en la zona mediterránea. La necesidad de mejorar las tierras de cultivo en regiones afectadas por condiciones pluviométricas adversas, donde su rentabilidad así lo aconseja, ha hecho que la Agroclimatología se haya convertido en un tema importante, proliferando los índices de aridez específicos tales como los de Thornthwaite, Turc, Penman y Papadakis. Al mismo tiempo, la conservación de los recursos forestales y florísticos en general permite el crecimiento de la Fitoclimatología o, en sentido más amplio, la Bioclimatología. Aunque en cualquiera de estos casos sería necesario disponer de datos climáticos a nivel del suelo, los datos habituales de los observatorios pueden servir de punto de partida para la elaboración de índices de potencialidad agrícola (Turc, 1961).

El clima urbano es otro de los temas actuales de estudio que se vienen desarrollando desde hace unos 20 años (Albentosa, 1980; Chandler, 1965; Landsberg, 1970; López Gómez y Fernández, 1985; Moreno, 1993) y que precisa de mediciones muy específicas y concretas para detectar pequeñas diferencias entre sectores del ámbito urbano y su entorno próximo. El análisis de la distribución espacial de la contaminación, los tipos de tiempo que la favorecen o impiden, las áreas más y menos afectadas, etc., están llevando a mostrar la necesidad de realizar estudios previos a la instalación de determinadas industrias en las proximidades de núcleos habitados en función de la existencia de nieblas, vientos desfavorables, etc. Muy relacionado con este tema está la salud pública, de tal manera que se habla de una Geografía Médica o de Bioclimatología Humana (Pagney, 1982).

Hay también un interés por la relación entre clima e hidrología, ya que los regadíos, las regulaciones de cuencas, las obras hidroeléctricas, el abastecimiento de áreas industriales y urbanas dependen básicamente de las precipitaciones, su reparto estacional, momentos de crecida y estiaje, etc. La posibilidad de predecir con máximas garantías estas necesidades ha acelerado el crecimiento de estos estudios. Destaca en España el interés despertado por las inundaciones del ámbito mediterráneo y cantábrico, que ha dado lugar a importantes estudios como los de López Bermúdez (1979), López Gómez (1983), Capel Molina (1983), García (1983), Miro-Granada (1983), Rosselló *et al.* (1983), Gil Olcina *et al.* (1983), Martín Vide (1985), de interés tanto climático como hidrológico y geomorfológico.

El transporte aéreo y marítimo (aunque también el terrestre), el trazado de nuevas líneas, la previsión de catástrofes, la construcción de aero-

puertos, carreteras, etc., requieren del apoyo interdisciplinar entre profesionales. El turismo aparece implicado en las características climáticas de una región determinada, que ofrece unas condiciones de insolación, temperatura, etc., adecuadas a unas necesidades. Por una parte, veranos con insolación continuada, como los de la zona mediterránea, y por otra, inviernos con abundante nieve para las estaciones de esquí, serían algunos ejemplos contrastados del interés del clima en determinados espacios de ocio para la sociedad actual, donde llega a convertirse en el factor económico principal (Cuadrat, 1981).

### 3.3.2. Controversia

A raíz de las innovaciones introducidas en el estudio de la atmósfera gracias a los avances científicos, surgen concepciones diferentes sobre la forma de cómo se entendía que debería de ser considerado y estudiado el clima. A raíz de ello se formaron dos tendencias que comportan métodos de investigación fundamentalmente diferentes y que, con algunas variaciones, se mantienen en la actualidad. Se trata de los enfoques analítico y dinámico, los cuales dieron origen a una dura polémica, especialmente en el seno de la escuela francesa de los años sesenta. Posteriormente se han ido acercando las posturas hacia la integración de ambas corrientes, como indican Estienne y Godard (1970).

La Climatología analítica la constituye el estudio separado de cada uno de los elementos del clima (temperatura, precipitaciones, insolación, viento, presión, etc.) utilizando para ello el método descriptivo. Parte del estudio de ciertos valores estadísticos significativos, con los que se llega a definir numéricamente el clima de un lugar o región determinado, y a efectuar comparaciones con los lugares vecinos. Ha constituido el sistema de trabajo e investigación de la Climatología tradicional.

Ante la insuficiencia de la metodología analítica para explicar el clima de un lugar, en 1928, Bergeron propone un nuevo método que denominará "Climatología dinámica" y cuya base de estudio será el funcionamiento de la atmósfera y su relación con la superficie terrestre. Se propone el estudio matemático de la atmósfera a través de las leyes de la mecánica de los fluidos y de la termodinámica, y se sustituye el estudio horizontal del clima por el análisis en sentido vertical. A partir de este concepto comienzan a surgir numerosas formas de entender esta nueva metodología aplicada a solucionar los problemas teóricos generales. Por eso, durante la primera etapa, las mayores preocupaciones se centran en la formulación de hipótesis acerca de la circulación de la atmósfera. Destacan numerosos autores cuyos principios y estudios se consideran como la base del conocimiento actual y suponen el

enriquecimiento de esta nueva Climatología, como el estudio que realiza Flöhn (1936) sobre las masas de aire y sus singularidades, las ideas de Jacobs (1946) sobre el principio de una Climatología sinóptica basado en la estadística de los estados de la atmósfera, de la que dedujo un catálogo de fichas representando la velocidad de la corriente general, la curvatura de las isobaras y la naturaleza de las masas de aire, y el trabajo de Queney (1963) sobre la dinámica de las corrientes aéreas en regiones montañosas, entre otros. Todos ellos son buenos ejemplos de los nuevos impulsos que recibe la Climatología en estos momentos.

Por eso Durst (1951) propone revisar el concepto de clima que, según él, se debía explicar como un fenómeno físico y dinámico, y Pedelaborde (1958) con su estudio sobre el clima de la cuenca de París será el más ferviente defensor de este método sinóptico. Si múltiples y numerosas fueron las concepciones sobre cómo se debía investigar en Climatología, no menos variado fue el número y contenido de los estudios realizados en el marco de la Climatología sinóptica. En este sentido hay que decir que fueron los trabajos de los meteorólogos, sobre todo alemanes e ingleses, los que consiguen avances en el conocimiento de la Climatología dinámica. Los antecedentes de esta tendencia se remontan a los estudios hechos por Halley en 1686, Hadley en 1735 y Ferrel en 1856, basados todos ellos en principios fundamentalmente térmicos los cuales sin embargo se ha mostrado posteriormente que eran inexactos y han sido corregidos. Estos trabajos, junto a otros posteriores, como los de Weber, Bergeron, Dinies y Linke, Cholley, Bauer y Zimmerchied constituyeron importantes aportaciones a la preocupación por los problemas de la atmósfera en relación con el clima. En nuestro país cabe destacar la contribución de Medina (1960), Jansa (1963), Font Tullot (1955) por sus trabajos sobre cuestiones concretas y fundamentales en el movimiento atmosférico, sobre todo lo relacionado con la circulación de la corriente en chorro y las perturbaciones atmosféricas.

La crítica al enfoque analítico se basa en la consideración de que utiliza un método simplista que no tiene en cuenta la complejidad global del clima, puesto que trata los elementos separadamente cuando en la naturaleza estos elementos aparecen unidos y combinados entre sí (Pagney, 1976). También se considera que los promedios no tienen carácter real. A la luz actual esta crítica parece en algunos casos poco consistente, ya que todo investigador debe saber que el trabajo científico consiste en un constante ir y venir del todo a las partes y de las partes al todo; por lo que hace a los promedios, no dejan de ser una manera de aproximarse a la realidad, eso sí, a sabiendas de que se trata de un valor indicativo, pero comparable. El hecho de que haya estudios que sean una relación inconexa de datos ocurre en todas las ciencias y es por ello que es necesaria la crítica constructiva de la comunidad científica. Nos preguntamos si la crítica por parte de la escuela francesa

de Climatología tiene alguna similitud con la crítica que la escuela francesa de Geomorfología hizo de Davis, a nuestro parecer más efectista que real puesto que los nuevos enfoques que ahora dominan en esta ciencia no provienen de esta escuela sino de la anglosajona, la cual en cierto modo no deja de incorporar a Davis, aunque lo haya superado. Esto podría significar que en la evolución de ambas ciencias, Climatología y Geomorfología, hay un desfase de unos veinte años, puesto que el punto álgido de la polémica antidavisiana tuvo lugar en los años cincuenta y sesenta.

Sin embargo en las últimas décadas la Climatología analítica se ha visto revalorizada por la aplicación de nuevas técnicas de análisis estadístico (Pagney, 1958; Essenwanger, 1976; Dauphine *et al.*, 1980), y por constituir un complemento de los estudios sinópticos, pasando a ser denominada Climatología cuantitativa. Precisamente para Martín Vide (1986-1987) la metodología cuantitativa constituye el nexo de coordinación de las investigaciones separativas y las sinópticas. La novedad consiste básicamente en la utilización de métodos estadísticos de tipo inferencial. El uso del ordenador para el tratamiento de los datos sería el sistema de actuación habitual, estableciéndose nociones de frecuencia que desembocan en la predicción, usando extrapolaciones de datos para realizar estimaciones.

La realidad es que el método dinámico no está reñido con el analítico, especialmente con el cuantitativo, sino que ambos se complementan para describir y explicar las características climáticas de un lugar. Para Pagney (1976), el climatólogo necesita efectuar un análisis del hecho geográfico antes de realizar cualquier explicación, de la misma manera que un geomorfólogo examina y asimila primero las formas antes de intentar explicarlas. Atkinson (1985), comparándola también con la Geomorfología, dice que la Climatología estadística proporciona la descripción mientras que la Climatología dinámica permite el análisis de los procesos. A este respecto hay diferentes opiniones sobre la valoración que debe dársele a cada uno de los métodos a la hora de realizar un estudio climático. Según Marín (1991), Climatología analítica y Climatología dinámica representan la continuidad y el cambio en el debate metodológico en Climatología; mientras que la primera constituye la línea de continuidad e identificación científica en Climatología, el segundo enfoque gira entorno al estudio de la dinámica temporal del clima sobre la base del concepto de sistema climático, y representa la principal línea actual de cambio metodológico.

En definitiva, para definir el clima es necesario emplear conjuntamente los dos métodos de trabajo. El método analítico puede convenir a cierto tipo de estudios que no requieran saber los movimientos que se producen en la atmósfera ni tampoco encontrar las respuestas a sus conclusiones analíticas. Sin embargo, el geógrafo tiene que conocer, de la forma más exacta posible, todos los mecanismos que le puedan explicar por qué el clima de un

lugar se comporta de una forma y no de otra. No conformarse con la simple descripción de sus elementos. Y esa información sólo la obtendrá después de conocer lo que ocurre en la atmósfera y relacionarlo con lo que sucede en la superficie terrestre; de tal forma que debe considerar el carácter solidario de la atmósfera, tanto en sentido horizontal como en el vertical.

Al igual que ha sucedido en Geomorfología entre el enfoque davisiano y el dinámico o de procesos, la polémica que ha tenido lugar en relación a conceptos y métodos en Climatología, vista bajo la perspectiva actual, aparece fundamentalmente como una crisis de crecimiento, como un proceso de sustitución de un paradigma por otro, de unos estudios descriptivos por unos estudios dinámicos, lo cual puede verse como una evolución normal dentro del campo científico, en el que la fase descriptiva es indispensable para poder avanzar hacia concepciones más complejas y dinámicas. La controversia ha resultado finalmente fructífera, en el sentido de que se han ampliado los contenidos de la disciplina.

### 3.4. Áreas de conocimiento

#### 3.4.1. Principios y fundamentos

Este grupo temático trata del estudio de la epistemología de la Climatología, su filosofía, los principios y su cometido como ciencia a fin de mostrar al alumno el carácter de esta ciencia en cuyo estudio se inician, cuáles son las tendencias y metodologías actuales y cómo son las fuentes básicas necesarias para su estudio. Deben destacarse las diferencias y relaciones entre la Climatología, ciencia esencialmente geográfica, y la Meteorología, ciencia eminentemente física. De igual forma, es importante ofrecer una visión sucinta de los principales elementos y factores que conforman el clima. Estos temas son fundamentales en sí mismos y como instrumento de trabajo en relación con otras partes de la Climatología. Otro aspecto importante a tener en cuenta en la introducción es el de presentar la evolución histórica de la disciplina y las innovaciones que han acontecido en esta ciencia desde el siglo XVII hasta la actualidad, de la evolución que han sufrido las diversas teorías sobre la circulación de la atmósfera, haciendo más hincapié en las teorías de Hadley, Bjerknes y el sistema tricelular de Rossby.

#### 3.4.2. Métodos y técnicas

Por lo que hace a métodos y técnicas debe diferenciarse entre las de medición y las que se aplican a los estudios analítico y dinámico. En primer

lugar es conveniente que el alumno conozca la instrumentación habitual en las estaciones meteorológicas y aerológicas a fin de familiarizarse con los datos que de ellas se obtienen, sus características y su significado (Figura 3.3). Por otro lado, la definición habitual de los elementos del clima por va-

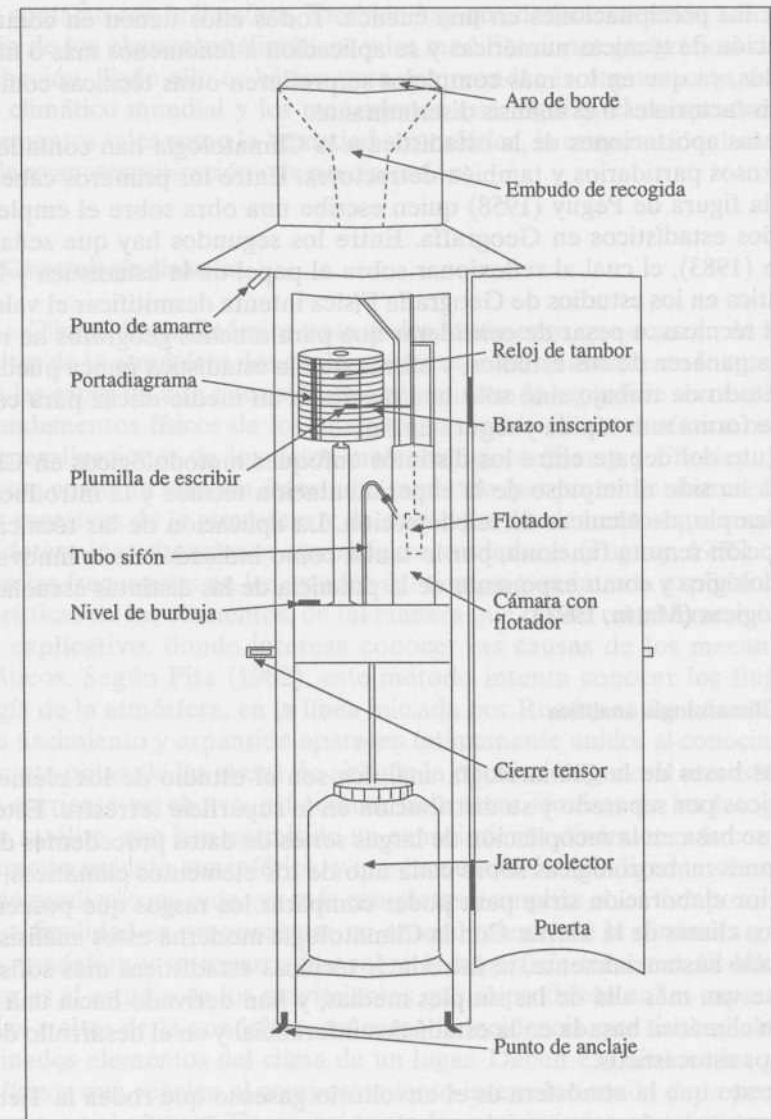


Figura 3.3. Pluviómetro registrador (modelo Hellman con soporte de papel).

lores numéricos hace que los conocimientos estadísticos sean fundamentales, lo mismo que el de modelos simples como rectas de regresión y los cálculos de probabilidades. Así es corriente emplear el análisis de varianza para explicar la influencia del relieve, el cálculo de probabilidades para el estudio de los períodos secos y húmedos, o el método de Thiessen para el estudio de las precipitaciones en una cuenca. Todos ellos tienen en común la utilización de técnicas numéricas y su aplicación a fenómenos más o menos sencillos, ya que en los más complejos se prefieren otras técnicas como los análisis factoriales o el análisis discriminante.

Estas aportaciones de la estadística a la Climatología han contado con numerosos partidarios y también detractores. Entre los primeros cabe destacar la figura de Peguy (1958) quien escribe una obra sobre el empleo de métodos estadísticos en Geografía. Entre los segundos hay que señalar a Guido (1983), el cual al reflexionar sobre el papel de la estadística y la informática en los estudios de Geografía Física intenta desmitificar el valor de ambas técnicas, a pesar de considerar que para muchos geógrafos ha resultado la panacea de sus estudios, y afirma que la estadística nunca puede ser un método de trabajo sino sólo una técnica o un medio eficaz para conseguir de forma más rápida y segura un fin.

Fruto del debate entre los distintos enfoques metodológicos en Climatología ha sido el impulso de la experimentación técnica y la introducción, por ejemplo, de técnicas de teledetección. La aplicación de las técnicas de percepción remota funciona, por lo tanto, como indicador de la innovación metodológica y como exponente de la potencia de las distintas escuelas climatológicas (Marín, 1991).

### 3.4.3. Climatología analítica

Las bases de la Climatología analítica son el estudio de los elementos climáticos por separado y su distribución en la superficie terrestre. Este enfoque se basa en la recopilación de largas series de datos procedentes de las estaciones meteorológicas sobre cada uno de los elementos climáticos, y su posterior elaboración sirve para poder comparar los rasgos que poseen los diversos climas de la Tierra. Con la Climatología moderna estos análisis han mejorado sustancialmente, al introducir técnicas estadísticas más sofisticadas que van más allá de las simples medias, y han derivado hacia una predicción climática basada en la estadística inferencial y en el desarrollo de los modelos estocásticos.

Puesto que la atmósfera es el envoltorio gaseoso que rodea la Tierra y en el que se producen esencialmente los fenómenos climáticos, de ahí la necesidad de entender sus características más fundamentales. Debe pues ana-

lizarse su composición y el papel de los principales gases que existen en ella, su capa y su estructura térmica. También deben incluirse una serie de conceptos básicos sobre los estados de la atmósfera. Un aspecto fundamental es en la actualidad familiarizarse con el significado de los balances, tanto energéticos como radiativos e hidrológicos, que se producen en la atmósfera y en su contacto con la litosfera. También hay que dedicar atención a la distribución de los elementos climáticos y las modificaciones geográficas de esta distribución. Todo ello es básico para comprender la organización del mosaico climático mundial y los mecanismos que regulan el comportamiento de elementos tales como la humedad atmosférica, la evaporación, la nubosidad, la evapotranspiración o la precipitación.

### 3.4.4. Climatología dinámica

La Climatología dinámica trata de los fenómenos que ocurren en las capas altas de la atmósfera, los cuales repercuten directamente en lo que sucede en las capas de aire que están en contacto con la superficie terrestre, y de los fundamentos físicos de los modelos de circulación atmosférica basados en generalizaciones de los datos meteorológicos (Barry y Chorley, 1972). Aparece como un método de estudio moderno que pretende abarcar los estados sucesivos de la atmósfera y de conjuntos de elementos que confluyen para determinar situaciones atmosféricas verdaderas (Pagney, 1976). Se estudian las frecuencias en los estados del tiempo y se intenta explicar las características de los elementos, de tal manera que puede considerarse un método explicativo, donde interesa conocer las causas de los mecanismos climáticos. Según Pita (1982), este método intenta conocer los flujos de energía de la atmósfera, en la línea iniciada por Rossby en los años cuarenta. Su nacimiento y expansión aparecen íntimamente unidos al conocimiento del frente polar, de las masas de aire, de la circulación general atmosférica y de la corriente en chorro, así como a las nuevas técnicas de las fotografías desde satélite, que han permitido un conocimiento dinámico más completo del funcionamiento atmosférico, y que han evolucionado ligadas a la necesidad de predicciones cada vez más completas y amplias en el tiempo.

La finalidad es proporcionar un entendimiento de la dinámica general de la atmósfera y su repercusión sobre la superficie terrestre. El hilo conductor es el estudio de los movimientos que se producen en las capas bajas, medias y altas de la atmósfera, así como la incidencia que tienen sobre determinados elementos del clima de un lugar. Deben examinarse los principios físicos que regulan el comportamiento interrelacionado de la presión y el viento en el planeta Tierra, así como las propiedades que distinguen las diversas masas de aire entre sí, sus modificaciones, la formación de los fren-

tes y las borrascas templadas, todo lo cual es necesario para llegar a un entendimiento de los cambios de tiempo que se suceden en el planeta. Otros aspectos fundamentales son el estudio del viento, tanto en lo referente a los grandes cinturones, como pueden ser los alísios o los vientos del oeste, como las grandes y rápidas corrientes aéreas de las capas altas atmosféricas o los vientos locales, como las brisas, etc.

### 3.4.5. Climatología sinóptica

Según Barry y Perry (1973) es la parte de la Climatología que se interesa en la descripción de climas locales o regionales en términos de las propiedades y movimientos de la atmósfera más que en intervalos mensuales de tiempo. Hay dos estadios en un estudio climático sinóptico, la determinación de categorías de tipos de circulación atmosférica (generalmente llamados tipos de tiempo), y el establecimiento de parámetros estadísticos tales como media, moda, etc., de los elementos meteorológicos en relación a estas categorías. Es decir, que se trata esencialmente de relacionar condiciones climáticas locales con circulación atmosférica, y por tanto proporcionar una base realista para la investigación y la enseñanza en Climatología. Las subdivisiones en la clasificación sinóptica se basan en el rasgo de la circulación atmosférica utilizado como base de clasificación: presión (dirección y distancia a los centros más cercanos de altas y bajas presiones y sus intensidades), flujo (dirección del aire en movimiento), condiciones en superficie o condiciones en altura, etc. De todas formas las clasificaciones sinópticas constituyen uno de los problemas a los que se dedica más atención. Las primeras investigaciones de los patrones sinópticos se llevaron a cabo en el siglo XX, pero el sentir popular ya había relacionado los tiempos fríos, cálidos o lluviosos con determinadas direcciones del viento. La Climatología sinóptica moderna se desarrolla a raíz de la Segunda Guerra Mundial, en relación a las necesidades bélicas de conocimiento de las condiciones atmosféricas.

Desde un punto de vista didáctico se trata de facilitar el análisis y comprensión de toda la información que ofrecen los mapas sinópticos del tiempo, de analizar la situación de la atmósfera en las topografías de 300, 500 y 700 hPa (hecto Pascals), así como la situación al nivel de superficie. Del mismo modo, en los Boletines Europeos se aprende a descifrar los símbolos internacionales que informan de numerosos fenómenos atmosféricos en puntos concretos del Hemisferio Norte. También a trabajar con la información que ofrecen los satélites, y con las bases para una previsión del tiempo. Finalmente se tratan los tiempos y climas de las diferentes zonas climáticas.

### 3.4.6. Climatología regional

En este apartado, y como complemento o contraposición con el dedicado a la Climatología sinóptica, se busca estudiar, por una parte las clasificaciones climáticas y por el otro su distribución dentro de los grandes continentes. Los temas clasificatorios eran los que recibían un mayor tratamiento en la Climatología tradicional, pero siguen siendo importantes actualmente. Se distinguen dos tipos de clasificaciones, las empíricas y las genéticas, las primeras son las más antiguas y tradicionales, como las de De Martonne, Trewartha, Austin, Köppen, Peguy, Miller, mientras que las segundas son las más recientes, como las de Flohn y Alisov. Según Hare (1973) la ruptura con las clasificaciones tradicionales está representada por la clasificación de Budyko (1958), mientras que a Thornthwaite (1948) habría que situarlo en el tránsito hacia las nuevas tendencias sinópticas.

Las clasificaciones empíricas o cuantitativas utilizan criterios como las temperaturas del mes o meses más cálidos o más fríos, la cantidad de precipitaciones y su estacionalidad. Entre ellas una de las más acreditadas es la de Thornthwaite (1948) que se basa en un sistema de cuatro siglas referidas a las precipitaciones y la evapotranspiración, la estacionalidad de las lluvias, la eficiencia térmica y la concentración de éstas; da unos resultados algo complicados y ha quedado reservada a la Agroclimatología. El sistema más moderno es el de Budyko (1958) que toma como datos la radiación solar en el balance térmico y la evapotranspiración. Las clasificaciones genéticas o explicativas aparecen a partir del desarrollo de la Climatología dinámica y utilizan conceptos sobre la circulación general y las masas de aire como criterios base de clasificación. Entre las más utilizadas cabe destacar la de Flohn (1936), en la que se utilizan dos siglas para definir siete tipos de climas, y la de Troll se basa en la sucesión tanto estacional del tiempo como en la diaria, utilizando el sistema de las termoisopletas. Sin embargo, todavía sigue siendo el sistema de Köppen (1906) el más usado, generalmente con alguna modificación, puesto que, a pesar de ser muy esquemático, da una explicación razonable a la existencia de los grupos y subgrupos climáticos que él mismo describe, los cuales han sido de relevante utilidad en el estudio de los climas españoles.

La finalidad de la Climatología regional es, en primer lugar, profundizar en el análisis de las clasificaciones e índices climáticos y la aplicación de los principales de ellos. En segundo, ver cuáles son las diferentes escalas espaciales que tiene su estudio con el fin de distinguir lo que son los estudios a escala planetaria, representados en los temas anteriormente considerados, de los estudios regionales y locales. Es necesario ir más allá de los rasgos climáticos de cada continente o unidad climática para llegar a sus implicaciones en relación con la vegetación y con las prácticas agrícolas, a fin de



llegar a comprender la importancia de las interacciones de elementos. No hay que olvidar que los conocimientos sobre la atmósfera adquieren categoría de geográficos cuando se relacionan con el espacio y especialmente cuando se presentan incidiendo sobre el medio geográfico.

#### 3.4.7. Climatología histórica

Se trata de uno de los temas que despierta más interés, debido sobre todo a los pronósticos de cambio climático que se están efectuando y que estamos presenciando en la actualidad (Henderson-Sellers, 1987). Dentro de la Climatología histórica pueden diferenciarse dos grandes temas (López Gómez, 1986): los climas del pasado y la evolución climática actual. Por lo que hace a los climas del pasado, se pueden distinguir tres etapas en función de las técnicas de análisis utilizables en cada una de ellas. La primera se caracteriza por la total ausencia de medios documentales en los que apoyar un estudio, por lo que es necesario estudiar los fenómenos climáticos a través de medios cualitativos, como la observación de formas de erosión, depósitos, fósiles, etc., relacionables a un clima dado. En la segunda ya existen referencias documentales escritas que recogen, directa (constancia de fenómenos meteorológicos inusuales y su repetición o frecuencia en dietarios y crónicas) o indirectamente los hechos climáticos (referencias a extensiones de determinados cultivos, fluctuaciones de precios agrarios, etc.) e incluso puede quedar constancia de ellos por otras pruebas materiales, como por ejemplo las obras de riego; como prueba documental merece destacarse el dietario de Polcar, en Valencia, de finales del siglo XVI principios del XVII. Finalmente, la tercera, a partir del siglo XIX, se caracterizaría por la utilización de datos mucho más instrumentales que los anteriores, como es el caso de las temperaturas o las precipitaciones, dando como resultado datos muy precarios, puesto que basta con la modificación en la localización del observatorio o un crecimiento urbano para variar unos mismos datos.

Con referencia a la evolución climática actual de momento no parece haber acuerdo. Para algunos científicos el clima evolucionará hacia un enfriamiento debido, sobre todo, a un aumento de la opacidad atmosférica por el polvo derivado de las actividades humanas y de los volcanes. Pero la opinión más generalizada es que, por el contrario, se evolucionará hacia un clima más cálido como consecuencia del aumento del gas carbónico, de las deforestaciones o por el uso de combustibles fósiles (carbón, petróleo o el gas) junto con la utilización de productos como los pulverizadores, causantes de la incorporación de gran cantidad de gases inertes (freones). Sin embargo su estudio necesita de unas técnicas que, todavía, están muy lejos de la formación habitual de nuestros geógrafos. Los temas se refieren, en esen-

cia, a la revisión de los estudios realizados dentro del campo de la Paleoclimatología y Climatología en épocas históricas y las previsiones de los que puede llegar a ser el clima de la Tierra en el futuro, teniendo en cuenta las modificaciones que están teniendo lugar en ella.

#### 3.4.8. Climatología ambiental

La Climatología puede y debe realizar aportaciones fundamentales en múltiples campos de la actividad económica y social, además de intervenir en actividades biológicas de los seres vivos y en muchos procesos del medio físico. Pero para ello es necesario manejar no sólo los elementos climatológicos sino también conocer su funcionamiento y su relación con otros fenómenos que actúan sobre el medio ambiente, como los que estudia la Geomorfología, la Hidrología, la Biología, la Ecología, etc., y ésto sólo se consigue a través de la colaboración con especialistas de las diferentes ramas de la Ciencia. Esta interdisciplinariedad no es una aspiración sino que se ha convertido en una realidad muy fructífera. La Climatología está abocada al estudio de los problemas ambientales y a la incidencia de las actividades humanas en el clima, en lugar de lo contrario, como ocurría en el siglo pasado. La principal característica de su aplicabilidad social y económica se basa en que las demandas sociales son cada vez más exigentes y complejas, a la vez que requieren soluciones más inmediatas en el ámbito urbano e industrial (contaminación atmosférica), en los de la agricultura y las modificaciones microclimáticas y en la búsqueda de respuestas a las catástrofes naturales de origen climático (inundaciones, ciclones, desertización, etc.).

El objetivo es aquí el hacer ver cómo el clima es uno de los componentes del medio natural, por lo que deben analizarse las relaciones existentes entre el clima y el resto de los elementos que componen el medio. Aunque el clima constituye un recurso fundamental para las actividades humanas y biológicas, también puede mostrarse en determinadas ocasiones como un obstáculo para el desarrollo de la vida. Por este motivo es necesario estudiar el papel del clima en el medio ambiente, entendido aquél como recurso y como elemento constituyente del paisaje y, a la vez, como medio de recepción de impactos. También es necesario ver el papel del clima en la progresiva desertificación de extensas áreas de la Tierra, en las inundaciones localizadas en diversos puntos del planeta, o en la contaminación atmosférica de las grandes áreas urbanas e industrializadas.

# 4. --- Hidrología

## 4.1. Introducción

Aunque el estudio de las aguas constituye esencialmente el objeto de la Hidrología, otras disciplinas se ocupan también del tema desde puntos de vista complementarios, como por ejemplo la Hidrografía por lo que hace a su distribución geográfica en ríos y lagos, la Geomorfología en lo que se refiere a la acción del agua sobre el modelado terrestre, la Hidráulica en sus aspectos físicos y aplicados, la Ecología en cuanto al agua como vehículo de nutrientes, la Geología en relación al agua subterránea, la Oceanografía en lo que se refiere al agua oceánica.

Por ello es difícil encontrar una definición de Hidrología que sea aceptada universalmente, dado el número de enfoques multidisciplinarios sobre la materia. Biswas (1970) considera como hidrológicos los temas relativos al caudal, mientras que estima dentro de la hidráulica todos los relativos al flujo en el canal. Acepta que la sedimentación, la modificación climática, la física de suelos, y algunos aspectos de la Oceanografía pueden incluirse en el campo de la Hidrología. La mayor parte de definiciones de la Hidrología terrestre (Price y Heindl, 1968) consideran, en síntesis, que es la ciencia que trata del estudio del agua en sus diversas manifestaciones en la superficie de la tierra: el agua de precipitación, el agua evaporada, el agua superficial y el agua subterránea.

Dentro del campo de la Hidrología el estudio de las aguas de escorrentía tiene mucho de geográfica, puesto que explica las características de la misma por la interacción compleja de los diversos factores del medio físico como el clima, el roquedo, el suelo y la vegetación (Frecaut, 1971). Y es

precisamente esta integración lo que diferencia la Hidrología geográfica del enfoque aplicado del ingeniero. Por ello resulta sorprendente para algunos autores (Hamelin, 1957) el hecho de que los geógrafos se hayan interesado tan poco en el estudio de las aguas, cuando por otro lado se interesan tanto en algunas de sus consecuencias, como por ejemplo la morfología de los lechos fluviales. Sin embargo hay que tener en cuenta que los métodos y técnicas utilizados pueden llegar a ser a menudo altamente sofisticados, por lo cual, y dada la débil formación científica y técnica de muchos geógrafos, resulta a menudo difícil de asumir.

More (1967) opina que, aunque hay muchas áreas que se superponen entre Hidrología y Geografía, las dos disciplinas se han desarrollado de manera bastante separada, y así muchos de los modelos hidrológicos no son geográficos en su concepción. Pero los geógrafos no deben ignorar las implicaciones de una ciencia que está evolucionando tan rápidamente como la Hidrología.

La aplicación a todas las ciencias del concepto de sistema ha hecho que los estudios de las aguas estén más que nunca basados en la comprensión del ciclo hidrológico (Ward, 1975), es decir, en el conocimiento del movimiento natural y continuo del agua a través de los procesos de precipitación, interceptación, evapotranspiración, humedad del suelo y circulación del agua sobre, en y bajo la superficie del terreno. El concepto de sistema también pone en evidencia que un río es algo más que el curso del agua que aparece delante de nuestros ojos. Porque las aguas que circulan superficial y permanentemente son el resultado de una serie de procesos que tienen lugar en todo lo amplio de su cabecera y no el resultado de una causa u origen únicos y puntuales. Desde este punto de vista es, por tanto, ocioso preguntarse dónde nace un río, dando al mismo un carácter antropomórfico que de hecho no tiene.

Por otro lado, cada vez se hace más patente la relevancia que, dentro del estudio de las aguas, tiene la influencia del hombre en el ciclo hidrológico (Mateu, 1984). Tanto por las modificaciones que es capaz de inducir como por el interés social cada vez más acuciante del control de los recursos en agua, todo lo cual hace que haya una preocupación creciente por el estudio de la Hidrología en las áreas urbanas (Douglas, 1981) y en lo concerniente a la calidad de las aguas (Walling, 1979), problemas que tenían poca cabida en la Hidrología clásica.

Finalmente, algo tan importante como el aprovechamiento óptimo de los recursos en agua de un país depende de su nivel científico y tecnológico, es decir, del conocimiento real que tenga de las leyes que rigen el comportamiento del agua en la corteza terrestre. De ahí la necesidad de que se expandan los estudios de Hidrología y entren de lleno en el campo de la Geografía Física. En España, por ejemplo, hasta hace poco los estudios hidrológicos

se impartían casi exclusivamente en las Escuelas de Ingeniería, y es por ello que el enfoque está muy relacionado con la aplicación a obras hidráulicas (Lorenzo Pardo, 1933) o a la gestión del agua. En estos ámbitos son de destacar el papel relevante en la recogida de datos hidrológicos de las Confederaciones Hidrográficas (Dirección General de Obras Hidráulicas, 1981) y del Centro de Estudios Hidrográficos (1965).

## 4.2. Evolución histórica

### 4.2.1. Precedentes

Son escasos los trabajos sobre historia de la Hidrología y es quizá por ello que los hidrólogos conocen poco su pasado. Bien es verdad que como ciencia académica es relativamente reciente y se halla además diseminada en muchas disciplinas. Biswas (1970) escribe varios artículos sobre el tema que más tarde compila y amplía en un libro del que tomamos información para este capítulo.

El estudio hidrológico es en cierto sentido tan antiguo como la civilización y Biswas (1970) llega a trazar sus orígenes hasta varios milenios antes de Cristo. En la cuenca mediterránea, cuna de nuestra civilización, el interés por la gestión de los recursos en agua es ancestral. Así, uno de los planes de irrigación más antiguos que se conocen es el de la villa de Nippur en la Mesopotamia del siglo XIII a. de C. (Kazmann, 1971). En la Grecia clásica, Platón ya pone de manifiesto el papel del bosque en la escorrentía (Poncet, 1968). No obstante la idea de que la lluvia podía ser el origen de las aguas que circulan por los ríos tardó mucho en aparecer. Ciertamente la dificultad de esta comprensión es más grande en un medio mediterráneo, puesto que no se da una correlación simple entre precipitación y escorrentía. Tan difícil resulta en estas condiciones relacionar los caudales de finales de junio con las lluvias de invierno, como la ausencia de escorrentía permanente después de las lluvias de otoño.

En la antigüedad clásica el interés por el conocimiento de la localización y magnitud de los recursos hídricos es bien notoria, así como la búsqueda de una explicación a la ocurrencia de fuentes, ríos y al posible movimiento del agua en el suelo. Así, para Platón el origen de ríos y fuentes es el océano homérico o Tartarus, un gran pasaje subterráneo con ramificaciones que penetraban toda la tierra hasta que salía al exterior por ríos y fuentes. Aristóteles creía que el agua de la superficie era debida a la condensación del agua que contiene la tierra, es decir, a que existen unos vapores subterráneos ascendentes. Sin embargo Aristóteles explicó los mecanismos de la precipitación y Vitrubio, trescientos años más tarde, comprendió el origen

pluvial de las fuentes, al entender que el agua subterránea se originaba en su mayor parte por la infiltración de la lluvia y la fusión de la nieve.

Otro aspecto a mencionar son los esfuerzos para tomar mediciones de caudales, uno de los pilares donde se asienta la Hidrología. El primer instrumento que se conoce es el utilizado para medir los niveles del Nilo, y consiste en columnas talladas llamadas nilómetros en las que se registraron niveles de hasta 74,25 metros. También se cuantificaron incrementos del lecho de 2,68 metros en 2.800 años, lo que significa una acumulación de sedimentos de 0,09 metros cada 100 años. El primer nilómetro árabe se construyó en 715 en la isla de Roda y se tienen registros de los niveles máximos y mínimos desde el año 641.

Leonardo Da Vinci (1452-1519) llevó a cabo multitud de observaciones de campo, las cuales, si bien fueron más cualitativas que cuantitativas, tiene ya visos de modernidad. Intuyó, aunque algo confusamente, el ciclo hidrológico, y llegó a una comprensión mucho mejor que cualquiera de sus predecesores o contemporáneos de los principios del flujo del agua en los canales fluviales. Da Vinci tuvo dos conceptos del ciclo hidrológico, uno correcto, el de la evaporación de mares y lagos formando nubes y su posterior condensación, y otro incorrecto, que el agua fluye también desde el interior de la tierra hasta las montañas y allí aparece a través de fisuras. Sin embargo adquirió un conocimiento del flujo en canales abiertos mejor que ninguno de sus predecesores, conocimiento basado en la observación y la medición. Tenía un concepto claro del principio de continuidad, es decir de que hay un mismo volumen de agua en canales de diferente dimensión y que lo que varía es la velocidad. Hizo observaciones sobre la distribución de la velocidad mediante un flotador situado en el agua, un distanciómetro en tierra y cantando las escalas musicales para medir el tiempo. También utilizó un nivel para medir la pendiente del río, tintes para estudiar el movimiento turbulento del agua, y puntos de aforos fijos para facilitar las observaciones de caudal. Estudió sistemáticamente las configuraciones del lecho y los efectos de fricción. Observó experimentalmente la sedimentación detrás de obstáculos y construyó canales de madera para detectar mejor los fenómenos hidrológicos. Formuló teorías sobre la irrigación, el drenaje y el control de avenidas. Planeaba escribir un libro sobre el agua que probablemente hubiese cambiado la historia de la Hidrología.

Pero fue el francés Bernard Palissy (1510-1590) quien intuyó, acertadamente, que el origen único de fuentes y ríos era la infiltración y retorno en superficie del agua de precipitación. Palissy era alfarero pero era un gran observador de la naturaleza y se interesó por los problemas relacionados con el agua. Afirmó categóricamente que los ríos no podían tener otro origen que el de la precipitación, rechazando la teoría de los cambios en el nivel del mar y los túneles subterráneos por los que el agua ascendía hasta las

montañas. Comprendió el principio de los pozos artesianos de la llanura del Po, es decir, su alimentación fluvial subterránea, y recomendó la aforestación para prevenir la erosión. Desgraciadamente sus trabajos, lo mismo que los de Leonardo, no influyeron en sus contemporáneos, todavía dominados por las ideas clásicas y religiosas.

En la misma época la contribución de Jacques Besson se centró en la comprensión del ciclo hidrológico, afirmando que el agua de precipitación es suficiente para mantener ríos y fuentes. Observó que el caudal decrece cuando baja la precipitación, y afirmó que evaporación y precipitación son iguales en cantidad. Por otro lado, el arquitecto Giovanni Fontana de Medi llevó a cabo investigaciones sobre las crecidas del Tíber en Roma, con mediciones sistemáticas y análisis del flujo de crecida. Propuso una mejora de los canales de drenaje para evitar inundaciones.

#### 4.2.2. Consolidación

No fue hasta cerca del final del siglo XVII cuando se formularon teorías plausibles acerca del ciclo hidrológico basadas en pruebas empíricas. Los mayores avances se deben al trabajo de tres hombres que llevaron a cabo investigaciones hidrológicas con método científico, por lo que pueden muy bien ser considerados como los fundadores de la Hidrología. Se trata de los franceses Perrault (1613-1688) y Mariotte (1620-1684), y el inglés Halley (1656-1742).

Perrault, con sus estudios sobre la precipitación y caudal del Sena en París, demostró que, contrariamente a lo que se había venido creyendo, la precipitación era más que suficiente para alimentar el flujo fluvial y el de las fuentes, puesto que estimó la pluviometría en la cuenca de París en 520 mm/año, mientras que el caudal del Sena aguas abajo de París era de unos 100 mm/año. Es interesante destacar que el estudio de Perrault, para probar su hipótesis de que sólo la lluvia era suficiente para alimentar ríos y fuentes a lo largo del año, se realiza dentro del marco de una cuenca de drenaje, en la que estima las entradas de agua procedente de las precipitaciones y mide las salidas por el cauce, con lo que lleva a cabo el primer balance de agua. Sin embargo considera las entradas por infiltración y por agua subterránea como fenómenos locales y ocasionales.

La publicación póstuma en 1686 del *Traité du mouvement des eaux et des autres corps fluides*, de Mariotte, traducido al inglés en 1718, influyó decisivamente al desarrollo de la Hidráulica y la Hidrología. El libro trata de las varias propiedades de los cuerpos fluidos, del origen de las fuentes, del equilibrio de los fluidos por su gravedad, del agua corriente y su medición, de la altura y amplitud de las corrientes perpendiculares y oblicuas, de la

conducción de aguas y de la resistencia de las tuberías. De especial interés en Hidrología es la parte dedicada al origen de las fuentes y a la determinación de la velocidad y el caudal. Aporta pruebas experimentales (midió la precipitación anual en Dijon durante tres años) de que el agua de lluvia es más que suficiente para alimentar las fuentes, y de que el incremento o descenso del caudal está relacionado con la precipitación. Explica en detalle como el agua procedente de la lluvia se infiltra hasta llegar a un nivel subterráneo impermeable por el que circula hasta que encuentra un punto de salida. En relación a la determinación de la velocidad del agua, utilizó flotadores como Leonardo, pero sugirió que éstos fuesen de cera para que se sumergieran, sin llegar a caer en el fondo, a fin de reducir el efecto del viento en superficie. El tiempo de recorrido lo midió con un péndulo de medio segundo. Usó flotadores interconectados para demostrar que la velocidad variaba con la altura desde el fondo y estimó como velocidad media la que se registra a dos tercios de la de superficie.

Otro investigador importante de este período fue el astrónomo inglés Edmond Halley (1656-1742), que experimentó con la evaporación para demostrar que producía suficiente agua para generar la lluvia que alimenta el flujo de los ríos. Para determinar la cantidad de agua que se evapora de los océanos tomó un recipiente de dimensiones conocidas y lo llenó con agua, calentándola hasta alcanzar la temperatura del mar en la época de verano. Al cabo de una hora midió de nuevo el agua y encontró que se había perdido una cierta cantidad. Estimó después las dimensiones del Mediterráneo y calculó en toneladas el agua que debía evaporarse en verano, entendiendo que la evaluación era conservadora puesto que no había tenido en cuenta el efecto del viento. Después estimó la cantidad de agua que llegaba al Mediterráneo a través de sus grandes ríos, asumiendo que cada uno de ellos tenía un caudal diez veces mayor que el del Támesis. Puesto que esta cantidad era superior a un tercio del total de la pérdida por evaporación, probó que hay suficiente agua en el Mediterráneo para alimentar a todos sus ríos. Determinó la evaporación para todos los meses del año observando el nivel de agua de un recipiente o evaporímetro todos los días a la misma hora. También trató el tema de los lagos y mares cerrados, llegando a la conclusión de que su nivel crece por la aportación de los ríos hasta llegar al límite en que pierde por evaporación lo que gana en agua fluvial.

#### 4.2.3. Sistematización

Durante el siglo XVIII florecieron los experimentos que llevaron a descubrir tanto instrumentos de medición (piezómetro de Bernoulli, molinete de Woltman) como a desarrollar teorías (teorema de Bernoulli, fórmula de

Chézy) y modelos (modelos a escala de Smeaton). Los escoceses Hutton (1726-1797), Playfair (1748-1819) y Lyell (1797-1875) no sólo sientan los principios de la geología moderna sino que, al entender la adecuación que existe entre los valles fluviales y los caudales de los ríos, contribuyen también a poner las bases de la ciencia hidrológica.

Dado que en Hidrología la estimación de la velocidad del agua es el punto clave de todo estudio, el perfeccionamiento en los métodos de medición representa siempre un hito decisivo. Por ello fue de gran importancia el tubo de Pitot (1695-1771). Este científico francés utilizó dos tubos paralelos, uno recto y el otro doblado a 90° en un corto tramo final, montados en un marco de madera. El instrumento se sumergía en el agua a la profundidad deseada con el tubo doblado cara a la corriente. En aguas quietas los niveles de agua de ambos tubos son iguales mientras que en aguas corrientes las altura difieren. Aunque su comprensión de las leyes físicas no era correcta el instrumento fue muy útil.

El francés Antoine Chézy (1718-1798) tuvo a su cargo el proyecto de traer más agua a París procedente del río Ivette, y se enfrentó al problema de determinar la sección y el caudal adecuados. Para ello desarrolló una fórmula de cálculo, y para probarla condujo dos experimentos en el canal de Compralat y en el Sena, en sectores rectos. La velocidad se tomó con un flotador. La fórmula es la siguiente:  $v = \sqrt{ah/p}$ , donde  $a$  es el área de la sección,  $h$  la pendiente y  $p$  el perímetro mojado. Sin embargo, el análisis y fórmula de Chézy no se incluyeron en el informe, por lo que tardó mucho tiempo en ser conocida. Du Buat (1738-1809) era de Normandía, y desarrolló varios principios de hidráulica mediante un gran número de experimentos, hechos por orden del gobierno. Sus trabajos fueron traducidos al alemán y al inglés. Razona, como Chézy, que la resistencia es proporcional al cuadrado de la velocidad,  $v^2/m$ , donde  $m$  es la constante de proporcionalidad, que debía ser igual a la fuerza gravitacional en dirección del flujo:  $v^2/m = gS$ , o sea  $v^2 = mgS$ , donde  $g$  es la constante gravitacional y  $S$  la pendiente. Pero finalmente propuso una ecuación muy complicada e incómoda de aplicar. Si bien la importancia de las ecuaciones de Chézy y de Du Buat es enorme, les faltaba el análisis de condiciones diferentes a las de sus experimentos para ser realmente universales.

#### 4.2.4. Desarrollo

Después del innegable progreso que significó la etapa anterior, el conocimiento hidrológico experimentó un notable crecimiento y con el siglo XIX llegaron los comienzos de las mediciones sistemáticas del flujo fluvial, como en el caso del Rin cerca de Basilea en 1809, del Tíber en Roma en 1825, del

Garona en 1837, del Ohio en 1838 y del Ebro en Tortosa en 1853. A nivel teórico se produjo, en 1889, la derivación, por parte de Manning, de una fórmula universal para calcular la velocidad del agua cuando no se dispone de mediciones, fórmula que sigue siendo utilizada hoy en día y que es como sigue: ( $v = R^{2/3} S^{1/2} / n$ ), siendo  $v$  la velocidad,  $R$  el radio hidráulico,  $S$  la pendiente y  $n$  el coeficiente de rugosidad, coeficiente que fue estimado empíricamente por Manning.

En 1856 el francés Darcy, con su trabajo *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*, puso los fundamentos de la teoría del movimiento del agua subterránea, al establecer experimentalmente la ley que rige el flujo de agua a través de arenas, más tarde completada con la teoría sobre el flujo del agua en los pozos, y que significó un notable avance en Hidrología subterránea. En esta misma época se publicaron los primeros libros de texto sobre Hidrología, como el *Manual of hydrology* de Beardmore en 1852. Puede, entonces, muy bien decirse que este siglo fue la gran era de la Hidrología experimental y, por tanto, el fundamento inmediato de la Hidrología científica actual.

La primera mitad del siglo XX se caracteriza por ser un período de racionalización. En 1932 Sherman propuso que los hidrogramas se confeccionaran en relación a un módulo, a fin de que fuesen todos comparables entre sí a pesar de proceder de ríos con caudales muy dispares. Esto representó un avance fundamental en la modelización de las relaciones precipitación/escorrentía (Anderson y Burt, 1990). También se idearon muchas fórmulas empíricas para la solución de varios problemas hidrológicos, pero en las que la selección de coeficientes y parámetros dependía exclusivamente del juicio y experiencia del investigador.

Horton (1875-1945), ingeniero hidráulico, es considerado como el padre de la Hidrología en Estados Unidos. Abordó el problema de determinar la escorrentía superficial y la erosión en las vertientes (Figura 4.1), en base a su teoría de que la generación de escorrentía dependía de que la intensidad de la lluvia fuese superior a la capacidad de infiltración de agua en el suelo (Horton, 1932). Otro hito importante en el desarrollo de la Hidrología fue el establecimiento, con fines ecológicos, del Laboratorio de Hidrología de Co-weeta, en Carolina del Norte, y de sus cuencas experimentales (Douglas y Hoover, 1988). Los datos recogidos en estas estaciones permitieron a Hewlett (1961) darse cuenta de que, en climas húmedos con vertientes cubiertas por vegetación, la generación de escorrentía no era de tipo hortoniano, sino que se producía en relación a la circulación subsuperficial y a suelos saturados.

Finalmente, Horton (1945) inicia la morfometría, o sea, la descripción cuantitativa de las redes fluviales y establece las relaciones entre sus parámetros principales, al considerar que las características físicas de las cuencas eran importantes para la estimación de las características de la escorrentía.

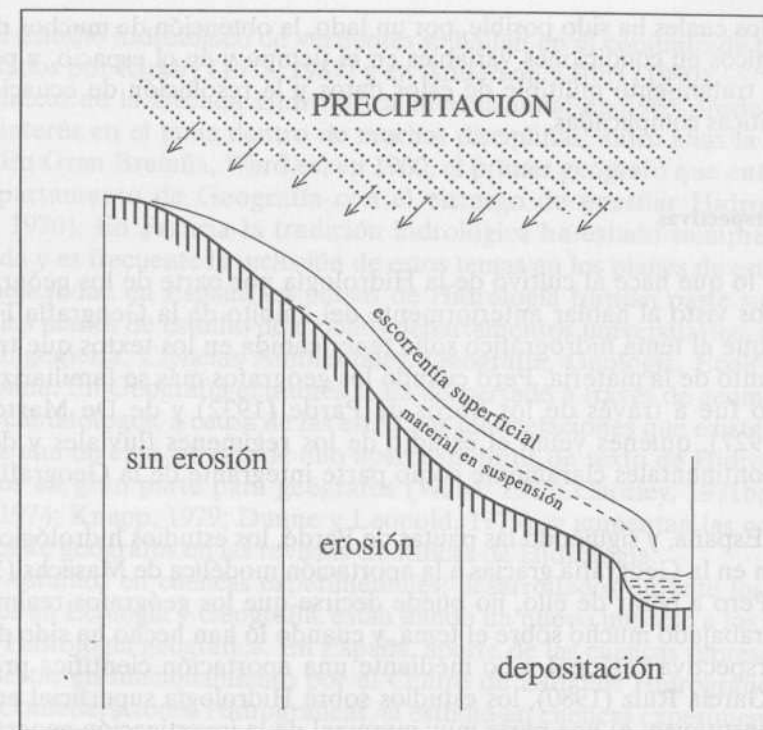


Figura 4.1. Escorrentía y erosión en las vertientes (modelo de Horton).

Desde el ámbito de la física de fluidos se llevan a cabo estudios sobre el comportamiento del agua en el suelo, los cuales son luego aplicados a la Hidrología (Sposito, 1987). El primer trabajo se debe a Buckingham (1905) y trata del equilibrio y comportamiento del flujo del agua en el suelo, para lo cual define la tensión capilar, y nota que en un suelo saturado debe ser cero. Más tarde Richards (1931) llevó a cabo mediciones precisas de la conductividad hidráulica mediante el diseño y utilización de tensiómetros. Con ello verificó experimentalmente la ley de flujos en medios porosos de Buckingham y derivó la ecuación que es aún comúnmente aceptada para su cálculo.

Los avances conseguidos en la segunda mitad de nuestro siglo, que puede considerarse como la edad de oro de la Hidrología, han sido y son muy grandes, tanto a nivel teórico como a nivel práctico, especialmente gracias a trabajos llevados a cabo después de la Segunda Guerra Mundial en relación a la predicción y control de avenidas, irrigación, calidad del agua, etc. Las bases de estos avances se hallan en parte en el desarrollo de instrumentos extraordinariamente sofisticados, tanto para la medición como para el cálculo.

lo, con los cuales ha sido posible, por un lado, la obtención de muchos datos hidrológicos en condiciones variables en el tiempo y en el espacio, y por el otro, el tratamiento múltiple de estos datos y la resolución de ecuaciones matemáticas complicadas.

#### 4.2.5. Perspectivas

Por lo que hace al cultivo de la Hidrología por parte de los geógrafos, ya hemos visto al hablar anteriormente del ámbito de la Geografía Física clásica que el tema hidrográfico solía tener cabida en los textos que tratan el conjunto de la materia. Pero cuando los geógrafos más se familiarizaron con ello fue a través de los libros de Parde (1932) y de De Martonne (1925-1927), quienes veían el estudio de los regímenes fluviales y de las aguas continentales claramente como parte integrante de la Geografía Física.

En España, y siguiendo las pautas de Pardé, los estudios hidrológicos se integran en la Geografía gracias a la aportación modélica de Masachs (1947, 1948). Pero a pesar de ello, no puede decirse que los geógrafos realmente hayan trabajado mucho sobre el tema, y cuando lo han hecho ha sido desde una perspectiva regional y no mediante una aportación científica propia. Según García Ruiz (1980), los estudios sobre Hidrología superficial en España constituyen: *a*) una parte muy marginal de la investigación geográfica; *b*) se circunscriben a ciertas regiones (cuena del Ebro y Levante); *c*) en general presentan un notable retraso metodológico pues se trata de trabajos basados en el tratamiento, muchas veces elemental, de los datos recogidos en los Anuarios de Aforos. Creemos que merece destacarse la aportación de García Sainz (1959) por el intento de abordar temas de tipo general, como el de la acción del relieve sobre la circulación del agua. Pero la Hidrología española cuenta con importantes trabajos en el tema de ingeniería hidráulica, es decir, aplicado a recursos y a obras de regulación (Lorenzo Pardo, 1933; Becerril, 1961). Los primeros textos sobre Hidrología peninsular aparecen a finales del siglo pasado (Torres Campos, 1895) y principios del presente (Bentabol Ureta, 1900; González Quijano, 1922)

En los últimos cincuenta años ha existido una estrecha colaboración entre Geomorfología e Hidrología en dos ámbitos, primero en Hidrología fluvial, y más recientemente en Hidrología de vertientes, para el estudio de temas relacionados con hidráulica y con transporte de sedimentos. Ejemplos del primer caso son los trabajos de Leopold y Maddock (1953) y de Leopold y Wolman (1957), los cuales culminaron y se generalizaron en un libro de texto (Leopold; Wolman y Miller, 1967) que se convirtió en un clásico de la Geomorfología fluvial. Ejemplos de la aportación de geomorfo-

logos al estudio hidrológico de vertientes se hallan en el conjunto de trabajos editados por Kirkby (1978, 1987) y en Anderson y Burt (1990).

El inicio de la Década Hidrológica Internacional en 1965 produjo un nuevo interés en el tema dentro de muchas disciplinas, entre ellas la Geografía. En Gran Bretaña, Ward es, en 1960, el primer geógrafo que entra en un Departamento de Geografía con el encargo de enseñar Hidrología (Ward, 1970). En Francia la tradición hidrológica ha estado siempre más arraigada y es frecuente la inclusión de estos temas en los planes de estudio. En la actualidad en España los cursos de Hidrología forman parte sustancial de los planes de estudio de muchos departamentos universitarios, como los de Ingeniería, Ciencias Ambientales, Geografía, Geología, Ecología y Agronomía. En Geografía el interés se ha despertado a través de geomorfólogos y climatólogos, a causa de las estrechas interrelaciones que existen entre cada una de ellas. A raíz de ello aparecen libros de texto de Hidrología pensados en gran parte para geógrafos (Ward, 1975; Chorley, 1971b; Dubreuil, 1974; Knapp, 1979; Dunne y Leopold, 1979), y aumentan las contribuciones de geógrafos en las revistas científicas de Hidrología.

Los estudios en cuencas experimentales, desarrollados durante los últimos años en Ecología y Geografía, están dando un nuevo impulso a los estudios de Hidrología geográfica. En España, aparte de las cuencas representativas puestas en funcionamiento por el Centro de Estudios Hidrográficos o por las Confederaciones Hidrográficas, el estudio en cuencas experimentales se inicia tanto por parte de ecólogos (Ávila y Roda, 1988; Piñol *et al.*, 1991) como de geomorfólogos (Llorens y Gallart, 1992; Batalla y Sala, 1992).

### 4.3. Los grandes temas hidrológicos

#### 4.3.1. El ciclo hidrológico

El concepto de ciclo del agua es el fundamento de toda ciencia hidrológica. Se basa en la consideración de que toda el agua de la Tierra y de su atmósfera está involucrada en un sistema de interrelaciones contínuo, que se lleva a cabo a través de los tres estados del agua: sólido, líquido y gaseoso. Esta dinámica hidrológica afecta a la parte más superficial de la corteza terrestre (litosfera) en, aproximadamente, un kilómetro de profundidad, y a la atmósfera hasta unos 15 kilómetros de altitud. Puesto que la cantidad total de agua existente en este sistema es limitada, debe existir un balance entre las diferentes partes del mismo. Este hecho tan simple y que todos conocemos se desarrolla de manera muy compleja, dando lugar a series de subsistemas que representan los diferentes caminos a través de los cuales el agua circula y se transforma, todo lo cual condiciona la disponibilidad de

agua de una zona determinada de la superficie terrestre en función de si el balance en este lugar es positivo o negativo. El ciclo hidrológico puede estudiarse a diferentes escalas, la global (Figura 4.2), es decir de toda la tierra y su atmósfera (UNESCO, 1976; Tardy, 1986), regional, o sea de un país o un continente (García Lozano, 1970) o a nivel de una cuenca de drenaje.

En esencia, para entender la Hidrología de cualquier sector de la Tierra hay que conocer: *a)* el volumen de precipitaciones, o lo que es igual, las entradas de agua en el sistema; *b)* el valor de la evapotranspiración, es decir las pérdidas de agua por evaporación y transpiración; *c)* la infiltración, almacenamiento y movimiento del agua en el suelo y el subsuelo, o sea, su dinamismo y distribución en la litosfera; *d)* la circulación del agua por cauces fluviales; *e)* el almacenamiento en lagos y océanos.

La precipitación, tanto su tipo como cantidad y distribución anual, es el factor más directamente determinante en el desarrollo del ciclo hidrológico, puesto que constituye la *entrada de agua* en el sistema constituido por una

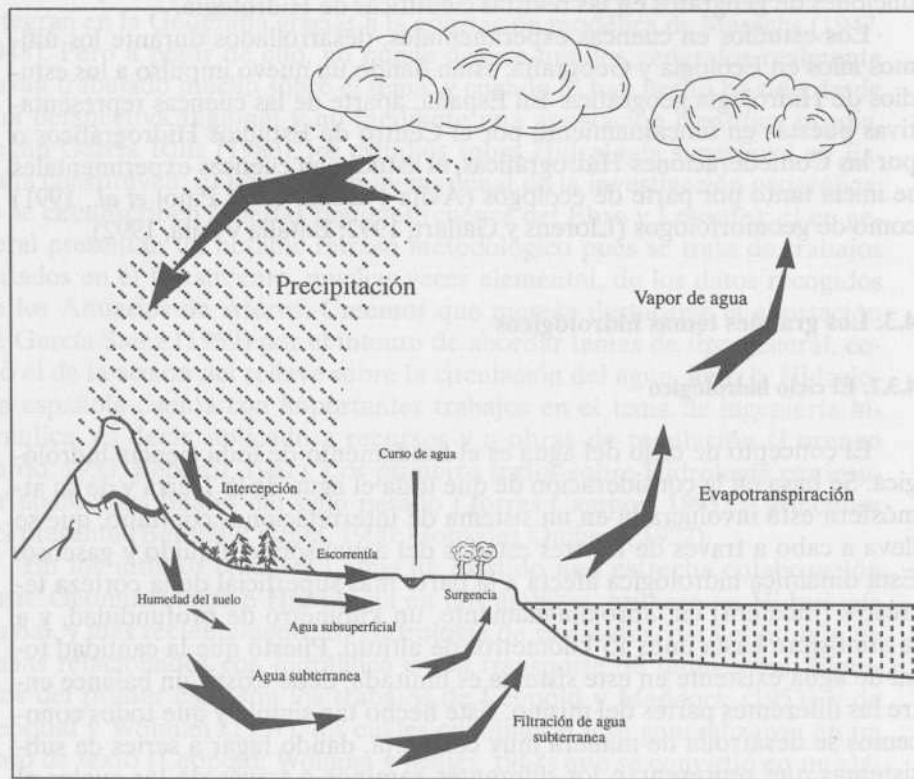


Figura 4.2. Esquema del ciclo hidrológico.

cuenca determinada. La precipitación puede presentarse en forma nival o en forma pluvial, y cada una de ellas, aunque pueda representar volúmenes de agua similares entrando en el sistema, repercutirá de forma diferente en el desarrollo del ciclo.

Evaporación y transpiración son dos procesos estrechamente interrelacionados y de gran importancia dentro del ciclo hidrológico, ya que determinan la vuelta a la atmósfera de una parte más o menos grande del agua de precipitación, representando las salidas de agua del sistema, es decir la *pérdida de agua*. El conjunto de pérdidas de agua debidas a los dos procesos mencionados se denomina evapotranspiración. La evaporación se inicia en el mismo momento de la precipitación, y, por tanto, una parte, normalmente pequeña, del agua de lluvia vuelve muy rápidamente a la atmósfera. También el agua caída e infiltrada en el suelo está sometida a evaporación, aunque en cantidades relativamente pequeñas. Los grandes focos de evaporación son, evidentemente, los lugares donde una gran parte del agua queda retenida en la superficie, como en los ríos, lagos, mares y océanos.

La parte de precipitación que llega a la superficie de la Tierra puede seguir uno de los caminos siguientes: *a)* quedar en la superficie almacenada en lagos y embalses, desde donde parte de ella se perderá otra vez por evaporación; *b)* circular por la superficie de las vertientes y dirigirse hacia las depresiones y concavidades donde, por acumulación, se irá produciendo una escorrentía concentrada que acabará en mares y lagos; *c)* en tercer lugar, el agua de precipitación puede infiltrarse en el suelo, aumentando así la humedad del mismo, pero, sobre todo, puede ir hacia el subsuelo y quedar allí almacenada durante mucho tiempo; el conjunto de agua infiltrada se va, sin embargo, movilizándose lentamente hasta reencontrar la superficie y sumarse a las aguas de ríos, lagos y mares.

#### 4.3.2. La cuenca como sistema

La consideración de la cuenca como un sistema es otra de las premisas fundamentales en Hidrología, y ha sido asimismo adoptada en algunas ramas de la Geografía Física, como en el caso de la Geomorfología (Gregory y Walling, 1973; Schumm, 1977), y considerada como una unidad geomorfológica básica (Chorley, 1969). El concepto de sistema ha sido fácilmente asimilado porque de hecho el ciclo hidrológico ya conduce a él. Es por ello que muchos de los textos generales de Geografía (Wilson, 1981) incluyen ilustraciones del ciclo hidrológico cuando quieren ejemplificar la teoría de sistemas.

El sistema cuenca fluvial está formado por el conjunto de aguas que drenan hacia un mismo tronco y que constituyen, por tanto, una unidad hidroló-



gica y geográfica bien definida. En cualquier sector de un curso fluvial es posible trazar la cuenca que contribuye a su alimentación hídrica, hasta llegar al área máxima en la que se recogen la totalidad de aguas que, finalmente, drenan al mar. Mientras que, a escala planetaria, el sistema constituido por el ciclo hidrológico es un sistema cerrado, en la parte que se desarrolla sobre la tierra a nivel de cuenca fluvial es claramente un sistema abierto.

Los límites del sistema cuenca son netos ya que corresponden, aproximadamente, a sus contornos topográficos, si bien hay que tener presente que la circulación subterránea altera, a veces, el drenaje de las aguas llevando a cuencas topográficas vecinas el agua que, de hecho ha iniciado su ciclo en otro lugar. En este sistema abierto las entradas de agua son las de precipitación, mientras que el dinamismo viene dado por el fluir de estas aguas por vertientes y valles hasta llegar al punto de salida al mar o a otra cuenca fluvial. Las aguas, en su discurrir, arrastran consigo los sedimentos arrancados del sustrato litológico de la cuenca, por lo que ésta es asimismo una unidad geomorfológica constituida por la red de incisión y por la carga de sedimentos.

Si bien desde un punto de vista científico es bien probada la utilidad de estudiar la cuenca como un sistema, también lo es a efectos prácticos (Chow, 1968). En el caso de la evaluación de los recursos hídricos, por ejemplo, es imprescindible tener presente la unidad de este sistema de relaciones, la conexión estrecha que hay entre agua superficial y agua subterránea, entre ambas y la precipitación y la evapotranspiración, entre el agua y las características del sustrato, etc. Además, puesto que cualquier acción que afecte a un sector de una cuenca repercute indefectiblemente aguas abajo de la misma, una alteración en la utilización del territorio en el área de cabecera (construcción de embalses, tala de bosque, urbanización, desechos industriales) tarde o temprano se hará sentir en la desembocadura. Son precisamente estas alteraciones en el uso del suelo las responsables en gran parte de que sean más rigurosos los efectos de las crecidas en muchas áreas, y de que los problemas de contaminación hayan aumentado sensiblemente.

#### 4.3.3. Morfometría

Desde que en 1945 Horton llevó a cabo la descripción cuantitativa de las cuencas y redes de drenaje, y formuló algunos de los principios que rigen el desarrollo de los mismos (Horton, 1945), es corriente que se incluya un estudio morfométrico en Hidrología, especialmente porque seguir esta metodología permite las comparaciones entre diferentes áreas, aunque la naturaleza estadística de las llamadas leyes de Horton ha hecho que su interés científico fuese menos valioso de lo esperado.

Horton ideó un estudio de la red fluvial en la que los parámetros principales que es necesario cuantificar son: clasificación jerárquica y longitud de los cursos, área, longitud, anchura y relieve de las cuencas. A partir de estos datos es posible la determinación de varias características del sistema fluvial, como la redondez o elongación de la cuenca, la densidad del drenaje, el orden y la frecuencia de los cursos, sus razones de bifurcación, de longitud y de áreas. Uno de los sistemas de jerarquización de cursos más usados en la actualidad es la modificación propuesta por Strahler (1964) de la establecida inicialmente por Horton (Figura 4.3). Clasificaciones más recientes son las de Shreve y Sheidegger, la primera relaciona mejor el orden de los cursos con el caudal, y la segunda es más útil en el tratamiento matemático de las redes de drenaje.

Horton también se dio cuenta de la norma que regía el grado de bifurcación entre los cursos de órdenes sucesivos, al comprobar que el número de cursos de un orden dado decrece sistemáticamente con el incremento del orden del curso. Se trata de una progresión geométrica de orden 3-5, aunque puede llegar a valores máximos de 7. Por tanto, al relacionar el número de segmentos de un orden determinado con el número de orden se obtienen rectas de regresión que corresponden a funciones exponenciales negativas. Las áreas de las cuencas de los cursos de los diferentes órdenes siguen esta misma pauta, mientras que la progresión geométrica que relaciona el orden de los cursos con la longitud de sus canales es similar pero de razón positiva.

#### 4.3.4. Experimentación y modelos

La Hidrología es una de las ciencias donde más se han desarrollado los experimentos y los modelos. Ello se debe tanto a la complejidad del ciclo hidrológico en su conjunto y del de cada uno de sus componentes, como a la importancia del agua para la vida y la actividad humanas. Esto explica el notable esfuerzo realizado por ingenieros y científicos para explicar, predecir y controlar todos los fenómenos relacionados con el agua. Tanto experimentación como modelos se usan para llevar a cabo simulaciones sobre comportamientos hidrológicos reales o supuestos, en base a formulaciones de teorías que se supone rigen este comportamiento. Mediante los experimentos se obtienen datos fiables de los diversos parámetros que intervienen en el ciclo hidrológico y el modelo permite simular diferentes situaciones y respuestas. Pero los datos experimentales no son suficientes para explicar el comportamiento del agua, puesto que sólo se llega a controlar alguno de los componentes del ciclo hidrológico, y además no durante mucho tiempo. Por tanto se hace necesario deducir o simular el comportamiento hidrológico a partir de datos parciales y discontinuos.

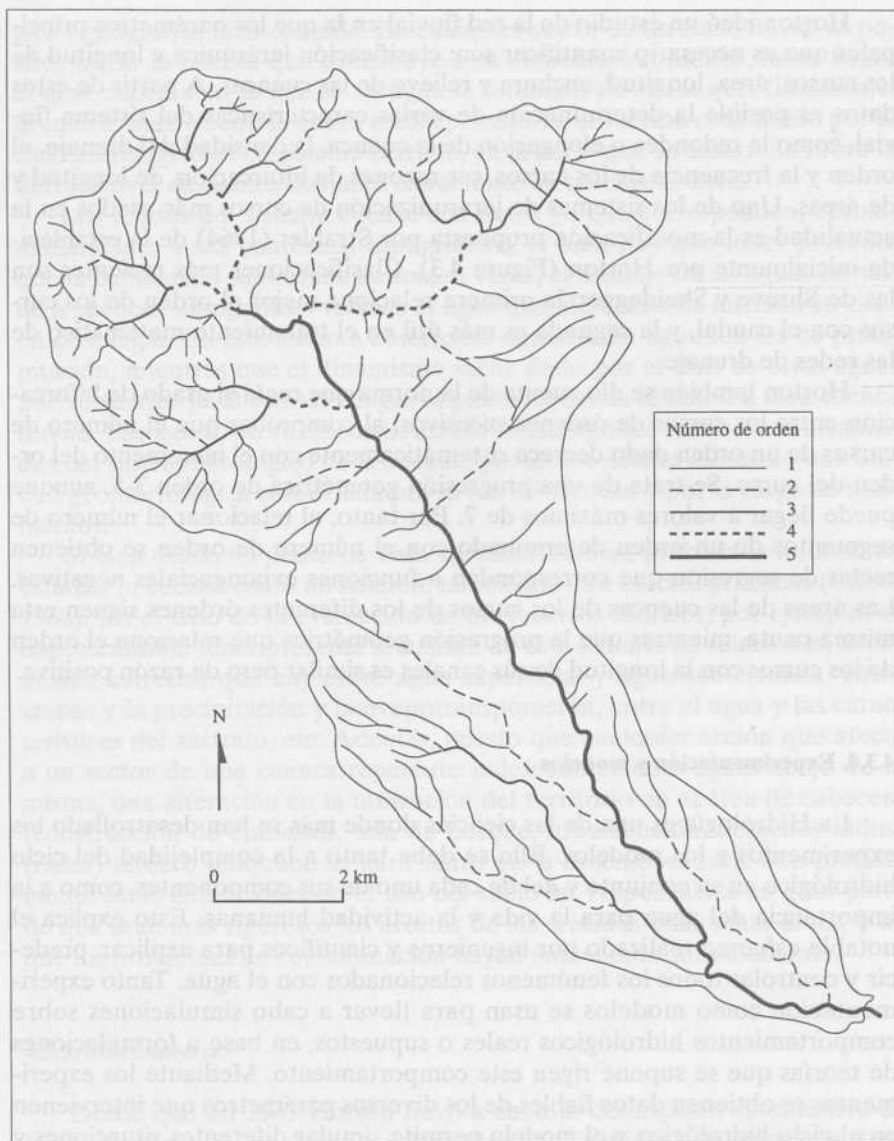


Figura 4.3. Morfometría de cuencas (según Horton modificado por Strahler).

Los modelos a escala han sido muy utilizados en investigaciones hidráulicas. El problema está en que una reproducción a escala de la complejidad de los procesos naturales, especialmente si se trata de cuencas de drenaje,

resulta muy difícil. Su mejor rendimiento se tiene cuando el modelo refleja aspectos hidrológicos muy concretos, generalmente fluviales, como un meandro, un lecho de gravas, etc. Su uso es común en ingeniería, especialmente cuando se trata del planeamiento de grandes obras hidráulicas a fin de comprobar en el laboratorio su resistencia y respuesta (Chow, 1967). El desarrollo de modelos utilizando ordenadores ha aumentado considerablemente en los últimos años, dada la flexibilidad y rapidez creciente en los ordenadores modernos. Los modelos matemáticos sustituyen la simulación de flujos diagramáticos por ecuaciones. Uno de los aspectos más interesantes de estos modelos es que los valores de los parámetros que describen las características físicas de la cuenca pueden variarse, de manera que permiten estudiar y predecir cambios en las salidas en función de variaciones en las entradas. Es una línea de investigación que está en gran auge y en la que son notables las aportaciones de geógrafos (Beven y Kirkby, 1979).

La fuente de datos para la modelización matemática son los estudios en unidades homogéneas y representativas que pueden ser tanto vertientes como pequeñas cuencas. Se trata de unidades hidrológicas que permiten analizar los mecanismos tanto de la escorrentía como de los sedimentos dentro de un tipo bien definido de medio físico-geográfico. Es interesante notar el valor geográfico que se atribuye a los estudios a nivel de cuenca de drenaje. Para Chartier (1966) por ejemplo, la pequeña cuenca de investigación hidrológica tiene, por esencia integradora, una vocación geográfica y Chorley (1971b) considera que, puesto que tiene en cuenta el medio físico en toda su complejidad, la cuenca es una unidad geográfica fundamental.

A pesar de que para la adquisición de datos fiables de los mecanismos hidrológicos las pequeñas cuencas experimentales son las más idóneas, Parde (1965) advierte sin embargo que estos datos son insuficientes para entender los fenómenos que se producen en las cuencas medias y grandes. Se presenta por tanto el problema de la extrapolación, el cual comporta en uno u otro momento la utilización de modelos de los fenómenos que se quieren explicar. La modelización sin embargo sólo debe llevarse a cabo a partir de datos muy seguros, pues no hay nada peor, según este autor, que expresar de forma matemática, la cual impresiona a los no iniciados, las observaciones y conclusiones erróneas.

#### 4.4. Áreas de conocimiento

##### 4.4.1. Principios y fundamentos

El concepto base sobre el que se asienta esta disciplina es el ciclo del agua y su presentación y estudio debe preceder al de otros aspectos hidroló-

gicos. El estudio del ciclo hidrológico implica la idea de balance, es decir de que deben igualarse entradas y salidas de agua. La escala de estudio más geográfica es la centrada en el marco de una cuenca de drenaje y bajo el concepto de sistema, es decir, de la interrelación con que se producen las entradas, movimientos y salidas de agua. Una parte del ciclo hidrológico, las entradas de agua por precipitación y las salidas por evapotranspiración, se estudian también dentro de la Climatología, si bien con objetivos distintos. Por otro lado, los principios generales que rigen en la circulación del agua están estrechamente ligados a la física, tanto en lo que se refiere a la dinámica de fluidos como a las características de suelos, mientras que su parte aplicada está ligada a la ingeniería. Por ello, en muchos casos se hace necesaria la aplicación de fórmulas y ecuaciones matemáticas. Sin embargo esto no quiere decir que en Hidrología geográfica deban conocerse necesariamente en profundidad estos aspectos, se trata simplemente de saber su significado y conocer su utilización.

#### 4.4.2. Métodos y Técnicas

Dada la importancia económica del agua, se requiere el conocimiento cuantitativo de todos los elementos del ciclo hidrológico, y por ello existen redes de estaciones meteorológicas, donde se miden precipitación, temperatura y evaporación, y estaciones propiamente hidrológicas para el aforo de caudales de agua superficiales. Finalmente están los datos que se estiman de forma secundaria con mediciones discontinuas (humedad del suelo, caudales subterráneos y subsuperficiales, calidad del agua) o por cálculos (evapotranspiración). Al investigar el sistema hidrológico hay que hacer una distinción (Amarocho y Hart, 1964) entre estudio paramétrico, es decir, el que trata de las relaciones entre los parámetros físicos comprendidos en los eventos hidrológicos, y el estudio estocástico, que emplea las características estadísticas de las variables para resolver problemas hidrológicos.

En el estudio geográfico de la Hidrología fluvial y de vertientes se requieren grandes dosis de trabajo de campo para la obtención directa de datos a escala de la cuenca de drenaje. Es por ello que el estudiante ha de aprender a medir en el campo los principales parámetros hidráulicos del cauce (anchura, profundidad, perímetro mojado, radio hidráulico, área de la sección, pendiente del lecho), y a determinar la velocidad del flujo y el caudal (Sala y Rovira, 1986). Y también ha de estar preparado para analizar en el laboratorio la calidad del agua y del sedimento transportado. Otra habilidad a adquirir es el de la lectura e interpretación de las bandas hidrométricas que proporcionan limnógrafos y pluviógrafos. Puesto que lo que se estudia es el agua y esta fluye constantemente, una de las bases del estudio

hidrológico son las técnicas de muestreo. En Hidrología fluvial, por ejemplo, ha representado un gran avance el desarrollo de los muestreadores de agua y sedimento instalados en las estaciones de aforo.

El análisis de los datos requiere el tratamiento estadístico y en especial en lo que se refiere a la probabilidad de ocurrencia de un suceso en un espacio y un tiempo (Chow, 1964), en especial de caudales extremos, que pueden considerarse sucesos aleatorios ya que sus futuras ocurrencias no pueden ser claramente predecibles. Los requerimientos óptimos para este estudio son las series largas de mediciones continuas y homogéneas de las principales variables hidrológicas, como las que proporcionan los organismos oficiales (Dirección General de Obras Hidráulicas, 1981). Cuando sólo se tiene registros cortos de datos, la formulación de un modelo de serie temporal puede ayudar a generar una base para estimar mejor la conducta hidrológica.

#### 4.4.3. Hidrología de vertientes

Esta es la parte del ciclo hidrológico que reviste mayor complejidad puesto que se subdivide en varios subsistemas, a la vez que es la que afecta y es afectada más directamente por la actividad humana. Estos subsistemas están constituidos por los procesos de interceptación, de infiltración, de circulación de agua por entre el suelo, de escorrentía superficial no concentrada, de transporte de sedimento en disolución y en suspensión. En esta rama de la hidrología se trabaja para comprender las relaciones entre las entradas de agua de precipitación y el tránsito y salidas de agua de las vertientes en relación a variables como la humedad antecedente y la constitución física del suelo. Hay por tanto varios temas de estudio: la física de los suelos y sus relaciones con el movimiento del agua; los componentes hidráulicos del flujo superficial; el volumen de agua de arroyada; la circulación subsuperficial; el transporte de sólidos y de solutos. Es un área de estudio que está en período de desarrollo y en la que convergen varias disciplinas. La colaboración del geógrafo, siempre desde el campo de la Geomorfología, se ha situado en dos ámbitos, el de las observaciones, mediciones y experimentaciones de campo (Dunne, 1988; Sala y Gallart, 1988), y el de la modelización (Freeze, 1988). Es cierto que la Hidrología de vertientes es un tema en el que se utiliza mucho la modelización, pero también es cierto que es en el que más falta hace la investigación de campo que permita determinar cada vez mejor los caminos que sigue el agua en su fluir por las vertientes hacia el sistema fluvial, y a ligar estos patrones a la remoción de sedimento y de solutos. Trabajos como los de Dunne y Black (1970) son modélicos y didácticos en este sentido. Es dentro de la Hidrología de vertientes donde se llevan a cabo los estudios de erosión, en su mayor parte en cooperación con la Geomorfología.

#### 4.4.4. Hidrología subterránea

También suele recibir el nombre de Hidrogeología, a causa de que su estudio se lleva mayoritariamente a cabo dentro de la Geología. Es natural que así sea puesto que la disposición tectónica y la composición litológica del subsuelo son determinantes en la distribución y circulación de las aguas subterráneas. Aunque la formación del geógrafo, más preocupado por la superficie de la tierra, es insuficiente para llevar a cabo investigaciones dentro del campo de la Hidrogeología, en su *currículum* deben incluirse temas de agua subterránea dada su importancia decisiva en la circulación fluvial y en el agua como recurso, es decir, en la formación y mantenimiento de acuíferos. Es necesario conocer por un lado las leyes que rigen la infiltración, almacenamiento y circulación del agua subterránea, y por el otro las relaciones entre agua subterránea y agua superficial. Lo mismo que en las otras ramas de la Hidrología, hay que comprender el balance que se establece entre entradas, circulación y salidas de agua. El caudal subterráneo está formado por el agua que se infiltra hasta llegar a un nivel impermeable a partir del cual se acumula saturando una franja más o menos amplia de roca y constituyendo una reserva de agua o acuífero. Esta agua subterránea circula pero en condiciones diferentes del agua superficial puesto que está confinada. En este caso las fuerzas que actúan vienen mayoritariamente determinadas por un medio saturado y se rigen por la Ley de Darcy. Para la aplicación de esta ley es fundamental el conocimiento de la conductividad hidráulica en medio saturado, para lo cual se ha recurrido a modelos que puedan ser expresados matemáticamente (Scheidegger, 1960). Un caso particular de circulación subterránea lo constituye la circulación kárstica, es decir, la que tiene lugar en el interior de rocas calcáreas que han sufrido procesos de disolución. La Espeleología es la ciencia que se ocupa específicamente de este tema.

#### 4.4.5. Hidrología fluvial

La progresiva concentración de las láminas e hilillos de agua circulando por las vertientes acaba frecuentemente por concentrarse, con lo cual aumenta su potencial erosivo y, por ello, da lugar a la formación de cárcavas, barrancos, torrentes y, finalmente, de ríos. Aunque la escorrentía superficial a lo largo del lecho fluvial es uno de los componentes más fáciles de observar dentro del ciclo hidrológico, hay que tener presente, no obstante, que constituye un subsistema cuyas entradas de agua proceden de varias fuentes: directamente de la lluvia, de la escorrentía superficial y subsuperficial a lo largo de las vertientes, y de la escorrentía subterránea. Además, es evidente, que cuanto más grande sea la cuenca de recepción y más elevada la

capacidad de almacenamiento de agua en el suelo y subsuelo, más regular y constante será la escorrentía superficial de los cursos fluviales de la misma. Hay dos aspectos a estudiar dentro del flujo fluvial. Por un lado las características físicas del flujo y el trabajo de erosión, transporte y sedimentación de este flujo, y por el otro, la cantidad y distribución de este flujo o caudal. En el primer caso las ciencias afines son la Física y la Hidráulica y en el segundo la Climatología.

Esta rama de la Hidrología, al igual que en la de vertientes, la aportación de los geógrafos geomorfólogos ha sido determinante. Pero al igual que sucede en Climatología con la precipitación, hay una parte de la Hidrología fluvial que se basa en la recopilación y análisis de largas series de datos, procedentes de las estaciones de aforo de la red nacional o de las cuencas experimentales, sobre los caudales diarios medios y los máximos instantáneos. El análisis del caudal medio o módulo permite el cálculo de los valores y las variaciones anuales, es decir la abundancia media de agua que producen las diferentes cuencas, y la determinación de los regímenes fluviales. El análisis de los máximos instantáneos a través de los hidrogramas de crecidas permite conocer e intentar predecir tanto avenidas como estiajes. En ambos casos es importante establecer la relación entre precipitación y escorrentía o coeficiente de escorrentía, y entre ésta y el transporte de sólidos y solutos o erosión. Con las técnicas estadísticas e informáticas modernas estos análisis han mejorado sustancialmente. También los estudios morfométricos tienen su interés, especialmente en la descripción y correspondiente clasificación de cuencas y redes fluviales.

#### 4.4.6. Hidrología de lagos y mares

El tema de las aguas lacustres y marinas suele estudiarse separadamente dentro de la Limnología y la Oceanografía respectivamente, y su tradición geográfica es escasa. Estos temas son tratados fundamentalmente por geólogos e ingenieros, y recientemente por ecólogos (Margalef, 1973, 1984). Sin embargo un desarrollo de la Hidrología geográfica debe comportar la inclusión de estos apartados (King, 1964). Los temas básicos a tratar son las características de las aguas, del oleaje, de las mareas, de las corrientes oceánicas y los balances hidrológicos de las masas de agua.

#### 4.4.7. Hidrología histórica

También denominada Paleohidrología, es una temática relativamente nueva (Schumm, 1967; Gregory, 1983). Se trata de reconstruir las condicio-

nes hidrológicas del pasado a través de estimaciones a partir de los cauces y de los sedimentos antiguos. Esto se consigue mediante la utilización de fórmulas (Manning, Chézy) y el análisis de depósitos sedimentarios para estimar la velocidad a que podía circular el flujo de agua, y el cálculo de los parámetros hidráulicos del cauce para determinar el caudal. El estudio del comportamiento a largo plazo de ríos antiguos y modernos tiene dos enfoques. El uno se refiere a las condiciones hidrológicas que existieron durante la formación de ríos ancestrales. En este caso las reconstrucciones hidrológicas se basan en la morfología y sedimentología de paleocanales y sus análogas con los ríos modernos. Estos datos ayudan a definir el paleoclima de la época y la magnitud de las fluctuaciones hidrológicas pasadas. El otro enfoque concierne los sucesos individuales, generalmente de alta magnitud. Una de las más espectaculares reconstrucciones paleohidrológicas de este tipo es la que llevó a cabo Bretz en la meseta de Columbia y que creó gran controversia, por la insistencia de Bretz en atribuir las macroformas de una área de 40.000 km<sup>2</sup> a un único evento catastrófico, el desbordamiento de un lago glacial (Missoula) al este del país a causa de la rotura de la barrera frontal. Bretz utilizó las ecuaciones de Manning y de Chézy para calcular la magnitud de la crecida. Posteriormente se llevó a cabo el estudio sedimentológico y geomorfológico que demostró la veracidad de la teoría de Bretz (Baker, 1973). Los estudios paleohidrológicos pueden contribuir a establecer períodos de recurrencia de crecidas y a comprender mejor las relaciones entre forma del canal y procesos hidrológicos y sedimentológicos.

#### 4.4.8. Hidrología regional

En ninguna materia tratada geográficamente puede olvidarse el tema regional, el cual está en la esencia de nuestra disciplina. Su tratamiento interno debe estar en consonancia con el desarrollo científico, y por tanto incorporar a los aspectos descriptivos los que se deriven de las tendencias más actuales. En Hidrología se trata de estudiar todos los temas y aspectos hidrológicos en diferentes ambientes climáticos, como son las regiones ecuatoriales, las áridas y semiáridas, las templadas y las frías. Especialmente en lo que se refiere al ciclo hidrológico, es decir, de balances de agua, y a las grandes cuencas, en sus aspectos de caudales, estacionalidad y morfometría.

#### 4.4.9. Hidrología ambiental

Uno de los aspectos más importantes de las tendencias actuales en Hidrología, y posiblemente la más interesante para el geógrafo, es el progresi-

vo énfasis hacia los problemas ambientales, es decir, aplicados (Mateu, 1984). Tal como indica el programa de la Década Hidrológica Internacional, los temas a estudiar son muy amplios (el agua para la irrigación, la potencia hidroeléctrica, los ríos internacionales, la protección frente a las crecidas, las previsiones de suministro de agua, etc.), siendo los de la conservación del suelo, el manejo de cuencas, la polución y contaminación, las crecidas y estiajes, los que entran de lleno en el campo de la Geografía Física. Por otro lado, el hombre es en muchos lugares de la tierra, el principal agente modificador de los parámetros hidrológicos. Esto es especialmente notorio en las áreas urbanas, y la tendencia expansiva de las mismas genera alteraciones en las llanuras aluviales (Bedient y Huber, 1988), un aumento de la escurrentía (Sala y Inbar, 1992) y las consecuentes inundaciones (Dolz *et al.*, 1992). Según Ward (1970), Hidrología urbana, calidad del agua, y crecidas son los temas en los que las aportaciones de los geógrafos son más importantes y que tienen un mayor futuro. No olvidemos que la mayor parte de la población vive en la actualidad en áreas urbanas. Mateu (1984) cree que la Hidrología practicada por los geógrafos hasta ahora no siempre ha sido coherente con el hecho ambientalista que implican los estudios relacionados con el agua. Sin embargo existen textos modélicos en el estudio del agua desde un punto de vista ambiental, como el de Dunne y Leopold (1979). Información sobre recursos hídricos puede encontrarse en textos procedentes de la ingeniería (Heras, 1983) y de la administración (Martín Mendiluce, 1981).

La Geomorfología es una ciencia que estudia las formas del relieve y sus causas.

Las formas del terreno son el resultado de la interacción entre fuerzas endógenas o procesos tectónicos de creación de volúmenes montañosos, y fuerzas exógenas, o procesos sucesivos de destrucción y modelado de relieves. Las fuerzas endógenas se nutren de la energía geotérmica, mientras que las fuerzas exógenas se generan a partir de la energía solar y de la energía mecánica de la tierra (Figura 3.1).

Aparte del aspecto puramente descriptivo y explicativo que el estudio de las formas de relieve y de las cuencas puede tener, es también de suma importancia el papel que la cartografía terrestre y se refiere a ejercer en el conocimiento y actividad humana, por su carácter de obstáculo o de alivio, de barrera resistente o trampa, etc. Para el estudio en campo, la contemplación del paisaje juega más allá del placer estético o del interés científico, y se lleva a proporción el por qué de la conformación y distribución de un lugar determinado, el cómo, el cuándo y el dónde de la ocurrencia de los procesos que lo han generado, y discernir las leyes de su distribución espacial. La especialidad científica que se ocupa del estudio de las formas del relieve es la Geomorfología.

La Geomorfología es una ciencia de la tierra que tiene su origen ligado a la Geología, desde la que constituye el último eslabón de los estu-

# 5.

---

## Geomorfología

---

### 5.1. Introducción

La superficie de la tierra está constituida por multitud de formas diferentes que, descritas e interpretadas adecuadamente, pueden ser aisladas y clasificadas de manera coherente. La conjunción de estas formas en un área determinada es lo que confiere un carácter específico a los diversos paisajes que conforman el escenario de la actividad humana.

Las formas del terreno son el resultado de la interacción entre fuerzas endógenas, o procesos tectónicos de creación de volúmenes montañosos, y fuerzas exógenas, o procesos erosivos de destrucción y modelado de relieves. Las fuerzas endógenas se nutren de la energía geotérmica, mientras que las fuerzas exógenas se generan a partir de la energía solar y de la energía rotacional de la tierra (Figura 5.1).

Aparte del aspecto puramente científico y especulativo que el estudio de las formas de relieve y de los paisajes pueda tener, es también de suma importancia el papel que la corteza terrestre y su relieve ejercen en el asentamiento y actividad humana, por su carácter de obstáculo o de abrigo, de tierra resistente o frágil, etc. Para el estudioso, en cambio, la contemplación del paisaje va más allá del placer estético o del interés económico, y le lleva a preguntarse el por qué de la conformación y dinámica de un lugar determinado, el cómo, el cuándo y el dónde de la ocurrencia de los procesos que lo han generado, a discernir las leyes de su distribución espacial. La especialidad científica que se ocupa del estudio de las formas del relieve es la Geomorfología.

La Geomorfología es una Ciencia de la Tierra que tiene su origen ligado a la Geología, dentro de la que constituye el último eslabón de los estu-

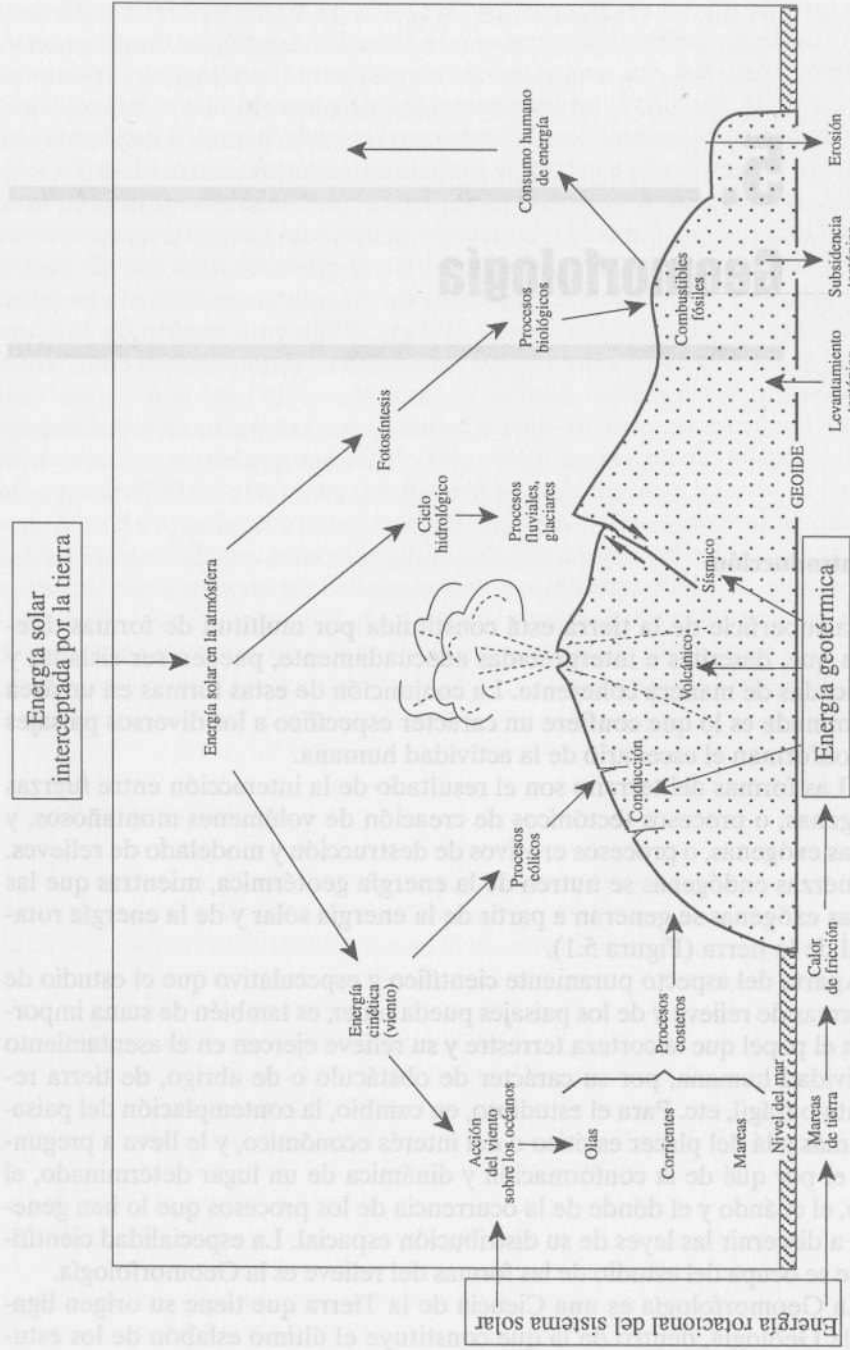


Figura 5.1. Fuerzas endógenas y fuerzas exógenas en el relieve terrestre.

dios estratigráficos, es decir, la fase actual de la evolución de la corteza terrestre. No es, por tanto, de extrañar, que la Geomorfología haya sido, hasta muy recientemente, una ciencia marcadamente histórica, lo mismo que lo ha sido la Geología. Es en las últimas décadas del siglo pasado que la Geomorfología adquiere un carácter distintivo y específico, gracias a la conceptualización llevada a cabo por William Morris Davis (1850-1934). La importancia de este geólogo americano radica fundamentalmente en su aportación teórica y metodológica. Un hecho digno de destacar en la formulación davisiana es su propósito de conformar un estudio de las formas de relieve que tuviese un carácter marcadamente geográfico, en el sentido de que fuese descriptivo, explicativo y con un gran valor didáctico, y de ahí el título de su esquema teórico como "ciclo geográfico" (Davis, 1899), posteriormente denominado ciclo de erosión.

Este proceso de vinculación del estudio de las formas del relieve a la Geografía es de suma importancia para entender algunas de las características de la disciplina, como lo es el hecho de que muchos de sus más importantes cultivadores, especialmente a lo que se refiere a la Geomorfología europea, hayan sido geógrafos. Así pues, desde el mismo Davis hasta nuestros días ha tenido lugar un constante trasvase de geomorfólogos del campo de la Geología al de la Geografía y viceversa. Esto hace que puedan trazarse algunos paralelismos entre la evolución de la Geomorfología y el de la Geografía, además de entre la Geomorfología y la Geología, lo cual da a esta disciplina un carácter particular, por lo que se refiere a la forma en la que se han establecido y evolucionado sus paradigmas científicos (Grau y Sala, 1982, 1984; Sala, 1984).

En los últimos años, sin embargo, las ciencias que más han contribuido a conformar la actividad de los geomorfólogos han sido, de una forma indirecta, la Geofísica y la Física, y de manera más directa la Hidrología y la Agronomía. La Geofísica ha revolucionado gran parte de las ideas geológicas a raíz del establecimiento de la teoría de la tectónica de placas, la cual ha dado una explicación dinámica de los grandes rasgos del relieve terrestre y oceánico, todo lo cual ha repercutido notablemente en el campo de la Geomorfología estructural y en la manera dinámica de enfocar el estudio del conjunto del modelado. De la Física provienen los conceptos de fuerza y resistencia aplicados al estudio de los procesos que modelan las formas del relieve, tal como preconizó Stralher (1952a). El papel de la Hidrología en el desarrollo de la Geomorfología tiene un carácter muy singular, ya que de hecho de ella procede gran parte de la renovación teórica y metodológica actual, a partir del concepto de sistema y de su aplicación a la cuenca de drenaje, por ello considerada como unidad geomorfológica básica. Por lo que hace referencia a la Agronomía, su importancia en la Geomorfología radica fundamentalmente en la adopción de muchas de sus técnicas y méto-

dos de estudio en el campo de los procesos de erosión, aspecto esencial no sólo en la constitución y evolución del relieve, sino también en la protección y control de la pérdida de tierras. Han sido precisamente las aportaciones recibidas de la Hidrología y de la Agronomía las que han dado a la Geomorfología una importancia cada vez más relevante en lo que concierne a su papel en la sociedad, puesto que le han proporcionado los elementos para estudiar de manera adecuada los problemas del medio ambiente. La diversidad temática y metodológica a que ha llegado la Geomorfología en los últimos años es fruto de la gran expansión que ha experimentado esta disciplina. De ello es una muestra no sólo la cantidad y calidad de las publicaciones sino también el elevado número de autores implicados en ello. Este crecimiento de la Geomorfología se ha producido no sin la ocurrencia de notables crisis y de duras polémicas. Si bien durante un cierto tiempo la controversia tuvo un carácter bastante agresivo, en el que hasta cierto punto se pretendía descalificar al adversario por entender que practicaba un tipo de investigación considerada obsoleta o poco científica, en los últimos años se ha llegado a una situación en la que se ha hecho plausible la existencia de muchas geomorfologías, en el sentido de admitir como variedad temática lo que en otro momento se consideraba como no ortodoxo. Esto no impide, sin embargo, el que hayan unos temas que acaparen más la atención de la comunidad científica.

Es cierto que en Geomorfología los paradigmas que eran aceptados como tales hasta los años cincuenta han sido cuestionados y en gran manera sustituidos por otros nuevos, pero no es menos cierto que, pasado el fragor de la polémica, se acepta un amplio margen de enfoques en la observación y explicación de los paisajes geomorfológicos. Prueba fehaciente del espectacular dinamismo de esta es el hecho de que existan en muchos países, entre ellos España, agrupaciones de geomorfológicos. La británica, ciertamente la más antigua y numerosa en miembros y producción científica, nacida en el seno de la Asociación de Geógrafos, organizó en 1985 la Primera Conferencia Internacional de Geomorfología, a la que han seguido las de Frankfurt, Hamilton y Bolonia. En ellas tiene cabida toda la gran variedad temática a que la evolución de la ciencia ha dado lugar, signo evidente de la importancia, coherencia e independencia que ha adquirido la Geomorfología en el mundo científico.

En España no es hasta los años ochenta que se inicia, a duras penas, la renovación conceptual, metodológica y técnica, paralelamente a una creciente integración de la Geomorfología en Geografía Física, tal como señala Muñoz (1984a). A pesar de las muchas reticencias que existen todavía a aceptar esta renovación, que ha llevado a la Geomorfología a la categoría de ciencia en lugar de ser una simple descripción de paisajes, se ha desarrollado notablemente la Geomorfología de procesos, inspirada en las escuelas norteamericana e inglesa, y que incluye la cuantificación y la experimentación.

## 5.2. Evolución histórica

### 5.2.1. Precedentes

El estudio del origen de las ideas geomorfológicas puede remontarse hasta precedentes tan antiguos como los que pueden proporcionar los escritos de autores griegos, romanos, árabes y renacentistas, tal como se explica en Geikie (1897), Thornbury (1954), Chorley *et al.* (1964), King (1976), y Pitty (1982). En todas las épocas se ha intentado dar una explicación racional a las formas del relieve terrestre. Así, en textos de Aristóteles ya parecen datos sobre la acción de los ríos y el mar como responsables del nivelamiento del globo, y en Estrabon la idea de una formación del relieve mediante procesos de deformación. Avicena elabora teorías sobre el origen de las montañas y sobre su erosión por las aguas corrientes y el viento, a partir de observaciones llevadas a cabo en paisajes desérticos de Arabia. También merecen citarse las ideas de Leonardo da Vinci, quien detecta tanto la lentitud de los procesos de erosión como la importancia de la acción fluvial.

En líneas generales, los conceptos que dominaron durante siglos los puntos de vista utilizados en la descripción y explicación de las formas de paisaje terrestres fueron los que emanaban de los textos bíblicos. Así, de ellos se derivan las ideas de: *a) creacionismo*, es decir, de que las formas del relieve han sido creadas específicamente tal como son en la actualidad; *b) catastrofismo*, es decir, que el principal causante de los rasgos del relieve han sido grandes catástrofes, principalmente el diluvio universal, ocurridas en un corto lapso de tiempo. Esta última apreciación lleva a deducir una edad aproximada de las formas del relieve de unos 4.000 años, que son los que se deducían de la interpretación del génesis. La primera contraposición a esta estimación la hizo el francés Buffon (1707-1788), quien al estimar la antigüedad de la tierra lo hizo en unos 74.000 años. En relación al catastrofismo, el alemán Werner (1749-1818) introduce el origen marino de las rocas, por sedimentación seguida de compresión, lo que ha venido en llamarse *neptunismo*.

### 5.2.2. Desarrollo

Fueron las ideas del escocés Hutton (1726-1797) las que sentaron las bases de la Geología científica moderna, y con ella las de la Geomorfología, al afirmar que debía partirse de la realidad observable para encontrar una explicación comprensible de los rasgos del relieve y de su evolución. Según Chorley *et al.* (1964) en Rusia Lomonosov (1711-1765) sustentó ideas parecidas. Hutton, en su *Theory of the Earth*, utiliza, para exponer su teoría, la



analogía entre la circulación de la sangre en el cuerpo humano y la circulación de la materia por el paisaje a través del ciclo de meteorización, erosión, transporte y deposición, ciclo que es renovado de tiempo en tiempo debido a los levantamientos tectónicos. Por esto considera la evolución del relieve como algo “sin vestigios de un comienzo y sin perspectivas de un fin”. Estas ideas de Hutton son las que constituyen la base de la llamada “Ley del Uniformitarismo” sintetizada en la máxima de Geikie (1897) “el presente es la llave del pasado”, todo lo cual está en clara oposición a las ideas catastrofistas inspiradas en el relato bíblico y no en la observación de los hechos.

Poco después de Hutton, su discípulo el matemático Playfair (1747-1819) ilustraría de forma magistral el tema, al describir con claridad la manera como las aguas corrientes son responsables de la formación de los valles por los que circulan, algo que hoy día aparece como tan obvio, y al establecer la relación que existe entre el tronco principal de un curso de agua y sus afluentes, entre el tamaño de las cuencas y el del río que contienen. Esta teoría se conoce con el nombre de Ley de Playfair.

A los trabajos de los autores citados siguieron los tres volúmenes de *Principles of Geology* del también británico Lyell (1797-1875), considerada la carta magna de esta ciencia hasta finales de siglo, quien con una actitud abiertamente polémica frente a las ideas catastrofistas todavía dominantes, se convirtió en el gran divulgador del uniformitarismo y de su extensión más lógica, el gradualismo, con lo cual la negación del catastrofismo fue todavía más notoria. Lyell describió los procesos de meteorización, de erosión y transporte fluvial, de depositación en cuencas de sedimentación, y dedujo como a partir de estas áreas sedimentarias se originaban nuevas montañas en relación a fuerzas tectónicas.

### 5.2.3. Consolidación

La siguiente etapa importante en el desarrollo de la ciencia geomorfológica tiene lugar en la segunda mitad del siglo XIX, coincidiendo con la gran consolidación científica que este período significó en todas las ciencias. La escuela británica, principal precursora desde Lyell de la teoría de la erosión marina para explicar el origen de las grandes llanuras continentales de denudación, tiene a su representante más notable en Ramsay (1814-1891), junto con Jukes (1811-1869), los cuales destacaron, no obstante, la importancia de la acción fluvial en el modelado de Gran Bretaña.

En Europa sobresalen las figuras y las ideas de los germanos Von Richthofen (1853-1905) y Peschel (1879-1880), el primero, al igual que los británicos, atribuye una importancia decisiva a la acción abrasiva de las olas en el modelado terrestre, y el segundo se interesa más en la efectividad de las

fuerzas endógenas (fracturación y plegamientos). Los franceses De La Noe y De Margerie, en la obra conjunta *Les formes du terrain* (1888), ponen el énfasis en la acción de las aguas continentales como agentes geomorfológicos, punto de vista que se acerca más al que, como veremos, desarrolló la escuela norteamericana, y que ya había sido resaltado por su compatriota Surrell en 1841. También Dokuchaev (1846-1903), el científico ruso que luego dedicaría su atención al estudio de los suelos, se interesa por la acción fluvial. Otros autores señalan la importancia de la acción de los glaciares, como el suizo Agassiz en su estudio de 1840.

En los Estados Unidos de América es la época de la colonización del lejano oeste, la cual atrae a numerosos naturalistas al descubrimiento de nuevos espacios. En el caso que nos ocupa cabe destacar el trabajo llevado a cabo por exploradores tan famosos como Powell (1835-1902), Gilbert (1843-1918) y Dutton (1850-1934). Todos ellos realizaron importantes aportaciones al corpus teórico de los que hoy llamamos Geomorfología, sobre todo por lo que se refiere a la importancia de las aguas continentales, o denudación subaérea, a la que consideran responsable de la mayor parte del modelado, no sólo por lo que se refiere a la abertura de valles sino precisamente en relación a los grandes aplanamientos continentales.

Sobresale de una manera especial la aportación de Gilbert, figura que el paso del tiempo no ha hecho sino acrecentar, especialmente en relación al cambio producido desde los años cincuenta en el paradigma y la actitud que dominan la ciencia geomorfológica. Por ello los investigadores actuales encuentran en él a su precedente, al autor que simboliza y justifica su propia trayectoria científica (Gilluly, 1970; Baker y Pyne, 1978). Su modernidad abarca varios aspectos. Por una parte, su prosa concisa y exenta de polemismos. Por otra, su método científico (Gilbert, 1886) basado en hipótesis de trabajo que son posteriormente comprobadas, tanto a nivel teórico y cuantitativo como a nivel de observación directa en el campo y el laboratorio. Finalmente la utilización del concepto de sistema en el sentido de que todo cambio es siempre compensado y, por tanto, en el caso de ríos y vertientes existe siempre un estado de equilibrio dinámico. Lo cierto es que Gilbert fue más escolar que dialéctico, se interesó más por los procesos físicos que por la historia fósil, su visión de las formas fue más mecánica que orgánica, se preocupó más por el equilibrio dinámico de las formas que por su evolución. Su enfoque es actual porque pone el énfasis en la acción de los procesos externos sobre las estructuras geológicas, considera las formas del terreno como el resultado de la tensión entre la fuerza de los agentes erosivos y la resistencia de las rocas a los mismos. Entre sus trabajos más destacados hay que mencionar los relacionados con la escorrentía y la erosión en las vertientes, la mecánica del transporte fluvial y la evolución de laderas (Gilbert, 1909, 1914).

#### 5.2.4. Sistematización

El desarrollo de un corpus de doctrina, por lo que hace referencia a la comprensión del conjunto del relieve terrestre, tiene lugar con la aportación de Davis (1850-1934), otro geólogo norteamericano, quien describió la erosión o modelado de la superficie de la tierra como dependiente de la energía cinética, decreciente en el tiempo, de las aguas de escurrimiento sobre los relieves levantados por las fuerzas tectónicas (Johnson, 1954). Davis fue un excelente sistematizador del material de investigación existente en su tiempo, así como un gran expositor de sus propias ideas. La teoría que formuló la denominó ciclo geográfico (Davis, 1899), aunque también se la conoce con el nombre de ciclo de erosión o teoría de la peneplanización. Las bases de la teoría de Davis arrancan de la gran revolución científica producida en el siglo XIX, de la síntesis derivada de la conjunción de las ideas de Hutton, Lyell y Darwin. A todo ello incorpora observaciones de campo, las propias y las realizadas por los primeros exploradores del oeste de los Estados Unidos de América, especialmente por Powell, Dutton y Gilbert. El primero había formulado la hipótesis de un nivel de base como control del desarrollo de la erosión, el segundo introdujo los conceptos de denudación continental, y el tercero observó la tendencia a la convexidad de las cabecezas de las vertientes y estableció la ley de la capacidad del transporte de los cursos de agua en vertientes y en valles.

Aunque no se trata aquí de analizar en detalle la aportación de Davis al pensamiento geomorfológico, sí es conveniente apuntar el contenido de sus postulados fundamentales: 1) Las formas de relieve son función de tres factores, la estructura geológica, los procesos de erosión y el estado de desarrollo o tiempo de acción de los procesos sobre la estructura. De esta trilogía, el tiempo es para Davis el elemento fundamental; de ahí su segundo postulado. 2) Las formas del modelado evolucionan gradual y sistemáticamente, pasando en ordenada sucesión por estadios perfectamente identificables, los llamados de juventud, madurez y senectud. Esta evolución del relieve se produce en ciclos sucesivos, en cada uno de los cuales alterna una fase corta de constitución del relieve por la acción de las fuerzas tectónicas, y una fase larga de destrucción del mismo bajo la acción de los procesos de denudación subaéreos (Figura 5.2). El énfasis en el factor tiempo y en el desarrollo evolutivo de los paisajes hacen de la Geomorfología preconizada por Davis una ciencia fundamentalmente histórica. También es importante en el planteamiento de Davis el hecho de que considerase como esenciales en la denudación la acción del agua en vertientes y valles, y los movimientos en masa lentos en las vertientes, es decir, los procesos que se dan comúnmente en los países templado-húmedos, a los que consideró como procesos normales de denudación, dando a los procesos ligados a otros climas el valor de accidentales.

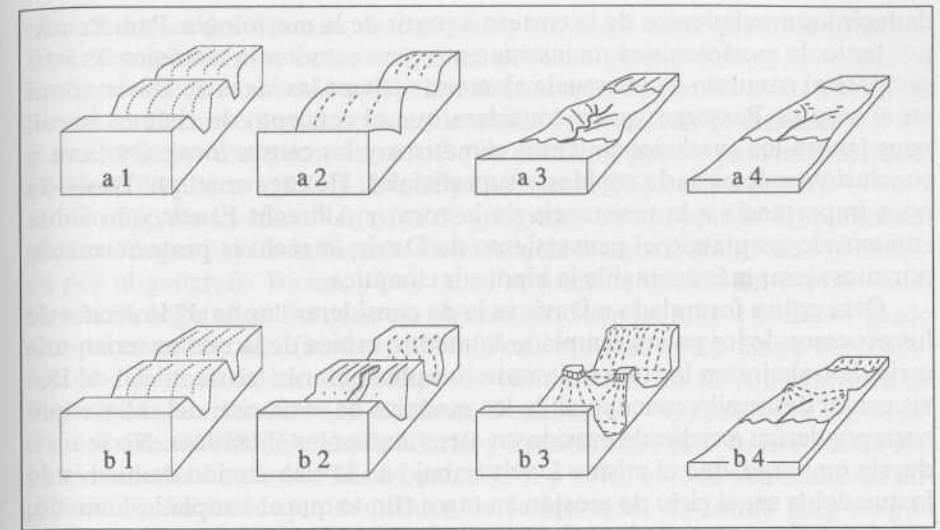


Figura 5.2. Estadios en el ciclo de erosión. a) según Davis; b) según King.

Davis fue, además del gran sistematizador de los conocimientos de su tiempo, un gran divulgador de sus ideas, una de las virtudes de las cuales fue su extrema simplicidad, buscada consciente y explícitamente, por el interés que tuvo en que fuesen la base de un estudio geográfico del relieve (Davis, 1889). Pero aún cuando la popularidad de los postulados davisianos fue inmediata y extensa, también es cierto que ya en su tiempo surgieron ciertas críticas a sus teorías. De esta controversia, en la que ha habido defensores y detractores de las ideas de Davis, surge hasta cierto punto la actual división de la ciencia geomorfológica en varias ramas, todas ellas con una base teórica propia y que de hecho contribuyen al conocimiento más completo del relieve terrestre, al poner el énfasis en los diferentes conceptos del mismo.

#### 5.2.5. Controversia

Walter Penck (1924) fue quien más decididamente se opuso a la conceptualización davisiana, y lo hizo desde una perspectiva estructural. Es decir, Penck cree que el factor preponderante en el modelado de las formas del relieve es la estructura geológica, en especial la que hace referencia a la acción de las fuerzas tectónicas. Considera, en total oposición a Davis, que la forma de las vertientes es función de la mayor o menor actividad tectónica del área, la cual genera más o menos potencial erosivo, y por tanto, intenta

deducir los movimientos de la corteza a partir de la morfología. Para Penck, por tanto, la morfología es un instrumento para estudiar la tectónica. Prácticamente el conjunto de la escuela alemana rechazó las ideas de Davis, como en el caso de Passarge, quien considera que el concepto de ciclo es irreal, pues ignora los condicionamientos climáticos y las causas locales, y lleva a conclusiones demasiado rápidas y superficiales. Hettner cree que Davis da poca importancia a la resistencia de la roca, y Albrecht Penck, que había comenzado aceptando el pensamiento de Davis, lo rechaza posteriormente por considerar más aceptable la hipótesis climática.

Otra crítica formulada a Davis es la de considerar "normal" la acción de los procesos de los países templado-húmedos, crítica de la que nacieron una serie de trabajos en los que se intenta complementar la teoría inicial de Davis con el desarrollo conceptual de los modelos de evolución del relieve que corresponderían a ciclos de erosión en otros ambientes climáticos. No se olvide, sin embargo, que el mismo Davis trabajó en la elaboración deductiva de lo que debía ser el ciclo de erosión en otros climas que el templado-húmedo, como muestran sus trabajos sobre climas áridos y glaciares de montaña.

Posteriormente a Davis quienes mejor desarrollaron sus teorías fueron Cotton (1941) en Nueva Zelanda, Peltier (1950) en los Estados Unidos de América, Wooldridge (1950) en Gran Bretaña, De Martonne (1946) y Baulig (1952) en Francia, Macar (1946) en Bélgica. En España la tradición geomorfológica ha estado muy marcada por sus orígenes geológicos (E. Hernández Pacheco 1932) más en la línea de Penck, pero también se deja sentir la influencia de Davis, como es el del estudio general de las superficies de erosión en la Península Ibérica (Sole Sabaris y Llopis Llado, 1952) y el específico de las Cordilleras Costeras Catalanas (Sole Sabaris, 1940) y de la Cordillera Central (F. Hernández Pacheco, 1932).

En el marco de los paisajes semi-áridos de Australia, King (1953), partiendo de lo expuesto por Davis y por Bryan sobre la morfología de las áreas secas de los EEUU, así como en base a la evolución de vertientes defendida por W. Penck, elabora una teoría alternativa a la propuesta y defendida por Davis, la llamada pediplanización, con la idea de que el clima "normal" bajo el que evoluciona la mayor parte de paisajes es el semiárido (Figura 5.2).

De la importancia climática en el desarrollo de los ciclos de erosión, defendida por los autores arriba mencionados, se llega de manera lógica a la concepción de la existencia de conjuntos de formas o paisajes con un carácter específico, en función no tanto del tiempo, sino más bien del conjunto de procesos que tienen lugar en los diferentes ambientes climáticos. No obstante, la influencia del clima sobre el carácter de las formas de relieve está ya implícita en el concepto germánico tradicional del paisaje, en el que se incluye la percepción de todos los aspectos visuales del terreno, la explica-

ción de los cuales necesita en casi todos los casos tener presente al clima. Esta idea también se encuentra en el norteamericano Eakin, así como en los franceses de Martonne y Cholley. El concepto de control climático en las formas del relieve ha sido posteriormente desarrollado al máximo por los geomorfólogos europeos, entre los que destacan por su pionerismo Büdel (1950, 1977), Tricart (1953), Tricart y Cailleux (1955) y Birot (1960).

En España la entrada masiva de geógrafos en trabajos de Geomorfología tiene lugar bajo la influencia de la escuela francesa, sobre todo la liderada por el geógrafo Tricart, y por tanto se inscribe dentro del ámbito de la Geomorfología climática, que no obstante incluye en mayor o menor grado el aspecto estructural (Muñoz, 1984a; Peña Monné, 1991). Entre los pioneros de esta línea de investigación cabe citar a Rosselló (1970), Martínez de Pisón y Muñoz Jiménez (1972), Sanz Donaire (1974), Llobet (1975), Ménsua e Ibáñez (1978), Gutiérrez Elorza y Peña Monné (1979). Los cursos impartidos anualmente por Tricart entre 1973 y 1979, bajo el patrocinio de Solé Sabarís, hicieron que su influencia se ejerciera de forma muy amplia entre las nuevas generaciones de geomorfólogos.

#### 5.2.6. Perspectivas

Visto desde una perspectiva actual, se puede decir que la crítica realmente más profunda y efectiva del esquema davisiano ha sido la llevada a cabo, aunque sin prácticamente polemizar sobre ello, por la misma escuela norteamericana. Y ha sido de nuevo precisamente con la crítica a Davis que se ha generado y desarrollado una nueva temática en Geomorfología, en este caso centrada en la cuantificación y el estudio de los procesos que generan el modelado.

El primer embate proviene de Horton, de quién ya se ha hablado a propósito de la Hidrología, el cual vio la necesidad de superar el nivel descriptivo y especulativo de la escuela de Davis y de llevar a cabo estudios que fuesen cuantitativos, experimentales y con una base teórica. Horton (1945) desarrolla una descripción cuantitativa de la red de drenaje fluvial, a fin de que sea posible predecir el comportamiento fluvial. También elabora un modelo de escorrentía y erosión del agua en las vertientes, y de los procesos hidráulicos.

Además de los de Horton, otros estudios cuantitativos constituyen también un precedente de la Geomorfología actual, como son los de Rubey (1938) sobre el movimiento de las partículas en un lecho fluvial, y de Bagnold (1941) sobre la física del movimiento de las arenas por acción del viento. Poco después Strahler (1952a) formula las que pueden considerarse bases de la geomorfología moderna: a) énfasis en el estudio de los procesos

que rigen el modelado; *b*) enfoque de carácter dinámico, es decir, fundado en los principios de la física; *c*) formulación de modelos matemáticos; *d*) deducción racional partiendo del análisis de datos empíricos fruto de la observación; *e*) análisis hechos en términos de sistemas abiertos, o lo que es lo mismo, tendentes a alcanzar estados de dinámica estable y a autorregularse.

El vacío conceptual dejado por Davis, con teorías basadas en el evolucionismo darwiniano, es sustituido por la idea que en los años cincuenta invade el mundo científico, la teoría de sistemas. Partiendo de ella, Hack (1960) propone una alternativa al ciclo de erosión basada en el concepto de equilibrio dinámico, con lo cual se vuelve, hasta cierto punto, al enfoque de Gilbert. Según este supuesto, todas las formas del terreno están mutuamente ajustadas, de manera que reflejan el equilibrio que existe entre la estructura geológica y el proceso de modelado dominante. Esta forma o formas, producto del equilibrio, prevalecen mientras prevalezcan el o los procesos que las determinan. Por tanto, en el caso ideal, los procesos se hacen independientes del tiempo, aunque en la realidad puedan existir cambios en el clima o la tectónica que alteren los procesos y sus tasas. Pero entonces no tarda en establecerse una nueva forma, en equilibrio con los nuevos procesos y, por tanto, la mayor parte de la topografía vuelve al equilibrio dinámico inicial. Este concepto diverge totalmente del de Davis, y así ambos pueden ser considerados como casos finales y extremos de un espectro de posibilidades geomorfológicas, que van desde una total dependencia del tiempo (Davis) a una total independencia del mismo (Hack). Se trata, en la nueva Geomorfología, de visualizar las formas del terreno más en su aspecto espacial que en su aspecto temporal, con lo cual se hace de la Geomorfología una ciencia más física que histórica.

### 5.3. Tendencias actuales

Después del período que, utilizando la terminología de Kuhn (1962), podemos considerar como revolucionario, encontramos en la Geomorfología nuevos paradigmas dentro de los cuales pueden distinguirse varios aspectos, desde la misma definición del marco teórico en el que se mueve la disciplina, hasta la temática preferida por la mayoría de los autores, así como los métodos y técnicas empleados para su estudio.

#### 5.3.1. La teoría de sistemas

En Geomorfología, aunque la formulación explícita de la aplicación de la teoría de sistemas se debe a Chorley (1962), lo cierto es que existen pre-

cedentes de utilización en varios autores. Cotton (1941) utiliza el término cuando trata de las alteraciones climáticas pleistocenas, Horton (1945) lo aplica al estudio de la cuenca fluvial, Strahler (1952a) cree que debe ser la base de todo estudio geomorfológico, y lo aplica al caso de las vertientes (Strahler, 1950) y de las cuencas de drenaje (Strahler, 1952b). En Francia Cholley (1950) también adopta un concepto similar para el conjunto de la Geomorfología, y Tricart y Cailleux (1955), con el nombre de sistemas morfogenéticos, lo aplican al ámbito de la Geomorfología climática.

Es interesante constatar cómo la adopción de la teoría de sistemas no ha hecho, en realidad, cambiar las tendencias que desde siempre han existido en los grupos nacionales. Así, este nuevo paradigma es utilizado por la escuela analítica anglosajona en el estudio de los procesos y su mecánica, por la escuela europea para los estudios climáticos, y por la escuela soviética en temas estructurales y aplicados. Algunos geomorfólogos, no obstante (Howard 1965), consideran la teoría de sistemas como una colección conglomerada de conceptos más que como una verdadera teoría y creen que, como el ciclo de Davis, sólo sirve para formalizar algo que ya se sabe previamente, de manera que más bien complica el conocimiento adquirido por la investigación.

El concepto de sistema cerrado, es decir, con límites a través de los cuales no circula materia ni energía, y que de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica debe evolucionar hacia un estado de equilibrio tendente a la entropía, ha sido aplicado por Lepold y Langbein (1962) al desarrollo de las formas del relieve, expresado en términos de probabilidad de distribución de la energía en base a las redes de drenaje. Además, también se ha utilizado para reinterpretar la idea del ciclo de Davis y situarlo dentro del marco de la ciencia actual, al considerarla una explicación geomorfológica basada en un sistema cerrado, en el que la entrada de materia se realiza de una sola vez por la tectónica y se va redistribuyendo posteriormente hasta llegar a una total inactividad (Chorley, 1962).

Los sistemas abiertos se caracterizan por la circulación continua de flujos de materia y energía a través de sus límites, y por mantener una condición constante a pesar de esta dinámica, por lo que su estado es lo que viene en llamarse de dinámica estable. La superficie de la tierra constituye un sistema abierto, puesto que en ella la materia es suministrada por el diastrofismo o vulcanismo y la energía se deriva de la radiación solar, la gravitación, la inercia rotacional y el calor interno. También cada uno de los procesos geomorfológicos constituyen sistemas abiertos y por tanto las formas que modelan han de entenderse como en equilibrio dinámico, si bien con cambios en relación a los cambios de energía (Hack, 1960; Howard, 1965).

Chorley y Kennedy (1971) han clasificado los sistemas geomorfológicos según su estructura o complejidad en: *a*) morfológicos, los que consisten en

una red estructurada de relaciones entre las partes que constituyen el sistema; b) en cascada, los dinámicos que contienen entradas de energía y de masa; c) de proceso y respuesta, los que presentan relaciones entre forma y proceso, es decir, incluyen los dos anteriores.

### 5.3.2. El estudio de procesos

Mientras el enfoque sistémico proporciona un marco conceptual en el que desarrollar la investigación, desde el punto de vista temático la Geomorfología más reciente se caracteriza por el énfasis en el estudio de los procesos actuales y su relación con el modelado. Recordemos que este es uno de los aspectos de la trilogía propuesta por Davis para estudiar y entender las formas del relieve. Pero mientras en la Geomorfología clásica la aproximación a los procesos es, en general, descriptiva o vaga, en la Geomorfología actual su estudio se ha convertido en el medio principal de todo intento de explicar las formas del relieve, dando lugar a lo que podríamos considerar una nueva Geomorfología, la dinámica o de los procesos, también llamada funcional (Ankert, 1980).

Si bien la idea de una Geomorfología dinámica parte de Strahler (1952a) y se encuentra presente en otros autores de la misma época (Dylick, 1957; Ttricart y Cailleux, 1955), el desarrollo exponencial de la misma se halla vinculado a los trabajos de Geomorfología fluvial llevados a cabo en los EEUU, tanto desde la Universidad (Strahler, Wolman, Schumm, Hack, etc.), como desde el Servicio Geológico (Leopold, Maddock, Langbein, etc.). La descripción estadística de sistemas fluviales y de vertientes, llevadas a cabo por Strahler (1950, 1954), la aparición en la misma época de los artículos de Leopold y Maddock (1953) sobre geometría hidráulica y de Schumm (1956) sobre evolución de cárcavas, son el inicio de una serie de trabajos que van a poner los cimientos de una Geomorfología en la que las formas del terreno tratan de explicarse mediante el examen de los mecanismos que rigen su desarrollo y no por su significación histórica. Todo ello tiene su plasmación en la publicación del manual de Leopold, Wolman y Miller (1960), el cual no sólo trata de procesos fluviales sino que pretende ser un texto de Geomorfología de procesos, ya que en él se consideran también los procesos de meteorización, o sea, de preparación del material a ser removido, y los procesos en las vertientes, es decir, de movilización del material hacia el curso fluvial.

A partir de este momento, el estudio de la gran variedad de procesos que actúan sobre el relieve se generaliza y abarca no sólo el ámbito de la investigación, en el que puede considerarse modélico el balance que hace Rapp (1960) en Suecia de todos los procesos que actúan en una cuenca de

drenaje, con especial énfasis en los movimientos en masa (Figura 5.3), sino que se extiende a la publicación de libros de texto o colecciones de artículos, especialmente por parte de la escuela británica, dedicados exclusivamente a tratar los mecanismos y efectos de los diferentes procesos.

Es justo destacar que en España el desarrollo de la Geomorfología de procesos parte de la relación de geomorfólogos españoles con alguna de las Comisiones de la Unión Geográfica Internacional, como las de "Procesos Geomorfológicos Actuales", "Experimentos de Campo en Geomorfología" y "Medición, Teoría y Aplicación en Geomorfología (Sala, 1983a; García Ruiz *et al.*, 1986). La reunión celebrada en España en 1986 por esta Comisión marca un hito importante en la apertura a las corrientes modernas y a la participación en proyectos y publicaciones internacionales (Calvo y La Roca, 1988; Gallart y Clotet, 1988; Gutiérrez *et al.*, 1988; Romero *et al.*, 1988; Sancho *et al.* 1988).

El estudio a fondo de los procesos geomorfológicos ha hecho revivir una de las polémicas clásicas en la interpretación del relieve terrestre, a saber, la que contrapone la concepción catastrofista y la concepción uniformitarista. Planteada la cuestión en términos actuales, se trata de discernir si es más efectiva en el modelado la acción de procesos de magnitud elevada y frecuencia baja, o lo son más los procesos de magnitud baja pero de frecuencia alta. Quienes replantearon el problema fueron Wolman y Miller (1960) en un trabajo que se ha hecho clásico en Geomorfología. La conclusión a que llegan es que, en el modelado, son más importantes los procesos de magnitud baja pero de frecuencia alta, aunque no por esto dejan de reconocer que algunas formas del relieve deben su constitución a procesos de gran magnitud pero muy esporádicos en el tiempo, como en el caso de la mayoría de abanicos aluviales. Si bien el debate actual no tiene ni mucho menos el carácter de combativo que tuvo en la época de Lyell, no es menos cierto que muchos geomorfólogos han dedicado su atención al mismo y, lo que es más importante, lo tienen en cuenta en sus trabajos de investigación. La cuestión estriba en discernir, en cada caso, la magnitud y frecuencia del proceso estudiado como base para la comprensión de su repercusión en el modelado.

### 5.3.3. Las técnicas cuantitativas y experimentales

Una de las características más sobresalientes de la Geomorfología moderna es la adopción de forma casi masiva de los métodos cuantitativos, y han dado posteriormente lugar a una Geomorfología de base cuantitativa y matemática (Scheidegger, 1970; Carson y Kirkby, 1972). Dentro de estos métodos y técnicas cuantitativos, uno de los aspectos más sobresalientes es la amplia incorporación a la investigación de las mediciones y experimenta-

ciones en el campo y en el laboratorio. El trabajo de laboratorio puede considerarse el más tradicional dentro de la disciplina, y se encuentran manuales ya en los años sesenta (Cailleux y Tricart, 1963; Koster, 1964), especialmente por lo que se refiere a los estudios sedimentológicos. Más nueva es la tendencia de llevar a cabo mediciones en el campo. Si bien las instalaciones pioneras, y que todavía siguen en curso, se remontan a los años cincuenta y fueron llevadas a cabo por investigadores tan prestigiosos como Cailleux en Francia, Jahn y Gerlach en Polonia, Rapp en Escandinavia (Figura 5.3), Mackay en Canadá, Leopold en los Estados Unidos de América, Roose en

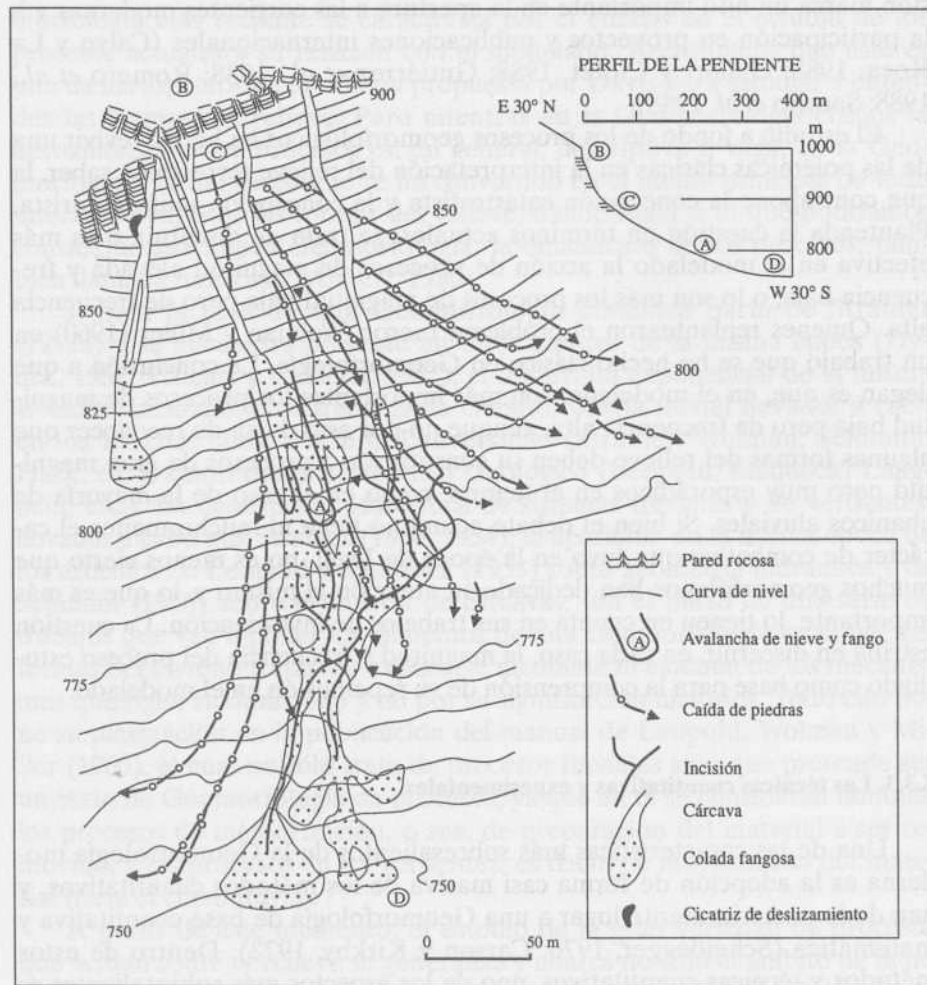


Figura 5.3. Observación y medición de movimientos en masa (a partir de Rapp, 1960).

África Ecuatorial, Dedkov en la ex Unión Soviética, no es hasta los años setenta cuando su utilización se generaliza, por tratarse de una metodología que se considera casi indispensable para el estudio de los procesos geomorfológicos (Slaymaker, 1980; Sala, 1983b; Sala y Gallart, 1988).

Los llamados experimentos de campo pueden ser clasificados en tres tipos según Slaymaker (1980): *a*) mediciones de la *evolución de una forma* del relieve; son el tipo que ha sido más utilizado desde los investigadores pioneros y sirven para aportar datos sobre la magnitud y frecuencia de acción de los procesos; *b*) mediciones de los *cambios morfológicos en diferentes conjuntos*; contribuyen a establecer las variaciones espaciales y temporales entre procesos y a determinar los focos de erosión; llevan implícito un plan de muestreo y son del tipo que tiende a adoptarse de forma más generalizada en la actualidad; *c*) mediciones de la *acción de un proceso bajo el control artificial* de alguna de las variables; es la única clase de medición que puede considerarse realmente un experimento puesto que se realiza en condiciones controladas, similares a las que se pueden obtener en un laboratorio; todavía poco abundantes entre los geomorfólogos, son comunes entre hidrólogos, agrónomos e ingenieros, y se considera que la Geomorfología debería tender a ellos.

Según Anhart (1980) debe hablarse de mediciones observacionales y de mediciones experimentales. El objetivo de las primeras es obtener valores de los parámetros naturales sin interferir con el medio, pues se pretende cuantificar la tasa del proceso observado tal y como opera en condiciones naturales, y por tanto, sujeto a multitud de interferencias. Las mediciones experimentales en cambio, intentan soslayar lo más posible el "ruido" y obtener resultados sobre un número muy limitado, pero preciso, de elementos o de sus relaciones; sus resultados se quiere que sean útiles para la identificación o la formulación de reglas o leyes generales que gobiernan la acción de los procesos envueltos. Esta distinción entre mediciones observacionales y mediciones experimentales se aplica tanto a las que se efectúan en el campo como a las que pueden efectuarse en un laboratorio, y no se debe nunca confundir una medición, por precisa que sea, con un experimento, aunque la evaluación de éste no sea absolutamente precisa. Así, no todo trabajo llevado a cabo en la asepsia de un laboratorio es experimental, como puede ser el caso de la medición granulométrica de sedimentos, del establecimiento de una composición química, etc. En cambio, sí constituyen experimentos geomorfológicos, tanto de campo como de laboratorio, el estudio, mediante simulación de lluvia, de distintos procesos de erosión (impacto de las gotas de lluvia, escorrentía superficial, etc.), o el estudio del comportamiento fluvial mediante la utilización de lechos artificiales, investigación que puede, asimismo, llevarse a cabo tanto en el campo como en el laboratorio. Finalmente, es importante señalar que en estos momentos existe cada vez

más una progresiva integración de los estudios de laboratorio y los estudios de campo.

#### 5.3.4. La modelización

Un experimento, por el hecho de representar un sólo segmento de la realidad, es un modelo de las condiciones y procesos naturales. En contrapartida, los modelos teóricos que incluyen procesos son asimismo experimentos (Anhert, 1980). Las mediciones empíricas se consideran más útiles si pueden proporcionar la base para la formulación, verificación y reajuste de una teoría, de la misma manera que la principal tarea de la teoría es sugerir nuevas direcciones para la investigación empírica; en resumen, uno no puede avanzar sin el otro. Una consecuencia de la obtención de datos empíricos ha sido la tendencia, cada vez más extendida, de intentar reducir a modelos los procesos estudiados.

Un modelo es una reproducción esquemática de la realidad, una abstracción. Confeccionarlo resulta una forma importante de investigar el desarrollo de alguno de los procesos que tienen lugar dentro de un sistema. Pueden dividirse en tres clases (Chorley, 1967; Chorley y Kennedy, 1971): modelos a escala, modelos análogos y modelos matemáticos. En los modelos a escala se utilizan materiales similares a los de un sistema real, pero a escala geomorfológica y cinemática menor (agua y sedimento en un recipiente reducido para simular el desarrollo de meandros). En los modelos análogos se usan materiales diferentes (el potencial eléctrico simulado por el nivel freático cambiante). Finalmente en los modelos matemáticos se generan formas o procesos mediante la simulación (desarrollo de redes de drenaje, de evolución de vertientes). Hay que tener presente, sin embargo, que, lo mismo que la cuantificación, la elaboración de modelos no es algo nuevo en Geomorfología, aunque sí lo sea la proliferación de su uso.

El estudio de los procesos geomorfológicos, hecho en un principio de forma cualitativa pero posteriormente por medio de la cuantificación y la experimentación, ha desembocado finalmente en la utilización de modelos matemáticos, con los que se pueda determinar o deducir la relación entre proceso y forma, entre causa y efecto, es decir, entre actividad geomorfológica y respuesta del sustrato a su impacto. El lenguaje matemático, especialmente lo que se refiere a ecuaciones diferenciales, ecuaciones de continuidad, de difusión y de sistemas, permite manipular series de relaciones y llegar así a predecir modelos proceso-respuesta aplicables a la Geomorfología (Thornes y Brunson, 1977). Trabajos pioneros y significativos en este sentido son los de Culling (1960), Scheidegger (1970), Anhert (1970), Kirkby (1971), Carson y Kirkby (1972).

Existe, evidentemente, un período de desfase entre la aparición de las tendencias pioneras y su generalización dentro de la comunidad científica. Si partiendo de lo que puede observarse en lo que se refiere a la tendencia a la medición de procesos en el campo, cuyo inicio puede situarse en los años cincuenta y su eclosión en los años setenta, admitimos el supuesto de que el lapso de tiempo entre ambos es de unos veinte años, y si en base a los temas que aparecen en revistas especializadas y en coloquios y reuniones internacionales, deducimos que la elaboración de modelos tiene su inicio en los años sesenta y setenta, podemos predecir que la generalización de esta corriente en Geomorfología tiene muchas probabilidades de producirse en la década de los años noventa.

#### 5.3.5. El concepto de escala

Esta es una idea clave en Geomorfología, puesto que está en la base de toda delimitación correcta de área de estudio, así como de los métodos y técnicas más adecuados a emplear en función del tipo de problema que se intenta resolver. Contribuye además decisivamente a enmarcar adecuadamente, y así clarificar algunos de los grandes debates que se dan dentro de las disciplinas.

La importancia del concepto de escala en Geomorfología ha sido puesta claramente de relieve por Tricart (1952) y por Cailleux y Tricart (1956). Según estos autores existe una relación estrecha entre la dimensión de la forma estudiada y el tiempo que ésta ha tardado en evolucionar. Distinguen siete órdenes de magnitud, que en el aspecto espacial van desde  $10^7$  km<sup>2</sup> a  $10^{-8}$  km<sup>2</sup>, y en el aspecto temporal desde  $10^9$  a  $10^2$  años. Para cada rango se definen: a) los caracteres generales de cada unidad geomorfológica; b) los de las unidades climáticas equivalentes; c) los de los mecanismos o procesos básicos que las gobiernan, así como la metodología con que deben ser estudiadas.

Otra consideración interesante de las implicaciones del concepto de escala en Geomorfología es la llevada a cabo por Schumm y Lichty (1965), quienes tratan el tema bajo la óptica de la teoría de sistemas y se centran esencialmente en el aspecto temporal. Consideran que en un período de tiempo largo, un espacio geomorfológico puede ser considerado como un sistema que pierde progresivamente energía potencial y masa, como en el caso de la teoría del ciclo de erosión de Davis. Pero en un lapso de tiempo más corto, la autorregulación ya es importante, y algunos componentes del sistema pueden estar en equilibrio dinámico. En un lapso de tiempo todavía más corto, también es posible un estado de equilibrio, en este caso equilibrio estable.

Con esta aproximación basada en el concepto de escala se consigue armonizar e integrar en el conjunto de la disciplina la Geomorfología de pro-

cesos con la Geomorfología climática y la histórica, puesto que cada una se sitúa a una escala temporal y espacial diferente y, por tanto, no son mutuamente excluyentes, sino por el contrario, ambas válidas dentro de su contexto. Bajo este punto de vista quedan también justamente enmarcados los estudios de carácter regional, es decir, los que tratan de la distribución espacial de las formas del relieve y de los diferentes paisajes a que ello da lugar.

### 5.3.6. El estudio ambiental

Con este término se designan aquellos estudios geomorfológicos que tratan problemas estrechamente relacionados con el medio ambiente, y lo hacen con el fin de obtener información que sea aplicable a una mejor gestión del mismo. Pueden ser tanto en lo que se refieren a procesos de tipo catastrófico como a procesos de acción continua y uniforme. Y de entre ambos, tanto los que tienen un origen puramente natural como los que están provocados directa o indirectamente por la acción antrópica. La preocupación por la conservación del entorno natural, por su utilización racional, se ha hecho seguramente más necesaria que nunca en una época en que el poder del hombre sobre la naturaleza es ciertamente muy intenso y extendido, y ello tiene una lógica repercusión en Geomorfología. Además, cada vez con mayor frecuencia los Programas de Investigación, tanto nacionales como internacionales, requieren un complemento aplicado de la misma.

Muchos de los más renombrados investigadores han dedicado parte de su tiempo a tratar problemas relacionados directa o indirectamente con temas aplicados. Como ejemplos de pioneros destacados se puede citar a Leopold (1962) al propugnar el inicio de bancos de datos en relación a procesos en cuencas de drenaje, por su interés de base no sólo en la investigación, sino por su aplicación en Geomorfología, Hidrología e Ingeniería. También a Tricart (1962), quien ha trabajado profusamente tanto en textos destinados a promover este enfoque como en proyectos de ordenación del territorio, nacionales e internacionales. Y a Verstappen (1968) en relación al ITC, centro de estudios holandés, hoy día con delegaciones en varios países del tercer mundo, donde precisamente se enseñan temas de aplicación de los conocimientos geomorfológicos al reconocimiento, previsión y control de riesgos ambientales.

Las bases teóricas y técnicas de la Geomorfología ambiental proceden de la Geomorfología de procesos, que ha dado al geomorfólogo una comprensión cada vez más completa de los mecanismos que rigen el medio ambiente, y por tanto de sus alteraciones (Cooke y Doornkamp, 1974; López Bermúdez, 1984). También se utilizan conceptos y técnicas de la Geomorfología estructural y climática, como reconocimiento de rocas y for-

maciones superficiales y cartografía. Los temas más destacados: *a)* alteraciones en cuencas fluviales, producidos por irrigación, deforestación, urbanización, etc.; *b)* procesos de erosión hídrica o eólica causados por agentes naturales y antrópicos; *c)* alteraciones de los canales y llanuras aluviales, especialmente en relación a extracciones de sedimentos y gravas; *d)* alteraciones en la dinámica costera.

## 5.4. Áreas de conocimiento

### 5.4.1. Conceptos y métodos

El primer tema que debe claramente diferenciarse es el de una introducción a la Geomorfología basada en la presentación de sus principios, conceptos y métodos, con lo cual se puede ver toda la amplitud de la disciplina, y así adquirir una mejor perspectiva frente al contenido de los diversos apartados de la misma. Para ello pueden considerarse tres subapartados: *a)* uno dedicado a tratar los principios y fundamentos de la Geomorfología, tales como su naturaleza, evolución histórica, tendencias y debates actuales; son aspectos que han interesado siempre al geomorfólogo, especialmente al que proviene del campo de la Geografía; *b)* otro dedicado a tratar los métodos y técnicas de observación, descripción, experimentación y análisis geomorfológicos, orientados a la explicación científica de los materiales y procesos que conforman y determinan el relieve y su evolución; *c)* los conceptos generales básicos que rigen la configuración de toda forma de relieve, es decir, la estructura, procesos y acción de clima y tiempo, con lo cual pueden quedar sentadas las bases de un posterior conocimiento en profundidad de cada uno de ellos.

### 5.4.2. Geomorfología estructural

Esta área de conocimiento constituye un aspecto que, si bien durante muchos años ha sido uno de los más tratados, actualmente tiene un peso relativamente menor dentro de la disciplina. Los avances alcanzados por la Geofísica han hecho de la investigación estructural un quehacer harto complejo, reservado a especialistas en Tectónica y Petrología. Por otro lado, las nuevas técnicas cuantitativas y experimentales permiten un análisis detallado de las formas, con lo cual el estudio de los trazos generales determinados por la estructura aparecen como menos interesantes al geomorfólogo. De entre las diferentes escuelas, quienes más se interesan por el relieve estructural son, por lo general, los autores soviéticos, juntamente con los germanos, franceses y españoles. En el área anglófona la estructura es vista más



bien como soporte, como elemento de resistencia a la acción de los procesos del modelado, es decir, que su estudio no suele tener un fin en sí mismo sino en cuanto a parte condicionante de la dinámica geomorfológica. La Geomorfología estructural se puede dividir en dos apartados: a) uno para tratar los elementos fundamentales del armazón estructural, tales como la constitución del globo, la estructura y dinámica de la corteza terrestre, las rocas y los grandes conjuntos estructurales, todo lo cual forma parte del ámbito estrictamente geológico; b) otro para tratar cuestiones más estrictamente geomorfológicas, es decir, las formas del relieve a una escala en la que aparecen esencialmente condicionadas por la estructura tectónica y litica, si bien sobre ella suele estar impresa claramente la acción de los agentes del modelado, y así puede hablarse de los diversos relieves esculpidos sobre estructuras sedimentarias, cristalinas y volcánicas.

#### 5.4.3. Geomorfología dinámica o de procesos

Ya se ha mencionado la importancia que tienen estos temas en la Geomorfología actual. Hay que señalar el hecho de que, en los últimos años, han aparecido una notable cantidad de textos dedicados a tratar tanto los presupuestos teóricos de la Geomorfología dinámica como a estudiar a fondo los mecanismos y efectos de todos y cada uno de los grandes agentes geomorfológicos, por lo cual las fuentes para el estudio de procesos son abundantes. De seguir como hasta ahora el desarrollo de esta área de conocimiento, no sería de extrañar que, en un futuro, alguno de los apartados consiguiera alcanzar suficiente entidad como para constituir un tema independiente; de hecho ya sucede así a nivel docente, especialmente en muchas universidades anglófonas, donde se dan cursos que tratan exclusivamente de alguno de los procesos, como por ejemplo Geomorfología fluvial, Geomorfología de vertientes, etc. Hay que tratar tanto los presupuestos conceptuales y metodológicos como las bases físicas de la acción de los procesos, tales como la resistencia del sustrato y los tipos de fuerzas físicas que provocan su inestabilidad. Después, separadamente, cada uno de los grandes procesos y formas asociadas: meteorización, movimientos en masa, arroyada, dinámica fluvial, glacial, eólica, del oleaje.

#### 5.4.4. Geomorfología climática

Es otra rama de la Geomorfología en la que se ha producido una notable cantidad de textos destinados a discutir y afianzar las bases teóricas en que se asienta, como el concepto de sistema morfogenético, en definir su posición frente a otros enfoques geomorfológicos, y en presentar los conjuntos

de procesos y formas que componen los diferentes paisajes. Además, al igual que en otras ramas de la Geomorfología, existe una amplitud considerable de principios y métodos procedentes de otras ciencias, puesto que lo que se considera fundamental en el modelado de los diferentes paisajes es la imbricación de los hechos climáticos, biológicos y edafológicos con los estrictamente geomorfológicos. Estos contenidos, así como los que se refieren a alguno de los aspectos del impacto del clima en determinados procesos, tales como la erosión en general y la erosión de vertientes y valles en particular, pueden agruparse en un primer apartado de principios generales. En segundo lugar hay que tratar los grandes temas propios de la Geomorfología climática, entendida como el estudio de los grandes paisajes zonales: glaciares, periglaciares, templado-húmedos, semi-áridos, áridos, cálido-húmedos. También las áreas de montaña deben considerarse como paisajes climáticos, en este caso por su desarrollo altitudinal en contraposición al latitudinal. Es necesario incluir específicamente la zona templada, los paisajes de la cual suelen estar ausentes de los textos clásicos de Geomorfología climática.

#### 5.4.5. Geomorfología histórica

El estudio de la evolución histórica de las formas del relieve constituye, como el estudio estructural, uno de los temas clásicos en Geomorfología, con la diferencia, no obstante, de que en este caso el interés de los investigadores por el tema se ha mantenido notablemente elevado. Discernir la acción del tiempo sobre el relieve es un trabajo que presenta un alto nivel de complejidad, y para llevarlo a cabo es necesario poseer herramientas metodológicas y técnicas depuradas, algunas adquiridas a través de la Geomorfología dinámica; también el conocimiento de la Geomorfología climática resulta útil, puesto que de lo que se trata es de reconstruir procesos y paisajes pasados a través de sus restos y del impacto de los mismos en el relieve actual. Es conveniente tratar primero los temas generales tales como paleorelieves, paleoclimas, etc., así como a los varios criterios cronológicos que suelen utilizarse en los intentos de datación (arqueológicos, estratigráficos, químicos, etc.). Bajo el epígrafe de la acción del tiempo se puede tratar más estrictamente de la evolución de los principales elementos del relieve como valles, vertientes, ríos y costas, así como el impacto de los climas cuaternarios en el paisaje actual.

#### 5.4.6. Geomorfología ambiental

En esta parte de la Geomorfología se trata, más que de proporcionar nuevos conocimientos, de ver la forma en que pueden aplicarse los que el

geomorfólogo ya posee, tanto al estudio de los impactos naturales y antrópicos en el medio como a las condiciones óptimas en que ha de manejarse este medio para evitar las situaciones límite. Puede subdividirse en dos apartados. El primero orientado a tratar lo que se refiere a precedentes y estado actual del tema, a las posibilidades que ofrece la Geomorfología frente a problemas del medio ambiente, y a las técnicas de evaluación de áreas desde varios puntos de vista ambientales: riesgos de catástrofes, destrucción de recursos, pérdida de valores estéticos, etc. El segundo apartado debe tratar de manera sistemática los grandes temas de la Geomorfología de los procesos (meteorización, cuencas de drenaje, acción fluvial de las aguas superficiales y subterráneas, inestabilidad de vertientes, erosión eólica, erosión costera) pero en sus aspectos referidos al impacto ambiental que conllevan y a las posibilidades de conservación del medio.

#### 5.4.7. Geomorfología regional

El estudio regional es quizás uno de los aspectos de la Geomorfología que más popularidad ha perdido en los últimos años, especialmente desde el punto de vista del investigador. Y sin embargo, éste es un tema geomorfológico que puede ser notablemente interesante no sólo para el geomorfólogo, sino también para todo estudioso o amante del mundo natural y de sus paisajes. Es además importante señalar que se vislumbra la posibilidad de una revalorización del enfoque regional, gracias al desarrollo tanto de teorías como de tecnologías que facilitan la comprensión global de las grandes áreas de nuestro planeta, como son la teoría de la tectónica de placas y de los sistemas climáticos, y la técnica de los sensores remotos, todo lo cual permite asentar a la Geomorfología regional en una base científica sólida. La publicación de una obra dedicada específicamente a presentar la Geomorfología de todo un continente, la de Europa concretamente (Embleton, 1984), representa seguramente el inicio de una revalorización de este tipo de estudios. El estudio regional puede enfocarse desde dos puntos de vista, el de las regiones naturales y el de las regiones políticas. Mientras que hay una escasez de textos que específicamente estén dedicados a la Geomorfología de las regiones naturales, hay muchas obras de Geografía regional que recogen una parte importante de estudio del relieve. El problema en estos casos radica en el hecho de que las geografías regionales suelen estar organizadas por países, y, desde un punto de vista geomorfológico, ésta no es una subdivisión representativa; precisamente muchas veces las unidades geomorfológicas sirven de divisoria entre países, como las líneas de cumbre o los cursos fluviales, con lo cual, evidentemente, el estudio de regiones naturales a escala global queda fragmentado.

## 6. Edafología

### 6.1. Introducción

Internacionalmente la Ciencia del Suelo se denomina Pedología, del griego pedon que significa tierra que se pisa, término utilizado tanto como sinónimo de ciencia que estudia las características físicas, químicas y biológicas del suelo como del estudio de la génesis y clasificación del suelo. Sin embargo muchos investigadores prefieren la denominación de Ciencia del Suelo, y a menudo con mención específica del aspecto estudiado, como por ejemplo, Física del Suelo, Química del Suelo, Biología del Suelo, etc.

En España, Huguet del Villar introdujo el término Edafología en el año 1925 (Martí Henneberg, 1984), del griego edafos, también significando tierra, pero incluyendo la idea de espesor. Como él mismo indica, Huguet del Villar llegó al estudio de los suelos procedente de la Geografía y de la Geobotánica. En ésta ciencia el calificativo de edáfico venía empleándose desde largo tiempo, incluso en textos ingleses. Huguet propone el término Geoedafología porque desde su punto de vista la acepción de esta palabra es el de ciencia que trata del suelo en sí mismo y de su influencia en los seres vivos, particularmente las plantas, incluyendo el uso agrícola del suelo por el hombre. Se trata por tanto de un estudio geográfico.

Felipó y Garau (1987) definen el suelo como el soporte y el almacén de las sustancias nutritivas para los organismos terrestres, constituido por una materia sólida y un espacio poroso. La materia sólida está integrada por partículas minerales provenientes del fraccionamiento de las rocas, consecuencia de su alteración, y por materia orgánica o humus, procedente de los restos de las plantas y animales. El espacio intersticial entre las partículas só-

lidas se denomina espacio poroso y puede estar ocupado por aire o bien por una solución de agua y sales diluidas. Tanto el contenido como la disposición de las partículas minerales y orgánicas del suelo originan una estructura en la que tienen lugar procesos de naturaleza física, química y biológica. La adecuada combinación de los diferentes constituyentes del suelo hace posible que sea un medio idóneo para el desarrollo de organismos vivos.

Una de las definiciones más citadas, seguramente por su sesgo romántico, es la de Nikiforov (1959), quien define al suelo como "la piel emocional" de la parte subaérea de la corteza de la Tierra, es decir, como una entidad inestable, similar a un remolino de movimiento muy lento o a un segmento corto de un río; el suelo sería también para este autor una puerta a través de la cual pasa una procesión interminable de átomos, un cuerpo natural de materia mineral y orgánica que cambia o ha cambiado en respuesta al clima y a los organismos. Varios edafólogos han comparado el suelo a un organismo, considerando las adiciones de materia mineral y orgánica como análogos a la alimentación, los cambios en estas materias del suelo como análogos a la digestión, la pérdida de materiales por lixiviación o fuga de gases análogo a la eliminación y exhalación; incluso puede hablarse de reproducción en el caso de suelos de vertiente, cuando la erosión arrastra parte del suelo al fondo de un valle y el suelo aluvial resultante todavía muestra algunas de las características del suelo de origen. En este sentido puede hablarse incluso de un suelo joven, el cual puede hacerse adulto y senil. Evidentemente estas designaciones corresponden a las clasificaciones de Davis para el relieve.

La génesis del suelo trata de los factores y procesos de formación del mismo, y es la base principal del concepto de suelo como una entidad natural que puede ser estudiada en sí misma (Cline, 1961). Este concepto ha sobrevivido a la fragmentación de la Ciencia del Suelo en muchas ramas altamente especializadas. El estudio de la génesis del suelo puede ser comparado a un sistema de puentes que conecta a ocho islas de estudios parciales, las de la Química, Física, Geología, Biología, Ecología, Geografía, Antropología, Agronomía (Buol *et al.*, 1980). A esta lista cabe añadir la de la Hidrología. Cada una de estas "islas" tiene una visión definida del suelo. Los químicos consideran el suelo, tal como ya hizo Liebig en 1840, como una probeta en la que el material ha sido colocado por fuerzas y agentes naturales y al que el hombre añade fertilizantes para incrementar el crecimiento de las plantas. Los físicos ven el suelo como una masa cuyas características y comportamiento cambian a tenor de las variaciones de temperatura y contenido de humedad. Los geólogos consideran al suelo como una unidad epidérmica a través de la cual pasa todo el material del ciclo de erosión, desde la roca hasta los sedimentos depositados en los océanos. Desde el punto de vista del biólogo, el suelo se define como el medio para el creci-

miento de las plantas, lo cual no es del todo satisfactorio en el sentido de que se basa en algo exterior al suelo y además, los lagos, océanos, e incluso glaciares y seres humanos son medios para el crecimiento de hongos, algas, líquenes, musgos o plantas más elevadas. Los ecólogos ven al suelo como parte del ambiente que condiciona y es condicionado por los organismos. En Geografía se estudia el suelo como un elemento del conjunto geográfico y como un bien que hay que preservar de los procesos de erosión y degradación. Para el antropólogo es un registro del pasado. Los agricultores describirían el suelo como una máquina cuyas partes principales son agregados y raíces, y que fabrica productos fito-zoológicos. Para el hidrólogo el suelo es el medio por el que discurre la circulación subsuperficial del agua, uno de los componentes del ciclo hidrológico.

De todos los enfoques, el genético es el que mejor engloba la naturaleza interdisciplinar del tema, y el que confiere al estudio del suelo una mayor importancia en el campo de la preparación científica básica, y además lo relaciona con los problemas de la ecología humana (Abelson, 1964). El estudio genético del suelo incluye la descripción e interpretación de los perfiles, de los corpúsculos, y de los patrones de distribución en la superficie terrestre (Buol *et al.*, 1980). Para estos autores, desde un punto de vista genético no se necesita considerar si un suelo es productor de plantas, de arena o de arcilla, sino que se trata de una colección de cuerpos naturales, relacionados entre sí y con otros factores y fenómenos del medio, de manera que pueden ser evaluados, y sobre todo medidos.

En líneas generales puede decirse que el objetivo del estudio geográfico de los suelos es registrar y explicar el desarrollo y distribución de los mismos en la superficie terrestre (Bridges, 1981), y estudiar las variaciones espaciales de la interacción entre elementos del medio sintetizadas en los suelos (Cruickshank, 1972). Es una rama del saber que se sitúa entre la Ciencia del Suelo y la Geografía, y tiene una importancia particular en ambas disciplinas. Los estudios de suelos pueden llegar a ser una manera de integrar gran parte de la Geografía Física de una forma que resulte ser de suma importancia para el hombre, y por tanto, es coherente con la filosofía del conjunto de la disciplina (Bridges y Davidson, 1982; Ross, 1987).

Ciertamente las investigaciones modernas están demostrando cada día más la estrecha dependencia entre suelos y las demás ramas de la Geografía Física. Por ejemplo con la Geomorfología, llegando incluso a escribirse textos en base a ello, como los del edafólogo Birkeland (1984) y de los geógrafos Richards *et al.* (1985); incluso algunos han llegado a proponer estudios específicos de Geomorfología y Edafología en el marco de una nueva disciplina, en la que se incorporen los enfoques tradicionales del estudio edáfico junto a la moderna ingeniería de suelos, y los enfoques geomorfológicos tradicionales junto a la Geomorfología de procesos (Gerrard, 1981). Más evi-

dente es la relación entre suelos y vegetación, de tal forma que el estudio del suelo forma parte integrante de los textos tradicionales de Biogeografía. Hoy día la cantidad de información acumulada, tanto en el estudio de la vegetación como en el del suelo, hace que ambas materias se presenten a menudo por separado. Sin embargo, sobre todo en el aspecto de sistemas naturales, suelos y vegetación forman un conjunto indisoluble (Trudgill, 1977). También con la Hidrología hay interrelaciones puesto que algunas de las características del suelo son esenciales para entender la infiltración y movimiento subsuperficial del agua, al mismo tiempo que en Edafología es necesario conocer las leyes que rigen el movimiento del agua en el suelo. En el caso de Climatología la relación es inversa, es decir, son las características climáticas las que condicionan el tipo y desarrollo del suelo.

## 6.2. Evolución histórica

### 6.2.1. Precedentes

Con la excepción de la reciente obra de Porta *et al.* (1994), pocos textos modernos dedicados a suelos contienen un apartado sobre la evolución histórica del desarrollo de la materia. Existen sin embargo obras dedicadas a tratar el desarrollo de los conocimientos sobre el suelo en diferentes épocas y culturas. En el caso de España tenemos la obra de González (1984), las de García-Badell (1950, 1951) sobre la España musulmana y romana, y las de Roquero (1956) sobre la España medieval.

Según Buol *et al.* (1980) y Fanning y Fanning (1989), antes del 1600 las referencias al tema de los suelos tienen, desde un punto de vista científico, un carácter extremadamente elemental. Una de las referencias más antiguas citadas es de hace unos 4.000 años y se refiere al ingeniero chino Yu quien llevó a cabo una clasificación de los suelos según su color y su estructura en nueve grandes clases, subdivididas en otras menores. Sin embargo parece que se trataba más de una clasificación de tierras que de suelos.

Escritores griegos y romanos iniciaron el conocimiento de los suelos sobre una base empírica, y tanto desde un punto de vista teórico como práctico. Así, Aristóteles (384-322 a. C.) y Teofrasto (372-287 a. C.) consideraron el suelo en relación al crecimiento de las plantas. Los escritores romanos que tratan el tema de manera similar incluyen a Catón el Viejo (234-149 a. C.), Varrón (116-27 a. C.), Virgilio (70-19 a. C.) Columela (alrededor del año 45) y Plinio el Mayor (23-79). Columela merece destacarse porque en su libro sobre agricultura lleva a cabo una distinción, aunque muy simple, entre suelos ricos y húmedos, ricos y secos, y blandos y duros, en un intento de distinguir los buenos de los malos para la agricultura.

Porta *et al.* (1994) consideran que la Edad Media no es una época floreciente para el desarrollo científico del estudio de suelos. No obstante, se escriben algunos tratados sobre Agricultura con referencias al suelo. Un excelente libro es el *Libro de Agricultura* de Abu Zacaría, que recopila los conocimientos sobre agricultura y jardinería en el área mediterránea en el marco de la cultura árabe asentada en la Península Ibérica. Además, en las *Etimologías* de San Isidoro de Sevilla se sintetiza el saber de su tiempo sobre Agricultura (Roquero, 1956).

En 1563 Bernard de Palissy (1499-1589), al escribir sobre los efectos de algunas sales en la agricultura, habla del suelo como una fuente de nutrientes minerales para plantas. Más tarde, en 1629, Van Helmont (1577-1644) propuso que la nutrición de las plantas se hacía solamente por el agua que circulaba por entre el suelo. En España destaca la obra *Agricultura General* de Gabariel Alonso Herrera terminada en 1513.

### 6.2.2. Desarrollo

El nacimiento y desarrollo de la Geología al final del siglo XVIII propició un nuevo estímulo para el estudio de los suelos. Se desarrollaron los estudios de campo y con ellos se favoreció la aparición de dos ideas esenciales en el estudio y clasificación de suelos. Primero, los métodos de campo permitieron reconocer cuerpos geográficos de suelos, aunque se interpretaron como directamente dependientes del sustrato durante más de un siglo. En segundo lugar la geología ofreció una primera teoría sobre la génesis de los suelos, en el sentido de que se formaban por la meteorización *in situ* de las rocas o por el transporte y depositación de materiales meteorizados.

A mediados del siglo XIX Thaer (1752-1828) sugirió en su tratado sobre suelos agrícolas, que las plantas asimilan directamente la materia orgánica putrefacta. Justus von Leibig (1803-1873) publicó un libro sobre la química aplicada a la agricultura y a la fisiología, en el cual también afirma que las plantas asimilan nutrientes minerales del suelo, por lo cual propuso el empleo de fertilizantes minerales en la agricultura; de hecho consideraba el suelo como un reservorio pasivo de nutrientes. En esta misma época varios científicos alemanes desarrollaron una Agrogeología, en la que se consideraba el suelo como una roca madre meteorizada algo lixiviada. En 1862, Fallou sugirió que Pedología significaba la Ciencia del Suelo Geológico-Teórico, y que se distingue de la Agrología o Ciencia del Suelo Agronómico-Práctica. Müller escribió una monografía sobre el humus, resaltando la característica biológica de la génesis del suelo forestal.

Más adelante, en la primera década del siglo XX, Ramann empezó a utilizar métodos químicos para establecer diferencias entre suelos y Gedroiz

introdujo el concepto de intercambio de cationes en los suelos. En Inglaterra, Williams (1863-1939) desarrolló el concepto de génesis del suelo como un proceso esencialmente biológico más que geológico, y recalzó que el fitociclo (extracción de nutrientes del suelo por las plantas y su vuelta a la superficie del suelo en forma de hojarasca y tejido de raíces muertas) explica el aumento progresivo en la fertilidad del suelo, y que la mejor síntesis del suelo tiene lugar en tierras de prados.

El sistema de clasificación refleja tanto el estado del conocimiento de la época como las bases en que se asienta la ciencia implicada. Durante el siglo XIX se iniciaron varios sistemas de clasificación de suelos, la mayoría de ellos en base al concepto de suelo como medio geológico para el crecimiento de las plantas, recogidos en Glinka (1931) y que pasamos a mencionar.

Uno de los sistemas más completos de clasificación basado en la Geología se debe a Fallou, que estableció dos categorías principales, suelos residuales o evolucionados sobre rocas meteorizadas, y suelos sedimentarios o desarrollados sobre depósitos, subdivididos luego en 25 clases inferiores en base a las propiedades físicas y químicas de la regolita. Esta clasificación fue seguida en muchas partes del mundo durante más de cincuenta años, y adaptada por el geógrafo alemán Richthofen en Geografía y Geomorfología.

Un esfuerzo para clasificar los suelos en relación a su utilidad para determinados cultivos es la propuesta por Thaer. También Eaton y Beck, en 1820, llevaron a cabo una clasificación de base geológica pensando en una mejora agrícola. Distinguieron entre suelos sedentarios y transportados, y establecieron subclases en relación a la textura. Pero fue Helgard quien llevó a cabo una clasificación en la que hay dos elementos que se apartan de la Geología. En primer lugar tuvo en cuenta las relaciones entre suelo y la forma del terreno, y entre suelo y vegetación natural (llanuras arenosas de robles, praderas calizas, etc.). En segundo lugar, reconoció el papel del clima, como en el caso de las acumulaciones de carbonato en suelos de regiones secas. Finalmente, Davy aportó un nuevo elemento de clasificación al considerar que los suelos están formados por una combinación entre material de meteorización de las rocas y material de alteración de la materia orgánica.

### 6.2.3. Consolidación

Es en Rusia donde nace el estudio científico del suelo. Tiene como precedente a Lomonosov (1711-1765), que escribió y enseñó sobre el suelo entendido como un cuerpo en evolución más que como un cuerpo estático. Pero el padre de la ciencia del suelo es Dokuchaev (1846-1903), quien puso los fundamentos de la Geografía y de la génesis del suelo. Su primer trabajo sobre el tema es de 1883, cuando publicó un informe sobre un estudio de

campo llevado a cabo en un suelo del tipo Chernozem, en el cual aplicó los principios de la morfología a los suelos, describió los principales grupos, esbozó la primera clasificación científica de los mismos, y desarrolló métodos de cartografía en base al trabajo de campo y de laboratorio. En 1886 propuso que la palabra suelo se emplease como término científico para referirse a aquellos horizontes de roca que diariamente, o casi diariamente, cambian su relación bajo la influencia conjunta del agua, aire y organismos vivos y muertos (Figura 6.1). Más tarde definió el suelo como un cuerpo natural e independiente, formado bajo la influencia de varios factores, de los cuales consideró a la vegetación como el más importante. Se trata para él de un producto complejo, resultado de las interacciones entre el clima, las plantas y los animales, la roca madre, la topografía y la edad del paisaje. Sus discípulos Glinka (1867-1929) y Neustruyev (1874-1882) volvieron a recalcar el concepto de suelo como una entidad en sí misma pero con características que corresponden a las de las zonas climáticas donde se desarrollan.

En los Estados Unidos Hilgard (1833-1916), geólogo y estudioso de los suelos, publicó trabajos sobre suelos alcalinos y sobre las relaciones entre suelos y clima. Llevó a cabo un trabajo monumental en el que resalta la combinación entre clima, formas del terreno, niveles freáticos, procesos alcalinos, meteorización de la roca, adaptación de las plantas y prácticas de

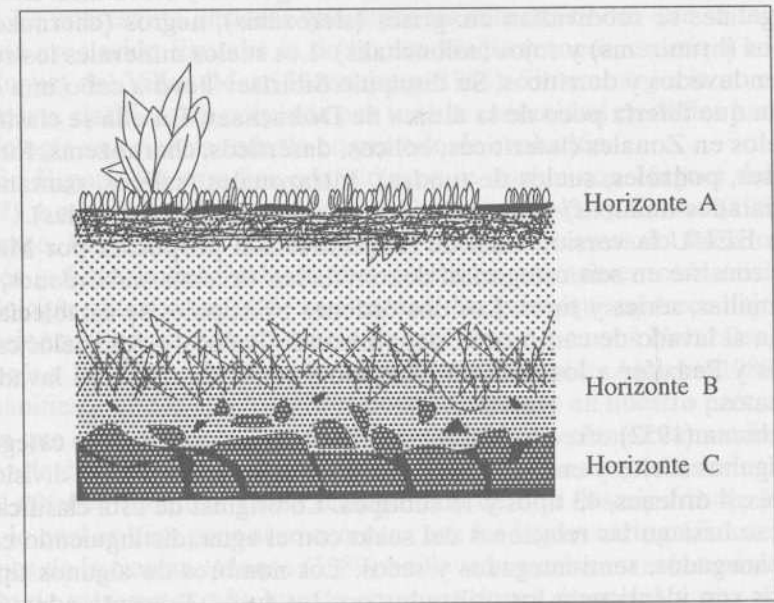


Figura 6.1. Esquema de un perfil de suelo.

cultivo, todo ello bajo un enfoque unificado que rara vez se encuentra en la actualidad. El otro pilar de la Edafología es Marbut (1863-1935), geomorfólogo estadounidense discípulo de Davis, y que fue director de la investigación sobre suelos en su país. Al tener conocimiento del trabajo de Glinka por una traducción al alemán del texto ruso, decidió llevar a cabo una traducción al inglés del mismo divulgando así los conceptos de la escuela rusa entre los científicos del suelo en su país. Marbut sostiene la teoría de procesos múltiples e independientes en la génesis de los suelos. Kellog (1902-1980) sucedió a Marbut como director de la investigación de suelos y continuó con sus colegas el desarrollo de la clasificación del suelo en base a los criterios establecidos por Dokuchaev y Glinka.

#### 6.2.4. Clasificaciones

En la traducción inglesa de una selección de los trabajos de Dokuchaev (1945) puede comprobarse que él fue el primero en proponer una clasificación de suelos considerados no como parte del sustrato geológico sino como un cuerpo independiente. Su esquema tenía dos categorías, los suelos normales y los suelos anormales, dando el carácter de normal a los suelos que se desarrollaban en función de las características climáticas de la zona. Los suelos normales los dividió en vegetales y minerales. Los suelos vegetales se subdividían en: grises (sierozems), negros (chernozems), castaños (brunizems) y rojos (solonchaks). Los suelos minerales los subdividió en lavados y detríticos. Su discípulo Sibirtsev llevó a cabo una clasificación que difería poco de la última de Dokuchaev. En ella se clasifica a los suelos en Zonales (lateríticos, eólicos, desérticos, chernozems, forestales grises, podzoles, suelos de tundra), Intrazonales (salinos, pantanosos, carbonatados-húmicos) y Azonales (esqueléticos, bastos, aluviales).

En EEUU la versión final de la clasificación propuesta por Marbut (1935) consiste en seis categorías, denominadas: órdenes, subórdenes, grupos, familias, series y tipos. Los dos órdenes principales se establecían en relación al lavado de carbonatos, denominando Pedocal a los suelos carbonatados y Pedalfer a los ricos en aluminio y hierro a causa del lavado de carbonatos.

Kubiena (1952) ofreció un sistema diferente, basado en cinco categorías para algunos suelos y en tres para otros. La clasificación tiene 3 divisiones, 16 clases, 4 órdenes, 43 tipos y 18 subtipos. Lo original de esta clasificación es que se basa en las relaciones del suelo con el agua, distinguiendo entre: suelos anegados, semi-anegados y secos. Los nombres de algunos tipos y subtipos son idénticos a los utilizados por los rusos. Presenta además un diagrama con los caminos de la génesis de los suelos, en el que pone consi-

derable énfasis en las propiedades químicas y físicas como factores de diferenciación. El sistema de Kubiena fue utilizado en toda Europa y muy especialmente en España.

Posteriormente fueron surgiendo modificaciones a la propuesta de Kubiena y cada país desarrolló su propia clasificación, tendiendo a limitar el criterio zonal o climático. El sistema francés es, como el de Kubiena, una clasificación genética, es decir, basada en la evolución progresiva del perfil, en el grado de alteración, y en el tipo de humus, además de algún otro factor que aparezca como muy fundamental (Douchaufour, 1970). Se adapta muy bien al estudio de los medios naturales por la correlación que existe entre suelo, vegetación y clima local, pero no tanto a los suelos agrícolas. Es por ello que los servicios agrícolas han desarrollado una clasificación alternativa.

La importancia del desarrollo de la Edafología como ciencia queda claramente establecido con las primeras reuniones internacionales para tratar el tema de los suelos (Roquero, 1949). En las Conferencias de Budapest (1909), Estocolmo (1910) y Praga (1922) se utilizó el término Agrogeológico, lo que muestra, según Huguet del Villar (1950), la importancia que habían tenido los geólogos en el desarrollo de esta ciencia y la preocupación dominante por los suelos cultivados. Pero ya en la Conferencia de Roma (1924) se adoptó la expresión más amplia de Ciencia del Suelo, que se aplicó igualmente a la primera Sociedad Internacional que salió de aquella reunión. Es interesante destacar que entre las subcomisiones que se formaron en esta asociación figuraba la de Suelos Mediterráneos, creada a iniciativa de Huguet del Villar (Martí Henneberg, 1984). Sin embargo, la no existencia de una clasificación aceptada por toda la comunidad científica hace de la Edafología una ciencia todavía en período de evolución.

En España los estudios edafológicos se inician con Huguet del Villar (1937) y continúan con trabajos de Albareda (1943) y Tames (1958). Sin embargo, Porta (1988) considera que todavía es necesario dar a conocer qué es la Ciencia del Suelo, y que se está en un momento de crisis de la Edafología oficial a causa de que es una disciplina que aparece bajo denominaciones diversas como Ciencia de la Tierra, Recursos Naturales, Agrobiología y Ecología, Producción Vegetal, etc. También Alonso (1989) pone de manifiesto que la Edafología es poco importante en nuestro país, aunque opina que en los últimos tiempos ha conseguido su plena autonomía, su carácter de disciplina científica. Actualmente existe un mapa de suelos a escala 1:1.000.000 (Guerra, 1968) acompañado de una descripción de los mismos, lo cual es bien poco si se compara con los logros cartográficos en otros campos de la ciencia. Alonso (1989) ha llevado a cabo un esfuerzo de adaptación de esta cartografía basada en asociaciones de suelos a una clasificación más geográfica de tipo climático.

## 6.2.5. Controversia

En Edafología, todo estudio pasa por el establecimiento de un sistema de clasificación de suelos objetivo, aplicable a escala mundial, y aceptado por la comunidad científica. Según Duchaufour (1970) la clasificación sistemática de los suelos tiene que resolver dos problemas: *a)* clasificar las unidades superiores y agruparlas en tipos de suelos en función de su génesis y de sus propiedades fundamentales; *b)* dar a los cartógrafos una herramienta cómoda para trazar mapas a gran escala que sean utilizables para fines prácticos. El problema radica en que las clasificaciones que se han llevado a cabo en la mayoría de países tratan, o bien de las unidades muy grandes o de las muy pequeñas, y siempre ha resultado difícil la presentación de un conjunto de unidades graduales a nivel universal.

La gran revolución en el sistema de clasificación se debe a la iniciativa norteamericana. Las publicaciones de Thorp y Smith (1949) y de Riecken y Smith (1949) señalan el inicio de la nueva sistemática, la cual se elaboró posteriormente juntamente con sus claves de clasificación por el Soil Survey Staff (1960). A partir de este momento empieza a ser tomada en cuenta, a discutirse y a mejorarse, no sin grandes reticencias a causa de su nomenclatura de raíces, prefijos y sufijos latinos, a imitación de las clasificaciones en Botánica y Zoología. Una de las principales diferencias entre esta clasificación y las demás estriba en la definición de taxones en base a cuantificación de las propiedades físicas, químicas, hidrológicas y biológicas del suelo.

La clasificación norteamericana se asienta sobre las bases siguientes: *a)* las propiedades de los objetos; *b)* las propiedades seleccionadas deben ser observables o medibles; *c)* las propiedades que puedan ser cuantificadas serán las preferidas; *d)* las propiedades elegidas deben relacionarse con la génesis del suelo; *e)* debe elegirse la propiedad que tenga más significado para el crecimiento de las plantas; *f)* propiedades significativas para un tipo de suelo pueden no serlo para otro suelo; *g)* el sistema de clasificación debe ser flexible para que pueda incorporar nuevos conocimientos. Es una taxonomía basada en diez órdenes fundamentales y varios subórdenes, éstos construídos mediante sufijos y prefijos de dos o tres letras, todo lo cual la hace aparecer muy extraña al no iniciado (Smith, 1968). Para la definición de las principales unidades se usan unos horizontes denominados de diagnóstico, que están definidos con mucha precisión por sus caracteres morfológicos, químicos y físicos. Los epipedones son horizontes que están en la superficie y generalmente son ricos en materia orgánica, mientras que los endopedones son subsuperficiales y corresponden a un horizonte B de alteración o a uno de iluviación.

La FAO ha desarrollado un sistema de clasificación que trata de sintetizar la moderna clasificación norteamericana con las renovadas de varios paí-

ses, el cual es aplicado en muchos países en vías de desarrollo, si bien el sistema estadounidense es cada vez más aceptado. Por ejemplo, es el que se ha adoptado en España al realizar el *Atlas nacional de España* (1992). Pero esto no quiere decir que no sea interesante emplear otros sistemas puesto que cada uno puede responder a una utilidad distinta. A fin de facilitar el estudio del suelo, se han hecho también esfuerzos para homogeneizar la nomenclatura de los diferentes horizontes, pero todavía se está muy lejos de conseguir que se aplique un sistema único de clasificación a todos los suelos del mundo.

CUADRO 6.1. Unidades de clasificación de suelos de la FAO y su correspondencia con los de EEUU y los de Europa.

FAO	EEUU	Europa
poco desarrollados	entisols	poco desarrollados
rankers y andosoles	inceptisols	poco diferenciados
sialíticos	inceptisols	brunificados
sialíticos	alfisols	brunificados
rendsinas	mollisols	calcimagnésicos
ricos en humus saturado	mollisols	isohúmicos
xerosoles	aridisols	isohúmicos
vertisoles	vertisols	vertisoles
podsoles	spodosols	podsolizados
chromosoles	alfisols	ferralsialíticos
acrisoles	ultisols	ferruginosos
nitosoles	ultisols	ferruginosos
ferralsialíticos	oxisols	ferralsialíticos
histosoles	histosols	hidromorfos
con agua estancada	aquasols	hidromorfos
salsódicos	halosols	salsódicos

## 6.3. Tendencias actuales

### 6.3.1. El suelo como un sistema

La Edafología moderna se considera estrechamente ligada a los trabajos de Jenny, quien escribió un tratado sobre los cinco factores que rigen el desarrollo de los perfiles del suelo, fundamentado en el concepto del suelo como un sistema de interacciones. Nikiforoff (1959) fue sin embargo el primero que utilizó formalmente el término. No se trata de un enfoque enteramente nuevo puesto que la escuela rusa, desde Lomonosov, siempre ha con-

siderado al suelo como un conjunto dinámico con múltiples interacciones. Así ya en 1898, y por primera vez, Dokuchaev ideó una ecuación en la que se tenían en cuenta los factores formadores del suelo, como el clima (*cl*), los organismos (*o*) y el material originario (*m*), e indicó que también sería necesario tener en cuenta el relieve y la edad de formación del suelo:

$$S = f(cl, o, m)$$

Jenny (1941) expresó los principios de estos factores que interactúan en el sistema suelo en términos de: clima (*cl*), organismos (*o*), roca madre (*m*), relieve (*r*), tiempo (*t*), y otros factores de menor importancia (*n*), formulando la ecuación básica:

$$S = f(cl, o, m, r, t, n)$$

Estos factores son las variables que definen el estado del suelo, los cuales pueden variar con independencia y relacionarse unos con otros.

Posteriormente Jenny (1961) derivó la ecuación anterior, tomando en consideración que el suelo es un ecosistema abierto donde pueden entrar y salir tanto la energía como la materia. Los parámetros utilizados son las propiedades del ecosistema (*e*), propiedades del suelo (*s*), las propiedades de la vegetación (*v*), y las propiedades de los animales (*a*), las cuales son función del estado inicial del sistema en relación a la roca madre, topografía, pendiente y exposición (*I*), de los potenciales externos de flujo constituidos por los organismos y el clima (*F*), y de la edad del sistema (*t*). La ecuación tiene la siguiente forma:

$$e, s, v, a = f(I, F, t)$$

En un intervalo determinado de tiempo  $Xt$ , los cambios de las propiedades del sistema equivalen a las entradas menos las salidas y, por tanto:

$$e, s, v, a = f(cl, o, r, m, t, n)$$

Hace falta remarcar que ni los factores topográficos ni la roca madre son dependientes del tiempo, mientras que el clima y los organismos pueden ser o no función de este parámetro.

Para estudiar la formación de un suelo hay que referirse a los diferentes factores individuales, es decir, considerar aquellas situaciones donde varía un solo factor mientras que los otros son constantes. Esto es prácticamente imposible y lo máximo que puede esperarse es encontrar indicios donde la variación de determinados factores sea tan pequeña que permita despreciarlos. Pueden establecerse secuencias en función de un factor dominante determinado, así:

$S = f(cl)$  *o, r, m, t, n* → Función del clima

$S = f(o)$  *cl, r, m, t, n* → Función de los organismos

$S = f(r)$  *cl, o, m, t, n* → Función del relieve

$S = f(m)$  *cl, o, r, t, n* → Función de la litología

$S = f(t)$  *cl, o, r, m, n* → Función del tiempo

$S = f(n)$  *cl, o, r, m, t* → Función de algún factor "n"

Aunque el concepto de sistema fue introducido en la Ciencia del Suelo para el estudio genético del mismo, es adoptado y desarrollado en Geografía del suelo por autores como Runge, Huggett y Gerrard. En el modelo de Runge (1973) el suelo es visto en términos de producción de materia orgánica, tiempo y cantidad de agua disponible para la lixiviación; el agua disponible depende de la cantidad de agua de infiltración que puede utilizarse en la edafogénesis comparada con la que se marcha por escorrentía superficial. Gerrard (1981), siguiendo a Runge, incorpora el concepto de energía en el sistema suelo en base a tres componentes: *a*) el de descomposición cuando la energía declina gradualmente y el sistema puede llegar a un estado de agotamiento virtual; *b*) el cíclico cuando la energía y posiblemente la entrada de material cambia de manera rítmica asociada a los ciclos diurnos y estacionales; *c*) el aleatorio debido a los suministros irregulares de energía como en el caso de las precipitaciones. Huggett (1975) extiende el concepto de catena a la cuenca de drenaje, utilizándolo como base para un modelo tridimensional del sistema suelo, e intentando simular el flujo de material en una cuenca ideal. Este modelo es realmente una extensión del modelo geomorfológico de nueve unidades de vertiente de Dalrymple *et al.* (1969) y deduce líneas de flujos de materiales definibles dentro de unidades suelo-paisaje. Los diferentes constituyentes se mueven a través del sistema en diferentes proporciones y en grados de tiempo variables en función del elemento representado.

Otro campo donde se aplica el concepto de sistema, y su consiguiente materialización para la elaboración de modelos, lo hallamos en los estudios agronómicos, como en el texto de Richter (1987), donde se considera al suelo como un "reactor" y su comprensión desde este punto de vista esencial para desarrollar una metodología eficaz para su conservación.

### 6.3.2. El estudio cuantitativo de los procesos edáficos

Jenny puso conscientemente las bases de la investigación cuantitativa, al darse cuenta de que la Ciencia del Suelo no podía seguir adelante sin incorporar el estudio a fondo de los procesos que generan su formación y desarrollo, y que este estudio necesitaba de un gran cuerpo de datos que no estaban disponibles en el momento en que él escribía. Todavía hoy no exis-



ten conocimientos ni datos suficientes para el estudio cuantitativo del sistema suelo como tal. Sin embargo sí se tienen datos de cada uno de los componentes del sistema y de su aspecto dinámico. Puede decirse, por tanto, que el centro de interés en los factores de formación del suelo propuesto por Jenny ha sido superado por una visión basada más en los procesos del perfil del suelo, es decir, en las entradas, salidas, translocaciones y transformaciones de los constituyentes del mismo (Simonson, 1959).

Una vez aisladas y cuantificadas las variables de un proceso, entonces la interacción dinámica de las mismas y la distribución espacial de las propiedades del suelo resultantes pueden ser investigadas y definidas (Trudgill, 1983). Al igual que sucedió en Geomorfología, el estudio cuantitativo de procesos ha llevado paulatinamente a los edafólogos al campo de la aplicación, o dicho en una terminología más actual, a una Edafología ambiental.

En la Geografía de los suelos el proceso de adquisición de datos suele estar bajo el dominio de investigadores de campos no geográficos (químicos, biológicos, etc.) lo cual, junto a la riqueza de datos intrínseca a todo suelo, retrasa el desarrollo de métodos cuantitativos. Sin embargo Courtney y Nortcliff (1977) han revisado las técnicas de análisis de distribuciones de suelos y hacen notar que, a pesar de la gran atención dedicada a los procedimientos de reconocimiento de suelos, es sorprendente el poco interés que la mayoría de investigadores ha dedicado a las relaciones espaciales. Aunque no haya una propiedad del suelo única que permita tipificar el conjunto, es evidente que podrían utilizarse métodos de clasificación, ordenación, análisis de regresión y de varianza, etc., en relación a estudios de delimitación de suelos y de variaciones espaciales (Courtney y Nortcliff, 1977).

El enfoque cuantitativo del estudio del perfil del suelo es relativamente reciente, aunque se ha intentado racionalizar la recogida de datos codificando las propiedades del perfil de manera que cada inventario pueda llegar a tener hasta 200 entradas que pueden luego ser analizadas por ordenador (Webster *et al.*, 1976). Por otro lado, la unidad cartográfica elemental ha adquirido una tercera dimensión con la definición de un corpúsculo de suelo tridimensional o pedion en la que los volúmenes más pequeños involucrados, generalmente entre 1 y 10 m<sup>2</sup> en superficie, son la base para una cartografía automática de unidades o polipediones. Las técnicas de cartografía y análisis de distribuciones han sido revisadas por Johnson (1963).

### 6.3.3. El estudio ambiental

Pero el suelo no sólo tiene interés para los científicos sino que, dado su papel de transmisor entre el mundo mineral y el mundo biológico, es además, y fundamentalmente, un recurso para la supervivencia humana. La im-

portancia del suelo como recurso se hace patente por la preocupación de múltiples organizaciones sobre el tema. En Estados Unidos se creó en 1945 la Sociedad Americana para la Conservación del Suelos, de la que en 1983 emanó la Asociación Mundial para la Conservación del Agua y el Suelo. En Europa la Declaración de Estrasburgo de 1972 estableció La Carta Europea de los Suelos y en 1988 se creó la Sociedad Europea para la Conservación de Suelos, con el objetivo de promover el estudio de los procesos de degradación del suelo, así como las prácticas de conservación, en el contexto europeo, y de hacerlo en base a un enfoque multidisciplinar.

La Carta Mundial de los Suelos, elaborada por la Conferencia de la FAO en 1982, define como degradación de suelos la pérdida total o parcial de su productividad, cualitativa o cuantitativamente, o de ambas, como consecuencia de procesos como la erosión, la salinización, la inundación, la desertización y la contaminación. La degradación del suelo repercute directamente sobre la agricultura disminuyendo el rendimiento de los cultivos y de los recursos hídricos, pero también afecta gravemente a otros sectores de la economía o el medio ambiente.

La preocupación por el impacto de los procesos de erosión se genera en el campo de la agricultura, puesto que es allí donde el suelo está más desprotegido y los efectos representan pérdidas económicas más tangibles. El norteamericano Bennett (1881-1960) es considerado uno de los pioneros en la materia, y fue realmente él quien alertó sobre la gravedad del problema (Bennett, 1939) e impulsó la creación del Servicio de Erosión del Suelo, del que fue director. En la actualidad el Servicio se denomina de Conservación de Suelos dado que la problemática de degradación es más amplia que el solo hecho erosivo. En lo que se refiere al interés geográfico de esta iniciativa, hay que destacar el establecimiento sistemático de parcelas experimentales, las primeras 44 en Missouri en 1917, de las cuales 19 han seguido funcionando hasta la actualidad. Las técnicas y metodologías desarrolladas en estas áreas experimentales son hoy día la base no sólo de estudios de erosión dentro del ámbito de la Edafología sino también dentro de la Geomorfología. La masiva producción de datos de los centenares de parcelas experimentales instaladas en todo el territorio norteamericano permitieron a Wischmeir y Smith (1960) formular la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (*USLE*, Universal Soil Loss Equation), ampliamente utilizada desde entonces aunque sujeta a revisiones. Los parámetros que intervienen en ella son: erosividad de la lluvia (*R*), erodibilidad del suelo (*K*), longitud de la ladera (*L*), pendiente (*S*), tipo de cultivo (*C*), medidas de conservación (*P*). La *USLE* predice la erosión en base a la comparación con parcelas controladas en las cuales se efectúan trabajos para prevenir y reducir la erosión.

Durante la década de los años ochenta, el Departamento Estadounidense de Agricultura decidió mejorar el modelo *USLE* sobre la base de

nuevos datos y aproximaciones metodológicas. Este proceso llevó a la formulación de un nuevo modelo llamado *RUSLE* (Revised *USLE*) que fue implantado definitivamente en 1992. El modelo Rusle se puede definir como la versión informática de la *RUSLE* mejorada. Las mejoras introducidas por la Rusle se pueden resumir en tres aspectos: a) la nueva ecuación incorpora más datos de diferentes regiones y sistemas de cultivo así como nuevas mediciones de erosión; b) corrige errores analíticos de la ecuación inicial; c) es más flexible en su aplicación, lo cual permite la modelización de una gran variedad de sistemas, mostrando las tendencias de la erosión incluso a partir de cambios muy pequeños en las prácticas agrícolas. De la misma manera que su predecesora, la *RUSLE* es básicamente un instrumento para la planificación y conservación del suelo, utilizado para estimar los efectos de la erosión en la calidad del suelo de un área determinada. Se trata todavía de un modelo para la predicción de la erosión a largo plazo, siendo su capacidad para estimar la pérdida de suelo en sucesos de lluvia concretos aún muy limitada. Una visión más detallada del modelo *RUSLE* se puede consultar en Yoder y Lown (1995). En la actualidad se está trabajando en el desarrollo de una ecuación funcional adaptada a las condiciones ambientales europeas (Morgan *et al.*, 1989), pero también en modelos de susceptibilidad a la erosión que combinen varios procesos geomorfológicos (DePloey, 1990).

Como resultado de este interés en el suelo como recurso, un tema cada vez más estudiado, también por los geógrafos, es el de la erosión del suelo. Los trabajos en este campo cubren diferentes aspectos (Zacar, 1982). Se han llevado a cabo investigaciones sobre la cantidad de material erosionado en relación a las variables que la controlan, y los estudios de la pérdida de suelos potencialmente útiles (Stocking, 1980) mediante la investigación detallada de procesos en el campo o con experimentos de laboratorio (De Ploey, 1983). Sin embargo lo más usual son los trabajos empíricos en los que se controlan las pérdidas de tierra y de nutrientes en relación a las entradas de agua.

#### 6.3.4. Perspectivas

Según Trudgill y Briggs (1977) hay dos grandes áreas de desarrollo futuro dentro de la temática de la Geografía de los suelos. Una se refiere al estudio de los procesos edáficos en sí mismos, donde el suelo es visto como un componente mediambiental que forma parte de la interacción entre sistemas geomorfológicos, hidrológicos y biogeográficos. La otra área se refiere a la aplicación práctica de conocimientos dirigida a la evaluación de la calidad de los recursos edáficos, su variación espacial y sus usos potenciales. También en su aspecto ambiental, el estudio de los suelos es un tema en alza dentro de la Geografía Física.

Dentro del estudio de procesos la observación y medición de éstos en el campo es un área de trabajo novedosa y sugestiva. Todavía no se puede predecir con exactitud el flujo de agua en el suelo, su movimiento en condiciones saturadas y no saturadas y por tanto tampoco el movimiento de solutos y de material en suspensión. Las dificultades que hay que superar son las derivadas de medir el movimiento del agua, de solutos, de partículas sedimentarias y de materia orgánica mientras están ocurriendo. Es por ello que se han de desarrollar modelos basados en la inferencia y simplificación de estos procesos a partir de las distribuciones observadas de los elementos constituyentes del suelo. Los avances recientes en hidrología de vertientes, tanto en experimentos de campo como en modelos (Dunne, 1988; Kirkby, 1988), ha facilitado el estudio tanto de la dinámica del agua en el perfil del suelo como a lo largo de la vertiente. Por tanto, los trabajos que más probabilidades tienen de éxito son los que se llevan a cabo de manera complementaria entre modelos teóricos y comprobación en el campo.

En lo que se refiere a los aspectos aplicados se parte de la consideración del suelo como un recurso. Por ello, se hace necesario describir las reservas en suelos a nivel nacional o regional, determinar y proponer usos apropiados, indicar las posibles repercusiones de cambios en el uso del suelo. El trabajo a realizar es el del reconocimiento, clasificación y cartografía de suelos, no como un fin en sí mismo sino para establecer la potencialidad del terreno y el mejor uso del mismo (FAO, 1976; FAO-UNESCO, 1970). Las aplicaciones a la agricultura son obvias puesto que muchas de las propiedades fundamentales del suelo son factores importantes en la productividad agrícola. Las aplicaciones no agrícolas se centran en el planeamiento del territorio, es decir, en detectar que usos son más convenientes en determinados casos, que posibilidades hay de usos alternativos en otros casos, como en la toma de decisiones sobre donde ubicar áreas recreativas, urbanas, de almacenamiento de residuos, etc. La mejora del terreno también puede beneficiarse de la Geografía de los suelos, como en el caso de suelos que necesitan un drenaje o un lavado.

Una parte de los aspectos aplicados se centra en el tema de la pérdida de potencial o desertificación (Grove, 1977; López Bermúdez, 1988). Según la definición de las Naciones Unidas de 1976, la desertificación es la expansión de las condiciones desérticas por cualquier razón, siendo el desierto un terreno con vegetación escasa y muy poca productividad asociada con la aridez, y una degradación persistente o en casos extremos irreversible. Así el término desertificación incluye no sólo la erosión sino también toda degradación del suelo (pérdida de nutrientes, salinización, etc.) que implique un descenso de su productividad. Dos son las causas que generan desertificación, el cambio climático y el mal uso del suelo. Mientras que puede ser difícil demostrar que el clima ha incrementado la aridez durante un período

suficientemente largo para causar una desertificación, es fácil observar que las actividades humanas se han incrementado en intensidad y en destructividad, y que el hombre generalmente aparece como el principal agente.

La degradación tiene muchas formas, por ejemplo, la polución por la aplicación de materiales tóxicos, la destrucción del marco estructural del suelo por prácticas agrícolas inapropiadas, la salinización a causa de prácticas de irrigación incorrectas, etc. La considerada más seria es no obstante la erosión del suelo por el agua, pues mientras que en los otros tipos de degradación se puede proponer algún tipo de reconstrucción, aunque sea a largo plazo, con la erosión la regeneración es imposible y lo único que puede hacerse es tratar de reducir su tasa. La erosión del suelo modifica la respuesta hidrológica en el sentido de que se genera más escorrentía por la desaparición de la capa superior absorbente. También es causa de un descenso de la productividad a causa de la pérdida en materia orgánica y nutrientes minerales. Y la pérdida de productividad lleva a un descenso de la biomasa y con ello una reducción en la protección del suelo frente a la erosión. Así, todavía más que la cantidad de suelo perdido es importante la estimación de la manera en que la erosión limita progresivamente el potencial productivo del suelo (Elwell y Stocking, 1984), es decir, el impacto que se produce en la productividad. En este sentido, Porta *et al.* (1994) señalan que para estudios amplios sobre degradación de suelos se requiere ante todo conocer a qué suelos se está haciendo referencia, cuáles son sus componentes inorgánicos y orgánicos, cuáles son los horizontes en que están organizados, sus propiedades y características, cuáles son los factores y procesos formadores, qué procesos están teniendo lugar y cuáles son las respuestas esperables frente a cambios de uso. Este conocimiento permite mejorar los diagnósticos y conseguir una mayor precisión en las recomendaciones según las características de cada suelo.

Desde el punto de vista técnico, es necesario resolver los problemas de mediciones en el campo con instrumentos de registro continuo, como por ejemplo la instalación de lisímetros conectados a registradores de datos. En cuanto al análisis de los datos obtenidos, Courtney y Nortcliff (1977) sugieren el uso de técnicas estadísticas, tanto descriptivas como analíticas, para obtener combinaciones de variables de suelo objetivas y significativas utilizables en la producción de mapas de suelos.

Desde el punto de vista institucional, si bien hasta los años setenta la geografía de los suelos tuvo un papel menor en los estudios ofrecidos por la mayoría de departamentos de Geografía, durante la década de los ochenta, en los países del norte de Europa, ha pasado de ser una breve descripción de los grandes grupos de suelos del mundo a convertirse en una nueva disciplina con un enfoque sistemático y con un gran número de aplicaciones prácticas (Bridges, 1978). Es decir, ha superado los estadios primarios de re-

colección y explicación de información a la fase de utilizar dicha información para propósitos prácticos, especialmente en decisiones sobre usos del suelo. Este incremento de la Geografía de los suelos, pura y aplicada, ha permitido a esta ciencia emerger como una nueva y vigorosa rama de la Geografía Física. Es interesante señalar que, de la misma manera que la Hidrología geográfica se desarrolla a partir de los estudios de Geomorfología fluvial, también en el caso de la Edafología hay un desarrollo a partir de la Geomorfología, en este caso del estudio de los procesos en las vertientes. En nuestro ámbito la implantación de la Edafología como disciplina geográfica queda claramente reconocida en algunos planes de estudio y en libros de texto como el de Cobertera (1993). Pero no se conocen, por parte de geógrafos, estudios de procesos edáficos. Sí en cambio estudios sobre erosión y degradación, que ya empiezan a constituir una importante base de datos (Sala *et al.*, 1991; Sala y Rubio, 1994). Nuestra opinión es que éste es el momento oportuno para iniciar trabajos interdisciplinarios con estudiosos del suelo procedentes de campos complementarios a la Geografía, como biólogos, geólogos, farmacéuticos y agrónomos, especialmente en el campo de la degradación y conservación de suelos.

## 6.4. Áreas de conocimiento

### 6.4.1. Principios generales

La base de la Edafología moderna es la consideración del suelo como un elemento independiente, integrado por materia mineral procedente del sustrato geológico, y por el material biológico procedente de los restos vegetales y animales. La constitución de un suelo depende de la incidencia e interrelación entre factores (clima, roca madre, organismos, relieve y tiempo) y parámetros y procesos físicos, químicos, biológicos, hidrológicos y antrópicos. El estudio del suelo es importante en sí mismo, pero sobre todo es fundamental en la economía y el medio ambiente.

### 6.4.2. Métodos y técnicas

Los métodos y técnicas utilizados en Edafología son los descriptivos, analíticos y cartográficos, así como los de campo, de laboratorio y de gabinete. Como en todo quehacer científico una correcta descripción es la base ineludible de estudio. Los métodos analíticos, además de ser indispensables para el buen conocimiento del suelo, constituyen un elemento de gran ayuda para el estudiante en la comprensión del marco teórico. El primer paso

es la descripción del perfil, con la consiguiente distinción y nomenclatura de horizontes. A continuación debe llevarse a cabo el muestreo en el campo de cada uno de los horizontes, y seguidamente la determinación en el laboratorio de los parámetros físicos, químicos, biológicos e hidrológicos. Como ya hemos visto este es un tema difícil y todavía muy controvertido, por lo que dentro de los grandes temas de estudio merece un capítulo aparte. Finalmente, y como en tantos aspectos de la Geografía Física, la cartografía de unidades es una de las grandes metodologías a utilizar y para la que existen muy variadas técnicas; en la actualidad la utilización de ordenadores y de sistemas de información geográfica (SIG), sistemas de información de suelos (SIS) y sistemas de información del territorio (SIT), son las más novedosas, permitiendo un rápido acceso a la información y su utilización con eficacia. Otro aspecto actual en el tema metodológico y técnico es la importancia cada vez mayor que adquieren las mediciones y experimentos de campo, sobre todo para el estudio del comportamiento hidrológico del suelo, así como para el estudio de la erosión y la degradación de los suelos.

#### 6.4.3. Propiedades de los suelos

Esta es la parte dedicada a la descripción y análisis de los elementos que caracterizan los suelos. Propiedades físicas (perfil, color, textura, estructura, densidad, porosidad), hidrológicas (agua en el suelo, humedad, infiltración, conductividad hidráulica), químicas (pH, nutrientes, contaminación) y biológicas (materia orgánica vegetal y animal). Requiere una gran cantidad de observación de campo, de muestreo y de análisis en el laboratorio. Pero este es el trabajo paciente y laborioso sin el cual no puede alcanzarse un buen conocimiento del objeto de estudio. Resulta novedoso en muchos de nuestros Departamentos pero sin duda cada vez se generalizará más.

#### 6.4.4. Procesos edafológicos

Los factores de la edafogénesis son climáticos, geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, biológicos y temporales. El clima actúa sobre todo por la temperatura y el agua. La Geología por el material sobre el que se desarrolla el suelo o roca madre. La Geomorfología por la importancia del relieve, tanto a nivel de grandes unidades como a nivel de vertiente y de ladera. La Hidrología por su participación esencial en los procesos de desarrollo progresivo del suelo, siendo el agua el vehículo de transporte mecánico y en disolución de la materia mineral y orgánica que compone el suelo. Los seres vivos porque precisamente su presencia es la que determina que un sustrato

se convierta en un suelo, pudiendo decirse que es la vegetación y los restantes seres vivos los que hacen el suelo. Finalmente, el factor tiempo es esencial en la formación de un suelo puesto que de él depende el nivel de desarrollo del mismo. Los procesos de génesis o formación del suelo ocurren tanto a partir de una roca como a partir de otro suelo. Algunos procesos tienen lugar cada día y el hombre puede incidir sobre los mismos. Fanning y Fanning (1989) clasifican los procesos de formación de suelo en dos grupos: procesos menores, a los que comparan a los instrumentos de una orquesta, y procesos mayores o combinación de los anteriores, similares según estos autores a una sinfonía. Los procesos mayores son los que dan lugar a los grandes tipos de suelos. Los procesos menores serían las transformaciones de la materia mineral y orgánica, la eluviación y la iluviación, la oxidación y la reducción, la edafoturbación, la erosión y la acumulación. Los procesos mayores serían la calcificación, la salinización, la alcalinización, la podsolización, la lixiviación, la laterización, la gleificación. Los procesos mayores son los que tradicionalmente han sido discutidos por los edafólogos y atribuidos al desarrollo de los grandes tipos de suelos y fueron ya tratados por los primeros edafólogos rusos como Dokuchaev y sus discípulos.

#### 6.4.5. Clasificaciones

Tal como manifiestan Felipó y Garau (1987), clasificar un suelo no es una tarea sencilla. En primer lugar debe hacerse una descripción morfológica, y a veces incluso morfométrica *in situ* de los diferentes horizontes y del entorno. Después, mediante el análisis de laboratorio, es necesario determinar los constituyentes y sus propiedades. Toda esta información, siguiendo las normas del sistema que se utilice, permite hacer la clasificación y, por tanto, dar denominación a un suelo. Como en toda sistematización, pueden llevarse a cabo clasificaciones distintas según el aspecto que interese observar. Así pueden clasificarse los suelos en relación a: la roca madre (tipo, dureza, mineralogía), la edad (cronosecuencias), el clima (actual o pasado), la vegetación, el hombre, la topografía (catenas). Finalmente pueden clasificarse siguiendo pautas nacionales o internacionales (FAO, EEUU).

#### 6.4.6. Distribución regional y geográfica

Esta es una parte muy importante de la Edafología dado que el conocimiento del tipo de suelo que corresponde a una determinada área es fundamental tanto desde el punto de vista agrícola como de conservación. Es por ello que es una de las tareas a que más se dedican los edafólogos, especial-

mente a la plasmación cartográfica de esta distribución. El estudio regional comporta una clasificación del suelo, y ésta un trabajo de campo y unos análisis de laboratorio. Pero además de la clasificación regional o de grandes áreas, el suelo puede clasificarse a escala más reducida y en este caso el elemento condicionante es la topografía. La organización interdependiente de los suelos a lo largo de una ladera se denomina catena. El término catena se empezó a utilizar en EEUU en los años cuarenta y cincuenta en el sentido hidrológico, es decir, como un grupo de suelos desarrollados a partir de la misma roca madre pero que difieren en el drenaje a causa de la topografía. Pero también se utiliza por el efecto que tiene la topografía en determinar áreas estables, áreas de erosión y áreas de acumulación a lo largo de una ladera.

#### 6.4.7. Problemática ambiental

Los estudios ambientales y aplicados en Edafología son cada vez más frecuentes y necesarios en este final de siglo. Según Porta *et al.* (1994), ésto se debe por un lado a la coyuntura económica, derivada de una situación de excedentes en la producción agrícola en los países desarrollados, y por otro a la sensibilización creciente por la calidad ambiental y frente a los procesos de degradación del medio ambiente. Para actuar sobre el proceso de degradación del suelo es necesario el conocimiento de lo que se quiere preservar, es decir, los suelos, y no sólo por parte de los edafólogos sino también de otros especialistas, y en particular de los que toman decisiones sobre ordenación del territorio como los geógrafos. En este sentido, aunque en el campo de la Geografía los estudios de degradación ambiental del suelo se han centrado en el tema de la erosión, por ser éste muy cercano a la Geomorfología, sin embargo no son menos importantes otras formas de degradación, como la salinización, el mal drenaje, la fertilización, los diversos tipos de polución, los cambios de uso, etc. Se trata de problemas debidos a múltiples causas y que, siendo en muchos casos de una gravedad más acusada que la de la erosión, pasan en general más desapercibidos, si bien cada vez en menor grado (Felipó y Garau, 1987). El otro aspecto a tener en cuenta es el de trabajos que apliquen el conocimiento edafológico a la ordenación del territorio.

## 7. --- Biogeografía ---

### 7.1. Introducción

Los principios sobre los que se asienta la Biogeografía se basan fundamentalmente en los que fueron establecidos por hombres con intereses científicos diversos, como Lamarck (1744-1829), Malthus (1766-1834), Alexander von Humboldt (1769-1859), de Candolle (1806-1893), Darwin (1809-1882), Wallace (1823-1913), Huxley (1825-1895) y Haeckel (1834-1919), así como en los formulados por los grandes clásicos de la Ecología como Schimper (1856-1901), Warming (1841-1924), y los más contemporáneos como Tansley (1923), Leach (1933), Gaussen (1933) y Prenant (1933). De estas fuentes nacen las ideas biogeográficas en las que se asientan las teorías modernas. Estos orígenes diversos hacen que tanto la amplitud temática como la complejidad filosófica de esta disciplina sean aún hoy muy grandes, y que su desarrollo se haya llevado a cabo bastante separadamente, a veces incluso sin relación alguna, en dos ramas científicas, la biológica y la geográfica. Esta doble identidad, y las diferencias que comporta en centros de interés, métodos y objetivos, han hecho que la definición de la Biogeografía no quede muchas veces suficientemente clara, y que su establecimiento internacional como una ciencia básica independiente se haya retrasado en relación a otras ramas de la Geografía.

El término Biogeografía es utilizado por dos grupos de estudiosos. Para los biólogos es el estudio de la distribución espacial y temporal de especies animales y vegetales, como preludeo para explicar cómo tales distribuciones han jugado una parte en la historia evolutiva de las mismas. A escala global las explicaciones en la distribución radican en la moción de los continentes,

la orogenia, las glaciaciones, los cinturones climáticos. A escala local las explicaciones se basan en las variaciones topográficas, los suelos. Para los geógrafos el término significa el estudio de la biosfera y de los efectos humanos en plantas y animales. Parte de los estudios han sido espaciales-sinópticos, es decir, similares a la Fitogeografía y la Zoogeografía, mientras que otras partes han estado orientadas hacia procesos como la Ecología del cuaternario y el impacto humano, por tanto similares a la Ecología. Si aceptamos que el hombre es la especie central del estudio geográfico, entonces probablemente una Biogeografía geográfica debe incluir la acción del hombre como creador de nuevas especies animales y vegetales y de nuevos ecosistemas. En general, este punto de vista se orienta hacia procesos y funciones más que hacia el espacio y la sinopsis, es decir, sigue más a la Ecología. Hay que decir que los cambios en el pensamiento y métodos de la Biogeografía, tal como la entienden los geógrafos, están fuertemente influenciados por los sucesos en el pensamiento ecológico. De todas las ramas de la Geografía, la Biogeografía es quizá la que tiene más lazos con la Geografía Humana, dada la capacidad que tiene el hombre de alterar su medio natural sobre todo en lo que se refiere a los demás seres vivos (Taylor, 1984a). Precisamente durante los años setenta y ochenta los biogeógrafos estaban entre los geógrafos que sugerían una vuelta al estudio tradicional en Geografía de las relaciones hombre-medio.

Hasta cierto punto pues, la Biogeografía puede ser considerada como un ensamblaje de estudios diversos pero relacionados y sistemáticos (Taylor, 1984b). Pero esta complejidad es según Fleure (1936) el encanto y al mismo tiempo la dificultad del estudio biogeográfico. En esencia, es muy análoga a lo que los biólogos tradicionalmente denominan Ecología, pero en el caso de la Biogeografía con la inclusión deliberada del hombre, como ser vivo y como modificador de ecosistemas naturales. La Ecología aplicada es la que tiene mayores similitudes con los intereses biogeográficos, así como todas las Ciencias Ambientales en general.

La Biogeografía puede definirse como la ciencia que describe y explica las plantas y animales con respecto a su distribución por la superficie de la Tierra, así como sus agrupaciones y relaciones con el medio físico. En lo que se refiere a la vegetación, puede decirse que estudia el componente más visible del paisaje. Puesto que en la actualidad la cobertura vegetal está estrechamente vinculada con la actividad del hombre, al estudiar los complejos biogeográficos, no solamente se ha de tener en cuenta las rocas, el relieve, el clima y las aguas, sino que de una manera especial debe conocerse la actividad humana a lo largo de la historia y sus diferentes estrategias de explotación.

Las ideas de Darwin sobre *El origen de las especies mediante la selección natural*, publicadas en 1859, como ha indicado Stoddart (1966), han in-

fluído notablemente en el desarrollo de la Biogeografía, especialmente en cuatro aspectos: 1) ayudaron a establecer el concepto de cambio con el tiempo o evolución; 2) introducen las ideas de lucha o selección natural y las de aleatoriedad o variaciones por el azar en la naturaleza; 3) están en la base de los conceptos clave de asociación y organización en la naturaleza, con el hombre como parte de esta organización, y es en base a la teoría sobre la evolución que se lleva a las relaciones de los organismos con su entorno.

Pueden distinguirse tres principales focos de interés en la tradición biogeográfica: 1) el de la distribución espacial de los organismos y comunidades vivos en la superficie de la tierra; 2) el ecológico o de las relaciones de estos organismos con el medio físico; 3) el de la influencia del hombre sobre animales y plantas. Aunque a efectos prácticos vamos a tratar separadamente cada uno de estos aspectos, en realidad se encuentran casi siempre entrelazados en los trabajos de los investigadores. Buen ejemplo de ello son los trabajos de Humboldt, padre de la Biogeografía, fruto de sus expediciones, especialmente a América del Sur. Tanto para la tradición espacial como para la ecológica, su obra fundamental es el *Ensayo sobre la Geografía de la Plantas* escrita en 1805 con la colaboración del naturalista francés Bonpland (1773-1858).

## 7.2. Evolución histórica

### 7.2.1. La tradición espacial

Se trata de la Biogeografía más Biológica, es decir, del estudio de la distribución de plantas y animales a diferentes escalas y en un marco temporal que abarca desde cientos a miles de años. Algunos autores, en lo que se refiere al estudio de la vegetación, la denominan Geobotánica y la definen como el estudio de las condiciones en que viven, dónde se desarrollan, y cuáles son las causas de la distribución territorial de las plantas (O. de Bolos, 1963).

Al igual que en las otras ramas de la Geografía Física, los precedentes pueden encontrarse en las obras de los filósofos griegos. El estudio de la distribución espacial de plantas y animales es el más antiguo de la tradición biogeográfica, puesto que el hombre siempre se ha interesado por el lugar de las plantas y animales, especialmente de los que han resultado serle útiles. Incluso en los trópicos existen relaciones de flora del siglo IV como en el caso del sur de China.

La verdadera base analítica de la tradición espacial no obstante empieza con el trabajo de Tournefort en el siglo XVII y es por tanto pre-darwinista. Le sigue la obra de Darwin ya citada. Otro precedente de esta línea de

investigación son los trabajos pioneros del geógrafo de las plantas del siglo XIX, de Candolle (1778-1841). Finalmente se llega hasta la sistemática filogenética, hoy día referida como cladística, de Henning (1966) y Nelson (1978).

El interés en la distribución de animales se remonta a Aristóteles, pero empieza realmente en la ciencia moderna a partir del descubrimiento de América, cuando Georges Buffon (1707-1788) percibió claramente que las faunas del Viejo y Nuevo Mundo eran enteramente diferentes. La identificación de las principales regiones zoogeográficas del mundo se desarrolla en el siglo XIX con los trabajos de Sclater sobre la distribución de las aves, de Huxley sobre plantas, y de Wallace sobre animales, que trabajaron principalmente en el Sudeste asiático.

La Biogeografía clásica se basaba en el análisis de distribuciones, especialmente de discontinuidades, y esos trabajos no sólo llevaron a los esquemas clasificatorios y regionales, sino que proporcionaron claves para hacer deducciones sobre la historia tectónica de la Tierra, los cambios climáticos y los cambios de nivel del mar.

La principal base científica vino no obstante con la teoría de la movilidad de los continentes, un hecho ya intuído en siglos anteriores y explicitado por Humboldt al decir que el Atlántico era esencialmente un río, las márgenes del cual habían devenido separadas a causa del gran volumen de agua a través del cual el arca de Noé había navegado. El debate se produjo a partir de las publicaciones de Wegener, especialmente después de que su obra fuese traducida al inglés en 1924. Durante cuarenta años la polémica iniciada por Wegener dividió a los biogeógrafos. Sin embargo la teoría de la tectónica de placas, que incluye la progresiva separación de los océanos pero también la colisión de continentes, ha sido crucial para el desarrollo de muchas teorías biogeográficas.

Es importante destacar que dentro del estudio de la distribución espacial de animales y plantas se trata muy especialmente del origen de esta distribución, y es aquí donde se producen las polémicas (Taylor, 1984b). Así, dentro de esta línea existen en la actualidad dos corrientes de pensamiento fuertemente enfrentadas. La tradicional o darwinista basa la distribución espacial actual en unos centros de origen desde los que las especies se dispersan por varios motivos y, al quedar aisladas, evolucionan de forma diferente. La nueva escuela o cladística solamente admite una explicación, la de la fragmentación de distribuciones antecedentes a causa de la tectónica de placas, y se basa en el análisis, clasificación y distribución de las poblaciones a través de cladogramas. Los cladogramas son diagramas de clasificación de especies elaborados a partir de similitudes morfológicas.

En lo que hace referencia al estudio de la vegetación, hay que resaltar la figura de Josias Braun-Blanquet (1884-1980), que introdujo notables in-

CUADRO 7.1. Inventario fitosociológico según Braun-Blanquet.

Superficie inventariada	100 m <sup>2</sup>	
Altitud	410 m s.n.m.	
Exposición	NE	
Inclinación	35%	
Estrato arbóreo	90% de cobertura, 18 m de altura	
Estrato arbustivo	75% de cobertura, 2 m de altura	
Estrato herbáceo	50% de cobertura, 0,8 m de altura	
<b>CARACTERÍSTICAS DE LA ASOCIACIÓN Y LA ALIANZA</b>		
	<i>Abundancia</i>	<i>Sociabilidad</i>
<i>Arbustus unedo</i>	1	2
<i>Asplenium adiantum-nigrum</i>	1	2
<i>Bupleurum fruticosum</i>	+	
<i>Carex distachya</i>	+	
<i>Clematis flammula</i>	+	
<i>Lonicera implexa</i>	+	
<i>Phillyrea latifolia</i>	+	
<i>Rosa sempervirens</i>	r	
<i>Ruscus aculeatus</i>	2	2
<i>Viburnum tinus</i>	2	2
<i>Viola alba</i>	+	
<b>CARACTERÍSTICAS DEL ORDEN Y LA CLASE</b>		
<i>Asparagus acutifolius</i>	+	
<i>Pistacia lentiscus</i>	1	1
<i>Quercus ilex</i>	3	2
<i>Rhamnus alaternus</i>	1	2
<i>Rubia peregrina</i>	1	1
<i>Smilax aspera</i>	+	
<b>ACOMPAÑANTES</b>		
<i>Brahypodium sylvaticum</i>	+	
<i>Crataegus monogyna</i>	1	1
<i>Daphne laureola</i>	r	
<i>Daphne gnidium</i>	+	
<i>Erica arborea</i>	+	
<i>Euphorbia amygdaloides</i>	1	
<i>Hedera helix</i>	2	2
<i>Osyris alba</i>	r	
<i>Pinus halepensis</i>	+	
<i>Pinus pinea</i>	+	
<i>Quercus cerruoides</i>	3	1
<i>Rubus ulmifolius</i>	1	
<i>Sorbus domestica</i>	+	

novaciones dentro de las ideas geobotánicas, las cuales han hecho avanzar de una manera extraordinaria los conocimientos sobre la vegetación (O. de Bolos, 1994). Su aportación se basa en haber detectado la repetición de una misma combinación de especies, a la que llama asociación, en ambientes ecológicos similares. Así, cada uno de los diversos tipos de colectividades de plantas se repite cuando se repiten las mismas condiciones ambientales y el mismo grado de influencia del hombre y de los animales. Considera pues a la vegetación como un mosaico de asociaciones de plantas, cada una correspondiendo a una combinación particular de especies y, en general, cada una con algunas especies características, raras o inexistentes en otras asociaciones. Estas ideas son la base del sistema de descripción e interpretación de la cobertura vegetal ideado por él y denominado fitosociológico, ampliamente utilizado en todo el mundo (Cuadro 7.1). En 1927 Fundó en Montpellier la Estación Internacional de Geobotánica Mediterránea y Alpina (Sigma), desde donde se han propagado por todo el mundo sus ideas fitosociológicas. Sus trabajos son múltiples en lo que se refiere a estudios de asociaciones vegetales, el más significativo su contribución al conocimiento del encinar mediterráneo (Braun-Blanquet, 1936). En lo que se refiere a la explicitación de conceptos y métodos pueden encontrarse en la traducción al castellano de su obra (Braun-Blanquet, 1932). En España sus discípulos más notables han sido Oriol de Bolos (1954) y Santiago Rivas Martínez (1962).

### 7.2.2. Las bases ecológicas

En su aspecto ecológico, las raíces de la Biogeografía son tan antiguas como las de la historia natural. Aristóteles en su *Historia Animalium* expone ya principios ecológicos en relación a diferentes plagas. Existe además una clara relación entre la visión griega de la armonía de la naturaleza y el concepto moderno de equilibrio de la naturaleza. Elementos de Ecología, aunque no denominados así, se encuentran en la *Historia Plantarum* de Teofrasto (370-287 d. C.)

Parece que el primero en utilizar la palabra ecología fue el escritor americano Henry D. Thoreau (1817-1862) en una carta escrita en 1858. Sin embargo el primer científico que dio sentido al término fue el biólogo alemán Ernst Haeckel (1834-1919), que lo definió como la ciencia de las relaciones de los organismos con su medio circundante, en el que se pueden incluir todas las condiciones para la vida. Más adelante el término engloba no sólo las relaciones de cada planta con su entorno sino el de los grupos de organismos entre sí. Durante el siglo XX ha habido muchos intentos de mejorar esta definición, como los de Elton (1927) que la ve como una historia natural científica, Odum (1975) que la considera como el estudio de la estructura y

el funcionamiento de la naturaleza, y Krebs (1978) como el estudio científico de las interacciones que determinan la distribución y abundancia de organismos. Para Margaleff (1974) la Ecología es la Biología de los ecosistemas, el estudio del nivel de organización de individuos de distintas especies. Todos están de acuerdo sin embargo en que la Ecología es el estudio de las relaciones del organismo u organismos con su medio o "casa" (oikos).

En 1877 Mobius introduce un concepto más integrados al acuñar el término *biocenosis* para describir las relaciones internas de las comunidades vivas. Diez años más tarde, Forbes apunta en esta dirección al estudiar el conjunto de especies que viven en un lago como en un microcosmos, es decir, como un complejo orgánico en el que el cambio en una de las especies afecta al conjunto. Aquí tenemos un claro precursor del concepto de ecosistema. Al final del siglo XIX aparecen los textos del danés Warming y el del alemán Schimper, en los que se pone el énfasis en conjuntos de formaciones vegetales. Aunque todavía en sus inicios, no pueden negarse los logros de estos dos autores en el aspecto de síntesis. Sus libros dominaron el pensamiento en Biogeografía ecológica hasta los años cincuenta, cuando el concepto de ecosistema empezó a influenciar la estructura de los nuevos textos. El núcleo de las obras de estos autores era la descripción y clasificación de las formaciones vegetales del globo.

El más influyente de los dos ha sido sin duda Schimper puesto que muchos de los términos por él acuñados son todavía utilizados. Fue él quien introdujo el término de "selva tropical" y que le dio sentido en base a un reconocimiento mundial llevado a cabo sobre la estructura y florística de esta formación. Hoy en día la descripción y clasificación de la vegetación es una ciencia muy avanzada que trata el tema a todos los niveles, desde los reconocimientos a escala mundial al estudio de los varios modelos que pueden encontrarse a escala local. Revisiones recientes del tema pueden encontrarse en Harrison (1975).

El objetivo de Warming era la definición de unidades ecológicas, en contraposición a las unidades sistemáticas o taxonómicas, en base a su reconocimiento del hecho de que ciertos grupos u organismos, aunque no relacionados ni taxonómica ni ancestralmente, pueden poseer caracteres ecológicos muy similares. Esta comprensión de la importancia de la evolución convergente llevó al desarrollo del concepto de crecimiento-forma, un tipo de atributo común en grupos de plantas diferentes y que indica una adaptación significativa. El enfoque era en gran parte autoecológico, en el sentido de que cada organismo se clasificaba de acuerdo a su relación medioambiental o ecológica clave. Ejemplos clásicos de la terminología crecimiento-forma son todavía comunes como el de xerofita, mesofita, hidrofita, psamofita y esclerofítica. Investigaciones experimentales posteriores han demostrado que a veces, plantas que parecen poseer alguno de estos caracteres, por ejemplo,



el xerófito, no siempre funcionan realmente como xerófitas. El sistema crecimiento-forma que más ha perdurado es el del botánico danés Raunkiaer, que diseñó un sistema vida-forma todavía válido en estudios modernos, y en el que se clasifica a las plantas según la manera como sobreviven en la estación de condiciones más adversas.

A esta primera fase esencialmente descriptiva le sucede una fase con un enfoque más funcional. La clave de este cambio llegó con el estudio de la dinámica de la sucesión de la vegetación, llevada a cabo por científicos norteamericanos como Cowles al analizar la sucesión de plantas en las dunas del lago Michigan. El primer libro de texto sobre el tema se debe a Clements (1916), libro que fue, y sigue siendo, controvertido. Simboliza quizá más que ninguna otra obra el enfoque de los que tratan a la comunidad como un super-organismo. Clements argumenta que la comunidad es un organismo que crece y madura con el tiempo, llegando finalmente a un estado estable en equilibrio con el clima del área, y llamó a este estado final el clímax climático. Esta visión es conocida como la teoría monoclimática, puesto que para él el factor climático era el que gobernaba el desarrollo de la vegetación. Clements define la secuencia de vegetación en una serie de pasos que comprenden cinco fases: 1) nudación o la creación inicial de un área desnuda; 2) migración o la llegada de semillas; 3) ecesis o establecimiento de las semillas; 4) reacción o competición entre las plantas ya establecidas y los efectos que ellas tienen con el hábitat local; 5) estabilización, cuando las poblaciones alcanzan una condición de equilibrio con las condiciones del hábitat local y regional. Durante estas secuencias se dan una serie de estadios de transición hasta llegar al clímax (Figura 7.1).

Más tarde Tansley (1923), aunque partiendo de la visión orgánica de la comunidad, no cree que el papel de la vegetación sea predominante, y desarrolla en cambio una teoría policíclica, en la que un conjunto de factores ambientales tales como el clima, el suelo y el hombre, pueden en última instancia controlar la composición del estadio clímax final. Sin embargo otros autores, como por ejemplo Gleason (1926), no están de acuerdo ni con Clements ni con Tansley en la visión orgánica de la comunidad, puesto que creen que no hay conjunto de plantas que pueda persistir en un estado estable durante períodos de tiempo largos. Para él, así como para posteriores investigadores, una comunidad es poco más que una abstracción ecológica, y en realidad una colección al azar de poblaciones con las mismas necesidades ambientales. La convergencia de una sucesión en una escala amplia es mirada como altamente improbable (Whittaker, 1953) y en algunos estudios recientes se ha indicado incluso que la divergencia sucesional puede que sea la norma (Matthews, 1979). Cada especie es vista como poseedora de su propia variación específica y se ven las asociaciones como meros ensamblajes de poblaciones migrantes. Whittaker (1953) define la vegetación clímax

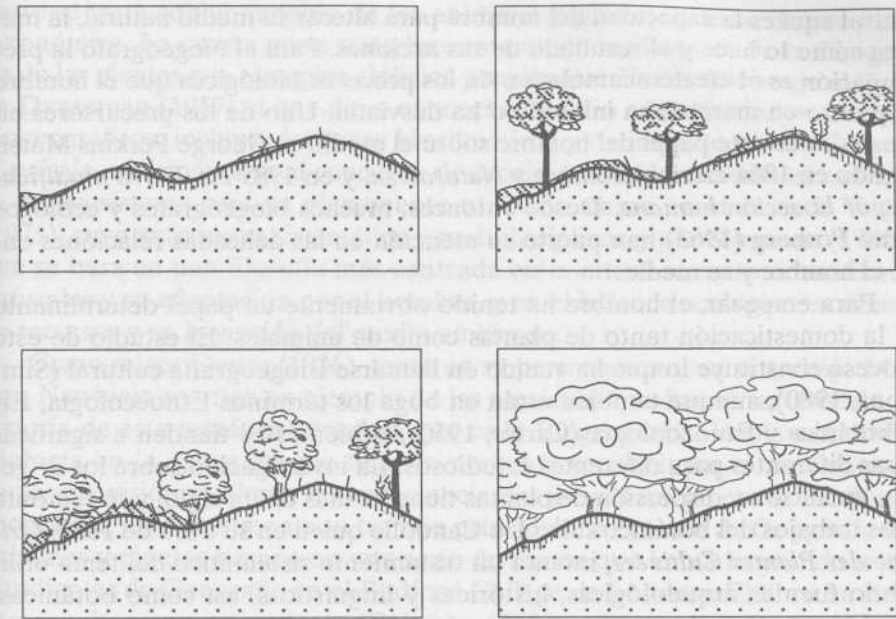


Figura 7.1. Sucesión vegetal.

como un modelo de la abundancia de especies, el cual, aunque localmente constante, puede variar de un lugar a otro de forma notable.

El concepto de sucesión ha sido muy tratado y se ha hecho la distinción entre sucesión primaria, es decir, la que tiene lugar en áreas desnudas, y sucesión secundaria, es decir, la que se desarrolla en áreas que ya han tenido vegetación y están sometidas a la actividad humana o a los riesgos naturales. Harrison (1975) piensa que esta visión inicial de la sucesión ha sido sustituida por una visión en la que se tienen en cuenta los cambios planta por planta, y además, se lleva a cabo un tratamiento estadístico de los datos. Mientras que al principio se creía que la vegetación clímax estaba controlada por el clima, más tarde se aceptó que las comunidades clímax son bastante permanentes y estables y se adaptan a un conjunto de condiciones ambientales y bióticas.

### 7.2.3. El papel del hombre

El enfoque ecológico es básico para la comprensión del papel del hombre en la naturaleza. Tal como expresó en su momento Sauer (1956) el tema

central aquí es la capacidad del hombre para alterar su medio natural, la manera cómo lo hace y el resultado de sus acciones. Para el biogeógrafo la preocupación es el efecto acumulativo de los procesos biológicos que el hombre ha puesto en marcha, ha inhibido o ha desviado. Uno de los precursores en el estudio de este papel del hombre sobre el medio es George Perkins Marsh cuando en 1864 escribe *Hombre y Naturaleza*, y en 1985 *La Tierra modificada por la acción humana*. Desde entonces, muchos biogeógrafos y ecólogos como Fosberg (1963) han puesto su atención en las delicadas relaciones entre el hombre y su medio.

Para empezar, el hombre ha tenido obviamente un papel determinante en la domesticación tanto de plantas como de animales. El estudio de este proceso constituye lo que ha venido en llamarse Biogeografía cultural (Simmons, 1980), aunque también están en boga los términos Etnoecología, Etnobotánica y Etnozoología (Carter, 1950), si bien éstos tienden a significar cosas diferentes para diferentes estudiosos. La investigación sobre los orígenes, evolución y dispersión de plantas tiene ya más de un siglo, y se remonta a los trabajos del botánico suizo De Candolle quien en su obra de 1882, *Origine des Plantes Cultivées*, intenta un tratamiento sistemático del tema utilizando fuentes arqueológicas, históricas y lingüísticas, así como botánicas. También contiene lo que se considera la primera referencia al concepto biogeográfico de centros de origen de las plantas cultivadas, un tema posteriormente desarrollado por el ruso Vavilov.

#### 7.2.4. Sistematización

El hecho de elaborar textos explícitamente de Geografía de las plantas implica un notable esfuerzo de sistematización y siempre es indicio de la madurez de una disciplina. Uno de los más antiguos es el de Hardy (1920), que todavía fue reimpreso en 1952. Entre los textos que merecen destacarse está el de De Martonne (1925-1927), el cual forma parte de su *Tratado de Geografía Física*. Se centra en la explicación de las distribuciones espaciales de plantas y animales en función de los factores climáticos y topográficos, y trata también de las asociaciones vegetales y de la acción del hombre sobre ellas. En España hay que mencionar el texto de *Geobotánico* de Huguet del Villar (1929), científico a menudo olvidado y sin embargo de tanta raigambre geográfica.

En 1936 se publica a título póstumo el libro de Marion Newbigin *Geografía de plantas y animales*. En la primera parte se presenta una amplia perspectiva de la Vida y su entorno incluyendo un capítulo sobre cambio climático escrito por Margaret Dunlop. La segunda parte se centra en las principales comunidades vegetales y sus asociados animales. En la tercera

parte se trata conjuntamente de los animales y plantas y de su distribución taxonómica. La cuarta parte trata brevemente de los factores de la Geografía de las plantas con ejemplos globales y regionales. Fue sin embargo el libro de Dansereau (1957) el que dio a conocer el amplio espectro de los estudios biogeográficos, incluyendo temas bioclimáticos y de impacto del hombre en el paisaje, anticipándose al concepto de ecosistema. Más adelante el concepto de ecosistema será ya plenamente utilizado, como en el caso de Watts (1971), cuyo enfoque es sistemático y multidisciplinar, y por Simmons (1980), que se basa en una filosofía más centrada en la interfase entre ecosistemas naturales y su adaptación por el hombre, y en el balance ecológico en el uso de recursos y en la gestión del medio ambiente.

Como relata Fleure (1936), tanto en su persona como en su trabajo Marion Newbigin se erige en ejemplo de las tensiones que han caracterizado la historia de esta temática compleja que es la Biogeografía. Había estudiado Biología en la época en que todavía no había tenido lugar el movimiento hacia una visión moderna de esta ciencia. Su interés inicial era la Zoología geográfica, pero finalmente su trabajo principal fue el texto de Geografía de animales y plantas basado en una serie de cursos que había impartido a los estudiantes de Geografía en el Bedford College de Londres. El libro ha sido encomiado como estimulante (Polunin, 1960) pero, a pesar de mencionar que la Biogeografía corresponde a lo que los botánicos llaman Ecología, casi una tercera parte del libro trata solamente de la distribución taxonómica de plantas y animales en la superficie de la Tierra. Es un texto en el que ya apuntan las tres principales tensiones con que se encuentra el biogeógrafo:

- 1) La división entre Geografía de las plantas o Fitogeografía y la de los animales o Zoogeografía, la primera siempre muy predominante en los libros de texto y en el campo de la Ecología, aunque en estos últimos años este desequilibrio parece que empieza a disminuir (Udvarý, 1969; Rubio, 1982).
- 2) El hecho de que la Biogeografía se enseña y se trabaja en dos disciplinas bien asentadas y tradicionales, la Biología y la Geografía, las cuales han desarrollado enfoques propios y entre las que no siempre se da la comunicación.
- 3) La definición del elemento geográfico dentro de la temática. El problema radica en si se entiende el término puramente como una visión espacial, y entonces la preocupación del biogeógrafo se centra en explicar las distribuciones de especies, géneros, familias, comunidades, o si se entiende en el sentido de las relaciones hombre y medio, con lo cual el foco de atención es más ecológico. Pero en este último caso la Biogeografía se encuentra con que se aleja de su hogar tradicional dentro de la Biología y la Geografía, para encontrar-

se más cerca de las Ciencias Ambientales y su propensión hacia los aspectos aplicados de la materia, tanto sociales como políticos, entrando en la problemática de la conservación y el manejo del medio ambiente.

### 7.2.5. Perspectivas

Hasta hace poco la atención dedicada a la Biogeografía por parte de los estudios geográficos ha sido escasa, tanto a nivel investigador como en los planes de estudio, y por tanto en la formación de nuevos geógrafos (Ferreiras, 1986), por lo que pese al auge alcanzado en los últimos años se trata de la disciplina de menor avance entre las especialidades físicas. Muñoz (1984b), al analizar las publicaciones de tema biogeográfico, hace hincapié en la dificultad para definir qué estudios de vegetación son realmente geográficos dentro de las investigaciones españolas del último decenio. Como dice M. de Bolos (1984), hasta 1960 en España los estudios de vegetación fueron realizados por botánicos y tienen carácter corológico, es decir, se interesan fundamentalmente por la distribución espacial. Desde 1960 comienzan los trabajos geográficos, destacando los de la escuela de Barcelona, donde desde la implantación del Plan Maluquer en 1969 la Biogeografía ha constituido siempre un tema básico en Geografía Física.

Los trabajos de los biogeógrafos académicos son muy diversificados, lo cual es de esperar en un campo emergente y hasta cierto punto híbrido. Pueden identificarse sin embargo cinco tendencias o campos de estudio principales: 1) unos pocos siguen interesados en el complejo suelo-vegetación, o suelo-vegetación-medio; 2) algunos dirigen sus esfuerzos hacia el estudio de las relaciones entre los principales tipos de vegetación y determinadas especies animales; 3) varios investigadores trabajan en el análisis de las distribuciones de especies individuales y los procesos que pueden influir en su distribución; 4) la mayor parte del trabajo de los biogeógrafos geógrafos es actualmente el tema del cambio de las comunidades o de los ecosistemas con el tiempo, en su mayor parte en el Cuaternario y el Holoceno, en el primer caso utilizando técnicas de datación palinológicas y en el segundo caso técnicas documentales y evidencias de campo; 5) otros biogeógrafos están interesados en examinar las interrelaciones entre el hombre actual y los ecosistemas o comunidades, los efectos de la polución y otros impactos ambientales.

En Inglaterra, por ser uno de los países donde más se cultiva la Geografía Física, también la Biogeografía tiene un buen nivel de desarrollo. Existe un Grupo de Estudio de Biogeografía dentro del Instituto de Geógrafos Británicos desde 1974, con más de 100 miembros, y organizando reuniones

dos veces al año. Se publica la revista *Journal of Biogeography* desde 1974 por una reconocida editorial de Oxford, la Blackwell, la cual tiene un lugar destacado entre las revistas de Ciencias Naturales más citadas internacionalmente. En España la tendencia es claramente expansiva, también con un grupo de estudio propio a nivel nacional.

### 7.3. Tendencias actuales

#### 7.3.1. El estudio espacial

Es claramente la más antigua tradición de lo que puede llamarse la Biogeografía clásica y no debería ser olvidada si los biogeógrafos quieren ser fieles a sus orígenes. Su reaparición viene determinada por los avances en la comprensión de la historia de la superficie de la Tierra, muy notables a través de los modelos de la tectónica de placas y de la distensión de los fondos oceánicos, lo cual genera una amplia controversia en relación a los estudios de filogenética, con sus enfoques cladistas y cladistas transformados. Ello significa que la materia está experimentando una excitante y estimulante nueva vida, por lo que la antigua tradición es todavía un elemento vital en Biogeografía (Nelson y Platnick, 1981; Stoddart, 1981).

Dentro de esta línea, y dentro del ámbito de la Biología, la "nueva Biogeografía" o cladística se basa en un método de clasificación que da lugar a gráficos de relativa afinidad entre especies denominados cladogramas. El aspecto principal es que en su elaboración no se hacen suposiciones a priori de la naturaleza de las relaciones implicadas (Henning, 1966). Al sustituir el taxón representado por los cladogramas por las localidades que éstos habitan se obtienen cladogramas de afinidades de área. No todos los biólogos están convencidos de su valor. Los cladistas recriminan a Darwin su interés en tomar la dispersión como diferente de la vicariancia en la explicación de la disyunción y de las distribuciones endémicas.

También es importante notar que al final de los sesenta y en los setenta la materia recibió otro notable estímulo con la publicación en 1967 de *La teoría de la Biogeografía de las islas* de Mac Arthur y Wilson. En él se argumenta que la biota de toda isla debe estar en equilibrio dinámico entre la inmigración de especies, que es una función de la distancia a su lugar de procedencia, y la extinción de especies todavía presentes, que es una función del área de la isla. Varios trabajos de zoología y botánica parecen confirmar esta tesis, tanto en el campo como en la simulación (Mac Arthur, 1972; Simberloff, 1972). Estos métodos utilizan diferentes niveles espaciales de análisis, donde los factores y mecanismos causales son numerosos e interrelacionados (Ortega, 1983). Estos modelos de ocupación espacial por las

especies animales han llevado a la teoría del equilibrio dinámico, apoyada en modernas técnicas cuantitativas y de tratamiento de la información (Rubio, 1982).

No obstante muchos geógrafos que estudian las plantas han tomado una actitud bastante crítica en relación a esta teoría (Gilbert, 1980). En algunos casos la crítica se basa en los métodos de análisis, en otros en la creencia de que distancia y área no son condiciones suficientes para explicar la presencia o ausencia de especies en determinadas islas.

### 7.3.2. El estudio eco-sistémico

El ecosistema es un concepto en el que la comunidad viviente (biótica) y el medio no-viviente (abiótico) son vistos como un sistema funcional integrado. El concepto necesita por tanto la aplicación de la teoría general de sistemas. El enfoque es de carácter esencialmente sinecológico y a mitad de los años cincuenta se convirtió en el mayor centro de atención en Ecología y en Biogeografía. El ecosistema es la unidad básica en Ecología, tan importante en este campo como pueda serlo el de especie en taxonomía. Es un enfoque mucho menos descriptivo y mucho más funcional y dinámico, ya que se centra en el movimiento de materia y energía a través de sistemas concretos.

Para Stoddart (1967) el concepto de ecosistema amplía las perspectivas de la Biología por sus cuatro propiedades: 1) es monístico, puesto que pone juntos en un solo marco al medio, al hombre y al mundo de los animales y plantas, dentro del cual se analizan las interacciones entre ellos; puesto que el énfasis se pone en todo el conjunto se evita el dualismo geográfico; 2) los ecosistemas están estructurados de una manera más o menos ordenada, racional y comprensible, y por tanto, proporcionan un enfoque que requiere identificar las estructuras existentes y los lazos entre los componentes de esta estructura; 3) los ecosistemas funcionan como resultado de transferencias tróficas, y la cuantificación de las cadenas elementales y de productividad son ejemplos de la manera en que la función puede ser utilizada; 4) el ecosistema es un tipo de sistema general, y por tanto puede ser visto como un sistema abierto con tendencia a un estado estable, sujeto a las leyes de la termodinámica; puesto que el ecosistema está en estado estable posee la cualidad autorreguladora y por tanto, con mecanismos tales como la homeóstasis de los organismos vivientes y las retroacciones como en cibernética.

Es interesante notar que el concepto de ecosistema recuerda en muchos aspectos las ideas de geógrafos clásicos como Herbertson (1865-1915) que acuña el término macro-organismo para describir la entidad compleja de los

elementos físico y orgánico de la superficie de la Tierra. También con el de Ratzel cuando expone su concepto del Estado como un organismo ligado al territorio. De manera similar el ecosistema tiene paralelismos con la Ecología del paisaje de Troll (1939) y la Morfología del paisaje de Sauer (1956). No es de extrañar por tanto que los geógrafos apreciaran muy pronto los méritos del concepto, que según Stott (1984) en muchos aspectos es un enfoque funcional de la Geografía regional. Cualesquiera que sean sus méritos o deméritos, lo cierto es que el concepto domina en la mayoría de libros de texto tanto de geógrafos como de ecólogos.

Según Chorley y Kennedy (1971) la posición y relevancia de la Biogeografía dentro de la Geografía Física ha sido tradicionalmente problemática, pero la aplicación del análisis de sistemas clarifica su papel al poder integrarse, como la Climatología y la Geomorfología, dentro del contexto de la teoría de sistemas. A ciertos niveles, por ejemplo los atributos físicos de la vegetación (cantidad de recubrimiento) pueden constituir parámetros de sistemas morfológicos más amplios o almacenes importantes de energía solar o en cascadas hidrológicas. A niveles de integración más altos, los ecosistemas pueden formar un espectro efectivo de lazos conceptuales entre sistemas proceso-respuesta puramente físicos, y sistemas-control geográficos formados por la interpenetración de sistemas físicos y sistemas proceso-respuesta socio-económicos. En una terminación de este espectro, algunos ecosistemas florales son más similares a sistemas proceso-respuesta dominados por relaciones mutuas de retroacción negativa. En el otro extremo, la actividad de animales desarrollados introduce un elemento de intervención consciente y de retroacción positiva en el funcionamiento del sistema, de manera que éste confluye con el del verdadero sistema de control geográfico manipulado por el hombre con finalidades de manejo de recursos.

El sistema más importante de control en la dinámica de un ecosistema es el que ejerce un determinado elemento cuando es escaso, hecho que se conoce como la Ley de los Mínimos. En la mayoría de los ecosistemas, sin embargo, es difícil determinar cuál es el factor limitante, que puede ser un macro o micro nutriente o un nicho ecológico ausente. Bajo condiciones naturales, un ecosistema puede equilibrarse y dar una productividad dentro de las limitaciones impuestas por el factor limitante. Todavía más importante, el ecosistema, como todos los sistemas biológicos, es homeostático, es decir, tiene la habilidad de compensar las fluctuaciones que se producen en su medio mediante mecanismos de retroacción. Cuanto más complejo es el ecosistema más alto es su potencial de homeóstasis. Es por tanto menos probable que se produzcan fluctuaciones catastróficas de productividad en un ecosistema bien establecido, como en tierras tropicales, que en uno de una isla ártica recién emergida. La complejidad de los ecosistemas en general se

incrementa con una mayor radiación solar total anual, con la edad del ecosistema, y con el tamaño del área por la que se extiende.

### 7.3.3. El enfoque histórico

Una de las características más interesantes de las contribuciones recientes hechas por geógrafos en Biogeografía ha sido una inesperada concentración de trabajos en los que se pone el énfasis en el aspecto histórico (Stott, 1984), y especialmente dedicada a los estudios del Cuaternario (Edwards, 1982). En su análisis de los campos de investigación de los biogeógrafos británicos en los años setenta, Simmons (1980) descubre que hay muchos interesados en el tema histórico, así como en el estudio descriptivo y funcional de ecosistemas. Estos dos campos de actividad, seguido por los estudios aplicados, eran los más tratados. El aspecto histórico de la Biogeografía abarca desde el estudio de las características de la flora y fauna del registro geológico hasta la evolución y tendencias actuales en la distribución de los seres vivos.

Mediante la colaboración con trabajos arqueológicos se ha podido demostrar el significado de las edades de bronce y de hierro en la reducción del bosque en muchas áreas, más por la modificación llevada a cabo por el hombre que por los cambios climáticos. Aunque en principio la investigación polínica se llevaba a cabo en un solo punto, posteriormente ha podido llegarse a estudios regionales de la vegetación pasada. En esta investigación la Palinología era la parte predominante, pero posteriormente ha adquirido mucha importancia el estudio de las propiedades magnéticas, que pueden ser diagnóstico de condiciones ambientales, se conservan durante largos períodos en muchas situaciones, y tienen parámetros que son fáciles de medir. Se aplicaron en principio en contextos lacustres y sus cuencas de drenaje porque pueden usarse como unidades de estudios ecológicos basados en sedimentos. Hoy se ha demostrado que las técnicas tienen muchas aplicaciones en correlación de sedimentos lacustres, en diferenciación de meteorizaciones y pedogénesis, para identificar fuentes de sedimentos, etc. Experiencias en este campo han permitido a Oldfield (1983) proponer un modelo de cambio ecológico relacionando el impacto humano en el medio como una alternativa adicional a modelos cíclicos o sucesionales.

También se registran avances en el aspecto cultural, es decir, en el estudio de cambios históricos en sistemas biogeográficos durante las últimas décadas, incorporando a su reconstrucción la actividad humana. Así, Simmons (1980) pone de relieve la existencia de una Biogeografía natural y una cultural, y reconoce la importancia de los conceptos de Dansereau (1957) en el sentido de que el hombre crea nuevos genotipos y ecosistemas.

### 7.3.4. La acción humana

Desde la segunda Guerra Mundial ha habido una explosión del interés en la historia de la domesticación de plantas y animales y en la primitiva agricultura por parte de muchos científicos, entre ellos geógrafos, empezando con la importante contribución de Sauer (1952). En el contexto biogeográfico la contribución de Harris (1969) es la más importante y se basa en estudios arqueológicos dirigidos a identificar los tipos de ecosistemas en los que se insertan las primeras domesticaciones.

La segunda área de estudio dentro del ámbito de la influencia antrópica sobre la naturaleza es la aplicada, muy importante en los últimos veinte años. Tanto biogeógrafos como ecólogos estudian temas tan cruciales como los recursos, los usos del suelo, la gestión de las comunidades bióticas y los impactos en el medio. Estos temas han sido revisados por Simmons (1980). Chorley y Kennedy (1971) ponen de relieve que precisamente uno de los principales resultados de la intervención humana en los ecosistemas es la reducción de la complejidad natural. Esto revierte en una reducción del potencial homeostático y por consiguiente deja que los factores limitantes actúen con más rigor. Resaltan que la mayoría de los sistemas naturales son complejos y altamente productivos, pero poco valiosos directamente para el hombre. En cambio los ecosistemas artificiales son simples, menos productivos pero más aprovechables.

### 7.3.5. La cuantificación

Aunque en Biología las técnicas estadísticas se introducen en los años cincuenta, existen comparativamente pocas contribuciones cuantitativas en Biogeografía por parte de geógrafos físicos antes de los años setenta, en parte porque eran pocos en número, pero también porque estaban más interesados en aspectos históricos y aplicados, por lo que tendían a preocuparse más por la evolución de plantas y animales en el tiempo que en aspectos ecológicos cuantificables (Simberloff, 1972). Esto queda reflejado en el hecho de que no hay ningún capítulo dedicado a la Biogeografía en *Frontiers in Geographical Teaching* de Chorley y Hagget (1965), y en *Models in Geography* de los mismos autores (1967) el capítulo sobre Biogeografía trata fundamentalmente de ecosistemas (Stoddart, 1967), además de que posteriormente se separó de los capítulos de Geografía Física cuando el libro fue reimpresso en varios volúmenes temáticos en 1969. Es notable que las reclamaciones de algunos geógrafos (Edwards, 1964) en el sentido de que la Biogeografía merecía un lugar más significativo en Geografía Física, ignoran los avances cuantitativos hechos en Ecología y las oportunidades cada vez mayores que se

abren ante ellos, como resultado de la atención que los ecólogos ponen en la producción biológica de los ecosistemas, puesto de manifiesto en el Programa Biológico Internacional de 1965. No obstante, la Biogeografía tendió a poner el énfasis en los aspectos de distribuciones espaciales y las relaciones ambientales sin reconocer la aplicación potencial de los métodos cuantitativos.

Así, los mapas mundiales de formaciones vegetales han sido utilizados muchas veces como base de clasificaciones climáticas, con el intento de ajustar la clasificación a la distribución de plantas. No obstante, la característica estática de tales mapas podría ser reemplazada por una clasificación más dinámica y cuantitativa si la investigación sobre las energías ecológicas, los ciclos de nutrientes y la dinámica de las poblaciones llevaran a una mayor utilización de datos sobre la producción primaria neta (PPN), que es la materia realmente disponible para pastos y para descomposición en humus. La tasa de acumulación de biomasa se expresa en peso de materia orgánica viva por unidad de área y de tiempo, y trabajos recientes del Programa Biológico Internacional han proporcionado estimaciones más ajustadas del PPN a nivel mundial, tanto para continentes como para océanos, lo cual hace posible jerarquizar tipos de biomasa en PPN presentes y pasados.

## 7.4. Áreas de conocimiento

### 7.4.1. Principios y conceptos

La Biogeografía, dentro de la Geografía Física, aparece vinculada a la Ecología y a la Geobotánica, con las que comparte buena parte de sus fines. De tal manera que normalmente resulta difícil separarlas, lo que contribuye a mantener la idea de que la Biogeografía es una ciencia con una base epistemológica muy pequeña y que carece del conjunto de teorías suficientes para convertirse en un paradigma (Simmons, 1980). Como señala Rubio (1982), ese solapamiento con otras ciencias se puede solucionar por la difícil ruta de utilizar sólo esos otros campos científicos como medio y no como fin. Es innegable el poco interés que ha existido hasta ahora en la historia de la Biogeografía, es decir, en la historia de la evolución de la materia. Los estudiosos han llegado al campo de la Biogeografía desde varias especialidades, de manera que no existe demasiada conciencia de grupo. En algunos campos domina todavía la polémica y se asume que las tendencias ahora en uso son las únicas válidas. Sin embargo una ciencia no se constituye sobre bases sólidas hasta que no puede asumir todas las tendencias, integrándolas en el lugar que les corresponda. Algo semejante es lo que sucedió en el campo de la Geomorfología donde, después de una época de dura polémica en

relación a las ideas de Davis, se ha llegado a una ramificación de la disciplina que es lo que hoy día le confiere su rango autónomo dentro de las ciencias de la Tierra. Además, a menudo los nuevos enfoques no son realmente tan nuevos y casi siempre pueden encontrarse precedentes de ellos, por lo que en realidad deben ser tomados más que como una contraposición como uno de los muchos posibles enfoques dentro de un todo muy complejo.

Uno de los problemas en la definición de Biogeografía es que el término "geográfico" para el biólogo significa fundamentalmente espacial, distribucional, locacional. Pero para el geógrafo implica la necesidad de explicar distribuciones y por tanto, comprende un amplio abanico de factores ambientales y culturales. Para el biólogo "geográfico" significa solamente espacial, global y sus explicaciones de las distribuciones se dan en términos de evolución más que de ecología y menos aún de la influencia humana. Por tanto, la Biogeografía de los geógrafos está destinada a ser una combinación de Ecología de plantas, animales y el hombre, mientras que la Biogeografía de los biólogos es esencialmente una plataforma espacial para debatir la manera en que las distribuciones modernas de plantas y animales están relacionadas con sus antecedentes, tanto en términos biológicos como geológicos.

### 7.4.2. Métodos y técnicas

Puesto que como se ha dicho la Biogeografía es una ciencia muy ligada a la Geobotánica y a la Ecología, sus métodos y técnicas proceden de estas ciencias y están destinados a conocer las características que definen tanto los individuos como los grandes grupos de animales y plantas. En base a la fisiología vegetal y a la clasificación en el primer caso, y con predominio del concepto de sistema y de la cuantificación en el segundo. Como en todas las ciencias, en Biogeografía el progreso se origina por la aportación de materiales muy concretos, por el acopio de datos, los cuales deben ser posteriormente interpretados a la luz de las teorías vigentes. Estos materiales concretos varían en función de la rama de la Biogeografía que se cultive, pero en todos los casos hay un material de base ineludible: los inventarios de plantas y animales. Para ello se necesita llevar a cabo observaciones y recolecciones de especies en el campo, que son posteriormente diseccionadas y analizadas en el laboratorio hasta llegar a su correcta clasificación. Para esta clasificación es necesario un detallado conocimiento de la morfología del individuo.

En el estudio de la vegetación merece destacarse el método fitosociológico de Braun-Blanquet (1932), un resumen del cual puede encontrarse en las pautas para el estudio de la vegetación que Panareda (1994) ha publicado recientemente y que ha de resultar muy útil a los estudiantes de Geografía. Tal

como se ha dicho en el caso de las tendencias actuales, la cuantificación es hoy en día esencial en el estudio biogeográfico, como en las demás ramas de la Geografía. Por tanto, conviene conocer las bases del análisis estadístico. La representación cartográfica tiene una amplia gama de posibilidades, desde un simple mapa temático manual hasta una cartografía asistida por ordenador. En el caso de la Biogeografía histórica el estudioso debe familiarizarse con las técnicas de reconocimiento y clasificación del registro fósil.

El material recogido puede ser objeto de dos tratamientos de base: el cartográfico y el estadístico. La confección de mapas está estrechamente relacionado con el estudio de la distribución espacial de especies y de comunidades, es decir, con el estudio geográfico más clásico. El estudio estadístico está más en relación con el enfoque ecológico.

#### **7.4.3. Corología: distribución espacial**

La Corología tiene como objeto la delimitación de las áreas de distribución geográfica de las especies y de las demás unidades taxonómicas o taxones (Lacoste y Salanon, 1973). En la Corología clásica se definen y delimitan los territorios por las especies, estableciéndose reinos, regiones, provincias, etc. Esta jerarquización era el resultado de la comparación de diferentes áreas, destacando en España los trabajos de Gaussen (1965) y de Rivas Martínez (1973).

En el pasado se ha abusado excesivamente de la utilización del modelo de los puentes continentales para explicar la expansión de ciertas especies a ambos lados de grandes masas oceánicas, apoyándose en teorías como la deriva continental o la tectónica de placas. Hoy en día se admite que muchas formas de distribución temporal y espacial son debidas a la dispersión por azar y a la vicariancia (Stoddart, 1981).

#### **7.4.4. Biocenología: las comunidades de organismos**

Los hechos biológicos tienen un campo de desarrollo que denominamos biosfera, caracterizado por la adaptabilidad de formas de vida a diferentes medios geográficos, determinando un reparto irregular pero ordenado de agrupaciones y conjuntos vegetales y animales. El paisaje biosférico se compone de espacios terrestres y oceánicos, aunque normalmente no suele dedicarse en Biogeografía excesiva atención a este último y, dentro del terrestre, se evita las referencias a los animales (Zoogeografía), especialmente por su capacidad de transferencia de un lugar a otro en determinados ámbitos. Por ello, es el mundo vegetal el que recibe mayor énfasis y sirve de base

general para explicar las cadenas biológicas de la biosfera. Pero además, las agrupaciones o asociaciones espaciales tienen como origen una evolución temporal o paleobiogeográfica que resulta de una combinación de factores evolutivos, donde las sucesiones biológicas van adaptando la vida a nuevas situaciones climáticas.

#### **7.4.5. Ecología: las relaciones con el medio**

Ya se ha tratado ampliamente la importancia del tema ecológico en Biogeografía. Dentro de esta área de conocimiento el geógrafo debe estudiar en detalle los factores que influyen en el desarrollo de plantas y animales, como son los factores derivados de la energía solar, los factores hídricos y los factores químicos. También las acciones mecánicas sobre los organismos. Una vez conocidos estos factores es necesario abordar el tema de las interacciones entre ellos y los seres vivos. Dentro del estudio ecológico cabe distinguir entre la autoecología, es decir, el estudio de las relaciones ambientales de las plantas individuales, y la sinecología o el estudio de las relaciones ambientales de las comunidades vegetales.

#### **7.4.6. Biogeografía histórica**

La Biogeografía histórica trata esencialmente de reconstruir las biogeografías del pasado, de la secuencia de sistemas de vegetación. Las técnicas que fundamentalmente se usan son geológicas, arqueológicas y biológicas, e incluyen análisis de polen y de diatomeas, estudios de microfósiles y de columnas estratigráficas, además de las evidencias procedentes de las dataciones por radiocarbono. Existe además un interés particular en el estudio del impacto ecológico de las sociedades humanas durante el período prehistórico. Así, geógrafos físicos junto con biólogos, limnólogos y otros investigadores han podido llegar a establecer la naturaleza de la flora y fauna a final del Cuaternario, y en la transición entre fases del mismo como el paso entre la tundra y el bosque caducifolio. Estas investigaciones han establecido con éxito los principales estadios en los cambios de vegetación en relación al clima, pero también en relación a la influencia antrópica.

#### **7.4.7. Biogeografía ambiental**

Hasta hace pocos años solamente se consideraba recurso natural a aquellos productos ligados a la producción (Ramos, 1978), pero hoy entra tam-

bién en este concepto la vegetación, la fauna, el agua y, en definitiva, el paisaje. Precisamente entre los temas que han tenido mayor incidencia social, y que por tanto han permitido la penetración de geógrafos en la administración pública, está el relativo al estudio de los ecosistemas actuales enfocados como recursos y para la defensa del medio ambiente. Temas muy tratados han sido la utilización de espacios de ocio, los incendios forestales, la degradación de los litorales, el retroceso de la vegetación, la erosión, etc. Para ello se ha contado con medios técnicos, tales como los sensores remotos, que han permitido cartografías de amplias regiones o la simple observación de las variaciones generadas por determinados procesos de degradación del medio ambiente. En cierta manera, se trata de estudiar la incidencia del hombre en las comunidades vegetales y en los ecosistemas en general, lo cual entronca esta vía de aplicación con las señaladas para la Climatología y la Geomorfología en cuanto a la influencia de la actividad humana en el medio físico. Se trata de armonizar las actividades humanas y resolver el conflicto existente entre desarrollo y conservación. El principal obstáculo estriba en que los recursos son difícilmente cuantificables y valorables con visión económica, por lo que no puede competir con la exactitud de la economía y de la ingeniería (Ramos, 1978). Sobre estos temas son interesantes los trabajos de Simmons (1974), Harrison (1975), Rubio (1984), Panareda y Ríos (1985). Estos estudios entroncan directamente con la mejor defensa ecológica del espacio, tanto natural como cultural, en la que están implicadas las restantes ciencias de la naturaleza. También en esta línea se encuentran los estudios sobre el papel de la vegetación en la dinámica erosiva (Thornes, 1990; Sala y Calvo, 1990).

Además está el tema de las áreas protegidas, como son los Parques Nacionales, que van cobrando cada vez más importancia a medida que el ecologismo va extendiéndose, incluso a nivel político. De hecho, las ideas conservacionistas comenzaron ya en el siglo XVII y XVIII, reflejadas en España en Ponz y en Cavanilles, aunque fue en los países del nuevo mundo como Estados Unidos (1872), Australia (1879) o Canadá (1885) donde aparecieron las primeras áreas protegidas. La política de parques es por tanto otra de las áreas de aplicación biogeográfica.

## 8. Modelización y experimentación

### 8.1. Introducción

El mundo real es muy complejo. Para entender la estructura y funcionamiento de alguno de sus componentes los científicos intentan reducir y simular la realidad substituyéndola por formas más simples que las que están estudiando. Esta simplificación de la realidad se lleva a cabo construyendo modelos. Así pues, un modelo es un artificio, una representación idealizada, desarrollado y usado con el fin de poner de relieve ciertos modos de explicación de la realidad o de demostrar algunas de sus propiedades. Debe distinguirse entre un modelo y una teoría, pues aun cuando ambos se hallan muy estrechamente relacionados, el modelo equivale a una interpretación de la teoría. Por tanto, una teoría dada puede explicarse mediante diversos modelos. En consecuencia un modelo no contiene toda la verdad en relación a una teoría, pero es útil para la comprensión de parte de ella.

Los modelos son un elemento clave en el desarrollo de las ciencias, ya que están en la base de la comprobación crítica de las teorías científicas. La validez de una teoría puede ser verificada por medio de un proceso deductivo que lleva a la formulación de predicciones a través del uso de un modelo. Este proceso deductivo es el mecanismo por el cual las premisas iniciales de una teoría pueden ser elevadas a conclusiones y sobre el cual la modelización puede ser más útilmente aplicada (Haines-Young y Petch, 1986). Los modelos son procedimientos que, a partir de unos valores de entrada generan unas salidas; en otras palabras, son instrumentos para la formulación de predicciones a partir de unos datos iniciales conocidos. La utilización de modelos implica un cierto nivel de incertidumbre, que es necesario estable-



cer en cualquier proceso de verificación de teorías que se realice. Solamente cuando los modelos son considerados en estos términos su papel dentro de la ciencia puede llegar a ser verdaderamente apreciado.

La construcción de modelos se lleva a cabo a través de un proceso de selección de la información, eliminando los datos poco relevantes y permitiendo, de esta manera, un acceso más directo al núcleo del problema investigado. Un modelo debe ser suficientemente simple como para ser entendido y manipulado con facilidad por los usuarios, y al mismo tiempo suficientemente complejo como para representar un amplio abanico de características del fenómeno estudiado. Otro aspecto importante en la construcción de modelos es que deben estar estructurados de tal manera que los aspectos más significativos del fenómeno estudiado, ya sea un sistema natural o bien social, se presenten de forma interrelacionada. Una vez desarrollado, un modelo se convierte en un instrumento en constante evolución y perfeccionamiento a partir de nueva información del fenómeno que se investiga.

## **8.2. La función de los modelos**

### **8.2.1. Los modelos en ciencia y en ingeniería**

El deseo de formular predicciones sobre la realidad no es un aspecto exclusivo del mundo científico. En la vida diaria las personas realizan predicciones continuamente, anticipando sucesos y elaborando planes para el futuro. Lo que distingue a la ciencia, no obstante, es la finalidad para la cual se emplean las predicciones. Los científicos emplean una predicción como instrumento para la comprobación crítica de una teoría y como guía para modificar y mejorar su comprensión de la realidad. El uso de modelos es distinto según se realice en ciencias puras o en ciencias aplicadas. Tanto un físico como un ingeniero pueden utilizar modelos para formular predicciones, pero el principal objetivo de un físico es el de comparar el resultado de la predicción con las observaciones reales, es decir, usa el modelo como herramienta de verificación de una teoría. El ingeniero, en cambio, usa el modelo únicamente para realizar una predicción como base para la toma de decisiones o para la realización de acciones determinadas.

La distinción entre el científico y el ingeniero tiene una importancia considerable para entender cuál es realmente la contribución de los científicos al desarrollo del conocimiento. Es erróneo, y por lo tanto criticable, el uso pseudocientífico de modelos que no tiene como finalidad una evaluación crítica de ideas o teorías. No es más científico un trabajo por el hecho de utilizar modelos, sobre todo si éstos no se utilizan como herramienta pa-

ra verificar teorías. Este planteamiento no implica, sin embargo, ninguna crítica al uso de modelos en trabajos aplicados. Las diferentes actitudes de un científico y un ingeniero delante del uso de modelos viene condicionada por sus respectivos trabajos y ambas son válidas en sus respectivos contextos. En este sentido, un ingeniero puede muy bien no estar interesado en la verificación de la teoría sobre la cual se basan sus predicciones, porque la teoría ya ha sido utilizada satisfactoriamente en el pasado; aunque es claro que el ingeniero puede no estar interesado en la verificación de una teoría, una comprobación crítica es siempre necesaria en alguna fase del proceso de predicción, si es que éste se desea realizar sobre una base racional.

### **8.2.2. Los modelos en Geografía Física**

No es fácil encontrar una definición amplia del papel de los modelos en Geografía Física, especialmente porque no existe entre los geógrafos un criterio común para considerar un modelo como tal, o saber cual es el uso específico de un modelo determinado. En general, puede decirse que un modelo es una representación idealizada, o más o menos simplificada, de la realidad del mundo físico. Una de las formas clásicas de reducir y abstraer la complejidad de la superficie terrestre es el mapa (topográfico, geomorfológico, etc.).

Chorley y Haggett (1967) consideran que un modelo puede ser tanto una teoría, una ley, una hipótesis, o una idea estructurada, que permite representar los aspectos fundamentales del fenómeno estudiado; también una relación, una ecuación, o una síntesis de datos; lo más relevante para estos autores es, sin embargo, que desde un punto de vista geográfico, un modelo puede incluir también razonamientos sobre la realidad mediante la utilización de transposiciones en el espacio para generar modelos espaciales, o en el tiempo para generar modelos históricos. Haines-Young y Petch (1986) consideran, por el contrario, que las teorías, leyes y hipótesis ya tienen una función definida dentro de la práctica científica, y que el hecho de calificarlos como modelos no aporta ningún aspecto nuevo a su definición. Asimismo, la idea de que los modelos son simplificaciones de la realidad es confusa y puede conducir a error. Según estos autores los modelos juegan un papel distinto al de los elementos antes mencionados (teorías, leyes, etc.).

Los modelos no pueden llegar a representar nunca el mundo real de manera global, sino que solamente pueden ser analogías con ciertos componentes y comportamientos parecidos al fenómeno que se pretende estudiar, y difieren en el grado de similitud con el mundo real de diversas maneras, por ejemplo, en relación a la semejanza física y también al grado de acierto de las predicciones. El parecido físico no es necesariamente una garantía de

que el modelo sea efectivo. A menudo se utilizan modelos a escala muy precisos para predecir la respuesta de diversos fenómenos naturales, por ejemplo, la erosión y la sedimentación marinas y la respuesta hidrológica de cuencas de drenaje. La similitud física no requiere necesariamente una semejanza física obvia, sino que depende básicamente del funcionamiento de leyes físicas similares tanto en el modelo como en el mundo real. Por ejemplo, el flujo laminar de agua en un acuífero saturado es proporcional al gradiente y conductividad hidráulicos del material del acuífero (ley de Darcy). De la misma manera el flujo de corriente eléctrica es proporcional al gradiente de presión eléctrica (voltaje) y la conductividad (1/resistencia), según la ley de Ohm. Por lo tanto, el flujo de agua a través de un acuífero puede ser simulado midiendo la corriente en un material conductor de las mismas características que las del acuífero. A este tipo de modelos se les denomina analógicos, y constituyen un primer paso hacia la representación abstracta de procesos mediante el uso de expresiones lógicas o matemáticas. En este caso, el movimiento del flujo en el acuífero se representa a través de la expresión matemática:

$$q = Aki$$

donde  $q$  es el flujo por unidad de tiempo,  $A$  es el área,  $k$  es el coeficiente de permeabilidad e  $i$  es el gradiente hidráulico. Mediante este procedimiento, el flujo puede ser calculado en cada punto del acuífero, ya sea manualmente o bien usando una calculadora o un ordenador. En este último caso, si un modelo informático calcula el flujo a partir de esta expresión matemática, el modelo puede ser aún calificado de semejante al mundo real, aunque el ordenador no guarde ningún parecido físico con el proceso estudiado, en este caso el movimiento de agua en el acuífero.

Muchos modelos que simulan procesos o formas naturales sólo se pueden parecer al mundo real en un nivel abstracto-matemático. Este tipo de similitud no tiene porque confirmar o rechazar la capacidad de un modelo para producir predicciones más o menos verdaderas. Es tan equivocado pensar que un modelo es correcto porque está basado en fórmulas matemáticas, como rechazarlo porque guarda poco o ningún parecido físico con la realidad. Evidentemente, ningún modelo es mejor que los datos reales o observaciones sobre el fenómeno estudiado. Cuando las predicciones se efectúan dentro del rango de los valores utilizados para la construcción del modelo, entonces éste dará probablemente resultados aceptables.

La modelización ha sido utilizada por ejemplo como alternativa a las cuencas de drenaje en trabajos de investigación en Geografía Física, especialmente en Hidrología y Geomorfología. No obstante, se les debería considerar como instrumentos complementarios, pero en ningún caso sustituto-

rios de la medición y experimentación en el campo (Gregory y Walling, 1973). Tres son las áreas principales de aplicación de los modelos en este tipo de estudios: *a)* el estudio de la respuesta de cuencas de drenaje, el funcionamiento de los diferentes procesos que en ella actúan, y las relaciones entre procesos y formas resultantes; *b)* la reconstrucción de ambientes paleo-hidrogeomorfológicos con el objetivo de predecir fenómenos actuales; *c)* la evaluación de los efectos de los cambios en las características de la cuenca, particularmente los ocasionados por actividades antrópicas. Sea cual sea el uso que se haga de un modelo en Geografía Física sus resultados deben ser verificables. En muchos casos, la predicción puede ser comprobada numéricamente mediante comparación con observaciones reales, que deben ser independientes de los valores utilizados para la construcción del modelo, con el objetivo de obtener una valoración exacta de la fiabilidad de la misma. No siempre esta comprobación se puede realizar con tanta exactitud, sino que a veces, las predicciones de ciertos modelos son menos precisas ya que contiene un mayor nivel de incertidumbre o, en otras palabras, las predicciones no son exactas sino que son más o menos probables.

### 8.3. Modelos y fuentes de error

Existen en la literatura muchas clasificaciones de modelos. Una primera clasificación que puede hacerse se basa en el papel de los modelos en el proceso de verificación de teorías y en las fuentes de error que este proceso genera (Haines-Young y Petch, 1986). Tal y como ya se ha expuesto anteriormente, en el proceso de verificación de una teoría se comparan los resultados de sus predicciones a través del uso de un modelo con los resultados obtenidos mediante observaciones de la realidad. Esto es posible porque las observaciones se realizan lógicamente en relación a la teoría, es decir, se hacen para poder comprobar su validez. De la misma manera se obtienen predicciones utilizando el modelo. El principal problema en el proceso de verificación surge a continuación: a qué elemento del proceso se debe imputar cualquier discrepancia entre las predicciones del modelo y las observaciones reales, ¿a las observaciones, al modelo o a la teoría?

Las observaciones sobre el fenómeno estudiado pueden conducir a la discrepancia en relación al modelo de dos maneras posibles: *a)* porque los principios internos de la teoría sean equivocados; o *b)* porque las observaciones han sido realizadas erróneamente. El modelo en si también puede generar errores: *a)* por el hecho de contener un elemento de azar; *b)* porque el modelo no está absolutamente delimitado por la teoría y por ello requiere calibración mediante el uso de información obtenida empíricamente, la cual puede estar también sujeta a error; *c)* debido a que los componentes

del modelo pueden tener un comportamiento fluctuante o indeterminado. Estas características proporcionan la base para una clasificación de los modelos tal y cómo se utilizan en la práctica científica, es decir, como elemento clave en el proceso de verificación de teorías. Para establecer esta tipología se usan tres criterios:

- ¿Es el modelo de tipo determinístico o estocástico?
- ¿Está el modelo totalmente determinado por la teoría o sólo parcialmente?
- ¿Se trata de un modelo físico o abstracto?

### 8.3.1. Modelos determinísticos y modelos estocásticos

Algunos modelos producen un solo resultado o predicción a partir de un solo valor de entrada. A este tipo de modelos se les llama determinísticos. Se trata de modelos que incorporan una estructura teórica basada en leyes de la física (continuidad, conservación de la masa, energía, momento, etc.) y que incluyen series de ecuaciones simples o diferenciales. Sin embargo, la falta de conocimiento de la naturaleza y del funcionamiento preciso de los diferentes procesos que operan en los sistemas naturales hace que su ámbito de aplicación sea limitado.

Hay modelos que, por el contrario, tienen la posibilidad de producir dos o más resultados a partir de un solo valor de entrada. Estos modelos se utilizan cuando parte de una teoría no puede ser descrita únicamente por los mecanismos que contiene. Esta situación se produce cuando se conoce la existencia de efectos desconocidos que pueden producir fluctuaciones en un componente determinado del modelo debido al azar, o bien cuando el investigador posee poca o nula información sobre la dinámica del fenómeno que se va a analizar. En la construcción de este tipo de modelos se incorpora un elemento de azar a uno de sus componentes o a parte de su estructura. Estos modelos se conocen con el nombre de estocásticos. Con modelos de este tipo la discrepancia entre predicción y observación puede ser atribuible al azar. Este tipo se ha utilizado ampliamente, por ejemplo, para simular el comportamiento hidrológico de cuencas de drenaje (Shreve, 1975). No obstante, estos modelos requieren generalmente la calibración del elemento de azar, en cuyo caso se incorpora una nueva fuente de incertidumbre o error en el proceso de verificación. Como se explicará posteriormente, los análisis de tipo estocástico se usan para generar secuencias sintéticas de datos climatológicos, hidrológicos y geomorfológicos, determinando las características de la distribución estadística de un grupo de datos históricos y utilizando un generador de números al azar para extender la secuencia de

datos. Por ejemplo, la precipitación y el caudal mensual o la producción de sedimento de una cuenca de drenaje pueden ser sintetizadas por un modelo estocástico basado en la media, la desviación tipo y la correlación entre los datos de la serie. Un caso de este tipo sería el modelo desarrollado por Thomas y Fiering (1962), para la generación de secuencias de caudales sobre la base de parámetros estadísticos simples. Estos modelos incluyen normalmente procesos como las cadenas de Markov o procedimientos de simulación del tipo Monte Carlo.

### 8.3.2. Modelos en relación a teorías

Los modelos pueden estar total o parcialmente determinados por una teoría. Un ejemplo simple de un modelo totalmente determinado por una teoría sería una de las leyes del movimiento de Newton:

$$s = vt + 1/2ft^2$$

donde  $s$  es la distancia recorrida por un objeto después de un tiempo  $t$ , a partir de una velocidad inicial  $v$ , y siendo sujeta a una aceleración uniforme  $f$ . Una vez conocidos los valores de  $v$ ,  $f$  y  $t$  podemos predecir  $s$ .

Un ejemplo de un modelo parcialmente precisado por una teoría sería la Fórmula Racional que predice el pico del caudal de un hidrograma ( $Q$ ) en cuencas de drenaje pequeñas:

$$Q = C \cdot I \cdot A$$

donde  $I$  es la intensidad de la lluvia y  $A$  es el área de la cuenca. La variable  $C$  es el coeficiente de escorrentía que se determina a partir de las características de la cuenca. El valor de  $Q$  no puede ser predicho directamente a partir de la teoría ya que cualquier predicción implica el uso de un valor empírico del valor  $C$ . Esto significa que durante el proceso de comprobación del ajuste de un valor  $Q$  con un valor real, la discrepancia puede surgir debido a una estimación inadecuada de  $C$  más que como resultado de la propia utilización del modelo.

### 8.3.3. Modelos físicos y modelos abstractos

La tercera fuente de incertidumbre, usada como criterio para esta clasificación de modelos, tiene en cuenta si el modelo es de tipo físico o abstracto. El atributo abstracto se usa para describir aquellos modelos que existen

sobre la base de conceptualizaciones y que pueden ser representados de manera simbólica. Este término se utiliza en esta clasificación en parte en contraposición al término físico, como en informática, y en parte para mostrar que estos modelos pueden ser representados de manera abstracta. Frecuentemente se les describe como modelos conceptuales, aunque este calificativo no es suficientemente preciso. El adjetivo matemático es el más correcto para designar a este tipo de modelos, aunque con frecuencia su significado se mal interpreta o asocia únicamente y de manera errónea con procedimientos particulares de tipo simbólico (Haines-Young y Petch, 1986).

A menudo se ha asumido que los modelos que se utilizan para realizar predicciones son sólo de tipo abstracto. No obstante, también se pueden utilizar modelos compuestos por objetos reales que simulan los objetos contenidos en la teoría, de la misma manera que las abstracciones o procesos simbólicos lo hacen en los modelos abstractos. A estos modelos se les denomina físicos y también se usan para generar predicciones a partir de unas entradas de datos. Por ejemplo, el transporte de sedimento en ríos puede ser estudiado en base a un modelo físico en un canal de ensayos, o de manera abstracta mediante un grupo de ecuaciones que lo describan.

#### **8.4. Principales tipos de modelos**

##### **8.4.1. Modelos naturales representativos**

Los modelos del tipo natural-representativo pueden ser definidos como sistemas naturales similares al estudiado pero más simples, mejor conocidos y más fáciles de observar que el original. En Hidrología, por ejemplo, las cuencas representativas y experimentales proporcionan estos modelos análogos naturales, y forman la base para el conocimiento y predicción del comportamiento de otras similares, a menudo de dimensiones superiores. El objetivo de establecer cuencas representativas es para que reflejen el funcionamiento hidrológico de cuencas de características parecidas, sobre todo en relación a la litología, el clima, los suelos, la vegetación y los usos del suelo. La función de estas cuencas-modelo es también la de proporcionar datos para el estudio de la respuesta hidrológica de la cuenca como consecuencia de cambios físicos introducidos durante el período de experimentación (cambios en los usos del suelo como: deforestación, urbanización, etc.). En Geomorfología se escogen a menudo regiones variadas y accesibles como modelos naturales representativos de formas estructurales. Estas regiones se dividen en áreas definidas a partir de la asociación de tres factores controlables en el terreno: pendiente, relieve y frecuencia de vertientes pronunciadas. La combinación de estos factores proporciona

distintos tipos de terreno con los cuales otras regiones pueden ser comparadas y clasificadas.

Los estudios de evolución de vertientes han utilizado a menudo analogías naturales como base para el desarrollo de modelos. Estos modelos se basan en la idea de que el retroceso de una vertiente está determinado por la diferencia entre el volumen de regolito transportado y depositado en una sección de la vertiente y la cantidad de material movilizado desde esa misma sección vertiente abajo. Este concepto fue desarrollado inicialmente por Morawetz (1932) y ampliado posteriormente por Anherst (1954), quien demostró que cualquier cambio en la base de una vertiente se puede transmitir vertiente arriba a través del movimiento del regolito. Sobre esta base conceptual, la construcción de nuevos modelos para la explicación de la evolución de vertientes se ha desarrollado notablemente en las últimas décadas (modelo de nueve unidades de vertientes de Dalrymple *et al.*, 1969), debido a que están superadas las explicaciones propuesta por modelos clásicos como los de Davis y King basados en la teoría de ciclos. Los modelos de evolución de vertientes se dividen generalmente en base a cuatro aproximaciones metodológicas (Young, 1972): modelos de recesión directa, modelos basados en reptación y mecanismos del flujo, modelos que incluyen interacción de formas, y casos especiales basados en mediciones de procesos.

Las relaciones orgánicas han sido utilizadas también como analogía para la explicación del mundo real. Este enfoque se ha utilizado para la formulación de modelos de tipo holístico, especialmente en investigaciones ecológicas dentro de la Biología. En Geografía Física los modelos basados en relaciones orgánicas se han usado a distintos niveles, a partir de analogías existentes que relacionan las propiedades de los organismos con las características de las áreas geográficas, especialmente en estudios sobre modelos de paisaje, aunque también para buscar explicaciones a la relación entre el hombre y la naturaleza (Stoddart, 1967). El criterio fundamental empleado por geógrafos es la capacidad de organización de los componentes del sistema de una forma funcional e interdependiente, en el cual a pesar de la existencia de un flujo constante de energía y materia, se mantiene en un estado de equilibrio. Este complejo en equilibrio posee diversas propiedades, entre ellas, adaptación, cohesión, reacción y recreación.

##### **8.4.2. Modelos físicos a escala**

Los modelos físicos son esencialmente representaciones a escala en laboratorio, en los que se construyen elementos estructurales fundamentales del fenómeno estudiado de acuerdo con las leyes de similitud, y en los que las entradas pueden ser controladas durante los experimentos. General-

mente estos modelos se apoyan en modelos de simulación informática como base en la realización de cálculos matemáticos posteriores. Este tipo de modelos proporcionan un amplio abanico de posibilidades, por ejemplo, para la investigación de procesos en vertientes y cuencas de drenaje. Los modelos a escala se han utilizado sobre arena para simular los efectos de la lluvia sobre la erosión de vertientes, o para reproducir la evolución de formas geomorfológicas. La razón principal para el uso de este tipo de modelos es la aceleración de la escala temporal. La interpretación de los resultados requiere considerar minuciosamente los efectos del cambio de escala sobre las constantes físicas, como densidad, viscosidad y resistencia del material.

Un ejemplo reciente del uso de modelos a escala para la investigación de procesos y formas resultantes en el campo de la Geomorfología fluvial lo tenemos en Warburton y Davies (1994). Estos autores presentan un modelo físico a escala de un río de gravas con morfología trenzada para el estudio de la variabilidad espacial y temporal del transporte de sedimento. La dinámica altamente variable del transporte en este tipo de canales múltiples ha sido tradicionalmente fuente de numerosos interrogantes para los geomorfólogos e ingenieros que han trabajado en este tipo de sistemas. Este es un fenómeno difícil de estudiar de manera experimental en el campo, ya que los problemas para la medición detallada del transporte de sedimento y la geometría hidráulica de canales fluviales en condiciones naturales son todavía enormes. Para avanzar en la solución de este problema se pueden utilizar modelos hidráulicos a escala en el laboratorio. Un modelo hidráulico a escala debe satisfacer necesariamente la condición de reproducción de las principales características del prototipo natural escogido para la simulación. Esto significa que debe cumplir las leyes de modelización o de similitud dinámica. Un canal de ensayos hidráulicos consiste en una plataforma, generalmente con paredes de cristal, en el cual se pueden controlar y medir las principales variables que intervienen en un proceso determinado (pendiente del canal, caudal, tamaño del grano, estructuras en el lecho, etc.). Los canales de ensayos varían en sus características constructivas (medidas y materiales), y pueden tener desde algunos metros de largo y centímetros de ancho hasta algunas decenas de metros de largo y varios metros de ancho. Generalmente suelen estar preparados para la instalación de técnicas de control y medición.

El uso de modelos físicos a escala presenta diversas ventajas e inconvenientes. Las ventajas más importantes se resumen en la posibilidad de reproducir el comportamiento del fenómeno investigado, de controlar las variables más importantes que juegan en el sistema, y de medir estos procesos con frecuencias de muestreo impracticables en el campo. Además, en un modelo a escala se pueden repetir los ensayos tantas veces cuanto se desee

para obtener todas las series de datos necesarias para la posterior comprobación de la hipótesis de trabajo inicial. El inconveniente principal radica en las simplificaciones y aproximaciones que se deben realizar durante el trabajo, las cuales hay que tener, muy en cuenta durante el proceso de interpretación de los resultados.

#### 8.4.3. Modelos analógicos

Los modelos analógicos son instrumentos mecánicos o eléctricos que integran características funcionales equivalentes a aquellas del sistema que se investiga. Un ejemplo clásico de modelo analógico es el utilizado por Lewis y Miller (1955). Estos autores utilizaron una mezcla de arcilla del tipo caolinita para simular ciertas características del proceso de deformación de los valles glaciares. Un modelo analógico más elaborado y muy conocido fue el construido por el Massachusetts Institute of Technology (1956) para simular el proceso de congelación y descongelación de las capas del suelo. La superficie del terreno y los sucesivos horizontes de suelo se representaban por medio de depósitos y tubos de cristal, en el interior de los cuales el nivel de agua se programaba en función de las temperaturas de cada uno de los horizontes y el flujo de calor en el suelo se reproducía por medio de flujo de agua.

Una de las analogías más utilizadas es aquella entre el flujo de corriente eléctrica o calor y el flujo de agua. Por ejemplo, Tinlin y Thames (1969) utilizaron un sistema eléctrico análogo a una cuenca de drenaje que incorporaba circuitos electrónicos para representar los procesos hidrológicos de interceptación, infiltración, agua en el suelo, escorrentía y agua subterránea. Las entradas (precipitación) se aplicaban mediante una corriente constante que se iba modificando progresivamente, hasta que la señal eléctrica final se parecía al hidrograma del caudal a la salida de la cuenca. Las ventajas de este tipo de modelos es que los procesos a estudiar pueden estar muy simplificados, considerando sólo las variables imprescindibles que atañen a un problema específico, y permiten al operador la reducción de la secuencia natural en experimentos comparativamente más cortos. Las posibilidades de estos modelos son todavía más amplias si se utilizan programas informáticos para la simulación y modelización de procesos físicos, a partir del desarrollo matemático de modelos conceptuales (Kirkby *et al.*, 1987).

#### 8.4.4. Modelos matemáticos

Existen diferentes tipos de modelos matemáticos, desarrollados a partir de modelos conceptuales, utilizados en Geografía Física para la descripción

cuantitativa de procesos en sistemas naturales. Normalmente, los modelos matemáticos emplean series de ecuaciones para transformar la información de entrada en valores de salidas. Las ecuaciones suelen representar los procesos que intervienen en el sistema y pueden ser derivadas analíticamente, empíricamente o de manera combinada. Existen muchos tipos de modelos matemáticos y, aunque aquí se describen desde más simples hasta a más complejos, a menudo las categorías se superponen considerablemente y muchos de ellos contienen elementos de diversos tipos. En este sentido, cabe señalar que no hay una sola tipología de modelos unánimemente aceptada. El texto siguiente se basa en la clasificación propuesta por Kirkby *et al.* (1987). Según estos autores los modelos se pueden dividir básicamente en: modelos determinísticos o de caja negra, modelos de procesos y de balance de masa o de caja gris y modelos estocásticos.

Todos los sistemas naturales están sujetos a unas entradas ( $X$ ) que una vez transformadas por los mecanismos del sistema ( $S$ ) proporcionan unas salidas ( $Y$ ). Por lo tanto:

$$Y = S(X)$$

El componente transformador ( $S$ ) se conoce como la función de transferencia y es, de hecho, el propio sistema. Generalmente  $S$  no es igual a 1 y, por esta razón, es necesario definir la naturaleza de esta función de transferencia. Para analizar las relaciones entre las entradas y las salidas del sistema se pueden tomar diferentes caminos: modelos de caja negra, de caja gris y de caja blanca (Chorley y Kennedy, 1971). En los modelos de caja negra el sistema se trata como una unidad, sin considerar su estructura interna, y la atención se centra en el carácter de las salidas que resultan de valores de entrada conocidos; es decir, se conoce lo que entra y lo que sale pero no que pasa en el interior del sistema. Los modelos de caja gris comprenden una visión parcial del interior del sistema. El interés se centra en un número limitado de subsistemas, pero no se toman en consideración la totalidad de las operaciones internas. En este tipo de modelos, la estructura interna de los diferentes subsistemas no es conocida y, en muchos casos, la vía de caja gris es simplemente el resultado de una investigación experimental de los sistemas de caja negra más que una transición hacia la definición de uno de caja blanca. Los modelos de caja blanca intentan identificar y analizar cuantos más reservas y flujos posibles en el sistema a fin de obtener el conocimiento más detallado posible de la manera en que la estructura interna del sistema produce una determinada salida en respuesta a un determinado valor de entrada. Este tipo de modelos son normalmente poco frecuentes y extremadamente complicados en su elaboración y funcionamiento.

#### • Modelos determinísticos

Los modelos más simples se denominan determinísticos o de pregunta-respuesta, son siempre de caja negra y en ellos el funcionamiento interno es invisible para el usuario, la tarea del cual se limita a introducir valores y obtener predicciones. Muchos modelos de este tipo no pretenden representar directamente los procesos que operan en el mundo real, tampoco a un nivel abstracto-matemático. El estadio más simple de modelos de caja negra lo representan las relaciones estadísticas entre dos variables del sistema. Estas relaciones se definen por medio de regresiones y para su construcción se utilizan técnicas de correlación estadística. Los valores de salida se estiman a partir de los valores de entrada, pero los procesos reales que operan en la naturaleza son poco conocidos o se desconocen totalmente. El sistema es tratado como una única unidad, sin ningún intento de revelar su estructura interna. Por lo tanto, la función de transferencia se toma como un valor constante y simple. Estos modelos se definen generalmente sobre una base experimental o empírica como resultado de mediciones conocidas, más que sobre una base de conocimiento teórico. Estos datos tienen una gran importancia en los estadios iniciales de cualquier estudio, ya que permiten la identificación inicial de los procesos que integran un sistema determinado, y el establecimiento de las relaciones entre sus diferentes variables.

Un caso particular de modelo determinístico con base empírica, ampliamente utilizado para la evaluación local de la erosión y como base para modelos más complejos de transferencia de sedimento en cuencas de drenaje, ha sido la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo, más conocida como *USLE*, desarrollada por el Servicio Norteamericano de Agricultura (USDA, 1982). La evolución de este modelo así como las revisiones posteriores se pueden consultar en el epígrafe 6.3.3. En su forma actual (Wischmeier y Smith, 1978) la *USLE* se expresa como:

$$A = RKLSCP$$

donde  $A$  es la pérdida de suelo por unidad de área, estimada como la erosión media anual en parcelas limitadas (no incluye erosión eólica, ni erosión en los márgenes),  $R$  es el factor de erosividad de la lluvia en una zona determinada,  $K$  es el factor de erosibilidad para diferentes horizontes del suelo,  $L$  y  $S$  son factores adimensionales que representan el impacto de la topografía en la erosión,  $C$  es el factor adimensional de cobertura y  $P$  es el factor adimensional que define las prácticas de control de la erosión. La *USLE* es una relación estadística derivada empíricamente a partir de muchos datos de campo más que un modelo basado en relaciones físicas, y su desarrollo reside fundamentalmente en análisis de regresión. Aunque esta ecuación

pretende ser universal, sus posibilidades de aplicación dependen básicamente de la disponibilidad de datos de campo locales para la calibración de cada uno de los factores; además, se ha demostrado que las relaciones específicas de  $L$ ,  $S$ , y  $C$ , derivadas en áreas del centro de los Estados Unidos, no se ajustan a otras áreas climáticas y tipos de suelos (p. ej., aquellos de origen volcánico). A pesar de estas limitaciones, la *USLE* continua utilizándose ampliamente para la predicción de pérdidas de suelo en muchas regiones del mundo.

Otros ejemplos de modelos de caja negra los proporcionan muchas de las ecuaciones de transporte de sedimento fluvial, a menudo obtenidas en ensayos de laboratorio. Según las características funcionales del modelo y el proceso metodológico seguido para su desarrollo, estos modelos se pueden dividir en empíricos (construidos a partir de mediciones de campo y/o experimentales), teóricos (desarrollados sobre una base conceptual y verificados posteriormente de forma experimental), y a dimensionales (en los cuales los parámetros del modelo están basados en relaciones entre la rugosidad del lecho y el calado del flujo de agua). Hay un gran abanico de posibilidades para escoger y se remite al lector a Dyer (1986) para obtener más detalles sobre algunos de estos modelos. Algunos de los más comúnmente utilizados son:

Tipo de carga	Tipo de modelo		
	Empírico	Teórico	Adimensional
Suspensión		Rouse (1937)	Van Rijn (1984)
Arrastre de fondo	Meyer-Peter y Müller (1948)	Bagnold (1956) Einstein (1950)*	Engelund y Hansen (1967)
Total	Laursen (1958)	Chang <i>et al.</i> (1965) Yang y Stall (1976)	Ackers y White (1973)

\* Modelo probabilístico de tipo estocástico.

Otro ejemplo clásico de modelo de caja negra para la predicción de crecidas lo tenemos en el hidrograma unitario. Se trata de un método gráfico que sirve para predecir el hidrograma de la crecida en una cuenca de drenaje. Para su aplicación no se precisa ningún conocimiento de los procesos hidrológicos que en ella operan, como puede ser la generación de escorrentía

a partir de la precipitación. A pesar de estas limitaciones, este modelo ha sido utilizado con notable éxito para la predicción de avenidas durante los últimos cincuenta años. Fue sugerido por Sherman (1932) y formulado posteriormente en base matemática por Nash (1957). Para cuencas con una superficie superior a 100 km<sup>2</sup>, se ha revelado como una de las maneras más fiables para la predicción de crecidas (Kirkby *et al.*, 1987). Sin embargo, este modelo ha sido muy criticado en base a diferentes aspectos, principalmente por el hecho de que asume una distribución temporal y espacial homogénea de la precipitación en la cuenca.

El modelo del hidrograma unitario se define como el hidrograma de 10 mm de escorrentía rápida a partir de una lluvia de duración determinada. Cuando no se dispone de datos de caudales no es posible producir un hidrograma unitario por el método gráfico simple, sino que hay que recurrir a la utilización de hidrogramas unitarios sintéticos (Synder, 1938). Como se ilustra en la Figura 8.1, un hidrograma unitario sintético es aproximadamente triangular y sus características formales quedan definidas por el pico del caudal ( $Q_p$ ), el tiempo de retardo hasta el pico ( $T_p$ ), y el tiempo de base ( $TB$ ). Este tipo de hidrograma se puede definir para cuencas sin estaciones de aforo a partir de relaciones empíricas adecuadas, como por ejemplo

$$T_p = C_t (LL_c)^{0,3}$$

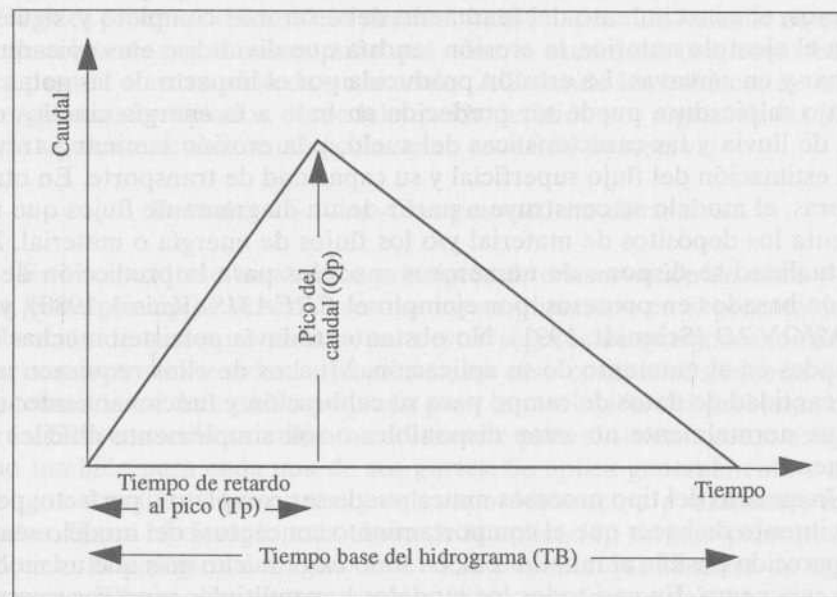


Figura 8.1. Esquema de un hidrograma unitario sintético.

que muestra como el tiempo de respuesta ( $T_p$ ) varía con el tamaño de la cuenca ( $L$  y  $L_c$  son dos secciones determinadas en el perfil longitudinal de la cuenca) y se reduce con el pendiente, ya que el coeficiente  $C_t$  se incrementa cuando el pendiente decrece. Para aquellos casos en que es necesaria una mayor precisión en el diseño de avenidas se han desarrollado modelos más complejos del tipo lluvia-escorrentía. Uno de los modelos hidrometeorológicos más conocidos es el *HEC-1* desarrollado por la Agencia Federal de Ingeniería Hidrológica del Departamento Norteamericano de Defensa.

#### • Modelos de procesos y de balance de masa

Los modelos del tipo de procesos y de balances de masa son de caja gris e intentan iluminar las cajas negras que representan los modelos anteriores. Según sea el grado de incorporación de procesos y el detalle de sus interrelaciones, los modelos de procesos y de balance de masa pueden ser considerados como cajas de diferentes tonalidades de gris.

Los modelos de procesos describen los mecanismos de funcionamiento de fenómenos determinados que operan en el mundo real. Por ejemplo, un modelo de erosión del suelo del tipo caja negra puede estimar tasas de erosión a partir de ecuaciones empíricas basadas en datos de lluvia, longitud y pendiente de la vertiente (*USLE*). En un modelo de caja gris basado en procesos, el conocimiento del fenómeno debe ser más completo y, siguiendo en el ejemplo anterior, la erosión tendría que dividirse en salpicadura, laminar y en cárcavas. La erosión producida por el impacto de las gotas de lluvia o salpicadura puede ser precedida en base a la energía cinética del agua de lluvia y las características del suelo, y la erosión laminar a través de la estimación del flujo superficial y su capacidad de transporte. En otras palabras, el modelo se construye a partir de un diagrama de flujos que representa los depósitos de material y/o los flujos de energía o material. En la actualidad se dispone de numerosos modelos para la predicción de la erosión basados en procesos, por ejemplo el *CREAMS* (Knisel, 1980), y el *EROSION 2D* (Schmidt, 1991). No obstante, todavía persisten muchas dificultades en el momento de su aplicación. Muchos de ellos requieren una gran cantidad de datos de campo para su calibración y funcionamiento, datos que normalmente no están disponibles o son simplemente difíciles de obtener.

Un modelo del tipo procesos nunca puede ser completo y perfecto, pero es un intento de hacer que el comportamiento conceptual del modelo sea lo más parecido posible al mundo real, en todo caso mucho más que un modelo de caja negra. En casi todos los modelos hay múltiples procesos operando a la vez e interrelacionándose los unos con los otros. Por lo tanto, un

modelo general puede estar compuesto por un número determinado de submodelos, cada uno de los cuales representando un proceso o grupo de procesos. Los distintos submodelos tienen que tratar con flujos de las mismas características, normalmente masa o energía, y trabajar a niveles de resolución espacial y temporal similares. Por ejemplo, es muy difícil conciliar un modelo sobre circulación atmosférica, que trabaje con células de un tamaño de  $100 \times 100$  kilómetros, con un modelo hidrológico que trabaje con cuencas de drenaje pequeñas e irregulares de un kilómetro cuadrado.

Los modelos de balances de masa se construyen normalmente a partir de modelos basados en procesos y sobre la base de diagramas de flujos y recipientes de reservas, de cara a superar las limitaciones de los modelos de caja negra, especialmente: a) las dificultades de extrapolación de las regresiones derivadas empíricamente en áreas muy concretas; b) los problemas derivados de la falta de datos disponibles; c) el hecho de no conocer los procesos involucrados en el desarrollo de un fenómeno determinado. De todas formas, esto no es necesariamente un problema ya que, por ejemplo, el modelo del hidrograma unitario no proporciona ninguna información sobre los procesos que generan escorrentía, pero ha sido utilizado con éxito notable para la predicción de avenidas en cuencas grandes.

Los modelos de balances de masa están en la base de muchos problemas de interés geográfico, como un balance de agua, de sedimento o de energía, pues proporcionan una estructura de trabajo muy útil en la cual los diferentes procesos del modelo pueden ser ajustados. Un balance no es sólo de gran interés por sí mismo, sino que además suministra una buena base física para la construcción de un modelo. Allí donde los balances de masa y energía sean apropiados, el modelo queda definido por alguna de las formas de la siguiente ecuación, conocida como ecuación de reserva:

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \text{Incremento neto de reserva}$$

Esta ecuación se basa en los principios de conservación de masa y energía. Estos principios deberían ser usados ampliamente en el proceso de modelización de cualquier sistema para estar seguros de que todos los flujos y reservas han sido tenidos en cuenta o, en caso contrario, sabiendo que su contribución es demasiado pequeña para la resolución del problema de interés. Esta ecuación se utiliza no solamente para el sistema como conjunto, sino también para cada una de sus partes. Se aplica generalmente a masas de agua o material terrestres, y más esporádicamente a elementos individuales. Quizá el ejemplo más obvio de la aplicación de este principio es el del ciclo hidrológico del agua. Este ciclo necesita que la masa de agua se conserve. Ello implica ciertos cambios físicos y químicos del agua, por ejemplo durante el proceso de incorporación en sedimentos, así como de cam-



bios de estado. De manera similar se puede aplicar este concepto a la conservación de las rocas y los materiales del suelo, así como a los balances de sílice y carbón en ciclos de denudación o de nutrientes. Las ecuaciones de reserva tienen también un papel importante en el momento de proporcionar las conexiones entre las tasas de cambio de flujos en el espacio y las tasas de cambio de flujos en el tiempo en un punto determinado. Finalmente, una virtud muy práctica de los modelos basados en balances de masa o energía es que poseen una base física mucho más completa que muchos de los modelos anteriores, y por lo tanto, ayudan a que las predicciones sean más realistas.

Cuando la red de relaciones del sistema no tiene reserva, la ecuación se reduce a que la suma de las entradas tiene que ser igual a la de las salidas. Los nexos no representan ningún recipiente de reserva, sino que tan sólo son puntos en los que la masa o la energía se acumula o se divide. Un ejemplo sencillo lo tenemos en la división de la energía solar a su llegada a la superficie de la tierra. Por el contrario, en todos aquellos casos en los que la masa o energía se puede acumular físicamente en una parte del sistema, la ecuación tiene que incluir algún valor que sirva para denotar los cambios en las cantidades de reserva. En el caso de modelo de balance más simple hay un solo depósito o reserva. El modelo *STORFLO* es un ejemplo de modelo con una sola reserva de base física que describe los cambios en el contenido de humedad del suelo. La base conceptual del modelo se funda en la idea de que el ciclo hidrológico se compone de flujos y reservas o recipientes (Figura 8.2). Este modelo está sujeto a dos conceptos principales: *a*) la cantidad de agua almacenada en el suelo (recipiente) determina el flujo de salida (Kirkby, 1975); y *b*) la capacidad de almacenaje está limitada por el momento en que se produce escorrentía por saturación. Esta forma de comportamiento del suelo es especialmente importante en áreas húmedas y semihúmedas, donde las tasas de lluvia son siempre menores que la tasas de infiltración de agua en el suelo. Esta descripción proporciona una idea de cómo el suelo actúa reservándose una cantidad entre la precipitación que entra en una cuenca y las salidas en forma de caudal. La formulación matemática de estos conceptos es el siguiente paso en el proceso de construcción del modelo. En *STORFLO*, la tasa de drenaje del suelo se puede representar por:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{(St/m)}$$

donde  $Q_t$  es la tasa de flujo del suelo en un tiempo  $t$  (mm/día),  $Q_0$  es la tasa de flujo en el momento de saturación (mm/día),  $St$  es el déficit de humedad del suelo (mm), y  $m$  es un parámetro del modelo que representa las características del suelo. Se trata pues, de un modelo exponencial que representa el

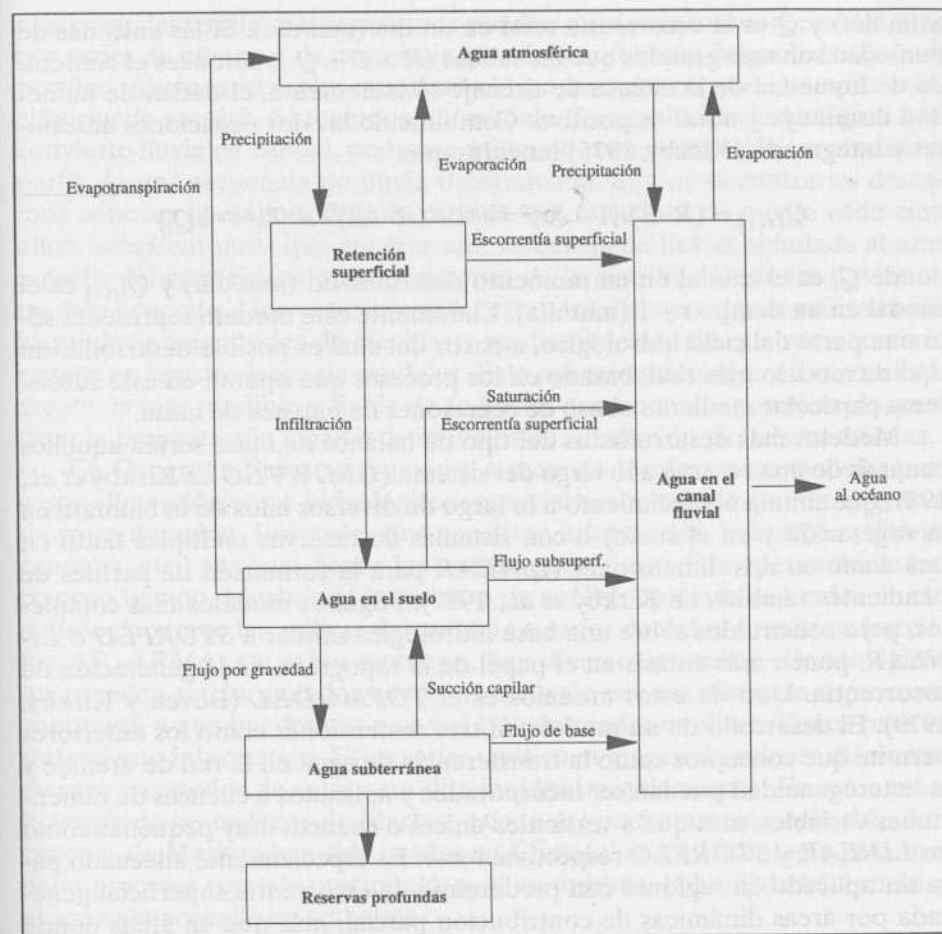


Figura 8.2. El ciclo hidrológico expresado como una serie de flujos.

drenaje del suelo (para discusión y desarrollo informático del modelo, véase Kirkby, 1975). Como la humedad del suelo se reduce al tiempo que el suelo es drenado, se necesita una segunda ecuación para calcular la cantidad de agua que interviene en este proceso. En otras palabras, se necesita una ecuación de balance de agua o reserva. Esta ecuación se puede expresar como:

$$dS/dt = R - E - Q$$

donde  $dS/dt$  es el cambio en el déficit de agua en el suelo durante un día (mm/día),  $R$  es la precipitación diaria (mm/día),  $E$  es la evaporación diaria

(mm/día) y  $Q$  es la escorrentía total en un día (mm/día). Si las entradas de humedad son más grandes que las salidas ( $R > E + Q$ ), entonces el contenido de humedad de la cuenca de drenaje se incrementa, el déficit de humedad disminuye y  $dS/dt$  es positivo. Combinando las dos ecuaciones anteriores e integrando (Kirkby, 1975) tenemos que:

$$Q_{(t+1)} = (R-E) / \{1 - e^{-(R-E)/m}\} + (R-E) \cdot e^{-(R-E)/m} / Q_t$$

donde  $Q_t$  es el caudal en un momento determinado (mm/día) y  $Q_{(t+1)}$  es el caudal en un tiempo  $t + 1$  (mm/día). Claramente este modelo representa sólo una parte del ciclo hidrológico, a partir del cual es posible desarrollar un tipo de modelo más real, basado en los procesos que operan en este subsistema particular mediante el uso de ecuaciones de balance de masa.

Modelos más desarrollados del tipo de balance de masa serían aquellos con más de una reserva a lo largo del sistema (*GROWVEG* en Kirkby *et al.*, 1987, que simula el crecimiento a lo largo de diversos años de la biomasa en la vegetación y en el suelo) o con sistemas de reservas múltiples tanto en una como en dos dimensiones (*LINEAR* para la formación de perfiles de pendientes también en Kirkby *et al.*, 1987). Algunos modelos más complejos, pero contruidos sobre una base hidrológica similar a *STORFLO* o *LINEAR*, ponen más énfasis en el papel de la topografía en la generación de escorrentía. Uno de estos modelos es el *TOPMODEL* (Beven y Kirkby, 1979). El desarrollo de un modelo en tres dimensiones como los anteriores permite que conceptos como la transferencia de agua en la red de drenaje y la heterogeneidad puedan ser incorporados y aplicados a cuencas de dimensiones variables, más que a vertientes únicas o cuencas muy pequeñas como en *LINEAR* y *STORFLO* respectivamente. Es especialmente adecuado para ser aplicado en regiones con predominio de escorrentía superficial generada por áreas dinámicas de contribución parcial, más que en áreas donde predominan procesos subsuperficiales de generación de escorrentía.

#### • Modelos estocásticos

El último grupo lo constituyen los modelos estocásticos. Esta categoría tiende a incorporar elementos de los tipos anteriores. Generalmente, estos modelos incluyen elementos de azar para representar sobre una base probabilística el comportamiento de aquellos procesos o formas que quedan fuera del alcance del modelo. El mundo real que se desea modelar puede ser inicialmente concebido como totalmente determinístico, de manera que los procesos no están en principio sujetos al azar. No obstante, quizá no se quieren incluir en el modelo las causas de todos los procesos que intervie-

nen en su desarrollo. Estos procesos pueden quedar entonces representados por series de números de azar derivados de una función de probabilidad específica. Algunos ejemplos muestran el tipo de casos en que esta aproximación puede ser útil. Si tenemos un modelo de simulación hidrológica que convierte lluvia en caudal, podemos utilizarlo para predecir la escorrentía a partir de una secuencia de lluvia determinada. Si, por el contrario, deseamos conocer la magnitud de la crecida que sucederá de media cada cien años, habrá entonces que generar una secuencia de lluvias simulada al azar a partir del conocimiento que tengamos de la distribución de las lluvias en un área concreta. Una vez construida, esta secuencia puede ser utilizada para predecir magnitudes de crecidas y su distribución, sin que sea necesario poseer un registro largo de caudales. Esta aproximación al tema es, posiblemente, la más rendible y fiable de todas las que intentan, por ejemplo, predecir la precipitación a partir de modelos de circulación global atmosférica.

En Geografía Física se requieren a menudo técnicas para modelar procesos climatológicos e hidrológicos, especialmente para expandir registros de corta duración. Los geógrafos necesitan información hidrológica (lluvia, caudales, etc.) en áreas donde los instrumentos de medida operan desde hace poco tiempo. Muchas de la técnicas de análisis de datos utilizados en climatología se pueden aplicar únicamente a series de datos continuos (modelos *AR*, *ARMA*, etc.). Sin embargo, hay diversos procesos climatológicos que pueden ser formulados como procesos de valores discretos o procesos continuos, y que pueden ser a su vez transformados en discontinuos para su tratamiento informático. Estas series contienen grupos de valores diferentes de cero y periodos de valor cero distribuidos irregularmente. En estos casos la teoría de las cadenas de Markov puede ser perfectamente aplicable. Las cadenas de Markov han sido usadas en Climatología e Hidrología para modelar procesos como la precipitación, la escorrentía, la humedad del suelo, y el agua almacenada en embalses.

Un ejemplo del uso de las cadenas de Markov para la modelización en Climatología lo proporcionan las series de datos de lluvia diarios. Generalmente estas series son discontinuas con grupos de valores de días secos y días lluviosos irregularmente distribuidos. La modelización de estos datos discontinuos requiere reconocer previamente las propiedades estadísticas diferentes de los grupos de valor cero y los grupos con valores distintos a cero. Las características principales de un registro de lluvias diarias pueden ser determinadas en base a las siguientes consideraciones: a) un día es seco o lluvioso (la definición de lluvioso puede ser tomada como un día con precipitación apreciable, o un día con un total superior a un umbral previamente determinado); b) la duración de las secuencias de días lluviosos y secos; c) la secuencia de los totales de precipitación de los días lluviosos.

La descripción de una serie de datos de lluvia requiere la modelización de dos componentes distintos: 1) la ocurrencia o no ocurrencia de lluvia, es decir, las secuencias de días secos y lluviosos; 2) la cantidad de precipitación en los días lluviosos. Para abordar este ejemplo tomaremos el primer caso: si la modelización se realiza sobre la base de considerar la ocurrencia de días lluviosos y días secos como dependiente de la situación en días previos, entonces se puede aplicar la técnica de las cadenas de Markov. Las cadenas de Markov relacionan la probabilidad de ocurrencia de un suceso (un día lluvioso) a partir de la situación del día anterior (orden 1 de Markov) o de  $n$  días anteriores (orden  $n$  de Markov). Modelos de Markov de primer y segundo orden han sido utilizados con éxito aplicados a los dos estados, seco o lluvioso o tomados conjuntamente. Este método es capaz de modelar la secuencia de días lluviosos en relación a un patrón climático para producir secuencias de lluvias ampliadas hasta cinco o seis días. No obstante, el número de parámetros que la definición de un modelo de orden más alto requeriría lo harían impracticable. Para una visión más detallada de las cadenas de Markov se puede consultar Salas (1993).

Un ejemplo de proceso geomorfológico que se puede abordar mediante el uso de un modelo del tipo estocástico es el del movimiento del sedimento en suspensión en un flujo turbulento (Naden, 1988). Consideremos el calado del flujo dividido en láminas de tamaño y grosor unitario. Las partículas de sedimento se distribuyen a través de las capas de manera que existe una probabilidad de movimiento para cada partícula de la capa  $k$  a la capa  $k + 1$  de

$$p(k/k+1) = 0,5 \{1 + \Psi [c(k-1, i) - c(k+1, i)]\}$$

y de la capa  $k$  a la capa  $k - 1$  de

$$p(k/k-1) = 0,5 \{1 + \Psi [c(k+1, i) - c(k-1, i)]\}$$

donde  $\Psi$  es un factor de ponderación y  $c(k, i)$  es la concentración en la capa  $k$  en el momento  $i$ . Si las concentraciones en las capas  $(k + 1)$  y  $(k - 1)$  son iguales entonces la posibilidad de que una partícula se mueva hacia arriba o hacia abajo es del 50%. Sino fuera así, existiría una gran probabilidad de que la partícula se moviera en la dirección de la menor concentración. Una de las ventajas de este modelo es que se puede aplicar potencialmente a concentraciones altas de sedimento y en condiciones de no equilibrio causadas por cambios en la configuración del lecho del río. Una de sus principales limitaciones es la falta de información disponible sobre distribuciones de velocidad en ríos, y también el hecho de que sólo es aplicable a ríos en los cuales las entradas de sedimento al canal sean totalmente uniformes.

## 8.5. Construcción y verificación de modelos

La construcción de un modelo empieza por la definición del fenómeno/s que tiene que ser objeto de simulación. Una vez el problema se ha identificado y definido, hay que concretar las partes o variables del sistema que van a intervenir en la construcción del modelo y hasta qué nivel de profundidad y detalle van a ser tratadas. La Figura 8.3 resume los diferentes pasos que se deben seguir en el diseño y construcción de un modelo, en este caso con base informática. Estos pasos se pueden resumir en:

- 1) Construcción previa de un modelo conceptual cualitativo, con indicación de los subsistemas básicos y las principales funciones de transferencia o procesos que actúan en el sistema, preferiblemente sobre la base de observaciones reales y en el marco de una teoría científica.
- 2) Definición de un procedimiento o algoritmo que conduzca a la predicción deseada, ya sea en términos lógicos o matemáticos. Un algoritmo es un conjunto de instrucciones para llevar a cabo, en un número finito de pasos y en un orden concreto, una tarea determinada. Este paso es quizás el más complicado, y se puede realizar con la ayuda de sistemas de diagramas o sistemas de ecuaciones representando las fuerzas y flujos necesarios para funcionamiento del modelo. En los modelos más simples, especialmente aquellos de caja de negra, las predicciones se expresan simplemente mediante una ecuación o un grupo de ecuaciones.
- 3) Diseño de las entradas y salidas de datos del modelo y su formato e incorporación al diagrama de flujos. Para volúmenes importantes de datos, los ficheros en formato convertible en disco o cualquier otro tipo de soporte informático son la manera más fácil de introducir los datos en el ordenador, transferirlos al modelo y, una vez realizadas las distintas operaciones, obtener los resultados.
- 4) Conversión del diagrama de flujos y los algoritmos a un programa informático en cualquiera de los lenguajes disponibles (*BASIC*, *FORTRAN*, etc.).
- 5) Verificación del programa para comprobar su capacidad de producir el tipo de predicciones deseadas y la precisión de las mismas y, en caso necesario, alteración y ajuste de algunos o todos sus componentes para obtener un funcionamiento más preciso.

Finalmente, una vez considerados los diferentes tipos de modelos, y los diferentes pasos en su construcción, es necesario definir como pueden ser

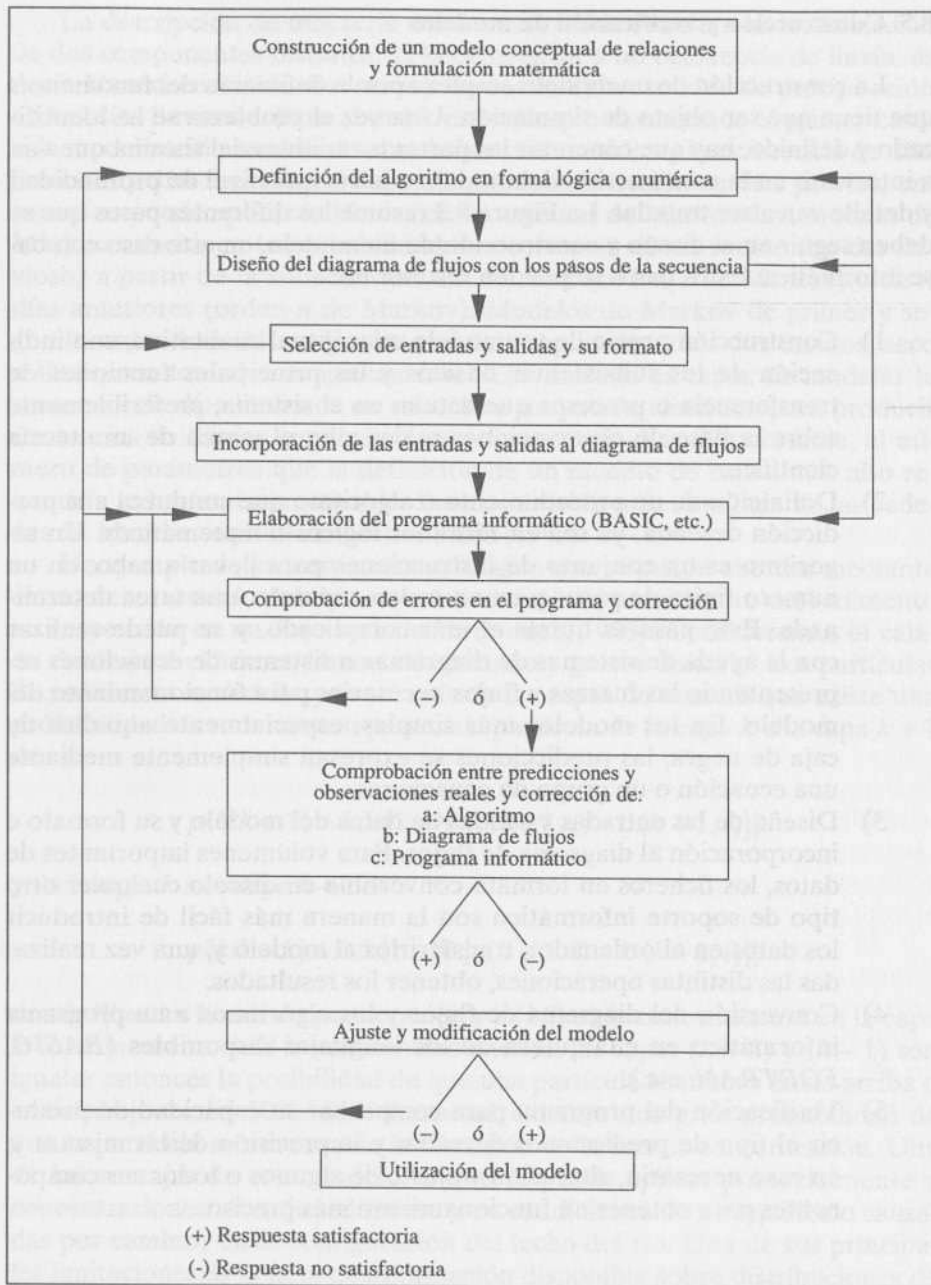


Figura 8.3. Esquema para el diseño de un modelo con base informática (a partir de Kirkby *et al.*, 1987).

utilizadas sus predicciones como prueba de comprobación crítica de una teoría científica. Conceptualmente el proceso de comprobación es muy simple: el modelo se utiliza para realizar predicciones, y el científico debe realizar una valoración sobre el grado de ajuste con los resultados esperados, es decir, sobre si estos son suficientemente similares a las observaciones para seguir utilizando la teoría o, por el contrario, si son suficientemente diferentes como para rechararla. No obstante, como se ha indicado al inicio del capítulo, el procedimiento es normalmente difícil de llevar a cabo, ya que la inconsistencia de las predicciones realizadas por un modelo respecto a los resultados esperados puede provenir de varias fuentes de error, algunas de ellas sin relación con la validez de la propia teoría.

Los errores en el modelo pueden ser de dos tipos: al azar o sistemáticos. Si los errores se deben al azar y se puede probar que son poco importantes, entonces el modelo se puede considerar como satisfactorio en el contexto en el cual se efectúa la comprobación. El error en este caso se puede atribuir a errores casuales en las mediciones, en los parámetros del modelo o en las predicciones del mismo. Sin embargo, cuando los errores son sistemáticos es necesario modificar o reestructurar el modelo para corregir las fuentes de error. La Figura 8.4 presenta una posible estrategia para la comprobación de modelos con base matemática.

Como se ha indicado anteriormente, ningún modelo proporciona predicciones perfectas. Existe siempre el riesgo de error, tanto en la calibración de los parámetros del modelo como en la obtención de datos de campo para su comparación con las salidas generadas por el modelo. Es necesario, en este sentido, desarrollar métodos que permitan valorar la precisión del modelo, de cara a alcanzar alguna conclusión objetiva sobre si el modelo es satisfactorio o no. A este proceso se le conoce con el nombre de verificación. En términos generales, el proceso de verificación se basa en una comparación de los resultados observados y los simulados. La mayoría de las funciones objetivas más comúnmente utilizadas para calibrar modelos necesitan hacer mínima la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores observados y los simulados por el modelo. Por ejemplo, en el caso de simulaciones hidrológicas

$$F1 = \Sigma(Q_{\text{obst}} - Q_{\text{simt}})^2$$

donde  $F1$  la función de error objetiva,  $Q_{\text{obst}}$  es el caudal observado en un tiempo determinado  $t$ , y  $Q_{\text{simt}}$  es el caudal simulado para el mismo momento  $t$ ,

$$F2 = (\Sigma Q_{\text{obst}} - \Sigma Q_{\text{simt}})^2$$

$$F3 = (Q_{\text{obspc}} - Q_{\text{simpc}})^2$$

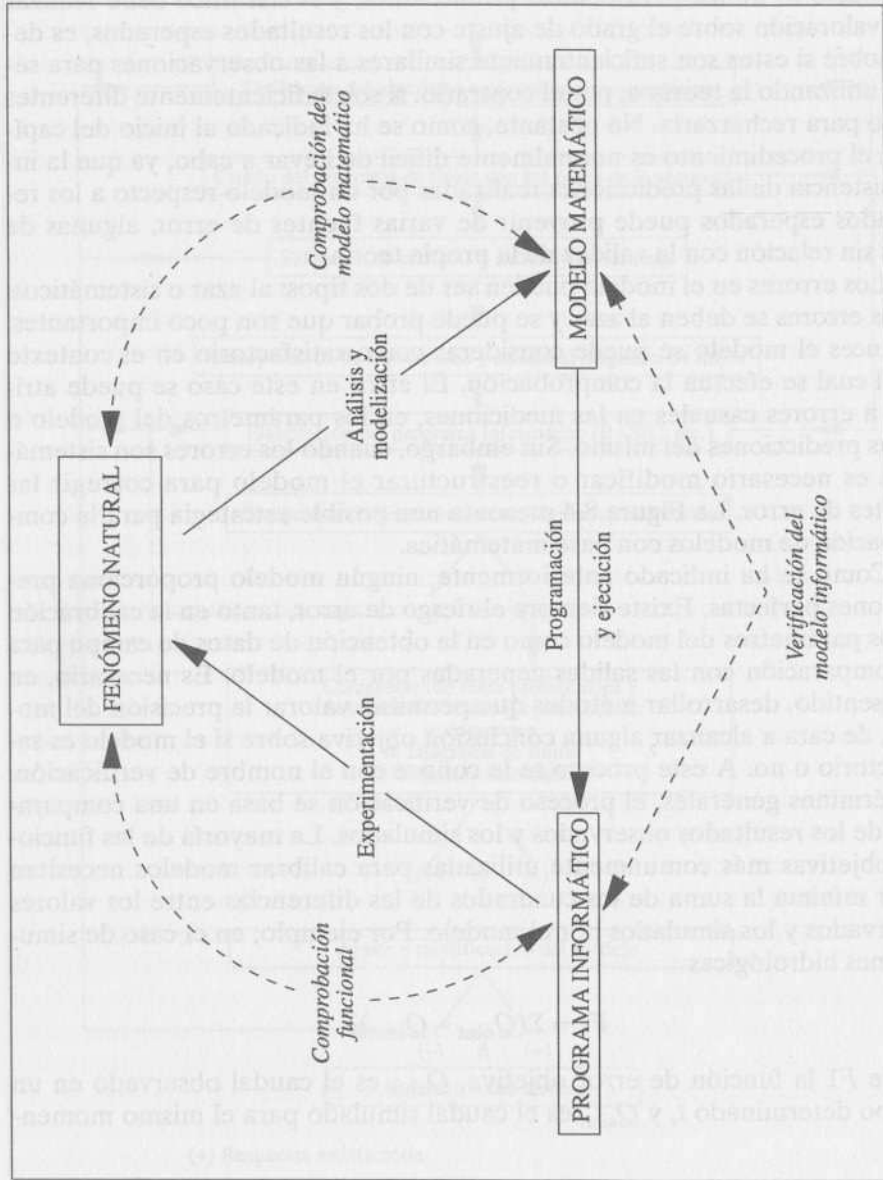


Figura 8.4. Estrategia en tres fases para la evaluación de modelos.

donde  $Q_{obspc}$  es el caudal observado en el pico del hidrograma y  $Q_{simpc}$  es el caudal simulado para el pico del hidrograma.  $F1$  es el índice que se usa generalmente, a pesar de que pequeños errores en el tiempo de paso pueden conducir a valores altos,  $F2$  se refiere al volumen total de agua de la crecida, y  $F3$  es la comparación de los caudales correspondientes al pico de la crecida.  $F2$  y  $F3$  no presentan el problema del paso de tiempo pero proporcionan solamente una cantidad de información muy limitada. El ajuste ( $A$ ) de la predicción viene dada por:

$$A = [(E - F1)/E] \times 100$$

donde  $E = \Sigma(\bar{Q}_{obs} - Q_{obs})^2$ , que establece la comparación con el valor más simple de todos, el valor constante del caudal medio observado. Este coeficiente de ajuste o eficiencia es útil porque permite la comparación entre cuencas de drenaje y en diferentes períodos de estudio; en otras palabras, muestra la fiabilidad del modelo e indica si sus predicciones pueden ser transferidas entre lugares y períodos distintos en el marco de la misma teoría científica.

El papel de los modelos en la predicción de fenómenos naturales es claramente un aspecto esencial en Geografía Física aplicada; la calibración y verificación son, en este sentido, elementos muy importantes en el proceso de desarrollo de un modelo. La selección de un modelo se debería basar en principios tan simples como: *a)* la sencillez conceptual y funcional; *b)* la fiabilidad en la resolución del problema (Kirkby *et al.*, 1987). Algunos modelos complejos pueden llegar a ser muy versátiles, pero en muchos casos un modelo de caja negra puede proporcionar predicciones mejores y más fáciles de conseguir. Es evidente el gran potencial de aplicación de los modelos determinísticos basados en procesos. Estos modelos, desarrollados sobre una base teórica sólida, ofrecen la oportunidad de reallizar trabajos experimentales, sustituyendo la terminal del ordenador por el trabajo de campo. Es necesario poner un énfasis especial en este aspecto, ya que este tipo de investigaciones pueden conducir con frecuencia a avances significativos en el conocimiento de los sistemas naturales y a la mejora de su control y modelización.

### 8.6. El control y la experimentación en el desarrollo de modelos y de teorías científicas

De la misma manera que con la modelización, el control y la experimentación no puede ser considerada de manera aislada con respecto a la teoría científica. La relación entre estos elementos se basa principalmente en

dos aspectos: a) la teoría establece las razones que llevan a realizar mediciones y experimentos, y son la base para su interpretación; b) la teoría describe la relación entre los diferentes experimentos y mediciones a través de modelos paramétricos de decisión estadística.

### 8.6.1. Mediciones y teoría científica

Las mediciones y los experimentos se realizan por razones concretas. El proceso de medición y experimentación sin relación con ninguna idea o teoría previa sobre el fenómeno natural estudiado es completamente erróneo. En ciencia, la teoría constituye la base para la toma de mediciones y la experimentación. La teoría guía también el tipo de mediciones a realizar, así como la forma en que éstas deben llevarse a cabo. Estas consideraciones se basan en tres aspectos principales:

- a) Las ideas generales o poco detalladas pueden ganar en precisión si son examinadas de manera rigurosa a partir de mediciones. Por ejemplo, en lugar de decir que la tasa de transporte de sedimento como carga de fondo en ríos aumenta con el caudal, se puede afirmar que la relación entre la carga de fondo y el caudal de agua es una en la cual el transporte se incrementa aproximadamente con el cuadrado del caudal unitario. En otras palabras, las relaciones cuantitativas proporcionan más información y más concreta que las cualitativas.
- b) El trabajo científico no se realiza aisladamente. La gran mayoría de trabajos en ciencia se basan en estudios realizados con anterioridad. Por ejemplo, los estudios sobre las formas de erosión y deposición en base a teorías mecánicas simples (Newtonianas), realizados por Leopold y sus colaboradores durante los años sesenta (Leopold *et al.*, 1966), tenían un claro referente en las ideas de Hutton sobre la evolución de las formas naturales postuladas casi dos siglos atrás (Haines-Young y Petch, 1986). Relaciones históricas similares tienen lugar en todas las ramas de la ciencia. Este hecho ilustra de qué manera la formulación de teorías y el desarrollo del conocimiento dependen en gran parte de los trabajos llevados a cabo en el pasado.
- c) Finalmente, un científico no realiza observaciones y decide *a posteriori* qué significado tienen, ni realiza tampoco observaciones simplemente para que un día otro investigador desarrolle a partir de ellas nuevas ideas o teorías. La realización de mediciones o experimentos no se hace tampoco de una manera arbitraria e incontrola-

da. Las observaciones se llevan a cabo por la necesidad de explicar aspectos que las teorías anteriores no consiguieron resolver o para solucionar problemas nuevos surgidos posteriormente. Las observaciones se realizan, por lo tanto, con un objetivo definido de estudiar problemas determinados.

Así pues, la necesidad de comprobar teorías proporciona las razones básicas para llevar a cabo mediciones y experimentos. No obstante, la relación entre observación y teoría es, si cabe, todavía más compleja. La teoría guía siempre la forma en que se hacen las observaciones. En general, las teorías científicas no relacionan propiedades cualitativas o generales sino que tratan sobre relaciones específicas entre objetos o sistemas. El problema para el científico es cómo trasladar la teoría al campo de las relaciones concretas entre las propiedades objeto de la medición. Los principios de conexión entre teoría y fenómenos concretos implican, básicamente: a) una deducción a partir de la teoría de los atributos o propiedades que deben ser controlados para estudiar el comportamiento del fenómeno o sistema investigado; b) cómo dichos atributos se relacionan unos con otros. La valoración de las propiedades medidas y sus relaciones proporciona la base para la realización posterior de experimentos, todo ello con el objetivo de comprobar el funcionamiento de la teoría.

### 8.6.2. Mediciones y estadística en ciencia

Todas las mediciones están sujetas a errores. Hay muchas clases de errores y en la mayor parte de estudios en que se llevan a cabo mediciones, aun las más simples, el investigador los debe tener en cuenta para valorar su influencia en la fiabilidad de los resultados obtenidos. Este proceso de valoración se realiza a través del uso de la estadística.

El tipo de error más simple se produce cuando se miden objetos de grandes dimensiones, pues sucede que tantas cuantas veces se repite la operación las series de datos obtenidos son siempre diferentes. Esto es debido a que no es posible reproducir pautas de medición exactamente iguales. A estos errores se les conoce con el nombre de errores simples de medición, y no afectan al resultado final si el nivel de precisión requerido no es muy elevado. También se producen errores cuando cambia la persona que lleva a cabo la medición, y en este caso se les llama errores operativos.

Consideremos ahora el caso del proceso de medición de un objeto que: a) no puede ser controlado de manera repetida a causa de que algún proceso lo altera substancialmente; b) sólo se puede medir parte del objeto, por

lo que las sucesivas mediciones deberían corresponder siempre a partes diferentes del mismo. Un ejemplo muy común de estos casos es el control de la distribución granulométrica del sedimento en el canal de un río. Por un lado esta distribución se ve alterada periódicamente por el flujo fluvial; por el otro, las aluviones se extienden por todo el lecho del río. Tanto en un caso como en el otro no es posible controlar todo el objeto de estudio, es decir, todo el sedimento. Por lo tanto, hay que tomar muestras reducidas y representativas, y más muestras si se desea repetir el proceso. Aunque se estudie siempre el mismo sedimento, los resultados variarían entre las distintas muestras. El error que estas diferencias puedan causar en la estimación de las características de toda la población se denomina error de muestreo.

La fiabilidad de una muestra es, en muchos casos, discutible, ya que inicialmente se desconoce su relación con el resto y su representatividad con respecto a toda la población. Este problema puede ser solucionado de manera parcial a través de la teoría de probabilidades en estadística. La estadística infiere las relaciones de las muestras entre sí y con el resto de la población, por lo que permite valorar los errores de muestreo, poniendo la base para decidir si dos muestras distintas representan poblaciones diferentes o, si por el contrario, las diferencias son debidas únicamente a errores de muestreo. En otras palabras, la estadística nos permite establecer en términos absolutos la probabilidad de que las diferencias entre observaciones sean debidas a errores de medición. Si esta probabilidad es suficientemente pequeña se puede concluir que las diferencias no son debidas a errores de medición, sino a diferencias entre las poblaciones de las cuales fueron tomadas las muestras. Este proceso lógico de separación entre las diferencias reales y las causadas por errores de medición es la base de todas las ciencias empíricas.

No obstante, aunque dos muestras sean diferentes no se puede afirmar categóricamente que provengan de poblaciones distintas, aunque hay que dejar siempre abierto este extremo. ¿Cómo se puede calcular esta posibilidad? Se asume en primer lugar que no hay diferencias entre las poblaciones. En estadística a esta suposición se la denomina hipótesis nula. Se debe empezar con esta hipótesis ya que no es posible asumir de entrada que las muestras son diferentes. En otras palabras, no es posible asumir que una teoría es verdadera como base para decidir si lo es o no lo es. Por el contrario, se supone de entrada que es falsa. Por lo tanto, se supone que no hay diferencias entre las muestras y se buscan evidencias que permitan rechazar esta hipótesis. Lógicamente, este procedimiento sigue las pautas del método científico desarrollado por el 'enfoque crítico racionalista' en ciencia, que postula que nada es verificable y sólo acepta una teoría si ésta suposición es indemostrable sobre la base de evidencias científicas (Popper, 1972).

La diferencia entre dos muestras se puede expresar simplemente como la diferencia entre sus medias. No obstante, hay otros procedimientos esta-

dísticos que nos permiten describir esta diferencia de manera más precisa; entre ellos se encuentran la prueba de Student, el análisis de varianza y la prueba de Kolmogorov-Smirnoff. Las pruebas de decisión estadística no garantizan resultados absolutamente ciertos, sino tan sólo una probabilidad más o menos alta de acierto en la aceptación o rechazo de la hipótesis nula.

La relación entre muestras puede ser explorada de manera cuantitativa por medio del uso de modelos estadísticos, aunque la aplicación de cada uno conlleva ciertas implicaciones con respecto al proceso de obtención de datos y a las características de las poblaciones que se desea muestrear. Estas condiciones se refieren básicamente a la escala de muestreo, a la normalidad de las poblaciones y al tamaño de las muestras. Es por ello que el científico debe decidir el tipo de prueba estadística que va a realizar antes de llevar a cabo las mediciones y los experimentos. Sólo cuando las mediciones cumplen los requerimientos de un modelo estadístico determinado pueden ser calificadas de correctas. Para un análisis más detallado de las diferentes pruebas de decisión estadística se recomienda consultar Raso *et al.* (1987).

### 8.6.3. Diseño experimental

En ciencia las mediciones se realizan en el marco de verificación de una teoría. El valor de un experimento no se debe juzgar por la cantidad de datos generados ni tampoco por la novedad de las técnicas utilizadas. La regla básica de valoración debe tener en cuenta su contribución al avance del conocimiento, a través de la comprobación crítica de una teoría. El proceso de medición debe ser muy preciso para evitar errores que pueden afectar no solamente al proceso de medición en sí, sino también a todo el proceso de verificación. El control del proceso de medición se realiza a través del diseño experimental, que se define como el procedimiento metodológico crítico de dónde, cómo y cuándo se van a llevar a cabo las mediciones para la obtención de datos de interés para la verificación de una teoría.

Aunque el diseño experimental está muy relacionado con la necesidad de efectuar mediciones, muy pocos geógrafos han considerado este aspecto como fundamental, a pesar de poner mucha atención en llevar a cabo mediciones muy detalladas (Slaymaker, 1980). Church (1984) mostró, en el marco de un enfoque científico deductivo, los diferentes elementos y características que deben formar parte de una estructura de experimentación sólida, y son:

- a) Un modelo conceptual, con los procesos o relaciones de interés, que será aceptado o rechazado a partir de los resultados de los experimentos.

- b) Un grupo de hipótesis específicas, que serán criticadas (confirmadas o rechazadas) por los resultados de los experimentos.
- c) La definición explícita de las propiedades del fenómeno objeto de interés y la metodología a seguir durante el proceso de medición.
- d) Un programa de las mediciones a realizar bajo condiciones de control, que asegure que la variabilidad del fenómeno estudiado pueda ser predicha por las hipótesis iniciales de la investigación.
- e) Un esquema concreto para el análisis estadístico de los datos obtenidos, que discrimine la validez de las hipótesis analizadas.
- f) Un sistema de gestión de datos diseñado específicamente para los que se produzcan en los experimentos.

Church (1984) remarca que, sobre esta base, muy poco trabajo de Geografía Física es calificable como realmente experimental. Muchos estudios de campo no tratan más que de casos particulares y, por lo tanto, los resultados son a menudo poco generalizables. Este tipo de trabajos constituyen la base del *excepcionalismo*, corriente desarrollada a partir de la visión kantiana de la Geografía. Esta visión no es aceptable en la actualidad y necesita ser profundamente modificadas para adecuarse a las necesidades actuales de la Geografía, concebida como una ciencia independiente, *generalista*, y situada en el marco de la estructura general del conocimiento (Harvey, 1969). No obstante, es importante señalar que el trabajo empírico puede ser valioso con posterioridad si es utilizado como base para la formulación de teorías o para la verificación de modelos conceptuales. Inicialmente esto se puede realizar mediante experimentos exploratorios que contengan elementos simples de control. Si se realizan con éxito y sus resultados son aceptables, se deberían continuar con experimentos de confirmación, que han de incluir necesariamente un diseño experimental completo, un objetivo más específico y, preferiblemente, un lugar de realización distinto.

Los experimentos se pueden clasificar básicamente en cuatro tipos (Medawar, 1979):

- Aristotélicos, para demostrar la veracidad de ideas y teorías previamente concebidas, mediante observaciones o situaciones creadas que se ajusten a la idea inicial.
- Baconianos, para aumentar el conocimiento sobre un fenómeno concreto mediante la recogida de información sobre el mismo; son la base de la visión inductiva de la ciencia.
- Galileanos, para la comprobación crítica de teorías, es decir, como base para su rechazo o aceptación mediante la observación de objetos reales.

- Kantianos, para explorar los efectos de las ideas y teorías mediante procesos lógicos o simulaciones; son la base de la ciencia crítica racionalista.

Diferentes ejemplos de cada uno de los cuatro tipos y su aplicación en ciencia se pueden consultar en Haines-Young y Petch (1986). En el diseño de un experimento, antes de empezar a realizar ninguna medición, hay que especificar el objetivo del trabajo, también llamado problema experimental. Para ello es necesario definir *a priori* cuatro aspectos básicos:

- a) Qué se quiere controlar y porqué. En otras palabras, hay que definir la variable dependiente en el proceso. Esta variable es la propiedad que se pretende medir del fenómeno o situación objeto de estudio, por ejemplo, la concentración de material en suspensión en estudios de transporte de sedimento en ríos. El tipo de medida se deduce de las relaciones causales que contiene la teoría. En esta primera fase es necesario definir también, en base a la teoría en cuestión, la población que se desea muestrear.
- b) A continuación se deben definir las variables independientes. Estas variables son la causa de las dependientes y como ellas quedan definidas en el marco de la teoría. En el caso fluvial anterior las variables independientes podrían ser las diferentes propiedades del flujo y la geometría del canal fluvial.
- c) Seguidamente debe decidirse el tipo de modelo estadístico que se utilizará para valorar los resultados. La elección de un modelo estadístico está limitada por el tipo de mediciones que se pueden realizar y los datos que se puedan obtener a través del proceso de control; no obstante, esta relación es biunívoca ya que una vez escogido el modelo, éste dicta las líneas maestras a seguir para la obtención de datos.
- d) Finalmente, un aspecto destacado en el diseño de experimentos es el concepto de anticipación, es decir, la posible predicción de los resultados que se podrán obtener y las consecuencias que de ello se deriven para la teoría. Cada experimento puede arrojar nuevos problemas e interrogantes no contemplados anteriormente que pueden necesitar nuevas explicaciones. Es necesario, en este sentido, asegurar la posibilidad de reproducción del diseño experimental.

Una vez realizado el experimento se deben interpretar sus resultados. Durante la interpretación hay que establecer las conclusiones que de ellos



se puedan derivar y las implicaciones que comportan para la verificación de la teoría. Según Lindley (1973) una parte fundamental en el proceso de interpretación es la toma de una decisión sobre la validez de los experimentos en el contexto de la teoría que se analiza. No existen criterios absolutos para la toma de esta decisión. En experimentos con base estadística, esta decisión se basa en criterios probabilísticos proporcionados por el modelo estadístico, es decir, la decisión se toma en base a un nivel de significación estadística que permite decidir si la hipótesis nula es aceptada o rechazada. En muchos casos este proceso es muy complejo y la respuesta final no puede ser totalmente absoluta, bien porque el experimento no ha sido valorado con una base crítica suficiente, bien porque no se ha prestado demasiada atención al significado de la hipótesis nula. El proceso de experimentación es, no obstante, un proceso de aprendizaje, al final del cual el investigador puede decidir continuar con más experimentos o realizar modificaciones que proporcionen respuestas más completas sobre el problema estudiado.

Todos los experimentos están abiertos a la crítica y a la mejora de la misma manera que se hace con las teorías. Un diseño experimental es casi siempre susceptible de ser mejorado con una mejor selección, por ejemplo, de las variables a controlar, de los modelos estadísticos de validación, y de la estrategia de muestreo, y examinando más detenidamente la hipótesis nula, todo ello también como base para el diseño de nuevos experimentos.

#### 8.6.4. El papel de la técnica en la obtención de datos

La capacidad de medir de manera satisfactoria es esencial para conseguir explicaciones científicas de los problemas estudiados. El papel de la técnica, es decir, del procedimiento utilizado para realizar mediciones, es el de permitir cuantificar las distintas variables de una manera consistente, rigurosa y precisa. Una vez se ha decidido qué y porqué se quiere medir, es importante emplear técnicas válidas de medición. Harvey (1969) define una medición como válida cuando mide lo que se supone que debe medir. Como se ha indicado anteriormente, la estructura interna de la teoría determina la definición del fenómeno o sistema que se debe controlar y las propiedades que es necesario medir. El procedimiento de medida debe reflejar esta idea lo más ajustadamente posible; sin medidas correctas los resultados de las pruebas estadísticas sobre las hipótesis formuladas serán inevitablemente erróneos. Para producir datos consistentes, el procedimiento de medición debe seguir, por lo tanto, los pasos definidos previamente. En muchos casos, las reglas de medición ya están establecidas; por ejemplo, en mediciones simples de peso y longitud. No obstante, en procesos más complejos, es necesario definir el método de medida de manera más detallada; en este senti-

do, la técnica a emplear puede no ser totalmente válida si no mide exactamente las propiedades contenidas en la definición de la variable. En otros casos, aún siendo válida la técnica escogida, los errores cometidos durante el proceso de medición pueden significar que los datos resultantes no son rigurosamente correctos para su uso en pruebas estadísticas complejas.

Aun en una ciencia natural como Geografía Física, existe todavía la necesidad de desarrollar una metodología convencional, de manera que la medición de variables específicas llegue a realizarse de forma normalizada (Goudie, 1990). Esto significa que la selección de una técnica conlleva en primer lugar una descripción exacta de todos los pasos necesarios para su utilización. Del mismo modo, debe proporcionarse información sobre el tipo de datos que se pueden obtener y la precisión de los mismos. Además, el desarrollo de cualquier técnica que pueda llegar a ser de uso generalizado, debería llevar implícito el hecho de poder medir sin ambigüedades y de manera exacta las distintas variables implicadas en una investigación.

La medición efectiva requiere un análisis profundo y detallado de los problemas y errores que se pueden ocasionar durante el proceso de medición. A pesar de la separación implícita de teoría, definición, medición, clasificación y verificación en el enfoque deductivo de la ciencia, normalmente es imposible separar todos estos componentes en la realidad. La definición de la variable a medir debe preceder lógicamente a la realización de mediciones, pero cualquier definición es susceptible de estar teñida con ideas previas a partir de datos y conocimientos disponibles sobre el fenómeno estudiado. La estructura inicial de una teoría puede depender parcialmente de las limitaciones operativas conocidas de antemano de las técnicas que se quieren aplicar en referencia, por ejemplo, a qué operaciones se necesitan, qué instrumentos y mediciones se deberán aplicar y cuáles están a disposición del investigador, y bajo qué condiciones de deberán realizar las mediciones. Por lo tanto, teniendo en cuenta que el procedimiento operativo debe acompañar el diseño de cualquier trabajo científico, las interrelaciones que se producen entre teoría, medición y pruebas estadísticas son inevitables y, en última instancia, este procedimiento controla los resultados y conclusiones que se puedan obtener.

#### 8.6.5. La cuenca de drenaje como marco de control en Geografía Física

Las cuencas de drenaje son unidades geográficas claramente identificables, al mismo tiempo que sistemas abiertos en términos de entradas y salidas de energía. Cada cuenca de drenaje está delimitada por una división topográfica que la aísla de las cuencas vecinas. Las únicas interacciones que se producen entre ellas son la migración de especies animales y, en al-

gunas ocasiones, las transferencias hídricas de tipo subterráneo. Definidas como sistemas de proceso-respuesta (Chorley y Kennedy, 1971), las cuencas presentan dos características fundamentales: a) su funcionamiento está controlado por la magnitud y la frecuencia de las entradas, y por los cambios en la morfología y la funcionalidad del sistema; b) existe una autorregulación para crear un estado de equilibrio entre formas y procesos. Por estas razones la cuenca de drenaje, en la cual el río es la arteria de energía principal, ha sido ampliamente reconocida como la unidad geográfica fundamental.

La cuenca es un sistema frágil, constituido por el subsistema vertientes y el subsistema fluvial. Los procesos en las vertientes son un tema destacado de investigación en Geografía Física. La investigación de cuencas de drenaje debe poner un interés particular en aquellos procesos relacionados con la acción erosiva del agua en las vertientes y la contribución de sedimento de éstas a la red de drenaje. Los estudios clásicos de procesos en vertientes se han desarrollado en gran parte para explicar la relación entre estos y las formas del relieve, con un énfasis claro en el estudio de su origen y evolución. Además, los procesos erosivos en vertientes constituyen un problema medioambiental de primer orden, particularmente en áreas agrícolas y forestales ya que, entre otros, alteran y degradan la cantidad y calidad del suelo, disminuyendo su productividad. Asimismo, cualquier modificación introducida por el hombre en las vertientes pueden producir efectos irreversibles aguas abajo.

La estabilidad del lecho de los ríos y los procesos fluviales asociados son también un problema geográfico de primer orden, en especial para el desarrollo y planificación de llanuras aluviales y para el control de los recursos hídricos. La gestión de los ríos para el suministro de agua tanto de uso doméstico como industrial constituye, entre otros, un problema medio ambiental muy delicado, teniendo en cuenta el incremento constante de demanda de agua, especialmente en las áreas más desarrolladas del planeta.

La variabilidad del caudal a lo largo del año y entre años sucesivos es importante de cara a conocer, por ejemplo, de cuánta agua se dispone para suministro y cuánta energía se puede producir.

Son muchos los países que tienen redes estables de estaciones de aforos, aunque son todavía escaso el número de estaciones normalizadas para el control de la erosión en vertientes y el transporte de sedimento en canales fluviales. Por este motivo, es necesario expandir y mejorar este tipo de instalaciones con el objetivo de entender la dinámica de las cuencas en toda su complejidad y para realizar predicciones hidrológicas y geomorfológicas en áreas afectadas, por ejemplo, por cambios en los usos del suelo. En este contexto cabe señalar que las técnicas de control y experimentación en cuencas de drenaje dentro de Geografía Física han experimentado un nota-

ble desarrollo a lo largo de las últimas décadas, muy especialmente en Climatología, Hidrología y Geomorfología. Destaca el trabajo del geomorfolo- go norteamericano Luna B. Leopold, que ya en los años sesenta lanzaba la idea de una red internacional de estaciones de vigilancia de la dinámica fluvial (Leopold, 1962). El objetivo de Leopold era el de establecer un banco de datos sistemáticos, a la manera de los datos meteorológicos e hidrológicos, a partir de los cuales se pudieran identificar las causas y explicar las variaciones de los diferentes procesos fluviales. Estos datos permitirían realizar predicciones sobre la ocurrencia de estas variaciones y su relación con causas naturales o con modificaciones antrópicas en la cuenca de drenaje. Leopold proponía el establecimiento de series de pequeñas cuencas experimentales en regiones con clima, vegetación, suelo y usos del suelo diferentes, equipadas con instrumentos de medición normalizados y simples, a partir de las cuales se pudiera obtener información rápida y comparable de interés en investigaciones sobre cambios medioambientales. Para más información sobre la red de vigilancia fluvial se recomienda consultar Sala y Rovira (1986).

Recientemente se ha puesto en marcha en España la Red de Estaciones de Seguimiento y Evaluación de la Erosión (*RESEL*) por parte del Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza (*ICONA*), dependiente del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. La *RESEL* tiene como objetivo principal el seguimiento de los procesos erosivos e hidrológicos en áreas afectadas por la erosión a través de una red de estaciones representativas, como base para la planificación de acciones de control y medidas correctoras. En concreto, los procesos básicos a controlar son: a) el ciclo de la erosión, tanto laminar y en regueros (en parcelas experimentales) y la producción de sedimentos en los cauces (en cuencas experimentales); b) el ciclo hidrológico, especialmente precipitación y escorrentía, también en parcelas y cuencas. Asimismo se trabaja en la mejora de técnicas de control de la erosión y de protección del suelo a través de estudios experimentales. El embrión de esta red lo constituyen las numerosas estaciones de control de la erosión en funcionamiento, la mayoría surgidas al amparo del Proyecto *LUCDEME* (Lucha contra la Desertificación en el Mediterráneo), las cuales son representativas de diversos ecosistemas afectados por graves problemas de degradación medioambiental.

Hay que destacar, finalmente, el avance metodológico que ha supuesto la aplicación del concepto de balance de sedimento para el control sistemático de procesos hidrogeomorfológicos en cuencas de drenaje. Su formulación definitiva llegó a finales de los años setenta y se debe a los geomorfolo- gos Dietrich y Dunne; ideas similares, aunque menos elaboradas, se pueden encontrar, no obstante, en trabajos realizados con anterioridad (Rapp, 1960; Schick, 1977). Un balance de sedimento es una simplificación conceptual de

la interacción de los principales procesos que transportan el sedimento, a partir de la meteorización de la roca y a lo largo de las vertientes y de la red fluvial, fuera de la cuenca (Dietrich y Dunne, 1978). Uno de sus principales atractivos es que se puede construir en poco tiempo a partir de reconocimientos de campo, experimentos en el laboratorio, y datos obtenidos en cuencas similares. Una vez elaborado sirve como punto de partida para el diseño de programas a largo plazo de medición y experimentación en el campo, y constituye, además, una base metodológica sólida para el control permanente y la formulación de predicciones sobre impactos medioambientales en cuencas de drenaje. El método del balance de sedimento ha sido también utilizado en el estudio de cuencas en áreas con clima mediterráneo (Lehre, 1982; Llorens y Gallart, 1992; Schick y Lekach, 1993; Batalla *et al.*, 1995).

## 9. Métodos y técnicas de control y experimentación

### 9.1. Introducción

El estudio de fenómenos naturales en ciencia requiere la toma de medidas, con el objetivo de obtener información que permita la comprobación crítica de teorías científicas. El tipo de mediciones a realizar depende de la teoría que se quiera verificar y del modelo estadístico que se escoja para valorar los resultados. La necesidad de cuantificar es esencial, ya que la comprensión general de un fenómeno está interrelacionada de manera inherente con la capacidad de definir y caracterizar las propiedades que lo constituyen. En general, se puede afirmar que si un fenómeno no puede ser controlado mediante medición, su conocimiento queda limitado y su comprensión es más superficial (Goudie, 1990).

Algunas veces la observación y medición de procesos naturales en Geografía Física se toma como el objetivo final de una investigación, olvidando que los resultados de cualquier medición adquieren validez y significado sólo en tanto que elemento de comprobación en el proceso de verificación y ajuste de teorías científicas. Esto no significa que las mediciones no sean importantes, sino todo lo contrario, puesto que sin ellas no pueden derivarse conclusiones precisas sobre los fenómenos estudiados. La fiabilidad de la información obtenida depende básicamente de la aplicación de unas reglas estadísticas y de la valoración de los errores que pueda contener.

## 9.2. Métodos y técnicas de trabajo de campo

Una parte fundamental de la investigación en Geografía Física se basa en el control y medición de procesos naturales en el campo, para lo cual es necesaria la utilización de diversos métodos y técnicas específicos. Teniendo en cuenta la imposibilidad de presentarlos a todos de una manera exhaustiva se han seleccionado aquellos que a juicio de los autores son de uso más frecuente, más representativos de los procesos en clima mediterráneo, pueden aplicarse dentro del marco de una cuenca de drenaje, y tienen una clara vertiente aplicada. Por todo ello, se encuentran más asequibles en departamentos universitarios de Geografía Física.

### 9.2.1. Precipitación y evaporación

#### • Precipitación

Entre los diferentes componentes que forman parte del ciclo hidrológico, los elementos de la precipitación, en particular la lluvia y la nieve, son los más comúnmente controlados. No obstante, obtener mediciones aceptables de precipitación no es tan sencillo como en un principio se pudiera pensar. Físicamente no es posible recoger toda la precipitación que cae sobre la totalidad de una cuenca de drenaje.

La precipitación, por lo tanto, tiene que ser muestreada; esta operación se realiza mediante instrumentos denominados pluviómetros o totalizadores y con pluviógrafos o pluviómetros registradores. En el caso del pluviómetro o totalizador, la inspección del instrumento se debe realizar diariamente a las 8h de la mañana (hora solar), incluso aunque no se haya producido precipitación. En el caso del pluviógrafo el registro continuo se lleva a cabo bien en papel o bien con soporte informático. Las mediciones se realizan en puntos concretos de la cuenca seleccionados como representativos, y los valores del volumen de agua caída (en m<sup>3</sup>) o el equivalente en volumen por unidad de área sobre toda la cuenca (en mm), deben ser estimados a partir de cálculos posteriores (véase epígrafe 9.4.1).

El diseño de la red de estaciones pluviométricas es fundamental para obtener medidas correctas de la precipitación en una cuenca de drenaje. Como guía general acerca de la densidad de estaciones pluviométricas en redes de control de la precipitación, se indica a continuación la densidad mínima para diferentes regiones del mundo, tal y como se especifica en la siguiente tabla (Shaw, 1983):

Región	Densidad mínima (km <sup>2</sup> /estación)
Zonas áridas polares.	1.500-10.000
Zonas templadas, mediterráneas, y tropicales:	
— Llanuras.	600-900
— Áreas de montaña.	100-250
Pequeñas islas montañosas (< 20.000 km <sup>2</sup> ).	25

Seleccionar el lugar adecuado para instalar un pluviómetro no es una tarea fácil. La cantidad de precipitación recogida debe ser ante todo representativa de la lluvia que cae en la cuenca controlada. Lo que realmente se toma como muestra es la cantidad de agua que cae sobre la entrada tipo del pluviómetro, generalmente con una sección de recogida de 150 cm<sup>2</sup>. Comparado con la superficie de una cuenca digamos pequeña, por ejemplo de 15 km<sup>2</sup>, la medida puntual representa solamente una fracción entre 10<sup>9</sup> del total de la cuenca. Por lo tanto, cualquier pequeño error en la medida debido a una localización deficiente puede suponer una interpretación incorrecta de un volumen importante de agua sobre toda la cuenca. Es importante colocar el pluviómetro lejos de objetos (casas, paredes, árboles) que puedan afectar su normal funcionamiento. La abertura mínima del espacio que rodea al pluviómetro con respecto a edificios o árboles debe ser de 120° y la distancia mínima con respecto al objeto más cercano debe ser el doble del objeto en cuestión. Si hay vegetación en los alrededores se debe tener en cuenta su crecimiento para decidir sobre la localización del instrumento. Una vez escogido el lugar para su ubicación, la base del aparato debe colocarse a 300 mm del suelo que debería estar cubierto, a ser posible, por hierba o grava para prevenir la salpicadura en caso de lluvia intensa.

#### • Entradas químicas atmosféricas y deposición seca

Es particularmente conocida la importancia que tienen las entradas atmosféricas, tanto en forma de deposición seca como disuelta, para el contenido químico de las aguas superficiales. Está claro que las entradas atmosféricas juegan un papel muy destacado en el ciclo de nutrientes de los ecosistemas, juntamente con la contribución proveniente de la denudación del suelo y las rocas. La estimación de las entradas atmosféricas es fundamental en estudios de balances hidroquímicos de cuencas de drenaje, ya que su conocimiento permite, entre otros, una evaluación más precisa de las reacciones de meteorización y los efectos de los usos del suelo en el balan-

ce. No obstante, la estimación de estas entradas presenta problemas considerables, especialmente por lo que se refiere a la recogida de muestras, su conservación y a los análisis en el laboratorio. Este último aspecto será tratado más adelante. Para información detallada sobre procedimientos de muestreo, conservación y análisis de muestras de precipitación se puede consultar Galloway y Likens (1978).

Generalmente las entradas atmosféricas se dividen en entradas húmedas o material disuelto en agua de lluvia, y deposición seca o partículas sólidas caídas entre episodios de lluvia. La recogida combinada de ambos componentes se realiza por medio de colectores abiertos a través de un embudo de polietileno, generalmente de 60° y entre 15 y 30 cm de diámetro. El agua de lluvia se recoge a través de un tubo de plástico en un depósito, normalmente también de polietileno. Este depósito debe estar pintado de negro, enterrado o cubierto con papel de aluminio para proteger la muestra de agua de la luz solar y evitar, de esta manera, la formación de algas durante el tiempo de almacenaje hasta su recogida. Algunos autores recomiendan que si el tiempo de almacenaje en el campo es muy largo se debe añadir al depósito 1 mg de acetato de phenylmercurio, o unas gotas de cloroformo, para preservar la muestra. Dado que las concentraciones de material disuelto en el agua de lluvia son generalmente muy pequeñas ( $< 1 \text{ mg l}^{-1}$ ), es conveniente manipular las muestras con mucha precaución para no contaminarlas durante su recogida y traslado. Se han desarrollado en este sentido instalaciones sofisticadas para la conservación de muestras en el campo, por ejemplo para guardar las muestras a baja temperatura después de ser recogidas en el colector y antes de ser transportadas al laboratorio.

Para poder realizar una estimación con garantías de la deposición seca en el total de entradas atmosféricas se necesita el uso de técnicas de campo más complejas, a no ser que el colector de lluvia esté abierto sólo cuando llueve o que el colector de deposición seca este cubierto durante ese tiempo. Algunos estudios han desarrollado técnicas para realizar este proceso de manera automática (Likens *et al.*, 1977), y en otros casos se utilizaron circuitos integrados para controlar sólo las entradas de agua de lluvia (Zeman y Nyborg, 1974).

#### • Evaporación

De los diversos elementos que componen el ciclo hidrológico, la evaporación es uno de los más difíciles de controlar. La evaporación de agua de la superficie terrestre debe ser considerada en base a dos aspectos distintos. El primero, la evaporación de una superficie acuática libre  $E_o$ , se refiere a la transferencia directa desde océanos, lagos, embalses y ríos hacia la atmósfe-

ra. Esta puede ser relativamente fácil de calcular si la capacidad del cuerpo de agua es conocida. La segunda forma de pérdidas por evaporación se refiere a la transpiración de la vegetación  $E_r$ , llamada también evapotranspiración. Es mucho más difícil de controlar que la evaporación  $E_o$ , ya que las tasas de transpiración pueden variar considerablemente en un área determinada de acuerdo con el tipo de vegetación, su capacidad para transpirar y la disponibilidad de agua en el suelo.

La medida directa de la evaporación se realiza mediante tanques y recipientes tipo cazuela. Estos instrumentos son relativamente pequeños, de sección circular o cuadrada, fáciles de transportar y de instalar. Los hay de muchas clases, y generalmente cada país desarrolla y utiliza los que cree más adecuados a su medio ambiente y necesidades. El tipo más utilizado es el Americano Clase A (1,21 m de diámetro y 25,5 cm de profundidad) o el Tanque Ruso GGI-3000, de menor diámetro (0,62 m) pero mayor profundidad (6,85 cm); ambos ofrecen valores de orden de magnitud correctos. Originalmente se controlaban diariamente, pero su funcionamiento ha sido mejorado con la introducción de equipos de medición y registro continuo, bien en soporte de papel bien informático.

Existen también instrumentos especialmente diseñados para la estimación de la evaporación y transpiración de una superficie cubierta por vegetación,  $E_r$ . Los más comunes son las garitas de filtración y los lisímetros. Los primeros son tanques cilíndricos o rectangulares de 1 m de profundidad que, una vez rellenos con una muestra representativa de suelo y con una superficie vegetal, se instalan en el terreno. La superficie de la instalación no debería ser visible desde la hierba o el sembrado colindante. Un tubo desde el fondo del tanque conduce el agua sobrante de por filtración hasta un depósito colector. A partir de datos de lluvia obtenidos en los alrededores se puede estimar la evaporación más la transpiración a partir de la expresión:

$$E_r = \text{Precipitación} - \text{Filtración}$$

Las garitas de filtración no tienen en cuenta los cambios en el contenido de humedad del suelo y, por lo tanto, las mediciones se deben realizar en períodos de tiempo en que la garita esté saturada, asegurando que los cambios en el contenido de humedad del suelo sean mínimos. Generalmente, en áreas con precipitación a lo largo de todo el año, los datos se registran cada mes.

Comparados con los anteriores los lisímetros son instrumentos más complejos ya que controlan los cambios en el contenido de humedad del suelo y, por ello, son más caros y complejos de instalar. Están compuestos por un gran bloque de suelo, cubierto por la vegetación representativa del área, inmerso en un recipiente lleno de agua e instalado en el terreno. En

el fondo del bloque de suelo se fija una base sellada con un tubo de drenaje y debajo se instala una balanza para registrar los cambios de peso del bloque. La expresión para el cálculo de la evapotranspiración es:

$$E_t = \text{Precipitación} - \text{Filtración} \pm \text{Cambios de peso}$$

Todas las medidas se refieren a la superficie del orificio del lisímetro a nivel del terreno. La precisión en el control de la evapotranspiración real por medio de lisímetros depende básicamente de la sensibilidad de la balanza. Para una información más detallada sobre el uso de lisímetros se puede consultar Green (1979).

## 9.2.2. Propiedades del suelo

### • Humedad

La mayor parte del contenido de agua en el suelo proviene de la infiltración, a través de los espacios porosos entre las partículas, del agua de lluvia o de fusión de nieve. Los conductos de penetración del agua en el suelo están facilitados por una película fina de agua higroscópica, producto de fuerzas electrostáticas, presentes en cada una de las partículas del suelo. El sistema más generalizado para obtener el contenido en agua de un suelo es el método gravimétrico de laboratorio. Esta técnica implica el traslado de las muestras de suelo, lo cual resulta siempre problemático por las alteraciones a que da lugar. Se puede, no obstante, medir el contenido en agua de un suelo en el campo mediante la utilización de un instrumento llamado *Speedy* (Sala y Gallart, 1988).

El *Speedy* es un instrumento portátil que no contiene elementos eléctricos. La medición se realiza en pocos minutos y el instrumento ofrece directamente el contenido de humedad de la muestra. Se trata de una cámara de presión en la que el agua contenida en la muestra de suelo reacciona con carburo de calcio formando gas acetileno; la mayor o menor presión producida por este gas, confinado en el interior del aparato, es la medida del porcentaje de humedad en el suelo. Para su utilización se introduce el absorbente (carburo de calcio) dentro del aparato. Posteriormente, se sitúa la muestra de suelo en el tapón del *Speedy*, procurando mantener el aparato en posición horizontal para evitar que entre en contacto con el absorbente antes de cerrar el instrumento. Una vez la cámara está bien cerrada se agita, se deja enfriar el gas que se ha producido en su interior, y se efectúa la lectura en la esfera graduada. Finalmente se abre la cámara lentamente, se vacía su contenido y se limpia el instrumento antes de efectuar nuevas mediciones.

La humedad en el suelo se puede medir de manera más exacta mediante un TDR (*Time Domain Reflectometry*). El TDR es un instrumento de precisión que se basa en la transmisión de ondas de alta frecuencia, la velocidad de las cuales depende de la permisividad dieléctrica del medio. Este valor está en función del contenido de humedad en el suelo. La permisividad dieléctrica del agua es 80 y la del aire 1. La medida ofrece una idea del balance en el contenido de aire y de agua que hay en los poros del suelo. Cuanto más bajo es el valor resultante, más alto es el contenido de aire y más bajo el de agua. El TDR consiste en una sonda metálica que se introduce en el terreno y por la cual se transmiten las ondas electromagnéticas. Esta sonda está conectada a una consola, donde se encuentra el circuito de control, y a una pantalla de cristal líquido donde se leen los resultados.

### • Capacidad de infiltración y permeabilidad

La infiltración se refiere al flujo de agua que penetra en el suelo y se define como la tasa máxima de absorción de agua de lluvia por el suelo en condiciones determinadas. Generalmente se mide en altura de agua por unidad de tiempo ( $\text{mm min}^{-1}$ ). Es importante tener en cuenta la influencia que las condiciones antecedentes del suelo ejercen sobre la capacidad de infiltración. El concepto de infiltración se asocia normalmente a suelos secos, mientras que la permeabilidad se mide cuando el suelo está saturado y se refiere al flujo de agua subsuperficial. La medición de estas propiedades no es sencilla y debe realizarse con precisión, ya que los resultados dependen mucho de las características de los suelos (Carson y Kirkby, 1972; Weeks, 1978).

La capacidad de infiltración de un suelo se puede estimar por medio de dos tipos de instrumentos, los infiltrómetros de aro y los infiltrómetros asociados a simuladores de lluvia. El primer tipo es fácil de emplear pero los resultados se ven más afectados por la variabilidad del suelo. Este método concibe el suelo como un cuerpo unidimensional (Gill, 1976), y se basa en dejar penetrar en el suelo el agua contenida en un aro o cilindro. La capacidad del suelo de absorber agua se mide bien como la reducción de la altura de agua dentro del cilindro, bien como la cantidad de agua necesaria para mantener dicha altura constante. Los resultados se expresan gráficamente y relacionan la absorción de agua con el tiempo indicando el nivel de saturación del suelo cuando éste alcanza su capacidad máxima de infiltración.

La estimación de la capacidad de infiltración de un suelo a partir de simulaciones de lluvia es más precisa. Esta técnica es mucho más elaborada que la anterior, y para su aplicación se utilizan a menudo equipos portátiles fáciles de manejar. Básicamente, estos equipos se componen de boquillas o inyectores que proporcionan una intensidad de lluvia y un tamaño de gota

controlables. Midiendo la escorrentía generada durante el experimento a la salida de la parcela, se puede estimar la capacidad de infiltración de una manera indirecta.

Asociada con la capacidad de infiltración, pero normalmente analizada en el laboratorio, se encuentra la permeabilidad. La permeabilidad se define como la facilidad de un líquido de fluir a través de un suelo o roca. La permeabilidad es un fenómeno complejo ya que su comportamiento está influenciado por una serie de factores, sobre todo tamaño y forma de las partículas, viscosidad del agua, y densidad. La ley de Darcy relaciona el flujo laminar subterráneo con el gradiente y permeabilidad hidráulicos del material del acuífero (véase epígrafe 8.2.2).

El control de la permeabilidad se realiza en el laboratorio utilizando un permeómetro. El principio de éste instrumento es el de permitir al agua fluir a través de la muestra, midiendo el gradiente hidráulico y la tasa de flujo o caudal. Para más información sobre este aparato se recomienda consultar Goudie (1990).

### 9.2.3. Características de la vegetación

En el estudio de la vegetación, es decir, en el estudio de las comunidades vegetales, el geógrafo ha de observar su composición florística, su estructura y su distribución y disposición espacial. La descripción de la vegetación puede hacerse de forma muy simple delimitando los conjuntos estructurales que la caracterizan (Dansereau, 1957). Si bien para el geógrafo este estadio sólo constituye una fase preliminar del estudio de la vegetación, para los no especialistas, como planificadores, urbanistas, arquitectos, etc., esta clasificación puede ser suficiente para sus valoraciones del medio físico. Los conjuntos estructurales se pueden distribuir horizontalmente en elementos de vegetación, o bien verticalmente en estratos de vegetación, expresión que designa los niveles sucesivos de altura en que se encuentran las masas vegetales. Otro tipo de características fácilmente inventariables (tipos biológicos o morfológicos, coloración, biomasa) pueden aportar una información botánica relevante en los conjuntos estructurales descritos. El inventario de la vegetación debe incluir básicamente los aspectos cuantitativos y cualitativos que ayuden a su caracterización. Algunos de los aspectos cuantitativos más comúnmente analizados en el campo son los siguientes:

#### • Abundancia y densidad

Se refiere al número de individuos presentes y se estima a partir del número de individuos de cada especie expresada en términos relativos. Así se

habla de especies raras, frecuentes, abundantes, etc. Para hallar su valor es necesario contar el número de individuos existentes por unidad de superficie definida, aunque a veces este proceso es largo y difícil. Para más información sobre este método y las escalas de valores de abundancia se recomienda consultar Harrison (1975) y Panareda (1994).

#### • Cobertura o grado de cubierta

Es el porcentaje de la superficie de la unidad de muestreo cubierto por la proyección horizontal de la vegetación, bien en su conjunto bien por alguno de sus estratos o especies. Se suele expresar en una escala de cinco grados con bastante variedad en los límites de las diferentes escalas propuestas. Una de las más utilizadas es la que se recoge en Margalef (1974):

Grado	% de cubierta
5	75-100
4	50-75
3	25-50
2	5-25
1	5

Dado que el grado de cubierta es un parámetro con mayor significado ecológico que la abundancia, para simplificar el trabajo de campo Braun-Blanquet (1932) propuso la siguiente escala:

5. Cualquier número de individuos que cubran >75% del área.
4. Cualquier número de individuos que cubran 50-75% del área.
3. Cualquier número de individuos que cubran 25-50% del área.
2. Cualquier número de individuos que cubran 5-25% del área.
1. Abundante pero con un valor de cobertura bajo o bien pocos individuos.
- + Pocos individuos y pequeña cobertura.
- r. Individuos raros o únicos con pequeña cobertura.

Un procedimiento práctico que facilita la asignación de los grados de una escala determinada en el campo es el siguiente: para cada una de las especies presentes se decide si cubre más o menos del 50% del área establecida. Si su cubierta es mayor del 50%, la siguiente pregunta es si además cubre más o menos del 75%. En el primer caso se asigna el grado 5 a esa

especie; en el segundo el grado 4. De la misma forma se procede si la especie cubre menos del 50% de la superficie. Finalmente si parece que cubre menos del 1% se asigna el +. La clase cuyo símbolo es *r* se reserva para aquellas especies de las que sólo aparece un individuo en el área de muestra (Ellenberg y Müller-Dombois, 1974).

• *Biomasa y productividad primaria*

La biomasa de las comunidades vegetales es la cantidad de materia vegetal que contienen por unidad de superficie, expresada en peso de materia seca, en kilocalorías (Gounot, 1969) o en gramos de carbono. Este parámetro es una indicación de la capacidad de la vegetación para acumular materia orgánica. Para la estimación de la biomasa existen métodos directos e indirectos. Los métodos directos implican la destrucción de la vegetación, que se ha de cortar, incluso desenterrando las raíces, para determinar el peso de materia vegetal seca. Para expresar esta medida en kilocalorías se halla el equivalente energético de la materia vegetal seca en una bomba calorimétrica. Uno de estos métodos es el de Wacker (1943) que se aplica a comunidades de herbáceas y que se basa en la proporción entre el peso de materia vegetal seca y el peso de materia vegetal húmeda. Los métodos indirectos tratan de establecer relaciones entre la biomasa y algún parámetro de la vegetación (altura, diámetro del tronco, grado de cubierta, etc.) cuya medición no sea destructiva. Por ejemplo, Kittredge (1944) utilizó la siguiente fórmula para las especies leñosas:

$$W_L = A \cdot D^h$$

donde  $W_L$  es la cantidad de hojas del árbol,  $D^h$  es el diámetro del tronco medido a 1,3 m del suelo, y  $A$  y  $h$  son constantes. La cantidad de hojas en el árbol sería la estimación de la biomasa. Existe una relación lineal entre  $W_L$  y  $D^2$ , siendo  $D$  igual al diámetro del tronco al nivel de la rama más baja. Esta relación, sin embargo, no es válida para todas las especies leñosas (Shinozaki, 1964). Otros aspectos cuantitativos en la caracterización de la vegetación serían la diversidad y la dominancia. Para una visión detallada de estos aspectos se puede consultar Southwood (1978) y Harrison (1975).

Los aspectos cualitativos se basan fundamentalmente en los rasgos fisiológicos y funcionales de las especies y comunidades vegetales y comprenden características tales como: composición florística, sociabilidad, vitalidad, fisionomía, estructura espacial y dinámica sucesional. Se resumen a continuación aproximaciones metodológicas para el estudio de los dos primeros.

1) *Composición florística*

La lista de especies presentes en la comunidad vegetal que se estudia suele elaborarse mediante listas florísticas en parcelas de muestreo. El nivel de detalle dependerá de cada tipo de estudio. Es decir, en algunos casos sólo interesarán las plantas vasculares o los árboles con valor económico, o una categoría taxonómica determinada como por ejemplo las plantas vivaces o las gramíneas. Si se pretende la definición florística de unidades de vegetación es necesario no olvidar ninguna especie y llegar incluso a diferenciar las subespecies y variedades.

2) *Sociabilidad*

Los individuos de una comunidad no se distribuyen aleatoriamente, sino que, por el contrario, las especies forman colonias más o menos grandes. Este hecho se describe como sociabilidad de las especies florísticas, Braun-Blanquet (1932) estableció una escala dividida en cinco clases:

5. Especies reunidas en formaciones generalmente puras.
4. Especies reunidas en pequeñas colonias.
3. Especies reunidas en haces.
2. Especies reunidas en grupos.
1. Especies aisladas.

Esta apreciación de sociabilidad no tiene otras pretensiones que las puramente descriptivas, y esto hace que no se distinga entre individuos propiamente dichos y los que provienen de la multiplicación vegetativa o ramificación de las plantas cespitosas. La sociabilidad de las especies vegetales es la principal responsable del modelo de vegetación; así, cuando Godron (1968) habla de la repartición o disposición de los individuos de una especie vegetal en una extensión dada, se refieren al aspectos más concreto y fácil de apreciar: la sociabilidad. La escala utilizada es la siguiente (a partir de MOPT, 1992):

Clase	Definición
1	Disposición regular, individuos uniformemente repartidos.
2	Disposición localizada, individuos irregularmente repartidos.
3	La especie se localiza en la periferia del área estudiada.
4	La especie se localiza en el centro del área estudiada.
5	Individuos aislados y poco numerosos.



## 9.2.4. Procesos fluviales

### • Parámetros hidráulicos

#### 1) Geometría hidráulica

Uno de los métodos más utilizados para el estudio de la dinámica de canales fluviales en relación a su evolución morfológica es la realización sistemática de perfiles transversales (Sala y Rovira, 1986). Los perfiles transversales proporcionan datos útiles para calcular caudales, en combinación con mediciones reales de velocidades, y estimar caudales de avenida, a partir de fórmulas para estimar la velocidad. El trazado del perfil transversal se basa en la medición de los desniveles relativos entre diferentes puntos de una línea situada transversalmente al curso fluvial. Para la realización de un perfil transversal se aconseja seguir los siguientes pasos:

1. Comenzar siempre desde el margen derecho del río, mirando aguas abajo.
2. Tensar y nivelar la cinta (no es necesario si se utiliza un nivel).
3. Especificar los límites laterales del flujo de agua.
4. Medir la distancia entre la cinta y el lecho en intervalos no superiores al 5% de la anchura del perfil, especificando los puntos de máximo calado.
5. Describir las características esenciales que conforman el perfil realizado (forma del canal, tipo y calibre del material del lecho, vegetación).

Es conveniente asimismo medir la pendiente (en %) de un sector de 100 metros aguas arriba de la sección de trabajo, ya que es un parámetro necesario para el cálculo teórico posterior de los caudales cuando no se dispone de mediciones directas de velocidad. Los parámetros hidráulicos que se obtienen del perfil son básicamente:

- Anchura ( $W$ ) en m
- Profundidad o calado ( $d$ ) en m
- Perímetro mojado ( $P_m = 2d + W$ ) en m
- Radio hidráulico ( $R = A/P$ ) en m
- Área ( $A$ ) en  $m^2$

#### 2) Velocidad del flujo

La velocidad del flujo que circula por un río es la medida de la distancia recorrida por el agua por unidad de tiempo, expresada en  $m\ s^{-1}$ . La veloci-

dad media se toma a 0,6 del calado desde la superficie, o como la media de los puntos 0,2 y 0,8 del calado también desde la superficie. En general, cuando se habla de velocidad del agua en un curso fluvial no hay que entender que nos referimos a la velocidad que tiene lugar en un punto determinado, sino a una velocidad media para el conjunto del flujo en una sección determinada. Existen métodos directos e indirectos para medir la velocidad del flujo en un río. A continuación se listan las técnicas más comunes y se describen tres de las más utilizadas:

	Tipo directo	Subtipo
Técnicas de medición de la velocidad de flujo de un río	Flotadores	Superficie Sumérgicos
	Molinetes hidráulicos	Péndulo Hélice Electromagnético Ultrasónicos
	Trazadores	—
	Relaciones pendiente-radio hidráulico	Manning Chézy

- a) *Medida directa de la velocidad mediante flotadores.* El cálculo se basa en el tiempo que tarda un flotador en recorrer una distancia determinada. La duración mínima del movimiento del flotador debe ser de 30 segundos, y las medidas se deben tomar en sectores rectos sobre una distancia mínima de 100 metros. La velocidad media a partir de las mediciones con flotadores debe ser ajustada mediante coeficientes para convertirla en la velocidad media en la vertical del flujo. Los coeficientes por los que se deben multiplicar los resultados oscilan, según el tipo de flotador, entre 0,8 y 0,95.
- b) *Medida directa de la velocidad mediante el molinete hidráulico.* La medición se basa en el número de vueltas de una hélice sumerigida en el agua un tiempo determinado. Este valor se transforma en velocidad del flujo mediante la fórmula siguiente:

$$v = [(c/t) \cdot a] + b$$

donde  $v$  es la velocidad del flujo,  $c$  es el número de vueltas de la hélice,  $t$  es el tiempo que ha durado la medición, y  $a$  y  $b$  son constantes empíricas que dependen del instrumento utilizado.

Cuando se toman medidas puntuales la velocidad media se debe determinar a 0,6 del calado del flujo desde la superficie, o como la media de los puntos a 0,2 y 0,8 desde la superficie, tal y como hemos señalado anteriormente. A ser posible, se tomaran de 2 a 5 lecturas en cada punto de observación. Treinta segundos son suficientes para obtener una estimación de la velocidad media en una vertical, excepto cuando las velocidades son muy bajas, en que son necesarios sesenta segundos. El número de mediciones de velocidad en la anchura del flujo depende de las dimensiones del río pero, en general, se recomienda un mínimo de veinte espaciados regularmente en la sección.

- c) *Cálculo indirecto de la velocidad mediante la ecuación de Manning.* Esta fórmula se basa en determinaciones empíricas de campo sobre unos valores denominados coeficientes de rugosidad. La fórmula se expresa como:

$$v = (R^{2/3} \cdot S^{1/2})/n$$

donde  $v$  es la velocidad,  $R$  es el radio hidráulico,  $S$  es la pendiente de la superficie del agua (generalmente no disponible, por lo que se utiliza la del lecho del río), y  $n$  es el coeficiente de rugosidad de Manning. Los valores experimentales de  $n$  varían desde 0,01 para superficies lisas hasta 0,08 para canales sinuosos con piedras y vegetación. A continuación se listan algunos valores del coeficiente de Manning:

Clases de ríos	Mínimo	Normal	Máximo
<i>Ríos de llanura</i>			
Lecho limpio, recto, sin vaguadas	0,025	0,030	0,035
Lecho limpio, ondulado, con vaguadas	0,035	0,040	0,045
Sectores de aguas lentas con vegetación	0,050	0,070	0,080
<i>Ríos de montaña</i>			
Lechos con gravas y cantos	0,030	0,040	0,050
Lechos con cantos y bloques	0,040	0,050	0,070

#### • Caudal de agua

El caudal de agua de un río es el volumen por unidad de tiempo que circula por una sección del canal fluvial determinada. La fórmula general para el cálculo del caudal viene dada por la expresión siguiente:

$$Q = A \cdot v$$

donde  $Q$  es el caudal (en  $m^3 s^{-1}$  o  $l s^{-1}$ ),  $A$  es el área de la sección ( $m^2$ ), y  $v$  es la velocidad del flujo ( $m s^{-1}$ ). En el caso de lechos muy irregulares se recomienda efectuar el cálculo del caudal por paneles o secciones de flujo individuales, con el objetivo de obtener un resultado más preciso y que refleje el carácter no uniforme del canal. Cada panel no debe superar el 5% de la anchura total de la sección. La fórmula a seguir para calcular el caudal ( $Q_p$ ) de cada panel es:

$$Q_p = [(v_1 + v_2)/2] \cdot [d_1 + d_2/2] \cdot W_p$$

donde  $v_1$  y  $v_2$  son las velocidades medias que definen el panel ( $m s^{-1}$ ),  $d_1$  y  $d_2$  son los calados correspondientes a dichas velocidades (m), y  $W_p$  es la anchura del panel (m).

Existen asimismo otros métodos directos para la determinación del caudal de agua de un río. Entre éstos cabe citar el de medición volumétrica mediante un colector. Ésta es una técnica que se utiliza para caudales muy pequeños, normalmente no superiores a  $10 l s^{-1}$ , y a pesar de su sencillez proporciona datos muy exactos. Se trata de medir el caudal recogiendo toda el agua que circula por el canal en un recipiente de volumen conocido durante un período de tiempo determinado, o bien midiendo el tiempo necesario para llenar el recipiente utilizado.

Entre los métodos indirectos cabe señalar el del registro continuo del caudal en estaciones de aforo y el método de dilución. Una estación de aforos es la construcción permanente de un canal en una sección de río. El cálculo se basa en una relación conocida entre altura de flujo en la estación y el caudal, obtenida a partir de mediciones de velocidad para caudales bajos, y sobre hipótesis teóricas de cálculo hidráulico para caudales de avenida. Los calados del flujo de agua pueden registrarse de forma continua en soporte de papel mediante el limnógrafo o en soporte informático mediante sondas capacitivas y ultrasónicas.

El caudal de agua de un río se puede medir también por el método de dilución. Este se basa en añadir una solución patrón de cloruro sódico al caudal y medir, mediante un conductímetro y una frecuencia de cinco segundos, la dilución de la solución aguas abajo. Antes de realizar el cálculo del caudal es necesario construir una recta de calibración que relacione conductividad y

concentración de la solución patrón. El cálculo del caudal se puede efectuar a partir de una de las fórmulas siguientes:

$$Q = M_i / \sum_{i=1}^n (C) \cdot t$$

$$Q = V_i \cdot C_i / \sum_{i=1}^n (C) \cdot t$$

donde,  $Q$  es el caudal,  $M_i$  es la masa inyectada,  $\sum_{i=1}^n (C)$  es el sumatorio de las concentraciones medidas,  $t$  es el tiempo,  $V_i$  es el volumen inyectado y  $C_i$  es la concentración de la solución inyectada (Sala y Gallart, 1988).

#### • Muestreo de agua en canales fluviales

El agua de los ríos se encuentra generalmente disponible de forma continua y en grandes volúmenes. En este sentido, los problemas de recogida y conservación de muestras son mucho menores que los que presenta la recogida de agua de lluvia. El tipo y frecuencia de muestreo depende en gran medida de las necesidades del estudio concreto. En muchos ríos la muestra puede ser recogida directamente de forma manual. Previamente a la toma de la muestra, siempre por duplicado, el recipiente debe enjuagarse diversas veces en el agua que se va a muestrear. La muestra final debe ser tomada aguas arriba de cualquier perturbación producida por el operador. Se recomienda asimismo la toma de la muestra en la parte central del flujo de agua y evitando la entrada de aire en el caso de botellas. Las muestras se deben etiquetar convenientemente siguiendo por ejemplo el modelo que se indica a continuación:

- |                                  |
|----------------------------------|
| • Número de la muestra .....     |
| • Lugar de muestreo .....        |
| • Fecha y hora .....             |
| • Altura del agua .....          |
| • Análisis visual .....          |
| • Investigador responsable ..... |

Los muestreadores extraen mezclas de agua y sedimento en suspensión y en disolución en puntos determinados de una sección fluvial, bien de manera integrada en un tiempo finito, (muestreadores puntuales o de integración temporal), bien tomando muestras representativas de concentraciones en todos los calados, (muestreadores de integración en profundidad). Los muestreadores pueden ser fijos o móviles dentro del canal, y pueden ser operados manual o automáticamente.

Uno de los *muestreadores móviles manuales* más comunes y sencillos de utilizar para toma muestras integradas en profundidad es el US DH48 (Figura 9.1a). La variabilidad vertical de la concentración de sedimento en suspensión hace necesaria la utilización de muestreadores de integración para obtener muestras representativas de la concentración media de sedimento. El muestreador de integración en profundidad US DH48 permite la entrada de agua y sedimento a través de un orificio de 3 mm de diámetro. Mediante una barra metálica fijada al aparato se efectúa un desplazamiento del mismo de manera continua, suave y con el mismo ritmo desde el lecho del río hasta la superficie del agua, asegurando una recogida uniforme de agua y de sedimento en suspensión en todos los niveles de la columna. Las muestras de agua y sedimento se toman por duplicado y se recogen en botellas limpias de 0,5 litros, etiquetadas según el modelo descrito.

Los *muestreadores fijos* pueden ser de tipo mecánico o automático, y ambos son muy adecuados para la toma de muestras durante las crecidas. Los primeros se componen de una batería de botellas situadas a diferentes alturas que permiten la extracción de muestras a distintos niveles del flujo de agua. El tapón de cada botella tiene adherido un tubo corto para la entrada del agua y el sedimento y otro de largo para la salida del aire. Cuando el agua sube por encima del nivel del primero la botella se llena y el aire se escapa por el segundo. Las botellas se pueden colocar en una caja de madera o metálica que se instala en una sección del canal. Este tipo de muestreadores están diseñados sobre todo para el muestreo de sedimento en suspensión durante la subida de las crecidas, que es cuando las concentraciones sufren más variaciones con el caudal (Schick, 1967), aunque también se utilizan para el muestreo durante la recesión de avenidas (Van Wyck, 1983).

Los *muestreadores automáticos* pueden ser activados bien cuando el flujo de agua alcanza un determinado nivel bien por períodos de tiempo. Con un plan de muestreo apropiado se puede controlar tanto la subida como la recesión de una avenida. En la mayoría de los casos los intervalos de muestreo pueden ser programados, así como la cantidad de agua que se desea extraer. Los muestreadores fijos (tanto mecánicos como automáticos) son de hecho muestreadores puntuales y, para el cálculo de las concentraciones reales de sedimento, deben ser oportunamente calibrados. Este aspecto es importante por dos motivos: a) porque las concentraciones varían de un punto a otro en el canal; b) porque los muestreadores pueden no ser totalmente eficientes en la extracción del sedimento.

#### • Transporte de sedimento

La carga de sedimento se define como la cantidad total de material sólido y disuelto que circula a través de una sección del río. Esta carga es el re-

sultado de las entradas atmosféricas, de los procesos bioquímicos que se desarrollan en el interior de la cuenca y de la erosión de las vertientes y el lecho fluvial. En el caso de cuencas donde las actividades humanas están presentes, también influyen los procesos que se puedan derivar de esta acción, en especial los de tipo forestal, agrícola e industrial.

### 1) Sedimento en disolución

Para la evaluación del material disuelto una muestra recogida al azar en el flujo que circula por el canal es suficientemente representativa, ya que el material disuelto se reparte de manera uniforme en toda la columna de agua. Además de la toma de muestras para su posterior análisis en el laboratorio, existen un cierto número de mediciones que deben llevarse a cabo *in situ*, durante el proceso de muestreo, ya que el retraso en su realización puede alterar las características físicas y químicas de la muestra, especialmente en campañas de campo realizadas durante el verano y, por lo tanto, afectar las estimaciones posteriores.

### 2) Temperatura

La temperatura es el primer parámetro físico a controlar porque de él depende la calibración del resto de instrumentos que se utilizan, por ejemplo, para medir la conductividad y el pH. La lectura de la temperatura ha de llevarse a cabo directamente en el flujo bien con la muestra a resguardo del sol. El tiempo de medición es de un máximo de cinco minutos.

### 3) pH

Un elemento importante a tener en cuenta en los estudios sobre química del agua es el pH, que ofrece una lectura del potencial de los iones de hidrógeno en la disolución, es decir, del grado de acidez del agua. Es un parámetro que se ve rápidamente afectado por cambios en la producción y transporte de sustancias húmicas y cambios de equilibrio en los carbonatos. Matemáticamente, el pH es el logaritmo en base 10 del recíproco de la concentración de iones de hidrógeno libres en moles  $l^{-1}$ , es decir,

$$pH = \log 1/H^+$$

por lo tanto,

$$H^+ = 10^{-pH}$$

El pH oscila entre 0 y 14 (ácido-alkalino), y en aguas naturales está normalmente controlado por el dióxido de carbono, bicarbonatos y carbonatos en equilibrio, y se encuentra en un rango que se mueve entre 4,5 y 8,5.

### 4) Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es la propiedad recíproca de la resistencia eléctrica en una solución de agua y constituye una medida indirecta de la cantidad de carga disuelta que transporta un río. Varía proporcionalmente con la fuerza iónica del agua y, por lo tanto, con la carga total de material disuelto que el río transporta. Está relacionada con la naturaleza de las sustancias disueltas, su concentración y la temperatura a la cual se realiza el control. La conductividad eléctrica se mide con un instrumento denominado conductímetro y los resultados se expresa en  $\mu S \text{ cm}^{-1}$ , a una temperatura corregida de 25°. La conversión de la conductividad a la temperatura normalizada de 25 °C se realiza a partir de la siguiente fórmula y utilizando los correspondientes factores de conversión (*f*):

$$\text{Conductividad } 25 \text{ °C} = \text{Conductividad } ^\circ T \text{ de la muestra} \cdot f$$

Temperatura (°C)	Factor de corrección (f)
3	1,71
5	1,61
10	1,41
15	1,25
20	1,11
25	1,00
30	0,91
35	0,83
40	0,76

La calibración del conductímetro se lleva a cabo mediante una solución de KCl 0,01N para una conductividad de 1,41  $\mu S \text{ cm}^{-1}$  a 25 °C de temperatura. La conductividad eléctrica proporciona una indicación muy rápida de la cantidad de sales disueltas en una muestra de agua, así como acerca de su grado de mineralización, de acuerdo con la siguiente tabla:

Conductividad ( $mS\ cm^{-1}$ )	Grado de minealización
< 100	Muy débil
100-200	Débil
200-333	Moderada
333-666	Acentuada
666-1.000	Importante
> 1.000	Excesiva

### 5) Sedimento en suspensión

La parte más fina de la carga de sedimento de un río es transportada generalmente en suspensión, básicamente a causa de las turbulencias del flujo, y su concentración disminuye desde el lecho hasta la superficie a un ritmo que depende del tamaño de las partículas. Las concentraciones más altas se encuentran cerca del lecho, con el material más grueso también en aquella área, mientras que el sedimento más fino se distribuye en la columna de agua.

Existen diferentes técnicas de control, la mayor parte de ellas basadas en la toma de muestras de agua (véase apartado anterior). Estas muestras, obtenidas en puntos concretos del sistema fluvial intentan reproducir las condiciones medias de transporte en la cuenca para caudales determinados. Es por este motivo, y por las bajas concentraciones que se pueden llegar a encontrar, que los puntos de muestreo deben ser seleccionados con precisión, y el proceso de muestreo realizado con las máximas garantías de orden y limpieza instrumental, para evitar la presencia de elementos contaminantes que puedan alterar el contenido de la muestra. Además, las concentraciones varían temporalmente, por ejemplo, con las fluctuaciones producidas por turbulencias, y según la posición y la profundidad en el canal. Hay que tener en cuenta, por lo tanto, que muestras individuales instantáneas sin repetición ofrecen normalmente resultados poco fiables. A menudo se olvida, por ejemplo, que el uso de muestreadores fijos no calibrados previamente, es decir, sin establecer las correspondientes variaciones transversales en las concentraciones de sedimento, pueden ofrecer resultados muy desviados de la carga real de sedimento del río.

El control continuo de la carga de sedimento en suspensión se realiza por medio de diversos tipos de instrumentos, especialmente *turbidímetros*. Estos aparatos se basan en el principio de que con el incremento de sedimento en suspensión la mezcla de agua y sedimento es cada vez menos transparente. Si la mezcla se hace pasar entre un foco de luz y una célula fo-

toeléctrica, las fluctuaciones registradas se pueden calibrar a partir de concentraciones conocidas de sedimento. Los problemas prácticos se presentan en el campo, por ejemplo debido a materiales flotantes, a variaciones en el tamaño del sedimento y a la luz del día. Algunos de los trabajos publicados utilizando esta técnica ofrecen resultados muy interesantes (Walling, 1977a). Asimismo se han utilizado relaciones entre atenuación de rayos-X y concentración de sedimento para la estimación de la carga en suspensión (Graf, 1971).

### 6) Carga de fondo

El transporte de material como carga de fondo se refiere a aquella proporción del sedimento que incluye todas las clases de material que se encuentran en el lecho del río, y que son transportadas básicamente por saltación, por rodamiento o arrastradas por el flujo de agua. Raramente incluye material más fino de 0,1-0,2 mm, ya que éste es transportado generalmente en suspensión.

Para controlar el transporte de fondo en un canal fluvial se pueden utilizar diversos métodos. Los instrumentos disponibles incluyen trampas permanentes en el lecho del río, muestreadores-colectores suspendidos por cable o anclados en el lecho del río, y muestreadores de diferencia de presión diseñados para igualar la velocidad de entrada en la trampa a la velocidad del agua en el canal. Entre estos últimos el más utilizado para el control de la carga de fondo es el muestreador Helley-Smith (Figura 9.1.b). Se trata de un instrumento ligero, especialmente diseñado para el muestreo de arenas y material fino, con las siguientes características básicas:

Características básicas del muestreador de arena	
Boca para entrada de sedimento	76 mm
Superficie de muestreo	57,8 cm <sup>2</sup>
Capacidad de la bolsa de recogida	15 kg
Luz de la red	0,45 mm
Fiabilidad para $\phi$ 0,5 - 16 mm	100%
Fiabilidad para $\phi$ >16 mm	≈ 70%

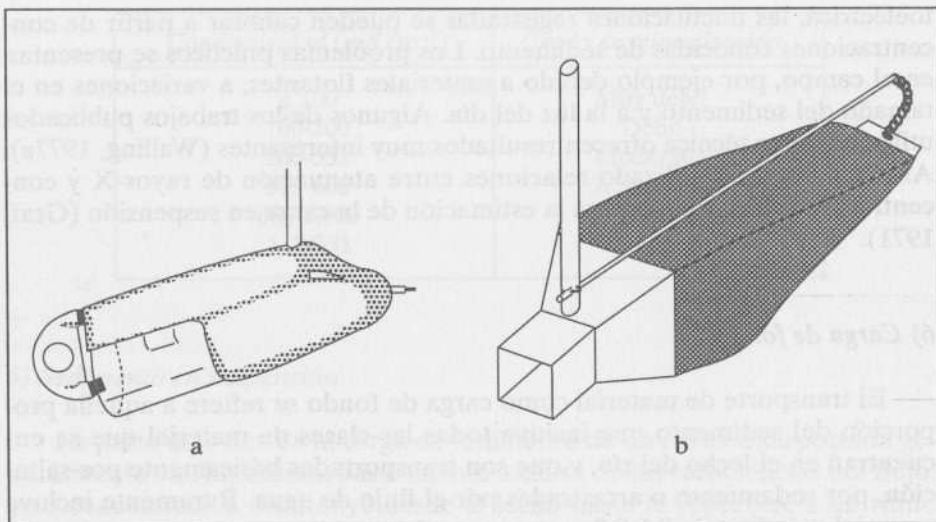


Figura 9.1. Muestradores: a) US DH48 de integración en profundidad; b) Helley-Smith portátil para carga de fondo.

El muestreo de la carga de fondo con Helley-Smith (Figura 9.1.b) en una sección de río se realiza de manera integrada en anchura para obtener una tasa de transporte media en todo el transecto. Las muestras se toman en intervalos no superiores al 20 % de la anchura total de la sección objeto de estudio. El tiempo de muestreo en cada punto debe ser, si es posible, como mínimo de 5 minutos, aunque puede variar según las tasas de transporte observadas. Las muestras se deben tomar por duplicado y, una vez recogidas, depositarlas en bolsas de plástico y etiquetarlas. Se recomienda una atención especial a la observación del movimiento de dunas u otras formas migratorias en el canal del río durante la realización del muestreo. Asimismo, se tendrá un cuidado especial en alterar el mínimo posible el lecho del río al colocar el muestreador, sobre todo en lechos con materiales finos fácilmente alterables, como arenas y gravas. Un buena descripción de este tipo de muestreadores se puede encontrar en Emmett (1979) y en Shen y Julien (1993).

Las tasas de transporte de fondo a partir de muestras puntuales se expresan en peso sumergido por unidad de tiempo por unidad de canal, y se pueden relacionar con parámetros hidráulicos (calado, velocidad). Asimismo, en relación a registros de caudal se pueden utilizar para calcular producciones de sedimento de cuencas de drenaje a largo plazo.

Otras técnicas utilizadas para la evaluación de la variabilidad espacial y temporal del lecho del río y del transporte de fondo en canales fluviales son,

respectivamente, las cadenas de erosión y los trazadores naturales y artificiales. Las cadenas de erosión se han utilizado en una gran variedad de situaciones fluviales para determinar la erosión y la deposición total de sedimento ocurrido durante una crecida (Leopold *et al.*, 1966; Laronne y Duncan, 1989). La ventaja de las cadenas es que es una técnica barata y que sólo requiere control antes y después de las crecidas. Sus principales inconvenientes radican en la posibilidad de alterar el lecho del río durante su instalación, y en que su búsqueda después de las crecidas puede ser complicada, especialmente si el caudal es importante.

El uso de trazadores ha sido ampliamente utilizado en Geomorfología, especialmente para la identificación de fuentes de sedimento en cuencas de drenaje y para el estudio del movimiento de sedimento, generalmente carga de fondo, en ríos. Algunos de los trazadores más conocidos son los radioactivos, las piedras pintadas y fluorescentes, y los magnéticos. Experimentos con este tipo de trazadores se pueden seguir en Thorne y Lewin (1979). El uso de trazadores naturales ha sido utilizado en Geomorfología fluvial para el estudio del transporte de fondo, especialmente en ríos de gravas. Un ejemplo interesante de aplicación de esta técnica se puede consultar en Engeninger y Custer (1983).

### 9.3. Métodos y técnicas de laboratorio

Para que los resultados de los análisis físicos y químicos de las muestras de agua y sedimento obtenidas en el campo sean fiables, hay que preparar y conservar las muestras de una manera adecuada, de manera que no sufran alteraciones o no se pierda ninguna de sus propiedades.

En este apartado se describen los métodos y técnicas de laboratorio que se utilizan para la preparación y conservación de muestras de agua y sedimento, juntamente con algunas de las determinaciones físicas y químicas que se pueden llevar a cabo en laboratorios de Geografía Física. Se presenta también el método gravimétrico para la determinación de la humedad del suelo. Finalmente, es importante poner énfasis en la limpieza y la conservación del material de campo y de laboratorio, como base para un uso correcto. Para una visión detallada de técnicas de laboratorio en Geografía Física se recomienda consultar Úbeda y Sala (1995).

#### 9.3.1. Preparación y conservación de muestras

Una vez se han trasladado las muestras de agua al laboratorio, se debe proceder a su preparación y conservación antes de ser analizadas química-

mente. La separación del agua del sedimento en suspensión es el primer paso en este proceso. Para ello, se debe filtrar la muestra. Este paso se realiza por medio de un equipo de filtración. Este instrumento está compuesto generalmente por una bomba de vacío manual o eléctrica, un tubo de conexión, un equipo de filtración, un filtro de celulosa de 0,45 mm, y unas pinzas. Como paso previo se debe tarar el filtro en una balanza de precisión. Un valor de referencia para filtros de celulosa comunes es 80 mg.

Una vez filtrada, la muestra de agua se divide en submuestras, que se conservan en frascos convenientemente etiquetados en la nevera a 4 °C hasta el momento de llevar a cabo las determinaciones químicas necesarias. En concreto, la submuestra para el análisis de cationes (100 ml) se guarda con una solución de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>). Las otras submuestras (100 ml para el análisis de aniones y 25 ml para el análisis de silicio) se guardan sin conservantes.

En condiciones óptimas de disponibilidad de los equipos de análisis, la determinación de la concentración de sílice se debe realizar en un plazo de 24 a 48 horas. El resto de determinaciones químicas se deben realizar en un plazo máximo de una semana. Para más información sobre métodos de conservación y análisis de muestras de agua se recomienda consultar Suess (1982).

Una vez las muestras han sido trasladadas al laboratorio, las botellas utilizadas en el campo deben limpiarse meticulosamente antes de ser usadas de nuevo, de cara a evitar todo posible riesgo de contaminación. Para ello, un procedimiento de limpieza fiable consiste en dejarlas durante 24 horas con una solución de ácido nítrico 0,01 N al 10% y posteriormente enjuagarlas varias veces con agua bidestilada hasta que la conductividad resultante sea menor a 5 μS cm<sup>-1</sup>.

Asimismo, se deberá tener un cuidado especial en limpiar todos los instrumentos de medición antes de realizar nuevas mediciones en el campo o pruebas en el laboratorio, muy especialmente si las muestras de agua corresponden a puntos de control en ríos diferentes. La limpieza se efectuará lavando los instrumentos con agua destilada tantas veces como sea necesario, hasta que la solución resultante tenga una conductividad menor a 5 μS cm<sup>-1</sup>.

### 9.3.2. Determinaciones químicas

Las determinaciones químicas básicas que se llevan a cabo en muestras de agua de río no contaminadas se refieren generalmente a los iones principales, entre ellos: *a*) cationes mayoritarios (Ca<sup>++</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>++</sup> y K<sup>+</sup>); *b*) aniones mayoritarios (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>); *c*) sílice (SiO<sub>2</sub>). En el caso de trabajos más detallados se pueden determinar también metales pesados conta-

minantes (p. ej., mercurio) y no contaminantes (p. ej., aluminio). Las técnicas que normalmente se utilizan para el análisis de los diferentes elementos químicos son: *a*) Absorción Atómica (AA) para cationes y metales pesados; *b*) Cromatografía Iónica (CI) para los aniones; *c*) Plasma de Inducción (PI) para la sílice. Este tipo de análisis requieren una tecnología sofisticada raramente disponible en departamentos de Geografía Física, por lo que se deben llevar a cabo en laboratorios especializados. Se presentan a continuación algunos procedimientos habitualmente disponibles en departamentos de Geografía Física para la determinación de diversos elementos químicos, concretamente el total de sólidos disueltos, la alcalinidad, la dureza, el calcio y los cloruros.

Finalmente es importante señalar que, si se desea realizar un análisis preciso y detallado de la muestra de agua, la fiabilidad de los resultados de los análisis químicos se debe comprobar necesariamente mediante la realización de un balance iónico. El balance iónico de una muestra de agua debe reflejar que la suma de las concentraciones equivalentes de cationes (en mmol dm<sup>-3</sup> o en meq l<sup>-1</sup>) es igual a la suma de equivalentes de aniones, siendo la concentración equivalente, la concentración en peso por unidad de volumen (mg l<sup>-1</sup>) dividida por el peso atómico de cada uno de los elementos químicos analizados. Para que un balance sea exacto la división entre la suma de cationes en equivalentes y la suma de aniones debe ser igual a 1. Un error de ± 5% es normal en aguas con concentraciones de material disuelto inferiores a 50 mg l<sup>-1</sup>. Muestras con desviaciones superiores a ± 10% deben ser rechazadas. Discrepancias superiores pueden indicar que no se han determinado algunos elementos importantes o que se han producido errores durante el proceso analítico.

#### • Total de Sólidos Disueltos

La concentración total de sólidos disueltos (TSD) se puede determinar de manera sencilla evaporando un volumen conocido de agua de la muestra por medio de una estufa a 103 °C. El volumen utilizado para la determinación es normalmente de 100 a 500 ml. El recipiente con la muestra se debe tarar antes y después del proceso de evaporación. El residuo seco resultante se expresa en mg l<sup>-1</sup>. Existen diferentes fuentes de error en este proceso, ya sea al calcular la diferencia entre dos pesadas poco precisas y, especialmente, debido a la pérdida de material disuelto por volatilización, sobre todo bicarbonatos y aniones, en aguas ácidas. Este tipo de determinaciones pueden suponer errores de ± 25%.

Cuando es necesaria la estimación frecuente del total de sólidos disueltos en aguas fluviales, ésta se puede estimar indirectamente a partir de

la conductividad específica (CE) por medio de una relación empírica del tipo:

$$\text{TSD} = \text{CE} \cdot \text{Constante}$$

derivada como mínimo a partir 10 determinaciones de TSD precisas. Para asegurar unas estimaciones correctas, esta relación debe ser estadísticamente significativa. Los valores de la constante suelen variar entre 0,5 y 0,9 dependiendo de los iones dominantes en la solución.

Como marco general para la interpretación de los resultados obtenidos en los análisis químicos, se puede señalar que los ríos caracterizados por concentraciones bajas de material disuelto (20-30 mg l<sup>-1</sup>) están dominados generalmente por concentraciones de Na<sup>+</sup> y Cl<sup>-</sup> y reflejan básicamente la contribución del agua de lluvia; aquellos ríos con concentraciones intermedias (30-1.000 mg l<sup>-1</sup>) tienden a estar dominados por concentraciones de Ca<sup>++</sup> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, y están relacionados con las entradas provenientes de la meteorización de la roca y el suelo; finalmente, los ríos con concentraciones de material disuelto superiores a los 1.000 mg l<sup>-1</sup> vuelven a estar dominados otra vez por concentraciones de Na<sup>+</sup> y Cl<sup>-</sup>, a causa entre otras de tasas de evaporación elevadas que dan como resultado la precipitación de CaCO<sub>3</sub> en el canal del río.

#### • Alcalinidad

La alcalinidad de una muestra de agua es la capacidad de algunos de sus componentes (carbonatos, bicarbonatos, fosfatos y silicatos) de aceptar protones y de ligar, de esta manera, una cantidad equivalente de ácidos fuertes. La cantidad de ácidos fuertes necesarios para neutralizar estos iones da como resultado la alcalinidad total del agua. La alcalinidad de las aguas naturales con un pH no superior a 8,3 viene dada por su contenido en sales de ácido carbónico, bicarbonatos e hidróxidos, y es prácticamente idéntica a la dureza de carbonatos. El principal compuesto es el bicarbonato cálcico, y en menor proporción los de sodio, potasio, hierro y magnesio.

La determinación de la alcalinidad se realiza por valoración titrimétrica. Solamente si la muestra se guarda convenientemente refrigerada a 4 °C la alcalinidad puede ser determinada en el laboratorio. La técnica de valoración por titración consiste en determinar el volumen de una solución de ácido de concentración conocida, generalmente ácido sulfúrico H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,02N que se necesita para reaccionar con una solución que contiene la sustancia a controlar, en este caso, carbonatos en agua. La solución patrón se coloca en una bureta y se va añadiendo progresivamente a un volumen conocido de muestra (100 ml), hasta que ésta cambia de color debido a la presencia de

un indicador, normalmente rojo de metilo 0,01%. La masa por volumen de la sustancia a determinar (en equivalentes l<sup>-1</sup>) se debe calcular a partir de la siguiente equivalencia:

$$V_{\text{ácido}} \cdot N_{\text{ácido}} = V_{\text{muestra}} \cdot N_{\text{muestra}}$$

Una vez conocida la concentración de carbonatos en meq l<sup>-1</sup>, hay que multiplicar el valor por su peso atómico para obtener la concentración en ppm (partes por millón) o mg l<sup>-1</sup>.

#### • Dureza

La dureza expresa generalmente el contenido del agua en compuestos de calcio y de magnesio. Se determina por complexometría con EDTA (ácido etilendiamino-tetra-acético, como sal disódica) que, con un pH igual a 10, se une al calcio y al magnesio. El indicador que se utiliza es una solución de negro de ericromo al 1% y su viraje es de rojo a azul.

Para determinar la dureza se añaden de 2 a 3 gotas del reactivo indicador, más 2 ml de solución pH = 10 a 100 ml de agua de la muestra. Se agita, y con una bureta se añade solución de complexona 0,1 M (EDTA) agitando hasta que el cambio de color se haya producido totalmente, siendo *V* el volumen de EDTA empleado, y *P<sub>m</sub>* el peso molecular del carbonato cálcico (100,08). El cálculo de la concentración se realiza mediante la fórmula siguiente:

$$\text{CO}_3\text{Ca l}^{-1} = \left\{ \left[ V \cdot 0,1 \text{ M} \cdot \left( \frac{P_m}{1000} \right) \right] / 100 \right\} \cdot 10^5$$

Convencionalmente, la dureza del agua se expresa en grados franceses (°TH) o en grados alemanes (°dH), según se interprete su equivalencia en contenido de Carbonato Cálcico (1 °TH = 0,01 g CO<sub>3</sub>Ca l<sup>-1</sup>) o de Óxido Cálcico (1 °dH = 0,01 g CaO l<sup>-1</sup>), respectivamente. En términos generales, la dureza del agua se suele expresar a partir de la escala siguiente:

Categoría	°TH	°dH
Muy débil	0-7	0-7
Débil	7-14	4-8
Semidura	14-21	8-12
Bastante dura	21-32	12-21
Dura	32-54	21-30
Muy dura	> 54	> 30



## • Iones mayoritarios

### 1) Calcio

De entre los elementos del segundo grupo del sistema periódico, el calcio es el mayoritario en el agua. Este elemento juega un papel fisicoquímico muy destacado, tanto en aguas destinadas a la alimentación y usos domésticos, como en las aguas que se utilizan con una finalidad agrícola e industrial. Se determina por complexometría (EDTA), utilizando como indicador murexina, y siendo el pH del medio igual a 12. Cuando se añade la complejona a la muestra de agua con un pH adecuado y con el indicador formando el complejo con el elemento, se produce un desplazamiento, formándose el ion con la complejona, y cambiando el color de la disolución en el punto de equivalencia. El viraje del reactivo es de rosa a violeta.

Para determinar la concentración de calcio se añade un poco de murexina con una espátula y 10 ml de una solución al 10% de NaOH a una muestra de 100 ml de agua. A continuación, se añade desde una bureta EDTA 0,1 M hasta el cambio del indicador, siendo  $V$  la cantidad de EDTA utilizada y  $P_m$  el peso atómico del calcio (40,08). La ecuación de cálculo es:

$$\text{mg Ca}^{++} \text{ l}^{-1} = \{[V \cdot 0,1 \text{ M} \cdot (P_m \text{ Ca}^{++}/1000)]/100\} \cdot 10^6$$

### 2) Cloruros

El ion cloruro es uno de los elementos químicos que está siempre presente como macrocomponente de las aguas. Dependiendo del tipo de terreno drenado, podemos encontrarlo entre límites muy amplios debido a su extraordinaria solubilidad (desde 2 mg l<sup>-1</sup> hasta 19 gr l<sup>-1</sup> en el agua del mar).

Los cloruros reaccionan con el nitrato de plata para dar un precipitado blanco de cloruro de plata. Una vez consumidos los cloruros presentes en el agua, la gota de exceso de nitrato de plata reacciona con el indicador (cromato potásico), para pasar a dar un precipitado rojizo de cromato de plata. El procedimiento para la determinación de la concentración se resume a continuación: a 100 ml de la muestra de agua, se añaden cinco gotas de CrO<sub>4</sub>K<sub>2</sub> al 10%, y desde una bureta se añade NO<sub>3</sub>Ag 0,1 N hasta que la mezcla se vuelva roja, siendo  $V$  el volumen de NO<sub>3</sub>Ag empleado y  $P_m$  el peso atómico del cloruro (35,45). La ecuación de cálculo es:

$$\text{mg Cl}^{-} \text{ l}^{-1} = \{[V \cdot 0,1 \text{ N} \cdot (P_m \text{ Cl}^{-}/1000)]/100\} \cdot 10^6$$

### 9.3.3. Análisis físico de materiales

La descripción de las propiedades básicas de los materiales es a menudo uno de los puntos principales para la explicación de un proceso geomorfológico. El conocimiento de estas propiedades sugiere en ocasiones nuevas líneas de medición y experimentación en el campo o en el laboratorio, así como ser utilizado, por ejemplo, en simulaciones de ordenador o en pruebas de mecánica de suelos. Frecuentemente este tipo de análisis se refiere a una estructura sedimentaria, ya sea en una vertiente, en una terraza o en el lecho de un río. Algunas de las propiedades físicas más comúnmente analizadas en cuerpos sedimentarios son la densidad, la porosidad y la capacidad de infiltración, el contenido en humedad y el tamaño de las partículas. A algunas de ellas nos referiremos a continuación.

#### • Humedad del suelo

El contenido de humedad de un suelo es la razón entre el peso del agua y el peso del suelo en un volumen determinado. Es una cantidad adimensional pero se expresa generalmente en %. Existen varios métodos para determinar el contenido en humedad. En el laboratorio se realiza por el método llamado gravimétrico. Se calcula a partir de la determinación del peso de una muestra en condiciones ambientales y la posterior comparación con el peso de la misma muestra una vez secada en un horno a 105-110 °C de temperatura. Para ello se coloca la muestra en un recipiente limpio apropiado (vidrio resistente al calor o recipiente metálico de cadmio-plata), se seca y se pesa ( $P_c$ ). Se toma una muestra representativa (5-10 g) y se pesa en el recipiente ( $P_w$ ). Se introduce seguidamente en el horno para que se seque totalmente. Generalmente el tiempo mínimo se sitúa alrededor de las 16 horas. Una vez seca la muestra, se retira el recipiente con la muestra del horno, se enfría en un desecador y se pesa otra vez ( $P_d$ ). El contenido de humedad del suelo ( $H$ ) se determina en porcentaje como:

$$H = [(P_w - P_d)/(P_d - P_c)] \cdot 100$$

Los métodos llamados de destilación se pueden usar para la determinación de la humedad de la muestra si el suelo ha sido previamente estabilizado. No obstante, este tipo de técnica es requerida en poca ocasiones en Geografía Física. Diversos métodos para la determinación de la humedad del suelo se pueden encontrar en Curtis y Trudgill (1974). La humedad, siendo una propiedad fácil de determinar, tiene un gran valor para estudios de Geografía Física. El comportamiento del suelo y su resistencia varían con el

contenido en humedad; asimismo, los análisis de contenido de humedad son la base para los límites de Atterberg, que representan cambios en el estado del suelo.

#### • Porosidad

La porosidad es la fracción de masa del suelo o la roca ocupada por poros. Se expresa de forma adimensional ( $n$ ) y se determina a partir de la proporción de espacios vacíos ( $e$ ), como:

$$\begin{aligned}n &= V_v/V \\ e &= V_v/V_s \\ n &= e/(1 + e)\end{aligned}$$

donde  $V_v$  es el volumen ocupado por espacios vacíos,  $V_s$  es el volumen del material,  $V$  es el volumen total. Teniendo en cuenta que el volumen total de una muestra es igual al volumen del material más el volumen de los poros, la porosidad se determina midiendo cualquiera de estas dos propiedades. Existen diversos métodos para determinar la porosidad, el más común es el picnómetro.

A partir de la determinación de la gravedad específica ( $G$ ), el peso seco ( $P_d$ ), la densidad global ( $\gamma_w$ ) y el volumen de la muestra ( $V$ ), la porosidad se puede calcular como:

$$e = (G\gamma_w V/P_d) - 1$$

de donde,

$$n = 1 - (P_v/G\gamma_w V)$$

El significado de la porosidad viene dado por su relación con la proporción de espacios vacíos y con la resistencia de los materiales, y es uno de los factores que determinan la permeabilidad de un material. No obstante, la relación exacta entre porosidad y permeabilidad no ha sido todavía determinada. Asimismo, la porosidad de las rocas, ya sea total o determinada por análisis de lámina fina, es importante en diversos aspectos en estudios sedimentológicos. En este sentido, existen técnicas cuantitativas basadas en el análisis de imágenes para la caracterización de espacios porosos (Lin y Hamasaki, 1983).

#### • Distribución granulométrica

Una parte destacada del análisis físico de muestras de sedimentos y suelos consiste en la evaluación de su distribución granulométrica y su composición mineralógica. La composición mineralógica se realiza mediante un instrumento llamado difractómetro basado en la técnica de difracción por rayos-X. Este tipo de aparato no se encuentra normalmente disponible en departamentos de Geografía Física, por lo que generalmente habrá que recurrir a laboratorios especializados.

Por lo que se refiere a la evaluación de la distribución en porcentajes de cada uno de los calibres del material muestreado, se sigue generalmente el método directo de tamización por medio de la torre granulométrica. Este método sólo puede ser utilizado para un rango de tamaños relativamente restringido, normalmente entre 0,063 y 16 mm. Existen diversas clasificaciones de tamices, entre ellas la *German Standard* DIN 1171, la *British Standard* BSS 410, las *Series Francesas* AFNOR, y la *ASTM Standard* E-11.

Antes de proceder a tamizar la muestra hay que prepararla debidamente. En el caso de una muestra relativamente pequeña se recomienda tamizarla en su totalidad. En el caso de muestras más voluminosas es preferible analizar submuestras representativas obtenidas por el método de cuartear. En el caso de muestras con mucho material fino, antes de dispersar y tamizar la muestra, se debe eliminar el cemento arcilloso y las sales insolubles. Los carbonatos se pueden eliminar por medio de ácido hidrociorídrico diluido y la materia orgánica mediante peróxido de hidrógeno como agente oxidante.

El proceso de dispersión para el análisis de finos incluye el cambio de los cationes intercambiables presentes en las arcillas por iones de sodio. Para ello se añade una solución al 5-10% de dispersante a la muestra en agua desionizada y se deja en agitación toda la noche. Los agentes dispersantes más comunes son el ortofosfato trisódico y el hidróxido de sodio. A continuación, la muestra dispersada se pasa por el tamiz de 0,063 mm; simultáneamente el tamiz se lava con agua desionizada hasta que todo el material fino ha pasado; finalmente la muestra se seca al horno a 110 °C. Si está disponible, la dispersión también se puede realizar más rápidamente por medios ultrasónicos. Para obtener resultados precisos en el proceso de tamizado, los granos deben estar totalmente secos, pues sólo con una humedad en la muestras del 1%, las fuerzas aditivas pueden superar al peso de los granos con diámetro inferior a 1 mm.

La torre granulométrica está compuesta por diversos tamices de luces diferentes (generalmente desde 0,063 mm hasta 8 o 16 mm) situados sobre una plataforma vibratoria con temporizador. Durante el tamizado se pueden producir errores de diversas maneras. Esto depende básicamente de:

- a) La carga de sedimento en la torre granulométrica.
- b) Las propiedades superficiales de las partículas.
- c) El rango de tamaños en la muestra.
- d) El método de agitación utilizado.

En general se recomienda una carga máxima de 0,1 a 0,15 Kg para muestras de arena y entre 0,04 y 0,06 Kg para muestras de arena fina o inferiores. El tiempo mínimo de tamizado recomendado es de 10 minutos. Finalmente, si fuera necesario por su volumen dentro de la muestra, el material más grande de 16 mm se puede medir individualmente mediante un pie de rey. El tamaño del canto se caracteriza generalmente por su eje *b*. El cálculo de la distribución granulométrica de una muestra se presenta en una sección posterior (epígrafe 9.4.6).

Si la muestra es de material inferior a 0,063, entonces debe usarse el tamizado húmedo, ya que por debajo de este tamaño el tamizado en seco es muy poco preciso. Equipos de tamización húmeda de sobremesa están disponibles comercialmente y proporcionan también buenos resultados para calibres de material superiores. Para más información se recomienda consultar Goudie (1990).

## 9.4. Proceso de datos

### 9.4.1. Precipitación

La banda pluviométrica es uno de los elementos principales que contiene un pluviómetro registrador o pluviógrafo. Constituye el soporte de papel en el cual se registra la intensidad de la precipitación, la cantidad de agua en mm por unidad de tiempo. Las bandas puede ser de recorrido diario, semanal y/o mensual, dependiendo en cada caso del mecanismo de relojería que opere en cada aparato y en función de las necesidades concretas de la investigación. En el eje de las ordenadas de la banda se representa la cantidad de agua recogida en décimas de mm, mientras que el eje de las abscisas superiores marca el paso de tiempo establecido. En los pluviógrafos convencionales el sifón de recogida admite un máximo de 10 mm de lluvia, cantidad después de la cual la plumilla vuelve a empezar el registro de precipitación desde el nivel 0 de la banda.

Una vez extraídos los datos de precipitación de las estaciones pluviométricas es necesario calcular la precipitación total en la cuenca de drenaje. Existen para ello diversos métodos: media aritmética, polígonos de Thiessen, isoyetas, hipsometría y el método multicuadrático. En este capítulo se describen los dos primeros.

El método de la media aritmética es el más simple para calcular la precipitación media sobre una cuenca. Los datos simultáneos registrados en cada una de las estaciones pluviométricas de la cuenca (o en su caso, de los alrededores) se suman y el resultado se divide por el número total de estaciones. Este método proporciona resultados fiables siempre que:

- a) La lluvia en la cuenca sea registrada por muchas estaciones regularmente distribuidas.
- b) El área no tenga marcadas variaciones topográficas, de manera que la variabilidad de la precipitación sea mínima.

Como en muchos casos estas condiciones no se pueden cumplir, es necesario recurrir a técnicas más elaboradas para estimar la precipitación media. Entre estos métodos se encuentran los polígonos de Thiessen.

El método de los polígonos de Thiessen fue diseñado por el ingeniero americano del mismo nombre en 1911. Se trata de un método objetivo, en el cual las medidas de precipitación en cada una de las estaciones pluviométricas se ponderan por la fracción de la superficie de la cuenca que representan y, una vez obtenida esta información, se suman los resultados. Sobre un mapa de la cuenca en el cual están representadas las estaciones, la superficie de la cuenca se divide en polígonos mediante líneas (bisectrices) que son equidistantes entre pares de estaciones adyacentes. Una configuración típica de polígonos de Thiessen se muestra en la Figura 9.2. Las superficies de los polígonos  $a_i$  correspondientes a las estaciones de medida, se estiman por planimetría o por peso. La precipitación total se calcula en base a la fórmula siguiente:

$$\sum_{i=1}^n P_i a_i / A$$

donde  $P_i$  es la precipitación en  $n$  estaciones y  $A$  es la superficie total de la cuenca estudiada. Las fracciones de superficie representadas por  $a_i/A$  se denominan coeficientes de Thiessen. Una vez determinados para un red estable de estaciones, la precipitación para cada área puede ser rápidamente calculada a partir de cualquier serie de datos. Este método es seguro y objetivo, pero el resultado final depende de una buena red de estaciones pluviométricas representativas. Su uso no es particularmente aconsejable para estimaciones de precipitación en áreas muy montañosas, ya que los efectos de la altitud no están contemplados por los coeficientes, ni tampoco para estimar totales de precipitación para sucesos de precipitación locales y/o extremos. Para un resumen completo de los diferentes métodos de estimación de la precipitación se recomienda consultar Shaw (1983).

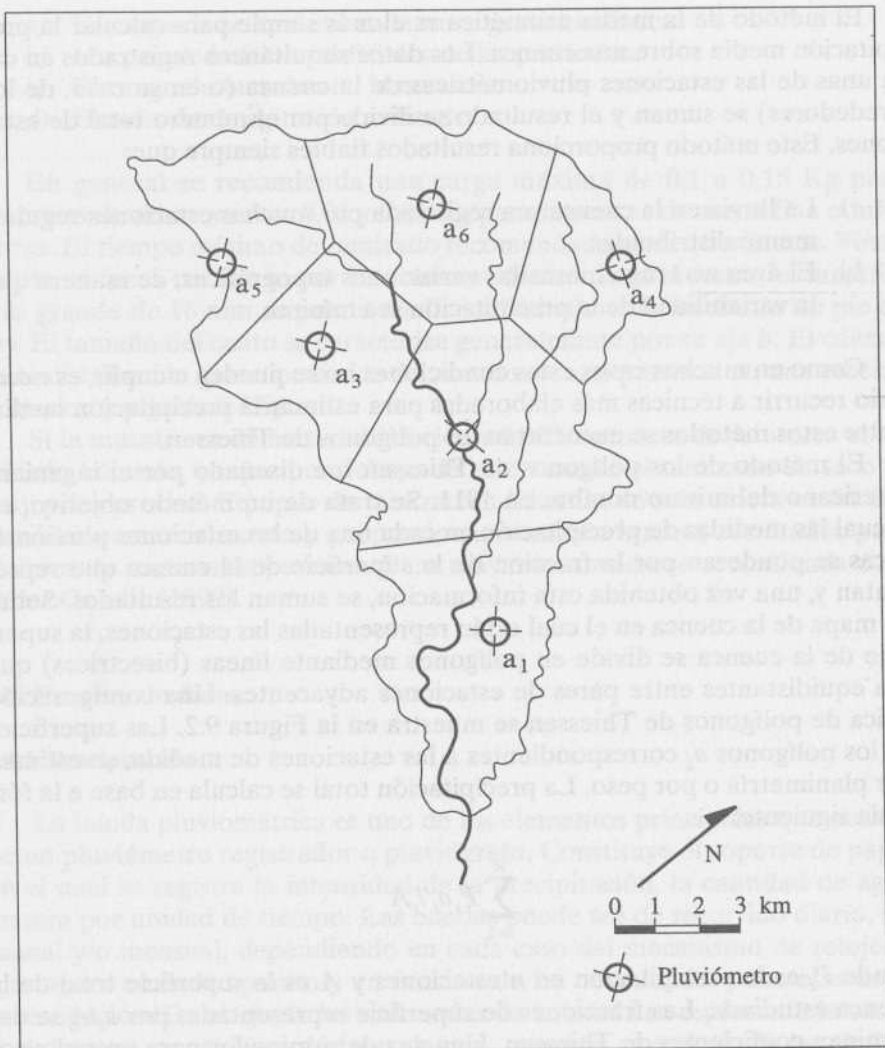


Figura 9.2. Polígonos Thiessen sobre la red pluviométrica de una cuenca.

### 9.4.2. Evapotranspiración potencial

Un concepto muy utilizado en trabajos de balances hidrológicos en cuencas de drenaje es el de evapotranspiración potencial, que indica la cantidad de evaporación y transpiración que tendría lugar en un área determinada si el suministro de humedad fuera ilimitado. La evapotranspiración potencial es la

evaporación máxima posible bajo unas condiciones meteorológicas determinadas e indica, de manera sencilla, la posibilidad de pérdidas de agua. De entre todas las aproximaciones empíricas para el cálculo de la evapotranspiración, una de las más utilizadas es el método de Thornthwaite. Este método está basado exclusivamente en datos de temperatura del aire, y se expresa mediante la fórmula:

$$E_p = 1,6(10T/I)^a$$

donde,  $E_p$  es la evapotranspiración potencial (mm/mes),  $T$  es la temperatura mensual ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $I$  es el índice de calor anual, y  $a$  es un coeficiente calculado a partir de:

$$a = 0,492 + 0,0179 I - 0,0000771 I^2 + 0,000000675 I^3$$

El índice de calor anual ( $I$ ) se calcula a partir de las temperaturas medias ( $T_m$ ) de los meses del año:

$$I = \sum_{i=1}^{12} (T_m / 5)^{1,5}$$

El valor de  $E_p$  calculada mediante este método se debe corregir multiplicándolo por un coeficiente que depende de las horas de insolación en función de la latitud y del mes del año de que se trate.

### 9.4.3. Frecuencia de caudales

La frecuencia con que ocurre un caudal determinado, o la cantidad de tiempo que un caudal de agua en un río es igualado o superado, tiene una gran importancia para estudios de balances de agua y sedimento en cuencas de drenaje. Para poder realizar este tipo de análisis es necesario contar con registros de caudales largos y fiables. Desde el punto de vista de la caracterización hidrológica de una cuenca, los datos de caudales diarios y los caudales de crecida son los más importantes. Comenzaremos con el análisis de los primeros.

Tomemos  $n$  años de registro de caudales en una sección de río determinada, a razón de 365 caudales medios diarios por año. Estos datos se distribuyen por clases de caudales previamente seleccionados, empezando por los valores más altos. Las frecuencias acumuladas convertidas en porcentajes del número total de días constituyen la curva de frecuencia de caudales. Esta curva in-

dica el porcentaje de tiempo durante el cual un caudal determinado es igualado o superado. La Figura 9.3 presenta un ejemplo de curva de frecuencia de caudales, construida a partir de los caudales medios diarios de veinticinco años de registro en la riera de Arbúcies (Cordilleras Costero Catalanas) en escala logarítmica. El área debajo de la curva es la medida del volumen total de agua que ha pasado por la estación de aforos durante el tiempo considerado. La forma de la curva de frecuencia de caudales es un buen indicador de las características hidrológicas de la cuenca y del tipo de respuesta de la misma a la precipitación. Una curva con una pendiente muy pronunciada indica un régimen de caudales muy variable, y se da normalmente en pequeñas cuencas con poca capacidad de retención de agua, donde el flujo del río sigue directamente el modelo de precipitación. Por el contrario, las curvas con pendientes más suaves indican poca variación en el régimen hidrológico como resultado, por ejemplo, de la regulación ejercida por el substrato de la cuenca. Las curvas de frecuencia de caudales construidas a partir de datos mensuales y anuales son también útiles, aunque mucho menos que las basadas en caudales diarios, sobre todo porque en las primeras los caudales extremos quedan muy relativizados por los valores medios. La comparación de curvas de frecuencia de caudales entre cuencas diferentes puede ser también de gran utilidad para estimar estadísticamente las características hidrológicas de cuencas de drenaje que no cuentan con registros hidrológicos largos.

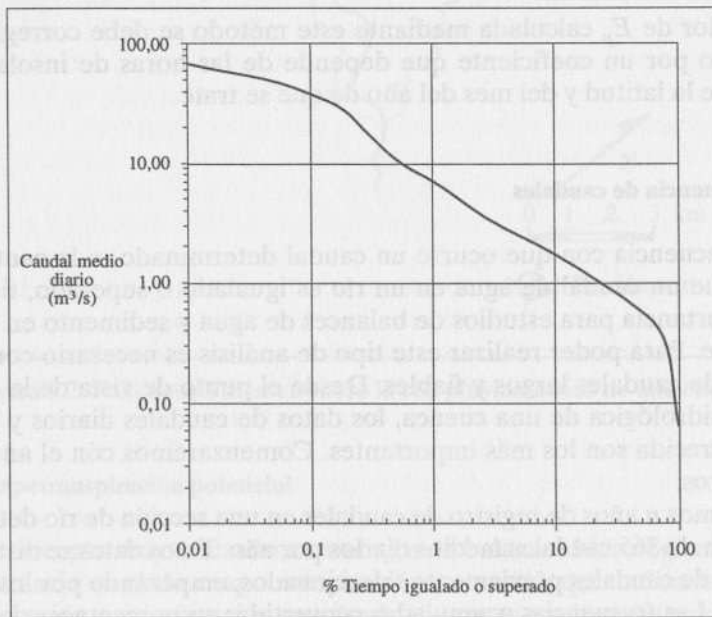


Figura 9.3. Curva de frecuencia de caudales (en Batalla y Sala 1994).

#### 9.4.4. Probabilidad de caudales extremos

Los caudales máximos instantáneos de avenidas extraídos a partir de hidrogramas en soporte de papel o informático son uno de los datos hidrológicos más valiosos para el geógrafo en el estudio de cuencas de drenaje, tanto por el significado hidrológico en sí como por su importancia en procesos de transporte de sedimento. Para evaluar la frecuencia de los picos de crecida con una alta fiabilidad son necesarios el máximo número posible de datos, en series con pocas o nulas interrupciones de registro. Los caudales máximos anuales son los que corresponden al pico máximo registrado por cada año de registro, siendo por lo tanto el número de valores igual al número de años de la serie. Por razones estadísticas, es importante asegurar que los datos seleccionados son independientes entre sí. Esto es a menudo difícil de conseguir, por ejemplo, cuando un caudal máximo en enero podría estar relacionado con el caudal máximo del año anterior ocurrido en diciembre. Por esta razón, es aconsejable en ocasiones usar el año hidrológico, que refleja la variabilidad estacional del clima y el régimen hidrológico en un área determinada, más que el calendario anual.

Existen diversos procedimientos para el cálculo del período de retorno de los caudales máximos instantáneos. Como paso previo al cálculo, los picos instantáneos se deben ordenar de forma decreciente, y con una segunda columna mostrando la posición en el rango. La probabilidad de que un caudal máximo anual ( $X$ ) sea igualado o superado en un año determinado  $P(X)$  se puede calcular para cada valor de  $X$  de acuerdo con diversas fórmulas, entre las más utilizadas la de Gringorten:

$$P(X) = (r - 0,44)/(N + 0,12)$$

donde  $r$  es el número de orden de  $X$  y  $N$  es el número total de datos de la serie, y la de Weibull:

$$P(X) = r/(N + 1)$$

Ambas ofrecen resultados similares y, como ejemplo, se han aplicado a datos de caudales máximos diarios de la cuenca de la riera de Arbúcies entre 1966 y 1987. Los resultados se presentan en la tabla al final de esta sección.

Una de las distribuciones de probabilidades para el análisis de caudales extremos más conocida es la ecuación de Gumbel basada en el método de momentos estadísticos. La ecuación de la distribución de Gumbel para caudales extremos viene definida por la fórmula:

$$P(X) = 1 - e^{-e^{-b(X-a)}}$$

donde  $P(X)$  es la probabilidad de que un caudal sea igualado o superado en un año determinado, tal y como se ha definido anteriormente, y  $a$  y  $b$  son dos parámetros relacionados con los momentos de la población de  $Q$  caudales. Definiendo el primer momento (la media) por  $\mu_Q$  y el segundo momento (la varianza) por  $\sigma_Q^2$ , los parámetros  $a$  y  $b$  se calculan a partir de las siguientes expresiones

$$a = \mu_Q - (\gamma/b)$$

$$b = \pi / (\sigma_Q \cdot \sqrt{6})$$

donde  $\gamma = 0,5772$ . Los momentos estadísticos  $\mu_Q$  y  $\sigma_Q^2$  pertenecen a toda la población estadística de crecidas para una estación de aforos. El resultado de aplicar este método a los datos de crecida de la riera de Arbúcies se presentan también a continuación:

$X(\text{m}^3 \text{s}^{-1})$	Rango	$P(X)$ Gringorten	$P(X)$ Weibull	$P(X)$ Gumbel (I)
65,0	1	0,025	0,043	0,025
56,0	2	0,070	0,086	0,030
55,0	3	0,115	0,130	0,053
16,0	4	0,161	0,173	0,374
15,0	5	0,206	0,217	0,295
13,5	6	0,251	0,260	0,422
13,0	7	0,296	0,304	0,435
8,0	8	0,341	0,347	0,550
8,0	9	0,386	0,391	0,550
7,7	10	0,432	0,434	0,561
7,0	11	0,477	0,478	0,580
4,8	12	0,522	0,521	0,639
4,3	13	0,567	0,565	0,645
4,0	14	0,613	0,608	0,650
3,6	15	0,658	0,652	0,661
3,0	16	0,703	0,695	0,676
3,0	17	0,748	0,739	0,676
2,9	18	0,793	0,782	0,679
2,0	19	0,839	0,826	0,690
2,0	20	0,884	0,869	0,690
1,0	21	0,929	0,913	0,721
0,7	22	0,974	0,956	0,735

### 9.4.5. Concentración de sedimento

En este apartado se presenta el procedimiento para el cálculo de las concentraciones de sedimento en suspensión y carga de fondo, a partir de las muestras recogidas en el campo y el trabajo previo de preparación realizado en el laboratorio.

El procedimiento para el cálculo de la concentración de sedimento en suspensión es muy sencillo y se realiza a partir de los resultados obtenidos durante el proceso de filtración de las muestras. Los datos que necesitamos son la cantidad de agua filtrada, la tara del filtro y el peso del filtro seco. Mediante la siguiente expresión podemos determinar cuál es la cantidad de sedimento en suspensión que el río transportaba en el momento de la recogida de la muestra:

$$C_s = [(P_f - T_f) \cdot (1 \text{ litro}/V)]/1 \text{ litro}$$

donde  $C_s$  es la concentración de sedimento en suspensión ( $\text{mg l}^{-1}$ ),  $P_f$  es el peso del filtro seco ( $\text{mg}$ ),  $T_f$  es la tara del filtro ( $\text{mg}$ ), y  $V$  es el volumen filtrado (litros). El procedimiento de cálculo de la concentración de carga de fondo o tasa de transporte se realiza a partir de la anchura del río donde se han tomado las muestras, el tiempo de muestreo en segundos, el peso seco total de la muestra recogida, y la entrada del muestreador. La fórmula para el cálculo de la tasa de transporte de fondo en el caso del muestreador Helley-Smith es la siguiente:

$$C_f = [F \cdot (W/0,076 \text{ m})]/t$$

donde  $C_f$  es la tasa de transporte de fondo en  $\text{gr s}^{-1}$ ,  $F$  es el peso total de la muestra en gramos,  $W$  es la anchura del canal en metros, y  $t$  es el tiempo de muestreo en segundos.

### 9.4.6. Distribución granulométrica

El análisis estadístico de los resultados del tamizado de las muestras de sedimento (suelo, vertientes, lecho fluvial) nos permitirá caracterizar su distribución granulométrica. El primer paso consiste en elaborar una tabla de frecuencias acumuladas como la que se presenta a continuación:

Clase (mm)	Peso (gr)	%	Σ%
(<0,063)	35	0,1	0,1
(0,063-0,125)	1.295	3,7	3,8
(0,125-0,25)	1.365	3,9	7,7
(0,25-0,5)	3.430	9,8	17,5
(0,5-1)	3.535	10,1	27,6
(1-2)	5.285	15,1	42,7
(2-4)	4.515	12,9	55,6
(4-8)	4.095	11,7	67,3
(8-16)	3.220	9,2	76,5
(16-32)	3.570	10,2	86,7
(>32)	4.655	13,3	100

A partir de esta tabla y utilizando el valor medio de cada clase como punto de referencia, se realiza el correspondiente gráfico de frecuencias acumuladas, que nos permitirá caracterizar la muestra de sedimento. Los parámetros estadísticos utilizados para la caracterización granulométrica de una muestra son normalmente los percentiles 16, 25, 50, 84 y 95 de la distribución. Existen diversas escalas para clasificar el sedimento según su tamaño, aunque difieren poco entre ellas. Una de las más utilizadas es la del *National Research Council* de 1947 (*The Encyclopedia of Sedimentology*, 1978):

Clase (mm)	Clasificación
(<0,063)	Limos y arcillas
(0,063-0,125)	Arena muy fina
(0,125-0,25)	Arena fina
(0,25-0,5)	Arena mediana
(0,5-1)	Arena gruesa
(1-2)	Arena muy gruesa
(2-4)	Gravas muy finas o gránulos
(4-8)	Gravas finas
(8-16)	Gravas medias
(16-32)	Gravas gruesas
(32-64)	Gravas muy gruesas
(>64)	Cantos

En el caso de depósitos aluviales existen diferentes coeficientes para su clasificación sedimentológica. Entre los más utilizados se pueden citar:

- El diagrama C-M de Passega (1964) y Royse (1968) que representa la relación del material más grueso, percentil 95 ( $d_{95}$ ), y el tamaño medio del material, percentil 50 ( $d_{50}$ ). Este coeficiente indica la clasificación local del material y los procesos de transporte, y discrimina entre abanicos aluviales y depósitos fluviales.
- El diagrama de desviación cuartil ( $d_{75} - d_{25}/2$ ) en relación al tamaño medio del material  $d_{50}$  de Buller y McManus (1972). Es un indicador muy sensible e indica la evolución de la textura del material en diferentes medios (dunas en ríos o playas, depósitos lacustres, etc.).
- El diagrama de desviación típica de Folk y Ward (1957) basado en una relación existente entre los diferentes percentiles de la distribución  $[(d_{84} - d_{16})/4] + [(d_{95} - d_5)/6,6]$ , y que divide el material en un rango desde muy uniforme hasta muy mal clasificado.

#### 9.4.7. Carga de sólidos

A menudo es necesario realizar cálculos de carga de material transportado, en disolución, suspensión o arrastre, para poder determinar las tasas de erosión y denudación de cuencas de drenaje a partir de mediciones puntuales. Para este tipo de estimaciones se requieren datos de caudales y de concentraciones. Para que el cálculo fuera ideal debería disponerse de datos continuos de caudal y de concentraciones. Como este extremo es prácticamente imposible de conseguir, hay que recurrir a la utilización de diversos procedimientos estadísticos como los que se describen a continuación.

El primer procedimiento se utiliza cuando hay pocos datos disponibles de concentraciones porque proceden de muestras irregulares o cuando no se dispone de datos continuos de caudales, y se define por la fórmula:

$$\text{carga} = \text{caudal medio} \cdot \text{concentración media} \cdot \text{tiempo}$$

Cuando existen datos regulares de caudales (anuales, mensuales, diarios), pero pocos datos de concentraciones se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{Carga anual} = \text{caudal total anual} \cdot \text{concentración media}$$

Cuando se han realizado muestreos periódicos frecuentes (diarios o semanales) y se dispone de un registro continuo de caudales, la carga de sedimento se puede calcular a partir de:

$$\text{carga} = \sum_{i=1}^{52} (\text{caudal total sem}_i \cdot \text{conc. media sem}_i)$$

Es necesario recordar que a menudo las muestras se toman durante caudales bajos y, por lo tanto, se pueden producir durante el cálculo diversos errores, bien una sobreestimación de la carga de material disuelto ya que la concentración se diluye con caudales altos, bien una infraestimación de la carga de sedimento en suspensión por el efecto contrario.

Finalmente, para el cálculo de la producción de sedimento de una cuenca de drenaje se pueden utilizar relaciones estadísticas significativas entre caudal y concentración en combinación, bien con medidas regulares de caudal, o con registros continuos, o con la curva de frecuencia de caudales. Un ejemplo del uso de este método se puede consultar en Batalla y Sala (1995). Walling (1977b) ofrece una revisión detallada de los problemas que se pueden ocasionar en los cálculos de carga de sedimento, demostrando que se producen diversas desviaciones para cada uno de los métodos señalados.

### 9.5. Consideraciones finales

Uno de los aspectos principales en la formación de un geógrafo físico moderno es el aprendizaje de técnicas de medición, experimentación y análisis estadístico. No obstante, este enfoque puede tener aspectos negativos, si se basa en la creencia de que las mediciones y la estadística en Geografía Física, más que un instrumento de trabajo concreto, son la meta de la investigación y su credencial para ser considerada una ciencia. Según Haines-Young y Petch (1986) el error de muchos trabajos contemporáneos en Geografía Física es que no reconocen que los procesos de medición y análisis estadístico son, esencialmente, el medio a través de los cuales se verifican las teorías científicas. Por lo tanto, separar las medidas de la teoría significa no comprender el contenido teórico que determina todo proceso de medición. Dentro del contexto del desarrollo científico, el proceso de medición debe ser tratado, por lo tanto, como punto de apoyo en las relaciones entre teoría, estadística y verificación. Sólo cuando las medidas y los datos experimentales son llevados a cabo y analizados en este contexto y las limitaciones de cada tipo de medida son conocidas y aceptadas, su papel en el proceso de desarrollo científico puede ser considerado como completo.

El desarrollo del método científico deductivo en Geografía Física no se ha producido, sin embargo, de una manera constante y uniforme. La aplicación inicial de técnicas de medición cuantitativas precedió al período de modelización en más de una década. Más tarde se incrementó el número de estudios basados en trabajo de campo, con el objetivo de proporcionar datos que permitieran profundizar en el conocimiento de los procesos naturales. A pesar de ello, mucho del trabajo de campo realizado no ha proporcionado todavía los lazos de unión suficientes para establecer, por ejemplo,

relaciones sólidas entre formas y procesos geomorfológicos. Además, la recogida de datos se ha realizado a menudo de manera aislada a la construcción de modelos; esto significa que el proceso de comprobación de modelos no se ha llevado a cabo regular y eficazmente. En este contexto, Dunne (1981) señaló que existe una necesidad evidente de diseñar programas de medición en el campo que generen el número de datos suficiente para la modelización, y no solamente aquellos datos que son fáciles de obtener. Esta planificación requiere que las estrategias de trabajo sean preparadas desde el principio por investigadores con conocimientos teóricos y de trabajo de campo, o en proyectos en equipo que incluyan estos dos aspectos.

No todos los estudios en Geografía Física demandan por igual la utilización de métodos y técnicas de medición. Goudie (1990) indica, por ejemplo, que durante la época en que predominaban los estudios de denudación cronológica en Geomorfología el tipo más común de trabajo se basaba en observaciones cualitativas de campo y en la construcción de mapas. La introducción de los estudios de procesos requirió la recogida sistemática y masiva de datos cuantitativos en el campo y la aplicación de técnicas de análisis estadístico. Asimismo, se ha dedicado mucho esfuerzo al análisis numérico de muestras en el laboratorio, particularmente en estudios sobre resistencia de materiales, composición granulométrica del sedimento, y análisis químicos de agua y sedimento. Por el contrario, uno de los apartados al cual se ha dedicado una menor atención ha sido el de la simulación en laboratorio de procesos naturales. Este tipo de experimentos permite examinar en detalle las relaciones de causales de muchos procesos, ya que muchas variables independientes que en el campo podrían fluctuar de una manera imprevista e incontrolada, pueden ser controladas en el laboratorio y ser reducidas a constantes. La vía de la experimentación en Geografía Física continua estando poco explotada, aún incluso representando la línea más cercana a los estudios deductivos de laboratorio que se llevan a cabo, por ejemplo, en Física y Química.



# 10.

---

## La docencia

---

### 10.1. Objetivos

La definición de objetivos es previa a toda planificación docente, tanto por lo que hace al temario como a los métodos y técnicas. Puesto que la docencia de la Geografía de que tratamos aquí se refiere a la que se desarrolla en la Universidad, nuestros objetivos deben estar en consonancia con los de esta institución; es decir, deben orientarse hacia el desarrollo de la cultura, la ciencia y la técnica dentro del ámbito de la Geografía Física. Por otro lado, como somos seres inmersos en una sociedad, nuestros objetivos deben ser también acordes con sus necesidades y aspiraciones. En nuestro mundo y en nuestra disciplina estas serán el conocimiento del entorno físico como base para su mejor conservación y gestión. Mientras que en Europa la Geografía Física es una ciencia con una notable tradición y arraigo, en España se trata de una ciencia relativamente reciente y oficialmente nueva en nuestras facultades. Es necesario pues intentar a través de la docencia paliar este desfase.

Según Frank y Meder (1976) los objetivos fundamentales que deben perseguirse en la enseñanza de cualquier disciplina pueden sintetizarse en un modelo hexagonal en el que cada uno de los lados representa, en igualdad de condiciones, cada uno de los aspectos a tener en cuenta: *qué* se enseña, *cómo*, *para qué*, *en dónde*, *a quién*, y *con qué*. En el contexto de la Geografía Física podríamos responder, de forma sucinta: el *qué* lo constituye el medio físico y sus relaciones con el hombre que lo habita, y el *cómo* consiste en clases teóricas, clases prácticas y, sobre todo, salidas y trabajo de campo. El *para qué* se orienta a la formación de personal docente, investigador

y técnico, y el *dónde* en nuestro caso es la enseñanza a nivel universitario. Finalmente el *con qué* lo constituye el profesorado, asistido por material cartográfico, audio-visual, y experimental. Si bien en muchas de estas premisas no podemos incidir, puesto que nos vienen impuestas por la sociedad, sin embargo sí podemos tratar de mejorar algunas de ellas o de sus aspectos, especialmente en el *qué* y el *cómo* se enseña, de lo cual puede derivarse el *para qué* de esta docencia.

En lo que se refiere al primer aspecto, es decir *qué* se enseña, creemos que es en estos momentos de suma importancia hacer hincapié en el carácter *medio ambiental* de la Geografía Física, orientándola hacia la comprensión del equilibrio que existe entre los diversos componentes del medio natural, y entre éste y la utilización que el hombre hace de él. Se debe más que nunca considerar como Ciencia del Medio Ambiente Humano, como percepción global a la vez que como análisis de los componentes de este conjunto, en sí mismos y en sus relaciones de interdependencia con los demás elementos. De ello se deriva una aplicación de estos conocimientos a la gestión y conservación del medio.

Por lo que hace a *cómo* se enseña, y teniendo en cuenta el *qué* y el *para qué*, debería incrementarse la enseñanza *global y activa*. En relación a ello quisiéramos hacer mención de las aportaciones de Ovide Decroly (Bosch y Muset, 1980), psiquiatra belga que aplicó a la pedagogía sus conocimientos en el campo de la deficiencia infantil, pues algunos de los conceptos de base que él desarrolló son aplicables a cualquier tipo de docencia. Es interesante destacar su concepto globalizador de la enseñanza, el énfasis que puso en la importancia de la aprehensión integrada en la etapa de los primeros conocimientos. Según Decroly (1923) nuestra percepción primera es naturalmente global, y esto es perfectamente aplicable en el caso de la Universidad en general (Decroly y Buysse, 1924) y de la Geografía en particular (Llopis, 1926). Otro aspecto de las ideas de Decroly se refiere a la enseñanza activa, es decir, la que se basa en la participación del alumno en su propio aprendizaje, lo cual está perfectamente demostrado que es mucho más enriquecedor y efectivo, no sólo en relación al aprendizaje en sí, sino en lo que se refiere al afianzamiento de la personalidad, en nuestro caso de la personalidad del geógrafo. No hay que confundir esta acepción de la palabra activa con el concepto utilitario político-marxista de Geografía activa acuñado por Pierre George, el cual ha constituido una de las principales causas de la decadencia de la Geografía Física en algunas universidades españolas. La enseñanza activa lleva implícita la utilización de métodos y técnicas experimentales, los cuales son en realidad parte integrante de la misma. Lo que a nuestro entender se consigue con ello es hacer del geógrafo un profesional autosuficiente, capaz de aceptar y rechazar tanto puntos de vista propios como ajenos. Esta confianza y seguridad en sí mismo debe repercutir en la posterior búsqueda

de trabajo, y por tanto hacerle competitivo a la hora de encontrar empleo, aquí y en cualquier país europeo. Y, dado que las salidas profesionales de los alumnos de Geografía Física es predecible que estarán cada vez menos dentro de la actividad docente, se les debe proporcionar las herramientas necesarias para defenderse en un contexto laboral más amplio.

Por lo que se refiere a *dónde*, *quién* y *con qué* se enseña, nos encontramos que en la Universidad Española la Geografía Física está encuadrada dentro del área de Ciencias Humanas y Sociales, lo cual condiciona la docencia, tanto por el marco institucional como por la procedencia y formación de profesores y alumnos. El profesorado de que se dispone procede, en su mayor parte, de la primera generación de geógrafos que, dentro de la Geografía llevaron a cabo una especialización en la etapa de su doctorado. Es por tanto un personal con un notable porcentaje de formación autodidacta, y que supone posibles deficiencias con un gran entusiasmo por la Geografía Física. Puesto que el profesorado más joven y los doctorandos han recibido una enseñanza más especializada, y además han vivido en una sociedad mucho más abierta y sin la carga anticientífica que representaron las ideas marxistas en la Universidad, este profesorado se encuentra en una situación intermedia entre dos generaciones, es decir, en el paso de lo tradicional y dogmático a lo nuevo y dinámico. Es importante dar a este personal facilidades para reciclarse, lo cual va a permitirle dar paso sin traumas a las nuevas generaciones.

En relación a *a quién* va dirigida la enseñanza, se trata de un alumnado que está encuadrado dentro del contexto de Historia y Geografía. En su mayor parte procede de un bachillerato en que la enseñanza de la Geografía Física es prácticamente nula, realizada a partir de un bloque denominado Ciencias Naturales e impartido por geólogos o biólogos. Estos estudiantes en principio poseen poca base en ciencias y llegan a Geografía porque no han podido acceder a especialidades que en principio les interesaban más. Esta entrada de alumnos de segunda o tercera opción tiene la contrapartida de que, al menos en Geografía Física, hay un buen número de estudiantes que tienen una buena preparación en ciencias. Un aspecto negativo a tener en cuenta es la cantidad importante de alumnos que compaginan el estudio con el trabajo. Deben ponerse los medios necesarios para paliar estos tres problemas. Así, por un lado es necesario reforzar la enseñanza de disciplinas científicas básicas, por el otro hacer un esfuerzo para mostrar el interés científico y aplicado de los estudios geográficos, y finalmente conseguir dotaciones suficientes para erradicar la necesidad de compaginar estudio y trabajo.

## 10.2. Métodos docentes

Aunque el método de enseñanza está intrínsecamente ligado al concepto de la disciplina, de manera que según sea el contenido de la materia deberá

ser el método, existen unas premisas básicas que se refieren a la metodología docente en general. El estudio y reconocimiento de estas bases evoluciona y se perfecciona con el tiempo, adquiriendo, gracias a la experiencia, nuevos enfoques (Ferrer i Cerveró, 1994).

Especialistas en pedagogía y psicología (Escoriza, 1989; Rodrigo, 1985) distinguen tres aspectos o formas de entender y practicar la docencia: el artístico, el tecnológico, y como procesamiento de la información.

En la enseñanza entendida como proceso artístico la práctica está gobernada por la intuición del docente y viene generada por sus experiencias personales, como alumno primero y como profesor después. Es innegable que este aspecto está siempre presente en la docencia, de ahí la importancia de la procedencia y formación del profesor.

En la enseñanza como proceso tecnológico el profesor es un experto precisamente en docencia, de forma que a la manera conductista, administra refuerzos, es decir, técnicas que actúan positivamente con el fin de controlar y mantener el aprendizaje deseado. Este aspecto tecnológico de la forma de transmitir y de controlar conocimientos está poco cuidado en la Universidad, a pesar de que un mínimo de entrenamiento en este sentido redundaría en beneficio de la docencia. No hay que olvidar la relación que existe entre enseñanza y dinámica de grupo, pues los procesos de comunicación educativa suelen producirse en el seno de un grupo cuyos miembros asumen diferentes funciones, protagonizando una gran variedad de fenómenos colectivos y de integración personal, todo lo cual es posible conocer científicamente.

La enseñanza como procesamiento de la información consiste en proporcionar a los alumnos prácticas guiadas en las que la responsabilidad se va transfiriendo gradualmente del profesor al alumno, a través de corregir errores, evaluar el nivel de comprensión, organizar y conducir la práctica, y facilitar y posibilitar el trabajo independiente. En este aspecto no hay que olvidar la necesidad de adaptarse a las características de los individuos a entrenar, si bien intentando introducir toda suerte de mejoras con el fin de elevar su nivel y equipararlo al de países más avanzados.

Una enseñanza eficaz requiere, básicamente, rigor, seguridad y crítica constructiva a nivel docente. Para ello debe ponerse el énfasis en los siguientes aspectos: *a)* buena preparación científica personal; *b)* presentación del material a un nivel adecuado; *c)* conocimiento de las fuentes de dificultad potencial; *d)* comunicación del entusiasmo por la ciencia; *e)* adaptación a las características y expectativas de los alumnos.

En el terreno metodológico se puede distinguir entre clases teóricas, clases prácticas, trabajo de campo y realización de proyectos. Asimismo se debe diferenciar la docencia impartida a grandes grupos y de la impartida a grupos pequeños.

### 10.2.1. Clases teóricas

Las clases teóricas tienen como finalidad suministrar el suficiente bagaje de contenidos fundamentales, una terminología precisa de la disciplina y fuentes de información propias del tema, imprescindibles en todo proceso formativo. El alumno, a medida que se suceden las clases a lo largo del curso, debe encontrarse motivado por la materia, lo cual depende en gran medida de la actuación del profesor. Hay que tener presente los rasgos del alumnado y ser ante todo ordenada y clara, así como utilizar una terminología rigurosa y precisa. También hay que sugerir temas de estudio, encauzar inquietudes científicas, y proporcionar las herramientas de trabajo necesarias para profundizar en los temas diseñados o en otros nuevos.

Ciertamente el método más eficaz es el que toma en consideración simultáneamente los elementos de la materia objeto de estudio y los intereses de los alumnos. Ello se consigue planteando interrogantes y problemas e incitando a la reflexión y a la intervención del alumnado en busca de soluciones. Es imprescindible fomentar el ansia de una formación permanente con la intención de que llegue a ser un hábito y, a la vez, despertar una vocación investigadora que sirva de acicate para garantizar la continuidad de su formación una vez terminados los cursos académicos.

#### • Clases teóricas en grandes grupos

La enseñanza universitaria en España, después del crecimiento exponencial del alumnado en las últimas décadas, ha de llevarse a menudo a cabo con alumnos organizados en grandes grupos. Por ello, el curso univesitario, sobre todo durante el primer ciclo, es un tipo de comunicación prácticamente con sentido único, estrechamente canalizado, donde habla una sola persona mientras que el auditorio toma apuntes, aunque eventualmente pueden suscitarse algunas preguntas a las que responderá el mismo docente. El profesor es el único detentador del conocimiento al más alto nivel, y se dirige al grupo de estudiantes de manera anónima, por lo que en este clima de exposición magistral no puede establecerse ninguna relación afectiva entre maestro y alumnos, ni siquiera entre los mismos alumnos (Soler, 1987) (Figura 10.1). Se trata pues de una exposición en monólogo que los alumnos siguen de forma pasiva, y en la que el profesor presenta un tema a base de establecer unos hechos, poner ejemplos, presentar situaciones problemáticas, dar explicaciones de terminología y de convenciones, realizar prospecciones y presentar juicios de valor.

Frente a consideraciones negativas sobre las clases magistrales, tales como que son un método pasivo de aprendizaje, que el alumno sólo recibe la

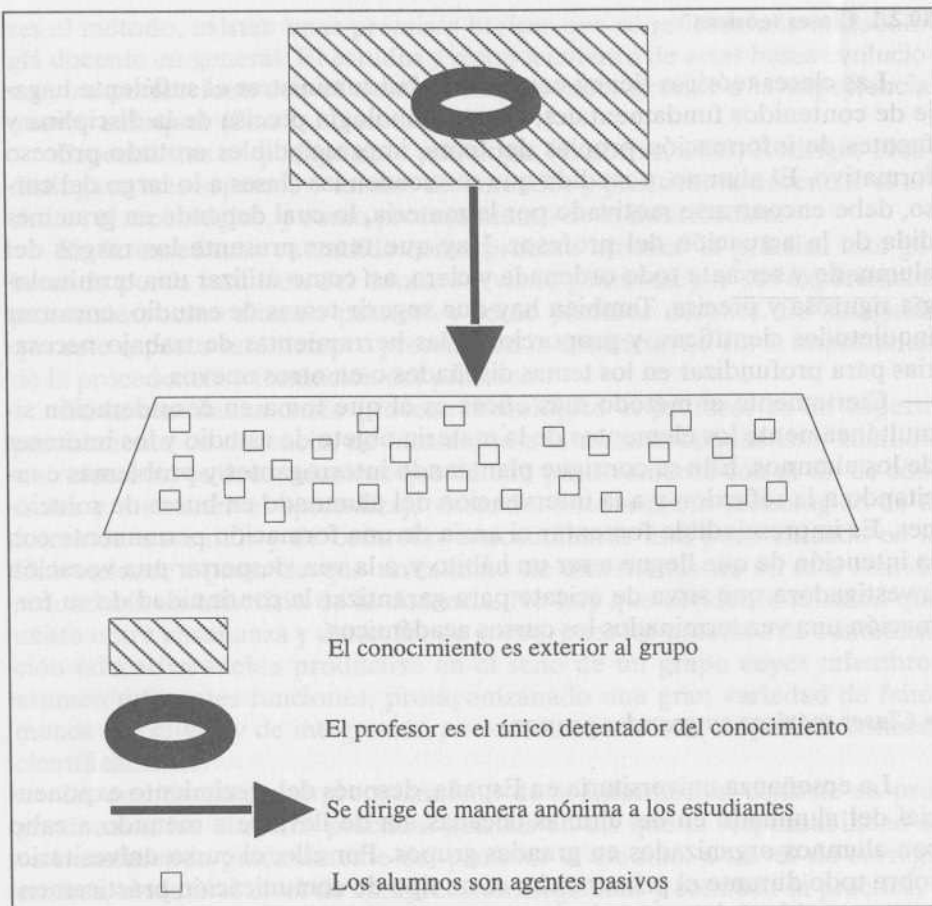


Figura 10.1. Modelo de docencia en gran grupo.

interpretación del profesor sobre el tema, existen algunas cualidades que es necesario no perder de vista, y que las hacen convenientes y aptas al ámbito universitario, por lo que no deben descartarse (Puyol y Fons, 1981) aunque si mejorarse. Entre los aspectos positivos de este tipo de clases cabe destacar que constituyen una síntesis ordenada del tema, que son un buen modo de introducción a una materia que para muchos estudiantes es nueva, y que ahorran a los alumnos muchas horas de búsqueda y elaboración de los temas. Por tanto, el método del Gran Grupo es un sistema adecuado para informar, lo cual suele ser conveniente en las primeras etapas de un aprendizaje. La clase magistral entendida bajo estas premisas debe crear las bases

adecuadas para posteriores clases prácticas, trabajos, excursiones, etc., en las que se genere la discusión, la búsqueda de soluciones, la confrontación de opiniones, etc. (Peña, 1987). En este tipo de enseñanza el profesor debe preparar el contenido de estas sesiones de acuerdo con un guión con los siguientes apartados:

- 1) *Introducción*: anuncio de lo que se va a exponer. Distribución oral del tiempo. Establecimiento de un marco de referencia. Enlace con las necesidades de los alumnos.
- 2) *Desarrollo*: presentación con claridad de la idea principal. Presentación de las ideas subordinadas. Desarrollo de ideas subordinadas. Colocación de éstas en el contexto.
- 3) *Síntesis y cierre de información*: síntesis parciales. Comparaciones y contrastes. Emergencia de la idea principal como procedente de las síntesis parciales. Manifestación de cómo se ha conseguido el objeto de la exposición.

#### • Clases teóricas en pequeños grupos

Aunque es evidente que una enseñanza impartida a un grupo pequeño tiene muchas más posibilidades de ser efectiva y activa, lo esencial de esta metodología es la forma no directiva de llevar la clase. La docencia no directiva en un pequeño grupo tiene una función insustituible para la consecución de un clima participativo y de enriquecimiento mutuo de los miembros del grupo. Su eficacia surge como consecuencia del desarrollo y de las condiciones de trabajo, más que de la información previamente depurada y estructurada. También de los conocimientos de la dinámica de grupos por parte del profesor o animador del grupo, así como de las técnicas precisas de aprendizaje.

Las clases que pueden ser de tipo no directivo en la enseñanza superior son fundamentalmente los *seminarios*, la preparación de *proyectos*, algunas clases *prácticas* y, de una forma más restringida, las *tutorías*. Para este tipo de clases el grupo idóneo es el de diez a doce alumnos, excepto en el caso de las tutorías en que el número se reduce a una, dos o tres personas. La actividad no directiva consiste en poner a los miembros del grupo en situación de dilucidar y, si fuese posible, resolver ellos mismos los problemas que encuentren, tanto a nivel de las tareas como a nivel de los sentimientos mutuamente percibidos. En la clase de tipo no directivo el conocimiento es interior al grupo, el profesor tiene el papel de animador o de facilitador, la relación profesor-alumno es individual y permanente, las interacciones entre los alumnos son libres, y los alumnos son participantes y pueden organi-

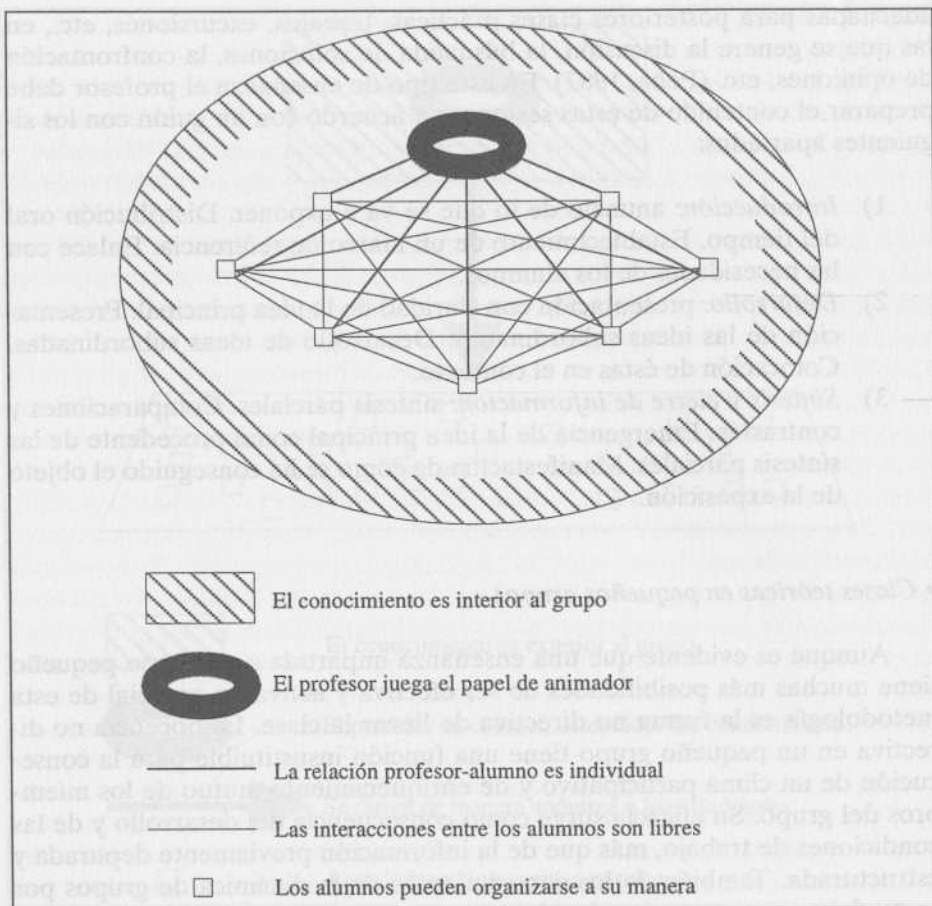


Figura 10.2. Modelo de docencia en grupo reducido.

zarse a su manera para alcanzar el fin común, que es la participación en el saber (Soler, 1987).

En la organización del trabajo del pequeño grupo el equipo acepta y comprende los objetivos propuestos, señala temas y puntos a tratar, selecciona fuentes de información, marca las etapas y el tiempo y distribuye el trabajo entre todos los miembros. En la ejecución del trabajo cada miembro asume una responsabilidad, desarrolla un aspecto determinado y consulta al equipo sobre sus problemas. Como resultado de ello cada miembro aporta al grupo su trabajo explicando el proceso seguido, los inconvenientes hallados y las conclusiones. Cada componente del grupo debe descubrir los he-

chos por sus propios medios, en un progreso interior y creciente de comprensión de las ideas. La función del profesor consiste en facilitar esta ascensión mediante el antiguo arte del cuestionario o mayéutica, en el sentido propio del que ayuda a dar a luz, que equivale al actual redescubrimiento y que consiste en hacer pasar una y otra vez a los alumnos por las etapas principales de la exploración según el procedimiento de la observación y verificación objetiva.

En el caso concreto de los *seminarios*, suponen la incorporación de los estudiantes a la investigación científica, lo cual es de sumo interés especialmente en los últimos años de carrera. Por lo que hace a las *tutorías*, es una práctica todavía poco habitual en nuestro país, dado la escasez de profesorado universitario, y sin embargo es la mejor forma de guiar al estudiante por el camino de la investigación, proponiendo lecturas adecuadas a sus intereses científicos y comentándolas luego, sugiriendo trabajos y llevando su seguimiento.

#### • Clases prácticas

El objetivo de las clases prácticas es dar al alumno, por una parte, un conocimiento directo de la realidad, y por el otro los instrumentos técnicos necesarios para el desarrollo de los conocimientos y para la investigación. Se considera que para que sea adecuada y fructífera, tanto para despertar la iniciativa personal como para fomentar la innovación, la clase práctica no puede superar la relación de treinta alumnos por profesor.

Las clases prácticas deben entenderse como la continuación lógica y complementaria de las clases teóricas, fijando contenidos y evitando, como dice Plans (1975), la formación de ideas estereotipadas adquiridas en el manejo de libros y textos. Por sus especiales características de grupo reducido y de ausencia de rigidez tienen un extraordinario valor formativo, pues son un cauce para el trabajo personal de los estudiantes, de forma que se convierten en protagonistas y realizan una labor mediante la cual se forman. No hay que olvidar ni desdeñar el valor humano de estas actividades, tanto en lo referente a las relaciones profesor-alumno como a las de los alumnos entre ellos. Pueden desarrollarse en el aula o gabinete, en el laboratorio o en el campo.

El tipo más simple de clase práctica, y además el que requiere una menor infraestructura, es la visual, es decir, la proyección de diapositivas, las cuales potencian la agilidad mental, el orden y la capacidad de observación (Sancho, 1980), y la audiovisual, con proyección de videos, para lo que existe abundante material intercambiable con otras universidades e instituciones (Abadia, 1985). Tanto en un caso como en otro el profesor puede utili-

zar material elaborado por sí mismo, o bien apoyarse en el material didáctico que existe en el mercado. Se trata de un recurso de gran importancia en Geografía Física, puesto que pone al alcance de los alumnos paisajes y fenómenos que el vulcanismo, el glaciario, los conjuntos dunares, etc. Puede utilizarse tanto para presentar paisajes como para introducir las formas características de los mismos, así como los procesos responsables de todo ello, en cada uno de los grandes ámbitos de la Geografía Física: relieve, clima, aguas, suelo y vegetación.

La clase práctica en el *gabinete* puede tener diversas funciones, desde el análisis de mapas y de fotografías aéreas, el reconocimiento y clasificación de rocas y plantas, hasta el aprendizaje de todo tipo de técnicas cuantitativas.

Las clases en el *laboratorio* ofrecen ya mayor dificultad logística, puesto que se necesita una infraestructura más importante que las Facultades de Humanidades no están siempre preparadas para asumir, ni psicológica ni financieramente. La finalidad de las prácticas de laboratorio es iniciar al alumno en el trabajo experimental, trabajo que partiendo de una hipótesis, planifica la forma de verificarla en condiciones fiables y controladas, mediante técnicas apropiadas.

Además de los objetivos mencionados, es de suma importancia enseñar a los alumnos a entender la necesidad de manipular y medir los objetos y procesos en condiciones controladas. Después de generar personalmente los datos, podrán comprobar, tanto la dificultad que hay en ello como las variaciones que se producen en la calibración de un mismo objeto por varios observadores, y así entender lo que significa y la importancia que tiene establecer órdenes de magnitud. Con todo esto es posible paliar la enseñanza libresco y de aula que han tenido la mayor parte de ellos durante su enseñanza primaria y secundaria. Por tanto, es necesario que la Universidad asuma la necesidad de las prácticas desde un punto de vista económico y desde un punto de vista del empleo del tiempo de sus profesores.

### 10.2.2. Trabajo de campo

Es un instrumento absolutamente imprescindible en el aprendizaje de la Geografía Física y su utilidad es aceptada a todos los niveles (Plans, 1975). Debe entenderse como una estrategia destinada a reforzar los contenidos de la asignatura, y no como sustituto de ciertos temas, o como simple añadido sin relación ninguna con el curso (Peña, 1987). De hecho, parte de su finalidad es la aprehensión del contenido teórico, pero además, el acercamiento a la realidad que facilitan induce a una mayor valoración de la Geografía como disciplina (Hernando, 1979).

Las finalidades del trabajo de campo son múltiples, tanto si se trata de excursiones como de cursos de campo. En primer lugar, pone en contacto al alumno con el mundo físico, mundo que muchas veces desconoce, bien por no haberlo observado con detenimiento bien por una cultura excesivamente urbana. Permite asimismo contrastar los conocimientos teóricos con la realidad y, como consecuencia, modificarlos o depurarlos. También familiariza con la observación minuciosa y con un enfoque geográfico del medio natural, su diversidad, sus relaciones y sus repercusiones en la vida humana.

Los objetivos y métodos concretos del trabajo de campo variarán en función de si se trata de *excursiones*, de *cursos*, o de *prácticas* a realizar por el alumno como parte de una materia. El trabajo de campo, para que pueda ser aprovechado al máximo, requiere una buena preparación previa, tanto en el campo por parte del profesor, como en el aula por parte de los alumnos. Es conveniente examinar con antelación mapas y diapositivas, así como referencias bibliográficas, a fin de que el alumno tenga una idea aproximada de lo que va a observar o en lo que va a trabajar. Es imprescindible que durante la excursión, curso o trabajo los alumnos tomen notas, y aprendan con ello cómo llevar una libreta de campo. También que una vez finalizada la salida se prepare un resumen de la misma en el plazo más breve posible. En el caso de las excursiones en grandes grupos, los resultados que se pueden obtener son más bien de tipo descriptivo, de familiarización con determinados paisajes y problemas geográficos, por lo que son muy interesantes en la etapa de iniciación. Las excursiones en grupos grandes requieren mucha preparación, empezando por una introducción previa en el aula y la confección de una guía. Se pedirá a los alumnos que tomen apuntes, que realicen dibujos y croquis en algunos puntos previamente escogidos. Las excursiones en pequeños grupos permiten clases más activas, así como la observación y, sobre todo, la discusión de problemas específicos, como por ejemplo la relación entre los diferentes elementos naturales.

Los cursos de campo tienen una finalidad distinta y, como su nombre indica, sirven bien para enseñar alguna temática concreta, como la investigación en cuencas de drenaje, o bien para mostrar el abanico completo de las subáreas de Geografía Física. Es conveniente que su duración sea de una a dos semanas con el fin de conseguir la atmósfera de trabajo y colaboración apropiados. Los cursos de campo deben ser del tipo de docencia no dirigida. Además es conveniente enfocar parte del trabajo de campo como si se tratara de un trabajo de laboratorio, enseñando así al alumno a enfrentarse con la complejidad de los experimentos o mediciones en el campo. Otro aspecto es el de llevar a cabo inmediatamente el tratamiento estadístico de los datos obtenidos a fin de establecer *in situ* las relaciones entre la realidad observada y la abstracción a que puede llegarse.

Es también recomendable que los alumnos tomen parte en cursos organizados en otros centros, para así familiarizarse no sólo con nuevos paisajes sino también con otros enfoques teóricos y metodológicos. Ejemplo de ello son los organizados en la Universidad de Verano de Teruel (Peña *et al.*, 1989) sobre Geografía Física, en la Universidad de La Laguna sobre Geomorfología volcánica y Biogeografía, los cursos del Instituto de Ecología de Jaca sobre Geo-ecología de montaña, los de la Universidad de Valladolid sobre Geomorfología estructural, los cursos de métodos y técnicas de la Sociedad Española de Geomorfología (Sala y Gallart, 1988).

Finalmente existe el trabajo que el alumno, individual o en grupos de dos o tres, debe llevar a cabo dentro de una asignatura como aplicación de lo aprendido. Antes de iniciar el trabajo habrá que definir los objetivos del mismo, en el sentido de cuál es el problema que se intenta clarificar o resolver. También los métodos y técnicas más adecuados en función de la propuesta. Seguidamente hay que identificar un área donde se pueda ejemplificar el caso a estudiar. Es imprescindible que el alumno utilice una libreta de campo donde vaya anotando todas las vicisitudes del trabajo. Esta libreta será controlada por el profesor y a partir de ella, junto con los trabajos llevados a cabo en el gabinete, se confeccionará la memoria que dé cuenta del trabajo realizado y de las conclusiones a que se ha llegado.

### 10.2.3. Proyectos

Si se aspira a que los alumnos de Geografía Física puedan desenvolverse en el mundo laboral, además de en el docente o investigador, es esencial que durante la carrera se lleve a cabo el aprendizaje de cómo desarrollar un proyecto, tal como se hace en las escuelas técnicas. Este tipo de ejercicio proporciona seguridad en uno mismo, respalda notablemente el *currículum*, y por tanto facilita la búsqueda de empleo.

La correcta realización de un trabajo que marque el final de una etapa, de primero y de segundo ciclo, necesita de un aprendizaje específico, el cual debería ser motivo de un curso cuatrimestral. La enseñanza de cómo realizar un Proyecto pretende inculcar una actitud y una visión de la disciplina y de la sociedad más que transmitir conocimientos (Blasco, 1974), puesto que de lo que se trata es de aplicar correctamente lo aprendido de manera que se convierta en algo útil. En un curso de proyectos el número de alumnos por profesor debe ser necesariamente reducido, alrededor de diez, y éstos deben llevar a cabo sus proyectos piloto en grupos de dos o tres.

El papel del profesor en este tipo de curso debe ser no directivo en la forma y vigilante en cuanto al fondo, orientando el aprendizaje, la observación y la investigación. Debe ayudar a concretar o a determinar los objeti-

vos a alcanzar, a distribuir el tiempo y las tareas correctamente. También contribuir a organizar el trabajo de cada equipo proponiendo objetivos y fuentes de información, marcando y jerarquizando etapas de desarrollo del proyecto, controlando la validez de los métodos y técnicas empleados, siguiendo la correcta progresión del trabajo, y comprobando los resultados. A lo largo del proyecto cada miembro del grupo debe presentar el estado de su trabajo, y explicar el proceso seguido, los inconvenientes hallados, y las conclusiones preliminares.

Así pues, la base del curso es la discusión que se origina a propósito del desarrollo del proyecto. Es importante que el trabajo que se lleva a cabo en los pequeños grupos se integre en una unidad con sentido por sí sola, de forma que permita a los alumnos darse cuenta de cuál es la marcha del proyecto y descubrir las fuentes de conexión entre los detalles, lo cual ayuda a ver lo que es pertinente en cada caso, lo que se puede despreciar o lo que hay que mantener.

### 10.3. Técnicas docentes

Dentro de las técnicas docentes tradicionales en Geografía podemos mencionar las bibliográficas, las cartográficas y las fotográficas. No hace falta insistir en la importancia y en las características de cada una de ellas por ser bien conocidas. A ellas hay que añadir la cada vez más generalizada utilización de los recursos informáticos. Por otro lado, las técnicas instrumentales, tanto de laboratorio como de campo, deben asimismo hoy en día formar parte de la docencia. Se trata, a diferentes niveles, de medios en apoyo no sólo de todo tipo de clases, sino también de los trabajos de los alumnos.

La utilización de fuentes bibliográficas es común en Geografía, puesto que todo curso bien organizado debe ir acompañado de la indicación de unas lecturas, especialmente de libros de texto. Sin embargo es preciso resaltar la necesidad de acudir a fuentes directas, de libros y, sobre todo, de revistas científicas especializadas, que presenten el trabajo de investigación llevado a cabo por su autor. Se trata de uno de los ejercicios más recomendables para llegar a hacerse cargo de una problemática dada el llevarla a cabo, y por lo tanto, debe instruirse al alumnado en la ejecución de comentarios bibliográfico técnicamente bien realizados, haciéndole distinguir entre una primera parte de resumen y una segunda parte de comentario documentado, en el que se enlace lo que se lee con conocimientos previos y a partir de ello formular una crítica constructiva y orientativa. Por el contrario, no es recomendable la consulta frecuente de recopilaciones, puesto que éste es precisamente el trabajo que el alumno debe realizar por sí mismo.

Es necesario dar a conocer la existencia tanto de repertorios bibliográficos editados como de redes de información automatizada, a las que puede acudir a través de las bibliotecas universitarias y de INTERNET. Como centros a los que se puede acceder mediante solicitud a través de la propia biblioteca hay que destacar el centro de documentación del Instituto Geológico y Minero de España (con 600.000 referencias), el Instituto de Información y Documentación en Ciencias y Tecnología del CSIC, el centro de la Red de Información Científica Automatizada (Red Inca) el cual tiene acceso a los bancos de datos de EURONET. En el extranjero existen también centros de documentación bibliográfica, como son los del American Geological Institute (AGI), Informascience (del CNRS), Science Abstracts (INSPEC), Science Citation Index o la Japan Information Centre of Science and Technology, con sus propios repertorios bibliográficos (Peña, 1987).

Los mapas y las fotografías aéreas constituyen una de las fuentes de información más importantes en Geografía Física. El alumnado, que en sus prácticas va a estar en contacto con estos documentos gráficos, debe conocer los fondos existentes en las diferentes instituciones. Junto a estos fondos generales debe existir un fondo de material para prácticas, donde se cuente con juegos repetidos de mapas topográficos, geológicos y de fotografías aéreas para agilizar la labor docente en las sesiones de seminarios y prácticas, y al mismo tiempo evitar que se deteriore el material del fondo general.

Los recursos informáticos son hoy en día excelentes ayudas en todo tipo de docencia y aprendizaje. Su utilización y las prestaciones que ofrecen aumentan a ritmo exponencial. El conocimiento de los programas estándar de procesadores de texto, bases de datos y hojas de cálculo se ha convertido en un instrumento indispensable en el mundo de la docencia.

El laboratorio también ha pasado a ser un recurso didáctico altamente necesario en la docencia de la Geografía Física. Nos referimos concretamente a un laboratorio dedicado a prácticas para los alumnos, con instrumental sencillo, pero que sirva para comprender un proceso y analizar un material. Las prácticas mínimas a realizar son las relacionadas con el análisis y caracterización de las formaciones superficiales y los suelos de las vertientes y del agua y el sedimento de los ríos (Ubeda y Sala, 1995). Las prácticas en el laboratorio deben estar relacionadas con las prácticas de campo, y por tanto se debe estar también equipado con material para este fin.

#### 10.4. Evaluación

El aprendizaje debe ser sometido a un control, el cual indica cómo se está llevando a cabo la docencia y el grado de asimilación a qué ha llegado el alumnado. Las dos funciones básicas de una evaluación son pues compro-

bar si el método docente es válido y en qué estado se encuentran los alumnos, tanto a un nivel de conocimientos sobre la materia como en madurez para expresarlos correcta y eficazmente.

Actualmente existen textos, como el de Espín López y Rodríguez Lajo (1993), destinados a tanto despertar la reflexión crítica de los profesores universitarios sobre el sentido, significado y funciones de la evaluación del aprendizaje de sus alumnos, como a sugerir formas o procedimientos que ayuden al profesor a comprender el papel que tiene la evaluación, y cómo esta puede servir de ayuda para mejorar todos los elementos que intervienen en el proceso educativo.

Es muy importante que el alumno sepa desde el comienzo de curso cómo va a ser evaluado, y sería conveniente que los profesores del área establecieran criterios conjuntos de control y de valoración.

Para ser objetivo, el sistema de evaluación debe ser múltiple y variado, con pruebas tipo test, redacción de temas, trabajos bibliográficos, resúmenes de excursiones y de prácticas, y trabajo de campo. Con ello puede llegar a obtenerse una calificación ponderada del rendimiento de los alumnos. En el primer ciclo es conveniente que tengan más peso las pruebas y en el segundo ciclo los trabajos.

Para la evaluación del rendimiento de las clases teóricas, las pruebas de tipo test son útiles para valorar el nivel de conocimientos, mientras que la redacción de temas refleja la madurez intelectual, de ahí la conveniencia de utilizar una combinación de ambos. En las prácticas nos parece más conveniente contabilizar la asistencia y participación oral y activa, o pedir un resumen, que no llevar a cabo pruebas específicas, a fin de que no se rompa el ambiente de distensión que debe regir en este tipo de trabajo. En relación al trabajo bibliográfico y al trabajo de campo, ambos deben realizarse bajo la tutoría del profesor, pues de lo contrario el aprovechamiento es mínimo. Resulta muy útil que el alumno presente una primera versión del trabajo hacia la mitad del curso, a fin de poder detectar omisiones y errores y así conseguir que la versión final sea lo más satisfactoria posible, tanto para el profesor como para el alumno.

Finalmente, no hay que olvidar que los resultados de las evaluaciones han de tener una repercusión práctica, tanto a nivel de profesor como a nivel de alumnos, y por tanto, llevar a un constante replanteamiento del trabajo docente o del aprendizaje, respectivamente.



# 11.

## La Geografía Física en algunas universidades europeas

### 11.1. La Universidad de Amsterdam

En la Universidad de Amsterdam se crea un Departamento de Geografía en 1947, pero en 1968 Geografía Física y Ciencia del Suelo pasan a formar un solo Departamento, el cual está encuadrado en la Facultad de Ciencias. El objetivo docente general en Holanda es prioritariamente el de formar buenos profesionales que sean capaces de llevar a cabo trabajos prácticos, de ahí que tanto la organización del trabajo como la de la enseñanza y los estudios estén marcados en este sentido.

Las salidas profesionales varían en función de la especialización, mejores para los que hacen física y química de suelos, no tan buenas para los que hacen Geografía de suelos y Geomorfología, y las más flojas para los que hacen ecología del paisaje. De todas formas al cabo de un año de finalizar sus estudios todos los estudiantes han encontrado un trabajo, bien en investigación bien en trabajos relacionados con el medio ambiente. El personal del Departamento está constituido por 16 docentes, 4 investigadores, 18 técnicos y 25 doctorados.

El número de estudiantes es en conjunto de unos 130, con aproximadamente 25 a 30 en los tres primeros cursos, alrededor de 15 en cuarto.

Sus recursos didácticos son muy amplios gracias al sistema de Programas de Investigación y Docencia financiados por el Gobierno. Se trata de contratos de cinco años de duración para llevar a cabo investigaciones que integren a los alumnos y que permitan equipar y mantener varios laborato-

rios y personal técnico. La valoración del trabajo realizado dentro de estos programas se basa en la calidad y número de publicaciones en revistas y editoriales internacionalmente reconocidas.

Por lo que se refiere a los recursos financieros del Departamento, proceden de tres fuentes:

- 1) La Universidad por medio de los Programas de Investigación y Docencia.
- 2) Los contratos exteriores.
- 3) Personal investigador del Consejo para la Investigación Científica.

El Gobierno, además de proporcionar una ayuda de base a todos los estudiantes, financia estancias en el extranjero.

El trabajo está organizado de tal manera que tanto profesores como alumnos trabajan 8 horas al día en las dependencias del Departamento, excepto cuando se está en trabajo de campo. La distribución horaria de este tiempo para los alumnos en horas de clase, horas de lecturas y horas de prácticas está muy pormenorizado. Los profesores están disponibles y accesibles durante las 8 horas laborales, pero no necesariamente presentes en las aulas o laboratorios. Una vez discutido y distribuido el trabajo se deja al estudiante que trabaje solo.

En la enseñanza, aunque la selección es casi inexistente, los estudiantes de Geografía Física deben de haber cursado Física, Química y Matemáticas en su bachillerato o superar una prueba en estos temas. Los estudios, aunque organizados en cuatro años, suelen llevar a los estudiantes 5 o 6 para terminar. En este sistema es el estudiante quien fija su nivel de conocimientos puesto que es el quien decide las preguntas que va a hacer a los profesores, por lo que no todos los estudiantes tiene el mismo nivel al salir. El nivel es un problema de motivación de cada estudiante.

En relación al control de conocimientos se establece una distinción entre los dos primeros cursos y los dos últimos. Mientras que en primero y segundo se llevan a cabo exámenes en el sentido tradicional, en los dos últimos no hay exámenes estructurados tal como se entienden en Francia o en España (tipo de examen, calendario), sino más bien una especie de trato entre el profesor y el estudiante en el que éste se presenta a revisar sus conocimientos en el momento en que se encuentra preparado para ello. Entonces presenta su trabajo (un proyecto que ha llevado a cabo) y lo discute con el profesor. El reconocimiento administrativo de las distintas pruebas se registra en un carnet que el estudiante posee. Se trata de un carnet con talonarios formados por conjuntos de tres hojas sobre las que anota su estado civil, tipo de enseñanza seguida, duración, la nota obtenida y su firma. El

estudiante se queda con una de estas hojas, la administración otra y el profesor conserva el talonario.

En la estructura general de los estudios la especialización en Geografía Física es inmediata. Los estudios tienen una carga de 1.700 horas al año durante 4 años, repartidas en 42 semanas de 8 horas. Ahora bien, estas horas no son todas lectivas puesto que 1 hora de clase se contabiliza por 3 horas de trabajo para el estudiante: una de asistencia a clase, una de preparación

CUADRO 11.1. Distribución de materias y carga horaria en la Universidad de Amsterdam.

PRIMER CURSO (Introducción propedéutica)	• Introducción	40 h
	• Geomorfología	240 h
	• Geología	200 h
	• Climatología	80 h
	• Suelos	280 h
	• Hidrología	120 h
	• Historia de la Geografía	80 h
	• Países Subdesarrollados	80 h
	• Informática	160 h
	• Matemáticas	120 h
• Trabajo de campo	160 h	
SEGUNDO CURSO (Bases)	• Geobotánica	120 h
	• Ecología del Paisaje	160 h
	• Suelos (Física y Química)	280 h
	• Procesos Geomorfológicos	160 h
	• Fotointerpretación	120 h
	• Geografía de suelos	120 h
	• Agro-Climatología	160 h
	• Estadística	120 h
	• Modelización 1	160 h
	• Trabajo de campo	280 h
• Proyecto	120 h	
• Modelización 2	160 h	
• Trabajo de campo	52 días	
TERCER CURSO (Investigación)	• Técnicas de Laboratorio	280 h
	• Estudios especiales	280 h
	• Seminarios	280 h
	• Trabajo de campo	6 meses
CUARTO CURSO (Investigación)	• Proyecto de Investigación	
	• Trabajo de campo y de laboratorio	

de examen, y una por cada lectura de 5 páginas de bibliografía exigida. No existe tronco común, ni enseñanzas de especialidad, ni optatividad. Todos los estudiantes hacen lo mismo hasta el cuarto curso, en el que llevan a cabo una investigación y una memoria especializados. Los cursos se dan en bloque por un profesor durante un período de un mes o dos. Cada profesor además lleva a cabo un curso de campo de dos semanas.

En el Plan de estudios existe un primer ciclo de asignaturas básicas (fases 1 y 2), ciclo que termina con la realización por parte del alumno de un trabajo de campo y una memoria sobre el mismo. El primer curso tiene carácter introductorio y después de los correspondientes exámenes el alumno obtiene un certificado. El segundo ciclo está orientado a la capacitación del alumno para realizar individualmente proyectos y reconocimientos bajo la orientación de un tutor y generalmente dentro de un proyecto de investigación. Ya no existen clases propiamente dichas sino trabajo en el laboratorio y/o en el campo. El alumno lleva a cabo un trabajo individual y un trabajo dentro de algún proyecto.

En 1991 entró en vigor en todo el país una nueva legislación en la que se ha llevado a cabo una reorganización de departamentos y enseñanzas con el fin de restringir y optimizar los presupuestos dedicados a las Universidades. Ello comporta que las especialidades a cursar por Departamento se limiten a aquellas en las que existe un buen nivel de profesorado, acreditado fundamentalmente en base a sus proyectos de investigación y publicaciones científicas. Los estudiantes deberán, más que antes, cursar determinadas asignaturas en Departamentos distintos al suyo.

El Programa de curso se agrupa en bloques de siete semanas, después de las cuales se interrumpen las clases una semana para dar tiempo al alumno de preparar la materia para examen (véase Cuadro 11.1).

## 11.2. La Universidad Libre de Berlín

En la Universidad Libre de Berlín el Instituto de Geografía fue creado en 1948. En la actualidad agrupa a las especialidades de Geografía Física, Geografía Humana y Cartografía, y pertenece a la División de Ciencias. El Instituto forma parte de la Facultad de Ciencias de la Tierra que comprende los Institutos de Geografía, Geología, Mineralogía, Geofísica y Meteorología. El objetivo general es promover el estudio de las Ciencias de la Tierra mediante la docencia y la investigación universitarias.

Las salidas profesionales de los estudiantes son buenas en el terreno de la docencia. Cada año hay unos 20 estudiantes que superan el Examen Estatal para maestros y 25 que obtienen el Diploma Universitario una vez realizado el trabajo de fin de carrera.

El Instituto tiene exactamente el mismo número de personal en Geografía Física que en Geografía Humana y algo menos en Cartografía. Cuenta además con personal técnico, investigador contratado mediante fondos que no proceden de la Universidad, y profesores invitados de otras universidades. La composición es la siguiente: 15 docentes, 2 técnicos y 2 secretarías.

Los fondos de financiación proceden de la Universidad en lo que se refiere a salarios y en parte a la adquisición de instrumental tanto de campo como de laboratorio. La otra fuente de ingresos es el "Deutsche Forschungsgemeinschaft" (Agencia Alemana para el Desarrollo Científico), que suministra fondos para la investigación y complementos a proyectos de investigación internacionales. En cuanto a recursos didácticos se cuenta con 4 laboratorios (química, física de suelos, hidrología, y canal de ensayos hidráulicos), además de biblioteca, una importante colección cartográfica y una colección de fotografía aérea.

La distribución anual del tiempo se realiza en dos bloques. Un primer bloque de 16 semanas de octubre a marzo y un segundo bloque de abril a septiembre. Los meses de marzo y septiembre no obstante no están ocupados por seminarios sino que se dedican generalmente a tutorías, trabajo de laboratorio y excursiones al campo (generalmente en el marco de proyectos de investigación llevados a cabo en el centro), y preparación de trabajos de las asignaturas que acaban de finalizar, normalmente resúmenes comentados de artículos especializados o trabajos bibliográficos.

La enseñanza consiste en clases teóricas, ejercicios, cursos de prácticas en el laboratorio y en el campo, excursiones, y seminarios. Al cabo de dos años de estudio el estudiante debe examinarse para obtener un Diploma Universitario o el título intermedio para maestros. Estos primeros exámenes consisten en pruebas escritas. El grado final es el Diploma de Estado, que suele conseguirse después de 4 o 5 años de estudio. Los exámenes consisten en una combinación de prueba oral y la presentación de un trabajo de final de carrera.

No hay una organización rígida de cursos y tienen lugar muchos cambios de asignaturas de un semestre a otro, puesto que los profesores se sienten orgullosos de tener la libertad de cambiar los contenidos, e incluso la organización de sus cursos, incluyendo seminarios y asignaturas impartidas por profesores extranjeros visitantes. La temática de los dos primeros años se centra en temas amplios, básicos de Geografía, mientras que los tres restantes son mucho más especializados, fundamentalmente para los estudiantes que quieren obtener el Diploma final. Cada estudiante debe escoger dos disciplinas afines a la Geografía Física dentro del ámbito de ciencias (generalmente se opta por Geología, Química, Biología o Meteorología), sobre las cuales debe cursar la mitad de las materias

obligatorias de la carrera. Casi la mitad de los cursos y seminarios que se ofrecen son optativos, mientras que la otra mitad es obligatoria. Se trata pues, de una organización basada en el trabajo y la libertad individual, tanto a nivel de alumnos como a nivel de profesorado, es decir, en una confianza mutua.

El primer ciclo de la carrera o de seminarios fundamentales en Geografía Física contiene materias de carácter introductorio que permiten al estudiante adquirir los conocimientos básicos de la disciplina. Algunas de las asignaturas que se ofrecen regularmente en Geografía Física son:

- Introducción a la Geografía Física.
- Geografía de los Oceanos.
- Geoecología del Sur y Este de Europa.
- Geomorfología y desarrollo del paisaje en la región de Berlín.

La oferta de asignaturas en el segundo ciclo (denominado de seminarios superiores) es más amplia e incluye, además de asignaturas optativas, tres grupos de materias obligatorias en dentro de los cuales los alumnos deben cursar como mínimo dos seminarios para obtener los créditos de cada grupo. Los tres grupos de materias obligatorias varían de un curso a otro. En el caso del curso académico 1995-1996 estas materias y algunos de los seminarios ofrecidos en cada unas de ellas fueron las siguientes:

#### Hidrología de cuencas de drenaje:

- Transporte de sedimento en ríos de Europa central.
- Erosión e hidrología de suelos.
- Riesgos hidrológicos en cuencas mediterráneas.

#### Investigación sobre el Cuaternario:

- Metodología en las investigaciones sobre Cuaternario.
- Fotointerpretación.
- Bases geomorfológicas para la interpretación de depósitos cuaternarios.

#### Potencial Geoecológico de las regiones áridas:

- Química medioambiental.
- Formas y procesos de los paisajes áridos.

Algunas de las asignaturas optativas que se recomiendan como complemento a las materias obligatorias se detallan a continuación:

- Soluciones experimentales y teóricas a los problemas hidromecánicos en Ciencias de la Tierra.
- Geografía Física de Asia interior.
- Introducción a la problemática ambiental del Atlas.
- Geoquímica y sedimentología de los suelos.
- Geoecología de los paisajes alemanes.
- Análisis y derecho medioambiental.

### 11.3. La Universidad de Saint Andrews

La enseñanza de la Geografía en la Universidad de Saint Andrews, la más antigua de Escocia, está basada en la tradición británica de Oxford y Cambridge. Aunque la enseñanza de la Geografía en esta Universidad se remonta al año 1935, el desarrollo del Departamento de Geografía en su estructura y dimensiones actuales se inicia en 1970. Los objetivos de la enseñanza son, además de transmitir una serie de conocimientos, el de desarrollar en el alumno un espíritu crítico sobre las ideas y teorías con las que deba enfrentarse, formar una mente disciplinada y capaz de un pensamiento independiente. Se trata por tanto de una enseñanza más científica que técnica, aunque no por ello las asignaturas de tipo técnico dejen de formar parte del plan de estudios. Es muy interesante señalar que los cursos de Geografía pueden seguirse tanto desde las Facultades de Letras como desde las de Ciencias, o lo que es lo mismo, desde Geografía se imparten clases a estudiantes de Letras y a estudiantes de Ciencias. Así pues, los Departamentos de Geografía de las Universidades de Gran Bretaña tienen la particularidad de estar a caballo entre las Facultades de Ciencias y las de Letras.

El Departamento de Geografía de St. Andrews cuenta con el siguiente personal (5 de los docentes son de Geografía Física): 9 docentes, 5 técnicos, 2 secretarías y 1 oficial científico.

En cuanto a los alumnos, los dos primeros cursos son comunes para Geografía Física y Humana, además de que suelen seguir algunas de sus asignaturas alumnos de otras especialidades, y la media es de 120 estudiantes en primero y 60 en segundo. En tercero y cuarto ya se sigue una especialización por lo que el número de alumnos desciende a unos 40.

La distribución anual del tiempo se hace en tres bloques. Un primer bloque de 10 semanas de octubre a diciembre, un segundo bloque de 10 semanas de febrero a abril, y un tercer bloque de 6 semanas en mayo y junio. A partir de abril, no obstante, ya no se imparten clases sino que se dedica el

tiempo a excursiones, tutorías, realización de trabajos y exámenes. La distribución semanal del tiempo lectivo es de 4 horas de clase teóricas, 3 horas de prácticas y 1 hora de tutoría. El resto del tiempo el estudiante debe ocuparlo en lecturas, seminarios, trabajo de campo, etc.

Los recursos didácticos de Geografía de St. Andrews han aumentado sensiblemente a causa de su nueva ubicación física en el mismo edificio que ocupan los Departamentos de Geología y de Química. Geografía tiene además un laboratorio de palinología, una sección de cartografía por ordenador y una de publicaciones. Los recursos financieros provienen de la Universidad y del Consejo Nacional para el Medio Ambiente.

La enseñanza consiste en un compendio de clases magistrales, trabajos prácticos, trabajo de campo, tutorías y seminarios. El trabajo de campo forma parte de la mayoría de cursos tanto en Geografía Física como en Geografía Humana. Las tutorías y seminarios se utilizan para abarcar aspectos que no quedan cubiertos por las clases y para ayudar a los estudiantes a desarrollar sus conocimientos geográficos mediante la discusión en pequeños grupos. Las tutorías se llevan a cabo desde primer curso en grupos de 5-6 estudiantes mientras que los Seminarios se inician en segundo curso e involucran a 10-15 estudiantes.

El control de conocimientos es bastante complejo y se basa en exámenes y trabajos, pero menos de la mitad de la puntuación está centrada en exámenes. En el segundo ciclo el estudiante, además de las clases, que comportan trabajos y exámenes, debe llevar a cabo tres trabajos, uno metodológico, uno de investigación que incluya trabajo de campo (10.000 palabras) y uno bibliográfico (7.000 palabras), bajo la supervisión de un profesor. Finalmente debe someterse a un examen en el que se ponen dos preguntas, una sobre un tema metodológico y la otra sobre un tema aplicado, con el fin de comprobar su nivel de conocimientos geográficos y su aptitud para aplicar tales conocimientos.

El margen de elección temático es amplio pero dentro de un programa coherente previamente establecido. Así, los estudios pueden estar totalmente basados en Geografía, o comportar una licenciatura mixta tomando un porcentaje determinado de asignaturas de los departamentos implicados; por ejemplo Geografía y Geología; Geografía y Botánica; Geografía y Deportes; Geografía y Pedagogía; etc.

El primer ciclo consiste en cursos de Geografía Física y de Geografía Humana, complementados con un trabajo de Geografía Regional el primer año y un examen sobre epistemología de la Geografía en el segundo. Las clases de Geografía Física de primer curso se centran en aspectos globales del medio físico (origen de las montañas, modelos climáticos globales) y las de segundo en temas a escala media y pequeña (cuencas de drenaje, sucesiones de vegetación). Además de estos cursos que ofrece el Departamento

los estudiantes de Geografía Física deben complementar sus estudios con temas del área de Ciencias (Geología, Biología, etc.). Durante este primer ciclo el soporte didáctico para el alumno es básicamente el material que se le suministra al impartir la clase.

En el segundo ciclo los estudiantes pueden estudiar los aspectos geográficos que más les interesen, aunque todos deben seguir un núcleo básico de materias durante el tercer curso, la mayoría de tipo práctico, pero una de ellas de tipo metodológico puesto que el objetivo es proporcionar herramientas de trabajo y al mismo tiempo una base para un trabajo teórico. Durante este ciclo el estudiante debe basarse más en las lecturas recomendadas que en la lección del profesor, puesto que ésta tiene más el carácter de conferencia.

Hay un núcleo de asignaturas obligatorias:

- Estadística e Informática.
- Metodología.
- Cartografía.
- Trabajo de Campo.
- Excursión científica al extranjero.

Existe asimismo un núcleo de asignaturas optativas distribuidas en dos bloques que alternan anualmente, de manera que doblan las opciones de los estudiantes en los dos años de especialidad. Los estudiantes siguen 3 o 4 de estas materias. En Geografía Física son:

- Geomorfología fluvial.
- Geomorfología Glacial y Periglacial.
- Cronología del Cuaternario.
- Geomorfología de vertientes.
- Geomorfología aplicada.
- Biogeografía.
- Biogeografía aplicada.
- Geomorfología litoral.

Las salidas profesionales que el Departamento prevé son optimistas, en el sentido de que por el momento sus graduados siguen un amplio abanico de carreras y están teniendo mucho éxito en promover su licenciatura en Geografía. Esto se atribuye a la combinación que comportan los estudios de Geografía entre temas de ciencias y temas de letras, puesto que les confiere adaptabilidad a diferentes ofertas, y a que muchos de los temas de investigación de los alumnos durante su formación resultan de interés social. Al igual que todos los licenciados en el Reino Unido, sólo un 25% utiliza su li-

cenciatura como cualificación específica, y es en el caso de seguir cursos de doctorado o cursos de especialización en planificación, cartografía y medio ambiente, con los cuales se abre el abanico de posibilidades laborales hacia puestos de trabajo en agencias centrales y locales del gobierno, educación, editoriales y agencias de conservación del medio ambiente. El resto encuentra trabajo en la banca, seguros, inmobiliarias, etc. Hay que tener presente que en el Reino Unido la salida profesional hacia la docencia a nivel secundario proviene de Departamentos especializados en Didáctica y Pedagogía, aunque los alumnos de los mismos siguen cursos de la especialidad que van a impartir.

#### 11.4. La Universidad Louis Pasteur de Strasbourg

El Departamento de Geografía de la Universidad de Strasbourg es uno de los más antiguos de Francia pues se creó en 1919, y también uno de los más acreditados, gracias sin duda en gran parte al impulso y proyección internacional que le dio J. Tricart después de su incorporación en 1948. Los geógrafos de Barcelona, por mediación de L. Solé Sabarís, han mantenido tradicionalmente lazos estrechos con este Departamento. A raíz de la reestructuración aplicada a la Universidad en 1969 el Departamento de Geografía de Strasbourg pasó a formar parte de la Facultad de Ciencias.

El personal con que cuenta el Departamento estrictamente de la Universidad es de 17 docentes, de los cuales 8 son de Geografía Física, y 4 técnicos. Sin embargo hay un grupo de trabajo interdisciplinar (climatólogos, hidrólogos, geomorfólogos, fitosociólogos, ecólogos y agrónomos) financiado por el CNRS, el Centro de Estudios e Investigaciones Eco-Geográficas (CEREC), en el que se agrupan docentes, investigadores, técnicos y estudiantes de Maestría y Doctorado, por lo que sus recursos, que son importantes en infraestructura de laboratorios y personal técnico, benefician a los estudiantes de segundo ciclo. Existe, además de los recursos didácticos usuales (mapas, fotografía aérea, etc.) un laboratorio para prácticas.

El número de estudiantes es de unos 60 en primero, de los cuales 30 de geografía humana, 10 de física y 20 de otras especialidades, en segundo el número baja ligeramente (25 geógrafos en total). En tercero hay alrededor de 30 estudiantes en el tronco común pero en la especialidad de geografía física se reducen a unos 15. En Maestría, aunque el número de plazas disponibles es también de 15, no siempre se cubren todas.

Por lo que hace a la enseñanza, los dos primeros cursos tienen carácter introductorio dentro de la especialidad de Geografía, terminados y aprobados los cuales el estudiante recibe un Diploma de Estudios Universitarios Generales (DEUG). El tercer curso es el de licenciatura y se basa, como en

CUADRO 11.2. Asignaturas para el DEUG en la Universidad Louis Pasteur de Strasbourg.

PRIMER CURSO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Introducción a la fisiogeografía</li> <li>• Geología</li> <li>• Estadística</li> <li>• Matemáticas</li> <li>• Alemán o Inglés</li> <li>• Prácticas de Gabinete (cartografía, geomorfología)</li> <li>• Prácticas de Gabinete (climatología, hidrología)</li> <li>• Una semana de trabajo de campo</li> </ul>
SEGUNDO CURSO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geomorfología Climática</li> <li>• Hidrología continental</li> <li>• Climatología</li> <li>• Prácticas de Geomorfología Estructural</li> <li>• Métodos cuantitativos</li> <li>• Cartografía</li> <li>• Matemáticas</li> <li>• Prácticas de Fotointerpretación</li> <li>• Alemán o Inglés</li> <li>• Prácticas de Botánica</li> <li>• Prácticas de Geología</li> <li>• Trabajo de campo (una semana)</li> </ul>
LICENCIATURA EN GEOGRAFÍA, ESPECIALIDAD GEOGRAFÍA FÍSICA	<p>Un tronco común técnico que comprende:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Teledetección</li> <li>• Estadística</li> <li>• Muestreo espacial</li> <li>• Prácticas de Cartografía</li> </ul> <p>Los siguientes módulos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Climato-Hidrología</li> <li>• Procesos geomorfológicos</li> <li>• Suelos y Biogeografía</li> <li>• Evoluciones geomorfológicas</li> <li>• Trabajo de campo</li> </ul>
MAESTRÍA EN GEOGRAFÍA FÍSICA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Procesos periglaciares</li> <li>• Pedología y Medio Físico</li> <li>• Hidrología (crecidas)</li> <li>• Climatología (riesgos)</li> <li>• Geoecología y evaluación Medio Natural</li> <li>• Riesgos Naturales</li> <li>• Un curso de campo de diez días</li> </ul>

el caso anterior, en el seguimiento de cursos y la realización de exámenes. El cuarto curso es el de maestría (Maitrise) y comporta, además de clases y exámenes, la realización de un trabajo de investigación extenso, que se concreta en una memoria en la que el estudiante trabaja un 70% del curso y se presenta ante un tribunal, como si fuese una tesina. El quinto curso comporta un Diploma de Estudios "Aprofondies" (DEA) y en él solamente se toman clases durante un cuatrimestre, el resto se dedica a realizar un trabajo de investigación. Existe la posibilidad de llevar a cabo un DEUG con especialidad en Geografía pero partiendo de la Facultad de Ciencias, lo cual puede considerarse un intento de acercar la Geografía Física francesa a los sistemas holandés, alemán y belga. Se basa en un primer curso con asignaturas mayoritariamente de ciencias más una de Geografía Física, y un segundo curso con la mayor parte de las asignaturas del tronco de Geografía Física.

En los tres primeros cursos domina el sistema de clases con predominio de la enseñanza basada en el discurso y donde el profesor dicta y los alumnos toman apuntes, aunque se facilita mucha información complementaria fotocopiada sin cargo para el alumno. A partir del cuarto curso existe la posibilidad de realizar trabajos dentro de proyectos de investigación coordinados entre el Departamento y el CNRS.

El control de conocimientos se lleva a cabo en base a exámenes a lo largo del año (80% de la nota) y de un examen final (20% de la nota). A partir de tercer curso se llevan a cabo trabajos dirigidos.

Las salidas profesionales son en primer lugar la administración del Estado y las administraciones regionales (50%), enseñanza (25%) e investigación.

En cuanto a las asignaturas, en el primer ciclo son prácticamente todas obligatorias. La carga horaria es el equivalente a una hora semanal, que son en realidad 25 horas por materia, puesto que éste es el número de semanas lectivas al año. Esto no quiere decir que todas las materias se den durante todo el año, pues en bastantes casos se concentran en un cuatrimestre. Para el DEUG de Geografía, especialidad Geografía Física, las asignaturas se pueden ver en el Cuadro 11.2.

### 11.5. La Universidad de Liège

En las universidades belgas la Geografía se enseña dentro de las facultades de ciencias, y por ello en el primer ciclo predomina una formación de base común para todos los estudiantes de Geografía con una carga importante de temas de ciencias.

En primer y segundo curso todas las asignaturas son obligatorias, y su carga docente es de 21 horas a la semana en primero y de 27 horas a la se-

CUADRO 11.3. Asignaturas y carga horaria en la Universidad de Liège.

		teoría	pract.	campo
PRIMER CURSO	• Física experimental	75 h	42 h	
	• Elementos de Geometría Analítica y de análisis infinitesimal	45 h	30 h	
	• Biología de organismos y poblaciones	45 h	45 h	
	• Elementos de Química General	45 h	30 h	
	• Introducción a la Geografía Física	30 h	30 h	
	• Introducción a la Geografía Humana	22 h	22 h	2 d
	• Introducción a fuentes y métodos históricos	30 h	15 h	
SEGUNDO CURSO	• Geografía Matemática	10 h		
	• Estadística General	30 h	30 h	
	• Elementos de Botánica	30 h	30 h	2 d
	• Elementos de Mineralogía	15 h	25 h	
	• Geología General	50 h	35 h	8 d
	• Geología Regional	10 h		2 d
	• Introducción a la Geografía Física	30 h	21 h	3 d
	• Introducción a la Geografía Humana	25 h	45 h	2 d
	• Introducción a la Geografía Económica	30 h	15 h	2 d
	• Foto-interpretación (Geomorfología)	10 h	10 h	
	• Economía Política y Social	45 h		
	• Sociología	30 h		
	• Elementos de Filosofía	5 h		
• Cartografía	30 h	24 h		
TERCER CURSO	• Geografía Matemática (Topografía)	30 h	10 h	
	• Geografía Física (Geomorfología)	30 h	37 h	8 d
	• Geología y Geomorfología del Cuaternario	15 h		2 d
	• Pedología	15 h	8 h	1 d
	• Geografía Botánica	22 h		2 d
	• Geografía Humana I	45 h	45 h	3 d
	• Foto-interpretación	18 h	22 h	
	• Geografía Económica I	30 h	15 h	3 d
	• Economía Política	5 h		
	• Aplicación de Métodos Matemáticos	15 h	15 h	
	• Elementos de Meteorología I	15 h		1 d
• Geografía Regional I	30 h	30 h	6 d	

CUADRO 11.3. (Continuación).

		teoría	pract.	campo
CUARTO CURSO	• Geografía Física (Geomorfología)	15 h	12 h	8 d
	• Geografía Física (Climatología)	15 h	15 h	
	• Geografía Zoológica	15 h		
	• Geografía Humana II	30 h	30 h	3 d
	• Geografía Regional II	30 h	15 h	5 d
	• Geografía Económica II	30 h		
	• Elementos de Meteorología II	15 h		1 d
	Materias de especialización en Geografía Física que se imparten distribuidas en los dos últimos cursos:			
	• Geomorfología y Geología Cuaternario	15 h + 15 h		
	• Geomorfología Dinámica	15 h + 15 h		
	• Climatología	15 h + 15 h		
	• Hidrografía	15 h + 15 h		
	• Geografía Zoológica	15 h + 60 h		
	• Geografía Botánica	15 h + 60 h		

mana en segundo. La mayor parte de las materias están divididas en una parte teórica, una parte práctica y una parte de trabajo de campo. Las prácticas consisten en sesiones de ejercicios o de laboratorio, organizadas en grupos de menos de veinte estudiantes y dirigidos por personal científico especializado. El conocimiento del inglés se considera indispensable.

El control de conocimientos se lleva a cabo mediante exámenes organizados en dos sesiones, junio y septiembre. La primera sesión está precedida de un período de estudio de cuatro o cinco semanas en el que no se llevan a cabo ni cursos ni trabajos prácticos. Durante el año se realizan pruebas sobre algunas de las materias, especialmente en primer curso, las cuales sirven principalmente para una autoevaluación de los conocimientos y de la calidad del trabajo de los estudiantes. En algunos casos la superación de estas pruebas puede significar la eliminación de materia en los exámenes. En el segundo ciclo el estudiante escoge un tema de especialización sobre el cual realiza un examen. Al finalizar los estudios deberá además presentar una memoria sobre alguna cuestión relacionada con el grupo de materias que ha elegido para el examen temático. Esta memoria, que es un trabajo personal, se realiza bajo la dirección de un profesor o un miembro del personal científico. El segundo semestre del último curso está esencialmente consagrado a la finalización de la memoria, que se habrá empezado normalmente en tercer curso.

Las salidas profesionales que se contemplan son la docencia a diferentes niveles, la investigación en diversas instituciones nacionales e internacionales, la administración pública, y la industria de servicios.

La distribución de asignaturas y su carga horaria puede verse en el Cuadro 11.3.

## 11.6. Recapitulación

Aunque la información que poseemos sobre la docencia de la Geografía en universidades europeas no es exhaustiva, ni en todos los casos comparable, es sin embargo posible destacar algunos puntos, y sobre todo establecer relaciones con la situación española.

En todas las Universidades, excepto en la de Amsterdam, la Geografía forma un bloque único, es decir, comprende tanto Geografía Física como Geografía Humana, y la enseñanza de ambas constituye obligatoriamente parte del primer ciclo, pero no del segundo. Existe además una importante carga docente en temas del área de Ciencias, tales como Estadística, Matemáticas, Geología, y en algunos casos Física y Química. Es lo que corresponde en una ciencia que procede y se sitúa en el campo de las Ciencias Naturales.

El volumen de carga docente dedicada a prácticas es elevado, en muchos casos cerca del 50%, y las salidas de campo, a menudo de varios días de duración, forman parte integrante del programa docente. En todos y cada uno de los departamentos existe por lo menos un laboratorio para prácticas, y a menudo laboratorios temáticos, lo cual muestra la consideración experimental que se ofrece a la Geografía.

Hay un porcentaje más o menos elevado de personal técnico, así como de personal investigador, este último algunas veces procedente de centros nacionales paralelos a la Universidad con la que colaboran. La proporción profesor-alumno varía en el primer y en el segundo ciclo. En el segundo puede llegar a ser de 1/1 o de 1/2. La relación profesor-personal técnico en algunos casos (Amsterdam) puede llegar a 1/1.

Las diferencias entre la docencia en estas universidades y las españolas de categoría similar, en lo referente a la enseñanza de la Geografía Física, son varias y a diferentes niveles. En Europa, la Geografía a menudo está dentro del campo de las Ciencias de la Tierra y no en el de las Humanidades, y a la Geografía Física se la reconoce como Ciencia Ambiental, con todo lo que ello conlleva a nivel de docencia e investigación, así como de posibilidades de trabajo para los licenciados.

También se da una equiparación entre docencia en las áreas de Geografía Física y de Geografía Humana, y la ausencia de un área específica de



Geografía Regional como en el caso español, la creación de la cual no ha hecho más que provocar un aumento no justificado del peso de la Geografía Humana.

Otra de las diferencias más notables es la que se refiere a la infraestructura para trabajos prácticos en los laboratorios y en el campo, tanto en material como en ayudantes y personal técnico cualificado. También la participación en las tareas docentes de investigadores de centros de investigación similares a nuestro Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Destaca asimismo el hecho de que se deja mucho más tiempo al alumno para estudiar, pensar y trabajar, lo cual le puede llevar luego a contrastar y discutir sobre lo aprendido. Con ello, la enseñanza se hace realmente universitaria, además de permitir la progresiva inserción en el mundo del trabajo.

Sin las bases mencionadas, las cuales implican la dedicación de presupuestos mucho mayores a las tareas universitarias, es prácticamente imposible que pueda, no ya competir, sino seguir el nivel y el ritmo de las universidades europeas.

## Bibliografía

- ABADIA, X. (1985): "Recursos didácticos en la enseñanza de la Geografía". En *Aspectos didácticos de Geografía*, ICE, Universidad de Zaragoza, 151-168.
- ABELSON, P. H. (1964): "Trends in scientific research", *Science*, 143, 218-223.
- ACKERS, P. y WHITE, W. R. (1973): "Sediment transport: new approach and analysis". *Journal of Hydraulic Engineering*, 99, 2041-2060.
- ALBAREDA, J. M. (1943): "Clasificaciones y tipos de suelo", *Anales del Instituto de Edafología*, 151-192.
- ALBENTOSA, L. M. (1975): "Evolución histórica del concepto de clima y métodos de estudio". *Asociación Meteorológica Española*, VII Jornadas, 179-212.
- ALBENTOSA, L. (1980): "Contaminación y cambio de clima en las regiones urbanas industrializadas". *Tarraco*, Vol. 1, 11-37.
- ALBENTOSA, L. M. (1984): "La evolución de la Geografía Física en España. Geomorfología y Climatología". *III Coloquio Ibérico de Geografía*, 99-112.
- ALONSO, J. (1989): "Los suelos de la Península". En BIELZA, V. (Dtor.): *Territorio y Sociedad en España. I Geografía Física*. Taurus. Madrid. 299-314.
- AMOROCHO, J. y HART, W. E. (1964): "A Critique of current methods in hydrologic systems investigation". *Trans. Amer. Geophys. Union*, 45, 307-321.
- ANDERSON, M. G. y BURT, T. P. (1990): "Process studies in hillslope hydrology: an overview". En M. G. ANDERSON y T. P. BURT (EDS.) *Process studies in hillslope hydrology*, John Wiley, N. Y., 1-8.
- ANHERT, F. (1954): "Zur Frage der rückschreitenden Denudation und das dynamischen Gleichgewichts bei morphologischen Vorgängen". *Erdkunde*, 8, 61-64.
- AHNERT, F. (1962): "Some reflections on the place and nature of physical geography". *Professional Geographer*, 14, 1-7.
- ANHERT, F. (1970): "Functional relationships between denudation, relief and uplift in large, mid-latitude drainage basins". *Am. J. Sci.*, 268, 243-263.
- ANHERT, F. (1980): "A note on measurements and experiments in geomorphology". *Z. Geomorph. Suppl. Bd.* 35, 1-10.

- ATKINSON, B. W. (1985): *El Clima*. Fondo de Cultura Económica, México.
- ATLAS NACIONAL DE ESPAÑA (1992): Grupo 7 *Edafología*, Instituto Geográfico Nacional, Madrid.
- ÁVILA, A. y RODA, F. (1988): "Export of dissolved elements in an evergreen-oak forested watershed in the Montseny Mountains (NE Spain)". *Catena Suppl.* 12, 1-11.
- BAGNOLD (1941): *The physics of blown sand and desert dunes*. Methuen, London.
- BAGNOLD, R. A. (1956): "The flow cohesionless grains in fluids". *Philosophical Transactions Royal Society London*, A265, 315-319.
- BAKER, V. R. (1973): "Paleohydrology and sedimentology of Lake Missoula flooding in eastern Washington". *Geological Society of America Special Paper*, 144, 79 pp.
- BAKER, V. R. y PYNE, S. (1978): "G. K. Gilbert and modern geomorphology". *Am. Jour. Sci.*, 278, 123 pp.
- BARRY, R. G. (1967): *Models in Meteorology and Climatology*, London, Methuen.
- BARRY, R. G. y CHORLEY, R. J. (1970): *Atmosphere, Weather and Climate*, Methuen, London. Traducción castellana (1972): *Atmósfera, tiempo y clima*, Omega, Barcelona.
- BARRY, R. G. y PERRY, A. H. (1973): *Synoptic Climatology. Methods and application*, Methuen, London. 552 pp.
- BARRY, R. G. y CHORLEY, R. J. (1970): *Atmosphere, Weather and Climate*, Methuen, London. Traducción castellana: 1972: *Atmósfera, Tiempo y Clima*, Omega, Barcelona, 392.
- BATALLA, R. J. y SALA, M. (1992): "Balanz hidroquímico d'una conca mediterrània en estat seminatural: el cas de la riera d'Arbúcies". *Acta Geologica Hispanica*, 27 (3).
- BATALLA, R. J. y SALA, M. (1994): "Magnitud y frecuencia del transporte fluvial de sedimento en una cuenca mediterránea semi-húmeda". *Pirineos*, 143-144, 3-15.
- BATALLA, R. J. y SALA, M. (1995): "Effective discharge for bedload transport in a subhumid mediterranean sandy gravel-bed river (Arbúcies, north-east Spain)". En: HICKIN, E. J. (ED.): *River Geomorphology*. Chichester, John Wiley and Sons, 93-103.
- BATALLA, R. J.; SALA, M. y WERRITTY, A. (1995): "Sediment budget focused in solid material transport in a subhumid Mediterranean drainage basin". *Zeitschrift für Geomorphologie*, 39, 249-264.
- BAULIG, H. (1952): *Cicles et climat en géomorphologie*. 50ème Ann. Lab. Geogr. Rennes, 215 pp.
- BECERRIL, E. (1961): "Los ríos españoles y su regulación". *Rev. Obras Públicas*, 109, 347-356.
- BEDIENT, P. B. y HUBER, W. C. (1988): *Hydrology and Floodplain analysis*. Addison-Wesley, Massachusetts, 6, 335-420 (Urban hydrology).
- BENNETT, H. H. (1939): *Soil conservation*, McGraw-Hill, New York.
- BENTABOL URETA, H. (1900): "Las aguas de España y Portugal", *Bol. Com. Mapa Geol. España*, 25, 347 pp.
- BEVEN, K. J. y KIRKBY, M. J. (1979): "A physically-based variable contributing area model of basin hydrology". *Hydrological Sciences Bulletin*, 24, 43-69.
- BIRKELAND, P. W. (1984): *Soils and Geomorphology*, Oxford University Press, New York-Oxford, 372 pp.
- BIROT, P. (1959): *Précis de Géographie Physique Générale*, Colin, París.
- BIROT, P. (1960): *Le cycle d'érosion sous les différents climats*, Centro de Pesquisas de Geografia, Brasil.
- BISWAS, A. K. (1970): *History of Hydrology*, North Holland, Amsterdam.
- BLASCO, J. (1974): *Memoria: Los estudios de Proyectos en las Escuelas Técnicas Superiores de Ingenieros Industriales*, ETSII, Universidad de Barcelona, Barcelona, 82 pp.
- BOLOS, M. de (1984): "La Biogeografía". *Ponencia III Coloquio Ibérico de Geografía*. Barcelona. 113-115.
- BOLOS, O. de (1954): "Essai sur la distribution géographique des climax dans la Catalogne". *Vegetatio*, 5-6, 45-49, La Haya.
- BOLOS, O. de (1963): "Botánica y Geografía". *Memoria de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona*, XXXIV, 443-491. Barcelona.
- BOLOS, O. de (1994): "Josias Braun-Blanquet i la seva obra". En: *L'estudi de la vegetació de Catalunya, passat, present i futur*, Centre Excursionista de Catalunya, Montblanc-Martín, Barcelona, 11-18.
- BOSCH, J. M. y MUSET, M. (1980): *Iniciación al método Decroly*, Teide, Barcelona, 184 pp.
- BRAUN, G. (1917): *Grundlagen und Methodik*, Leipzig, Teubner, I, 209 pp.
- BRAUN-BLANQUET, J. (1932): *Plant sociology; the study of plant communities*, McGraw-Hill, New York. Traducción castellana (1979): *Fitosociología. Bases para el estudio de las comunidades vegetales*, Blume, Madrid, 820 pp.
- BRAUN-BLANQUET, J. (1936): "La forêt de Yeuse méditerranéenne". *Bull. Soc. Sci. Nat. Nîmes* (Com. SIGMA, 45) 5, 147 pp.
- BRIDGES, E. M. (1978): "Soil, the vital skin of the Earth". *Geography*, 281, 254-361.
- BRIDGES, E. M. (1981): "Soil Geography: a subject transformed". *Progress in Physical Geography*, 5, 3, 398-407.
- BRIDGES, E. M. y DAVIDSON, D. A. (1982): *Principles and applications of Soil Geography*, Logman, London.
- BRYAN, K. (1935): "The place of geomorphology in the geographical sciences". *Ann. Ass. American Geogr.*, XL, 196-208.
- BUCKINGHAM, E. (1907): "Studies on the movement of soil moisture". *USDA Bureau Soils Bull.*, 38, 1-61.
- BÜDEL, J. (1950): "Das system der klimatischen morphologie". *Deutscher Geographentag*. München, 1948, 65-100.
- BÜDEL, J. (1977): *Klima-geomorphologie*, Borntrager, Berlín.
- BUDYKO, M. I. (1958): *The heat balance of Earth's surface*, Weather Bureau, Washington.
- BUDYKO, M. (1982): *The Earth's climate: Past and Future*, Academic Press, New York. 336 pp.
- BULLER, A. T. y McMANUS, J. (1972): "Simple metric sedimentary statistics used to recognize different environments". *Sedimentology*, 18, 1-2

- BUOL, S. W.; HOLE, F. D. y MCCRAKEN, R. J. (1980): *Soil genesis and classification*, Iowa State University Press, Ames. Traducción castellana (1983): *Génesis y clasificación de suelos*, Trillas, México, 406 pp.
- CAILLEUX, A. y TRICART, J. (1956): "Le problème de la classification des faits géomorphologiques". *Ann. Géog.*, LXV, 162-186.
- CAILLEUX, A. y TRICART, J. (1963): *Initiation à l'étude de sables et de galets*, CDU, Paris
- CALVO, A. y LA ROCA, N. (1988): "Slope form and soil erosion on calcareous slopes". En IMESON, A. C. y SALA, M. (EDS.) *Hillslope Processes*, Catena Supp. 12, 103-112.
- CAPEL, H. (1981): *Filosofía y Ciencia en la Geografía contemporánea. Una introducción a la Geografía*, Barcanova, Col. Temas Universitarios, Barcelona, 509 pp.
- CAPEL MOLINA, J. J. (1983): *Las inundaciones de Agosto de 1983 en el País Vasco, Cantabria y Navarra Atlántica*, Universidad de Murcia, Murcia.
- CARSON, M. A. y KIRKBY, M. J. (1972): *Hillslope form and processes*, Cambridge Univ. Press, London.
- CARTER, G. F. (1950): "Ecology-geography-ethnobotany". *Scientific Monthly*, 72, 73-80.
- CENTRO DE ESTUDIOS HIDROGRÁFICOS (1965): *Datos físicos de las corrientes clasificadas por el C. E. H.*, Ministerio de Obras Públicas, Madrid.
- CHANDLER, T. J. (1965): *The climate of London*, Longman, London.
- CHANG, F. M.; SIMONS, D. B. y RICHARDSON, E. V. (1965): "Total bed-material discharge in alluvial channels". *U. S. Geological Survey Water-Supply Paper*, 1498-I
- CHARTIER, M. M. (1966): "Recherches géographiques sur un bassin-versant". *Bull. de l'A. G. F.* París.
- CHOLLEY, A. (1950): "Morphologie Structural et Morphologie Climatique". *Ann. Géogr.*, LIX, 321-334.
- CHORLEY, R. J. (1962): "Geomorphology and general systems theory". *U. S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 500B.
- CHORLEY, R. J. (1967): "Models in geomorphology". En CHORLEY, R. J. y HAGGET, P. (EDS.): *Models in Geography*. Methuen, London. 59-96.
- CHORLEY, R. J. (1969): "The drainage basin as the fundamental geomorphic unit". CHORLEY, R. J. (ED), *Water, Earth and Man*, Methuen, London, 77-100.
- CHORLEY, R. J. (1971a): "The role and relations of Physical Geography". *Progress in Geography*, 3, 87-109.
- CHORLEY, R. J. (ED.) (1971b): *Introduction to Geographical Hydrology*, Methuen, London.
- CHORLEY, R. J.; DUNN, A. J. y BECKINSALE, R. P. (1964): *The history of the study of landforms or the development of geomorphology*, Methuen, London.
- CHORLEY, R. J. y KENNEDY, A. B. (1971): *Physical Geography: A Systems Approach*, Prentice Hall, London.
- CHOW, V. T. (1964): "Statistical and probability analysis of hydrologic data". En V. T. CHOW (ED.) *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York, 8-1-8. 42.
- CHOW, V. T. (1967): "Laboratory study of watershed hydrology". *Proc. Intern. Hydrol. Sympos.*, Fort Collins, Colorado, 1, 194-202
- CHOW, V. T. (1968): "Hydrologic systems for water resources management". In: *Hydrology in Water Resources Management, Conf. Proc.*, Water Resources Research Institute, Clemson Univ., Clemson, S. Carolina, 8-22
- CHURCH, M. A. (1984): "On experimental method in geomorphology". En: BURT, T. P. y WALLING, D. E. (EDS.): *Catchment experiments in fluvial geomorphology*. Geo-Books, Norwich, 563-580.
- CLAVERO, P. L.; MARTÍN VIDE, J. y RASO, J. M. (1982): "La Climatología actual: el uso de métodos estadísticos y modelos probabilísticos. Proyecto de un estudio termopluviométrico en Cataluña". *Notes de Geografía Física*, 8, 5-12.
- CLEMENTS, F. E. (1916): *Plant Succession, an Analysis of Development of Vegetation*, Carnegie Institution, Washington.
- CLINE, M. G. (1961): "The changing model of soil", *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 25, 442-446.
- COBERTERA, E. (1993): *Edafología aplicada*, Cátedra, Madrid, 157 pp.
- COOKE, R. U. y DOORNKAMP, J. C. (1974): *Geomorphology in environmental Management*, Clarendon Press, Oxford.
- COTTON, Ch. A. (1941): *Landscape as developed by the processes of normal erosion*, Cambridge Univ. Press, London.
- COURTNEY, F. M. y NORTCLIFF, S. (1977): "Analysis techniques in the study of soil distribution". *Progress in Physical Geography*, 1, 40-64.
- CRUICKSHANK, J. G. (1972): *Soil Geography*, Wiley y Sons, New York.
- CUADRAT, J. M. (1981): *El clima del Pirineo central. Ensayo de aplicación al turismo de montaña*, Departamento de Geografía, Universidad de Zaragoza, Zaragoza.
- CULLING, W. E. H. (1960): "Analytical theory of erosion". *Journal Geol.*, 69, 336-344.
- CURTIS, L. F. y TRUDGILL, S. T. (1974): *The measurement of soil moisture*. BGRG Technical Bulletin, 13.
- DALRYMPLE, J. B.; CONACHER, A. J. y BLONG, R. J. (1969): "A nine-unit hypothetical landsurface model", *Zeitschrift für Geomorphologie*, 12, 60-76.
- DANTIN CERECEDA, J. (1912): *Resumen fisiográfico de la Península Ibérica*, CSIC, Madrid.
- DANSEREAU, P. (1957): *Biogeography, An Ecological Perspective*, Ronald Press, New York.
- DAUPHINE, A.; DURAND-DASTES, F. y SAINTIGNON, M. (1980): "Informatique et statistique en climatologie géographique". *Inst. Sci. Hum.*, 48, 75-86.
- DAVIS, W. M. (1889): "Geographic methods in geologic investigation". *Nat. Geog. Mag.*, 1, 11-26.
- DAVIS, W. M. (1898): "The need of Geography in the University". *Educational Review*, X, 22-41.

- DAVIS, W. M. (1899): "The geographical cycle". *Geographical Journal*, XIV, 481-504.
- DAVIS, W. M. (1902): *Elementary Physical Geography*, Ginn y Co. Boston, 401 pp.
- DAVIS, W. M. y SNYDER, W. H. (1898): *Physical Geography*, Ginn, Boston, 429 pp.
- DE PLOEY, J. (ED.) (1983): "Rainfall simulation, Runoff and Soil Erosion". *Catena Supp.*, 4, 214 pp.
- DE PLOEY, J. (1990): "Modelling the erosional susceptibility of catchments in terms of energy", *Catena*, 17, 175-183.
- DECROLY, O. (1923): "La función de globalización y sus aplicaciones pedagógicas". *Revista de Pedagogía*, Madrid.
- DECROLY, O. y BUYSSE, I. (1924): "La Pédagogie Universitaire". *Revue Universitaire*, Bruxelles.
- DETTWILLER, J. (1982): "La loi de Buys Ballot". *La Météorologie*, 28, 61-69.
- DIETRICH, W. E. y DUNNE, TH. (1978): "Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain". *Zeitschrift für Geomorphologie*, Suppl. Bd. 29, 191-206.
- DIRECCIÓN GENERAL DE OBRAS HIDRÁULICAS (1977): *Aforos de sólidos en suspensión de la red experimental*. Resumen de datos de las cuencas del Duero, Tajo, Guadalquivir, Sur, Júcar y Ebro. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid.
- DIRECCIÓN GENERAL DE OBRAS HIDRÁULICAS (1981): *Anuarios de Aforos*, años 1978-79 a 1979-80 de las cuencas Norte, Duero, Tajo, Guadiana, Guadalquivir, Sur, Segura, Júcar, Ebro y Pirineo Oriental. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid.
- DOKUCHAEV, V. V. (1945): *Selected Works of V. V. Dokuchaev*. English translation by N. Kamer, U. S. Department of Commerce, Springfield, VA. Edición en ruso el 1883.
- DOLZ, J.; GÓMEZ, M. y MARTÍN, J. P. (EDS.) (1992): Inundaciones y redes de drenaje urbanas. *Actas III Curso de Avenidas*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, Monografía nº10, 428 pp.
- DOUGLAS, I. (1981): "The city as an ecosystem". *Progress in Physical Geography*, 5, 3, 315-367.
- DOUGLAS, J. E. y HUBBER, M. D. (1988): "History of Coweeta". In W. T. SWANK y D. A. CROSSLEY (EDS.) *Forest Hydrology and Ecology at Coweeta*, Springer-Verlag, New York, Ecological Studies 66, 17-31
- DUBREUIL, P. (1974): *Initiation à l'analyse hydrologique*, Masson, Paris
- DUCHAUFOR, P. (1970): *Précis de Pédologie*, Masson. París, 481 pp.
- DUNNE, T. (1981): "Concluding comments to the Christchurch Symposium on erosion and sediment transport in Pacific rim steplands". *Journal of Hydrology (NZ)*, 20, 111-114.
- DUNNE, T. (1988): "Field studies of hillslope flow processes". En M. J. KIRKBY, *Hillslope Hydrology*, John Wiley, Londres, 227-294.
- DUNNE, T. y BLACK, R. D. (1970): "An experimental investigation of runoff processes in permeable soils". *Water Resources Research*, 6, 478-490
- DUNNE, T. y LEOPOLD, L. B. (1979): *Water in Environment Planning*, W. H. Freeman y Co. San Francisco, 818 pp.
- DURST, C. (1951): *Climate. The synthesis of weather*, Boston.
- DYER, K. R. (1986): *Coastal and estuarine sediment dynamics*, John Wiley and Sons, Chichester.
- DYLICK, J. (1957): "Dynamical geomorphology, its nature and methods". *Bull. Soc. Sci. et Lett.*, Lodz. III-VIII, 12, 1-42.
- EDWARDS, K. J. (1982): "Palynology and Biogeography". *Area*, 14, 241-248.
- EHLERS, E. (1994): "ICSU and the Social Sciences". *ICSU Science International Newsletter*, 56, 17-20.
- EINSTEIN, H. A. (1950): "The bedload function for sediment transportation in open channel flows". *U. S. Department Agriculture Technical Bulletin*, 1026, 1-71.
- ELLENBERG, H. y MÜLLER-DOMBOIS, D. (1974): *Aims and methods of vegetation ecology*, John Wiley and Sons, New York.
- ELTON, C. (1927): *Animal Ecology*, Sidgwick y Jackson, London.
- ELWEL, H. A. y STOCKING, M. A. (1984): "Estimating soil life-span for conservation planning". *Tropical Agriculture*, 61, 2, 148-150.
- EMBLETON, C. (ED.) (1984): *Geomorphology of Europe*, Macmillan, London, 465 pp.
- EMMETT, W. W. (1979): "A field calibration of the sediment-trapping characteristics of the Helley-Smith sampler". *Geol. Surv. Prof. Paper*, 1139.
- ENGELUND, F. y HANSEN, E. (1967): *A monograph on sediment transport in alluvial streams*. Teknisk Forlag, Technical University of Copenhagen.
- ERGENZINGER, P. J. y CUSTER, S. G. (1983): "Determination of bedload transport using naturally magnetic tracers: first experiences at Squaw Creek, Gallatin County, Montana". *Water Resources Research*, 19, 1, 187-193.
- ESCORIZA, J. (1989): *Conocimiento psicológico y formación del profesorado*, Promociones y Publicaciones Universitarias, Barcelona.
- ESPÍN LÓPEZ, J. V. y RODRÍGUEZ LAJO, M. (1993): *L'avaluació dels aprenentatges a la universitat*. Pub. Universitat de Barcelona, Barcelona, 125 pp.
- ESSENWANGER, O. M. (1976): *Applied statistics in atmospheric science. Part. A: Frequencies and curve fitting*, Elsevier, Amsterdam, 412 pp.
- ESTIENNE, P. y GODARD, A. (1970): *Climatologie*, Colin, París.
- FAO (1976): *A framework for land evaluation*. FAO Soils Bull 32, Roma.
- FAO-UNESCO: (1970): *Soil map of the world 1: 5000000*, I-X, París.
- FANNING, D. S. y FANNING, M. C. B. (1989): *Soil: Morphology, Genesis, and Classification*, John Wiley, New York.
- FELIPO, M. T. y GARAU, M. A. (1987): *La contaminació del sòl: procés de degradació del medi edàfic i de l'entorn*. Diputació de Barcelona, Quaderns d'Ecologia Aplicada, 12. Barcelona. 85 pp.
- FERRER I CERVERO, V. (1994): *La metodologia didàctica a l'ensenyament universitari*, Pub. Universitat de Barcelona, Barcelona, 143 pp.
- FERRERAS, C. (1986): *Tendencias actuales en Biogeografía Vegetal*, Alhambra, Madrid.

FEYERABEND, P. (1975): *Against Method*, Verso, London. Traducción castellana (1984): *Adiós a la razón*, Tecnos, Madrid, 321 pp.

FINCH, V. C. y TREWARTHA, G. T. (1949): *Elements of Geography. Physical and Cultural*, McGraw-Hill, New York.

FLEURE, H. J. (1936): "Dr. Marion Newbegin: a tribute" En NEWBEGIN, M. I.: *Plant and animal geography*, Methuen, London, VII-VIII.

FLOHN, H. (1936): *Neue wege in der Klimatologie*, Frankfurt.

FOLK, R. L. y WARD, W. C. (1957): "Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters". *Journal of sedimentary petrology*, 27, 3-26.

FONT TULLOT, I. (1955): "Efectos de las depresiones frías en el tiempo de las Islas Canarias". *Revista de Geofísica*, XIV, 347-362.

FOSBERG, P. R. (1963): "Man's place in the island ecosystem". *Symposium of Tenth Pacific Science Congress*, Bishop, Honolulu.

FRANK, H. y MEDER, B. (1976): *Introducción a la pedagogía cibernética*, Troquel, Buenos Aires, 35 pp.

FRECAUT, R. (1971): "Quelques problèmes actuels de la recherche fondamentale en hydrologie fluviale". *Bull. de l'A. G. F.*, 389-390, 291-301, París.

FREEZE, R. A. (1988): "Mathematical models of hillslope hydrology". En M. J. KIRKBY, *Hillslope Hydrology*, John Wiley, Londres, 127-225

GALLART, F. y CLOTET, N. (1988): "Some aspects of the geomorphic processes triggered by an extreme rainfall event". En HARVEY, A. y SALA, M. (EDS.) *Geomorphic System, Catena Sup.* 13, 79-96.

GALLOWAY, J. N. y LIKENS, G. E. (1978): "The collection of precipitation for chemical analysis". *Tellus*, 30, 71-82.

GARCÍA, L. (1983): "Situaciones atmosféricas tipo que provocan aguaceros torrenciales en Comarcas del Mediterráneo español". *Estudios Geográficos*, 170, 61-85.

GARCÍA-BADELL, G. (1950): "Abu Zaccaria y los conocimientos agrícolas de los árabes españoles". *Bol. Biblgr. Agrícola*, Madrid, 14, 207-212.

GARCÍA-BADELL, G. (1951): *La agricultura en la Roma Antigua*, Ministerio de Agricultura, Madrid.

GARCÍA LOZANO, F. (1970): *Balance hídrico*, Centro de Estudios Hidrográficos, Madrid.

GARCÍA PEDRAZA, L. y GIMÉNEZ DE LA CUADRA, J. (1985): *Notas para la Historia de la Meteorología en España*, I. N. M., Madrid. 144 pp.

GARCÍA RUIZ, J. M. (1980): "Los estudios sobre hidrología continental en España". *Mélanges Hisp. a J. Sermet*, Univ. Toulouse-Le Mirail, 93-99.

GARCÍA RUIZ, J. M.; LASANTA, T.; ORTIGOSA, L. y ARNAEZ, J. (1986): "Pipes in cultivated soils of La Rioja, Spain". *Zeitschrift für Geomorphologie*, Suppl. 58.

GARCÍA SAINZ, L. (1959): "Las grandes crecidas fluviales norteamericanas e hispanolevantinas. Consecuencia de la acción del relieve en la circulación aérea". *Estudios Geográficos*, 74, 5-20.

GAUSSEN, H. (1933): *Géographie des Plantes*, Armand Colin, Paria.

GAUSSEN, H. (1965): "La division de l'Europe Occidentale en esembles floristiques". *Revue Roumaine de Biologie Botanique*, 10, 71-75. Budapest.

GEIKIE, A. (1897): *The founders of geology*, McMillan, New York.

GERRARD, A. J. (1981): *Soils and landforms*, Allen y Unwin, London.

GIL OLCINA (DTOR.) (1983): *Lluvias torrenciales e inundaciones en Alicante*, Instituto Universitario de Geografía, Alicante, 128 pp.

GILBERT, G. K. (1886): "The inculcation of the scientific method by exemple". *Amer. Jour. Sci. 3rd. Ser.*, 31, 284-299.

GILBERT, G. K. (1909): "The convexity of hill-tops". *Jour. Geol.*, 17, 344-350.

GILBERT, G. K. (1914): "The transportation of debris by running water". *U. S. Geol. Surv. Paper*, 86, 263 pp.

GILBERT, F. S. (1980): "The equilibrium theory of islands biogeography: fact or fiction?". *Journal of Biogeography*, 7, 209-235.

GILL, M. A. (1976): "Analysis of one-dimensional non-Darcy vertical infiltration". *Journal of Hydrology*, 31, 1-11.

GILLULY, J. (1970): "La filosofía científica de G.K.Gilbert". En: ALBRITON, C.C. *Filosofía de la Geología*, Cia. Ed. Continental, México, 275-283.

GLINKA, K. D. (1931): *Treatise on soil science*. 4ª edición. Traducido del ruso por A. Gourevitch. Programa de Israel para traducciones científicas, Jerusalén, 1963.

GLEASON, H. A. (1926): "The individualistic concept of the plant association". *Bull. Torrey Botanical Club*, 53, 7-26.

GODRON, M. (1968): *Code pour le relevé méthodique de la végétation et du milieu*, CNRS, Paris.

GONZÁLEZ, F. (1984): Desarrollo de la Ciencia del Suelo en España. *I Congr. Nac. Ciencia del Suelo*, III, Madrid, 5-39.

GONZÁLEZ QUIJANO, P. M. (1922): *Hidrología general de España*, Madrid

GOUDIE, A. (1990): *Geomorphological techniques*, Unwin Hyman, Londres.

GOUDIE, A. (1994): "The nature of physical geography: a view from the drylands". *Geography*, 194-209.

GOUNOT, B. (1969): *Méthodes d'étude quantitative de la végétation*, Masson, Paris.

GRAF, W. H. (1971): *Hydraulics of sediment transport*, Littleton, Water Resources Publications.

GRAU, R. y LÓPEZ, M. (1984): "Para un esquema histórico del pensamiento geográfico". *Revista de Geografía*, XVIII, 19-29. Barcelona.

GRAU, R. y SALA, M. (1982): "La Geomorfología en sus tratados y manuales: un esquema histórico de la disciplina (1870-1982)". *Revista de Geografía*, XVI.

GRAU, R. y SALA, M. (1984): "Caracteres de la Geomorfología moderna". *Acta Geológica Hispánica*, 19, 2, 67-74.

GREEN, F. H. W. (1979): Potential evapotranspiration determined from lysimeters. *Rep. Inst. Geol. Sci.*, 79/6, 4-6.

GREGORY, K. J. (ed.) (1983): *Background to Palaeohydrology. A perspective*, John Wiley, New York.

GREGORY, K. J. (1985): *The nature of Physical Geography*, Arnold, London. 272 pp.

GREGORY, K. J. (ED.) (1987): *Energetics of Physical Environment: energetic approaches to Physical Geography*, Wiley y Sons, New York.

- GREGORY, K. J. y WALLING, D. E. (1973): *Drainage Basin Form and Process: A Geomorphological approach*, Arnold, London, 458 p.
- GREGORY, S. (1978): "The role of Physical Geography. - Its curriculum". *Geography*, 281, 251-264.
- GRIBBIN, J. (ED.) (1978): *Climatic Changes*, Cambridge University Press, Cambridge. 280 pp.
- GROVE, A. T. (1977): Desertification, *Progress in Physical Geography*, 1, 2, 296-310.
- GUERRA, A. (ED) (1968): *Mapas de suelos de España. Escala 1/1.000.000, con Descripción de las Asociaciones Principales de Suelos*, Instituto Nacional de Edafología y Agrobiología, CSIC. Madrid.
- GUIGO, M. (1983): "Géographie Physique, statistique et informatique". *Annales de Géographie*, 511, 268-283.
- GUTIÉRREZ ELORZA, M. y PEÑA MONNE, J. L. (1979): El karst del Villar del Cobo (Sierra de Albarracín). *Estudios Geológicos*, 35, 651-654.
- GUTIÉRREZ, M.; BENITO, G. y RODRÍGUEZ, J. (1988): "Piping in badland areas of the middle Ebro basin". En HARVEY, A. y SALA, M. (EDS.) *Geomorphic Systems, Catena Sup.* 13, 49-60.
- HACK, J. T. (1960): "Interpretation of erosional topography in humid temperate regions". *Amer. Jour. Sci.*, 258-A, 86-97. (Bradley volume).
- HAGGETT, P. y CHORLEY, R. J. (1967): "Models paradigms and the new Geography". En R. J. CHORLEY y P. HAGGETT, *Models in Geography*, Methuen, London, 19-42.
- HAINES-YOUNG, R. H. y PETCH, J. R. (1986): *Physical Geography: Its nature and methods*, Harper y Row, London, 230 pp.
- HAMELIN, L. E. (1957): "Précision au sujet des termes de débit, d'écoulement et de ruissellement en hydrologie". *Cahiers de Géographie*, 2, 115-139, Quebec.
- HARDING, A. F. (ED.) (1982): *Climate Change in Later Prehistory*, Edinburgh University Press, Edinburgh. 210 pp.
- HARDY, M. E. (1920): *The Geography of Plants*, Clarendon Press, Oxford.
- HARDY, R.; WRIGHT, P.; GRIBBIN, J. y KINGTON, J. (1983): *El libro del clima*, Blume, Madrid.
- HARE, F. K. (1973): "La climatología basada en la energía y su frontera con la Ecología". En CHORLEY, R. J. (ED.), *Nuevas tendencias en Geografía*. IEAL, Madrid. 251-279.
- HARRIS, D. R. (1969): "Agricultural systems, ecosystems and the origins of agriculture". En P. J. UCKO y G. W. DIMBLEBY (EDS.), *The domestication and exploitation of plant and animals*, London, Duckworth, 4-15.
- HARRISON, C. M. (1975): *The description and analysis of vegetation*, Blackwell, Oxford, 175 pp.
- HARTSHORNE, R. (1959): *Perspective on the Nature of Geography*, Rand McNally, Chicago.
- HARVEY, D. (1969): *Explanation in Geography*, Arnold, London. 521 pp.
- HENDERSON SELLERS, A. (1987): *La evolución de la atmósfera*, Pirámide, Madrid.
- HENNING, W. (1966): *Phylogenetic Systematics*, Univ. Illinois Press.
- HERAS, R. (1983): *Recursos hidráulicos. Síntesis, metodología y normas*, Colegio de Ingenieros de Caminos, Madrid.
- HERNÁNDEZ PACHECO, E. (1932): Síntesis fisiográfica y geológica de España, *Trab. Museo Cien. Nat., Ser. Geol.*, Barcelona, 38.
- HERNANDO, A. (1979): "El trabajo de campo en la enseñanza de la Geografía". *Aportacions en Homenatge al Geògraf Salvador Llobet*, Dept. de Geografia, Universitat de Barcelona, 113-118.
- HEWLETT, J. D. (1961): *Soil moisture as a source of base flow from steep mountain watersheds*. U. S. Dept. Agric. Forest Serv., Southeastern Forest Experiment Station, Asheville, North Carolina, Paper N°132, 11p.
- HOLT-JENSEN, A. (1980): *Geography, its history and concepts*, Harper y Row, London.
- HORTON, R. E. (1932): "Drainage basins characteristics". *Am. Geophys. Union Tr.*, 350-361.
- HORTON, R. E. (1945): "Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical application of quantitative morphology". *Bull. Geol. Soc. America*, 56, 281-370.
- HOWARD, A. D. (1965): "Geomorphic systems, equilibrium and dynamics". *Am. J. Sci.*, 263, 302-312.
- HUFTY, A. (1976): Introduction à la climatologie, P.U.F., París, 264 pp. Traducción castellana: 1984: *Climatología*, Ariel, Barcelona, 292 pp.
- HUGGET, R. J. (1975): "Soil landscape systems: a model of soil genesis", *Geoderma*, 13, 1-22.
- HUGUET DEL VILLAR, E. (1909): *Geografía general*, Col. Manuales Soler, 79, Barcelona, 631 pp.
- HUGUET DEL VILLAR, E. (1916): *Archivo geográfico de la Península Ibérica*, La Académica, Barcelona, 256 pp.
- HUGUET DEL VILLAR, E. (1929): *Geobotánica*, Labor, Barcelona, 339 pp.
- HUGUET DEL VILLAR, E. (1921): *El valor geográfico de España. Ensayo de Ecética*. Sucesores de Rivadeneyra, Madrid, 300 pp.
- HUGUET DEL VILLAR, E. (1937): *Los suelos de la Península Luso-Ibérica*, Thomas Murphy, Londres, 416 pp. Mapa E:1/1500000.
- HUGUET DEL VILLAR, E. (1950): *Geo-Edafología. Método Universal de Tipología de los suelos como base de su cartografía harmónica*. Edición e introducción por J. Martí Henneberg, 1983, Publicacions de la Universitat de Barcelona, Barcelona.
- HUXLEY, Th. H. (1877): *Physiography: An introduction to the study of nature*, Macmillan, London.
- IZQUIERDO, J. (1945): *Nueva Geografía Física*, Prieto, Granada, 388 pp.
- JACOBS, W. (1946): "Synoptic climatology". *Bull. Amer. Met. Soc.*, 306-311.
- JANSA, J. M. (1963): "La corriente en chorro mediterránea". *Saitabi*, 13, 87-104.
- JENNY, H. (1941): *Factors of soil formation*, McGraw-Hill, New York.
- JENNY, H. (1961): "Derivation of state factor equations of soils and ecosystems". *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 25, 385-388.

- JOHNSON, W. M. (1963): "The pedon and the polypedon", *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 27, 212-215.
- JOHNSON, D. W. (ED.) (1964): *Geographical Essays by William Morris Davis*, Dover Pub. Inc., New York, 777 pp.
- JOHNSTON, R. (ED.) (1985): *The Future of Geography*, Methuen, London, 342 pp.
- KAZMANN, R. G. (1971): *Modern hydrology*, Harper y Row, New York, 365 pp.
- KING, L. C. (1953): "Canons of landscape evolution". *Bull. Geol. Soc. America*, 64, 721-752.
- KING, C. A. M. (1964): *Oceanography for geographers*, Arnold, London.
- KING, C. A. M. (ED.) (1976): *Landforms and Geomorphology: concepts and history*, Hutchinson y Ross, Strudsburg, Penn.
- KING, P. B. y SCHUMM, S. A. (1980): *The Physical Geography (Geomorphology) of W. M. Davis*, Geo Books, Norwich, 217 pp.
- KIRKBY, M. J. (1971): "Hillslope process-response models based on the continuity equation". En BRUNSDEN, D. (ED.): *Slopes, form and process*, Institute Brit. Geogr. Spec. Publication, 15-30.
- KIRKBY, M. J. (1975): "Hydrograph modelling strategies". En: PEEL, R. F.; CHISHOLM, M. D. y HAGGETT, P. (EDS.): *Processes in Physical and Human Geography*, Academic Press, London, 69-90.
- KIRKBY, M. J. (ED.) (1978): *Hillslope Hydrology*, John Wiley, Chichester.
- KIRKBY, M. J. (1988): "Hillslope runoff processes and models". *J. Hydrology*, 100, 315-339.
- KIRKBY, M. J.; NADEN, P. S.; BURT, T. P. y BUTCHER, D. P. (1987): *Computer simulation in Physical Geography*, John Wiley and Sons, Chichester.
- KITTREDGE, J. (1944): "Estimation of the amount of foliage of trees and stands". *Journal of Forestry*, 42, 905-921.
- KNAPP, B. (1979): *Elements of geographical hydrology*, Allen y Unwin, London.
- KNISEL, W. G. (1980): *CREAMS: A field-scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems*. U.S. Dept. of Agriculture, Conservation Research Report, 26, Washington, 640 pp.
- KÖPPEN, W. (1906): *Klimakunde I*. Traducido por el FCE, en 1923.
- KOSTER, E. (1964): *Granulometrische und Morphometrische Messmethoden an Mineralkörnern*, Enke Verlag, Stuttgart.
- KREBS, C. J. (1978): *Ecology: the experimental analysis of distribution and abundance*, Harper y Row, New York.
- KUBIENA, W. W. (1952): *Claves sistemáticas para la clasificación de suelos*, CSIC, Madrid.
- KUHN, T. S. (1962): *The structure of scientific revolution*, Chicago Univ. Press, Chicago. Traducción castellana: 1971, *La estructura de las revoluciones científicas*, FCE, México, Breviarios 213, 319 pp.
- LACOSTE, Y. y SALANON, R. (1973): *Biogéographie*, Masson, Paris. Traducción castellana (1973): *Biogeografía*, Oikos-Tau, Barcelona, 271 pp.
- LAKATOS, I. (1970): *Falsification and the methodology of scientific research programmes*, Cambridge Univ. Press, Cambridge. 196 pp.
- LAMB, H. H. (1972-77): *Climate: Present, Past and Future*, Methuen, London, 2 Tomos.
- LANDSBERG, H. E. (1970): *The urban climate*, Academic Press, London.
- LARONNE, J. B. y DUNCAN, M. J. (1989): "Constraints on duration of sediment storage in a wide, gravel-bed river, New Zealand". *Int. Assoc. Hydrol. Sci., Publ.*, 184, 165-172.
- LAURSEN, E. M. (1958): "The total sediment load of streams". *Journal of Hydraulic Engineering*, 84, 1-36.
- LE ROY LADURIE, E. (1967): *Histoire du climat depuis l'an mil*, Flammarion, París.
- LEACH, W. (1933): *Plant Ecology*, Methuen, London.
- LEHRE, A. K. (1982): "Sediment budget of a small coast range drainage basin in North-Central California". En: SWANSON, F. J., JANDA, R. J., DUNNE, T. y SWANSTON, D. N. (EDS.): *Sediment budget and routing in forested drainage basins*, U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Technical Report PNW-141, 67-77.
- LEITH, C. E. (1975): "The design of a statistical-dynamical climate model and statistical constraints of the predicability of climate". *The Physical basis of Climate modelling*, GARP Publ. Ser., 16, 137-141.
- LEOPOLD, L. B. (1962): "The vigil network". *Bull. Ass. Inter. Hydr. Sci.*, 7, 5-9.
- LEOPOLD, L. B. y LANGBEIN, W. B. (1962): *The concept of entropy in landscape evolution*, U. S. Geol. Surv. Prof. Paper 500A.
- LEOPOLD, L. B. y MADDOCK, T. (1953): *The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications*, US Geol. Survey Prof. Paper 252.
- LEOPOLD, L. B. y WOLMAN, G. (1957): *River channel patterns: braided, meandering and straight*, US Geol. Survey Prof. Paper 282-B, 39-84.
- LEOPOLD, L. B.; WOLMAN, G. y MILLER, J. P. (1964): *Fluvial Processes in Geomorphology*, Freeman, San Francisco, 522p.
- LEOPOLD, L. B.; EMMETT, W. W. y MYRICK, R. M. (1966): *Channel hillslope processes in a semi-arid area, New Mexico*, U. S. Geol. Survey Profe. Paper, 352G, 193-253.
- LEWIS, W. V. y MILLER, M. M. (1955): "Kaolin model glaciers". *Journal of Glaciology*, 2, 533-538
- LIKENS, G. E.; BORMANN, F. H.; PIERCE, R. S.; EATON, J. S. y JOHNSON, N. M. (1977): *Biogeochemistry of a forested ecosystem*, Springer, New York.
- LIN, J. y HAMASAKI, J. (1983): "Pore geometry: a new system for quantitative analysis and 3-D display". *Journal of Sedimentary Petrology*, 53, 670-672.
- LINDLEY, D. (1973): *Making decisions*, Wiley interscience, Londres.
- LLOBET, S. (1975): Materiales y depósitos periglaciares en el macizo del Montseny. antecedentes y resultados. *Revista de Geografía*, 9, 35-58.
- LLOPIS, A. (1926): "La Geografía en el mundo de Decroly". *Revista de Pedagogía*, Noviembre, Madrid.
- LLORENS, P. y GALLART, F. (1992): "Small basin response in a Mediterranean mountainous abandoned farming area". *Catena*, 19, 309-320.
- LOCKWOOD, J. G. (1985): *World Climates Systems*, Arnold, London, 304 pp.
- LÓPEZ BERMÚDEZ, F. y otros (1979): "Inundaciones catastróficas, precipitacio-

- nes torrenciales y erosión en la provincia de Murcia". *Papeles del Departamento de Geografía*, VIII, 49-91.
- LÓPEZ BERMÚDEZ, F. (1984): "Geomorfología y medio ambiente". En VARIOS *Geografía y medio ambiente*, Monografías de la Dirección General del medio ambiente, MOPU, Madrid, 71-110.
- LÓPEZ BERMÚDEZ, F. (1988): "Desertificación: Magnitud del problema y estado actual de las investigaciones". Monografía Sociedad Española de Geomorfología, 2, 155-170.
- LÓPEZ GÓMEZ, A. (1983): "Las lluvias catastróficas mediterráneas". *Estudios Geográficos*, 170-171, 11-29.
- LÓPEZ GÓMEZ, A. (1986): "Climatología". En GARGIA, A. (ED.), *Teoría y práctica de la Geografía*, Alhambra, Madrid, 154-163.
- LÓPEZ GÓMEZ, A. y FERNÁNDEZ, F. (1985): "El clima de las ciudades". *Arbor*, XXI, 474, 13-32.
- LORENZO PARDO, M. (1933): "Plan General de Obras Hidráulicas". *Plan Nacional de Obras Hidráulicas*, Ministerio de Obras Públicas, 2, 267-282.
- MACAR, P. (1946): *Principles de géomorphologie normale, étude des formes du terrain des régions de climat humide*, Masson, Liège.
- MacARTHUR, R. H. (1972): *Geographical Ecology: patterns in the distribution of species*, Harper y Row, New York.
- MARBUT, C. F. (1935): *The Soils of the United States*. USDA Atlas of American Agriculture, part 3, Advance sheets, 8.
- MARGALEF, R. (1973): *Los océanos*, Omega, Barcelona.
- MARGALEF, R. (1974): *Ecología*, Omega, Barcelona.
- MARGALEF, R. (1984): *Limnología*, Omega, Barcelona.
- MARIN, M. (1991): "La dimensió geogràfica de la investigació contemporània en climatologia". *Revista Catalana de Geografia*, Barcelona, VI, 16, 56-70.
- MARTI HENNEBERG, J. (1984): *Emilio Huguet del Villar (1871-1951). Cincuenta años de lucha por la ciencia*. Pub. Universidad de Barcelona, Barcelona, 240 pp.
- MARTÍN MENDILUCE, J. M. (1981): *El agua en España*, Centro de Estudios Hidrográficos, Madrid.
- MARTÍN VIDE, F. J. (1985): Pluges i inundacions a la Mediterrània. *Ketres*, Barcelona, 132 pp.
- MARTÍN VIDE, J. (1986-87): "Acerca de la medición y la experimentación en Geografía Física. Un ejemplo climatológico: la "isla del calor"". *Notes de Geografía Física*, 15-16, 21-29.
- MARTÍNEZ DE PISÓN, E. y MUÑOZ JIMÉNEZ, J. (1972): Observaciones sobre la morfología del Alto Gredos. *Estudios Geográficos*, 129, 597-690.
- MARR, J. E. (1900): *The Scientific Study of Scenery*, Methuen, London, 362 pp.
- MARTONNE, E. DE (1909): *Traité de Géographie Physique*, Colin, París.
- MARTONNE, E. DE (1925-1927): *Traité de Géographie Physique*. Vol. I: Climat et Hydrographie. Vol. II: Le relief du sol. Vol. III: Biogéographie, Colin, París, 1345 pp.
- MARTONNE, E. DE (1939): *Abrégé de Géographie Physique*, Colin, París.

- MARTONNE, E. DE (1946): "Géographie zonale: la zone tropicale". *Ann. Géogr.*, LV, 1-8.
- MARZOL, M. V. (1989): *Proyecto Docente*, Dpto. Geografía Física, Universidad La Laguna, 227 pp.
- MASACHS, V. (1947): "Los factores determinantes de la distribución espacial de los tipos de régimen de los ríos de la Península Ibérica". *Estudios Geográficos*, 28, 475-492.
- MASACHS, V. (1948): *El régimen de los ríos peninsulares*, CSIC, Barcelona. 511 pp.
- MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY (1956): *Design and operation of an hydraulic analogue computer for studies of freezing and thawing of soils*, Department of Civil Engineering, U. S. Army, Technical Report, 62.
- MATEU, J. F. (1984): "El problema medioambiental de las aguas continentales". En VARIOS, *Geografía y medio ambiente*, Monografías de la Dirección General del Medio Ambiente, MOPU, Madrid, 133-182.
- MATHER, J. R. y otros (1980): "Climatology: The challenge for the eighties". *Professional Geographer*, 32, 285-292.
- MATTHEWS, J. A. (1979): "Refutation of convergence in a vegetation succession". *Naturwissenschaften. Springer Verlag*, 66, 1, 47-49. Berlín.
- MEDAWAR, P. B. (1979): *Advice to young scientist*, Haper and Row, New York.
- MEDINA, M. (1960): *Meteorología básica sinóptica*, Paraninfo, Madrid, 320 pp.
- MENSUA, S. y IBAÑEZ, M. J. (1978): Correlación entre glaciares de acumulación y terrazas fluviales: las terrazas fosilizadas del Gállego y Cinca. *Geographica*, 20, 191-203. PORTA, J.; GÓMEZ ACEVEDO, M. y ROQUERO, C. (1994): *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*, Mundi-Prensa, Madrid, 807 pp.
- MEYER-PETER, E. y MÜLLER, R. (1948): Formulas for bedload transport. *Proceedings of 2nd Meeting of the International Association of Hydraulic Research*, Stockholm, 39-64.
- MILANKOVITCH, M. (1936): "Matematische Klimalehre". En KÖPPEN, W. y GEIGER, R., *Handbuch der Klimatologie*, Berlín.
- MIRO-GRANADA, J. (1983): "Consideraciones generales sobre la meteorología de las riadas en el Levante español". *Estudios Geográficos*, 170-171, 41-59.
- MOPT (1992): *Guía para la elaboración de estudios del medio físico*, Monografías de la Secretaría del Estado para las Políticas del Agua y del Medio Ambiente, Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Madrid.
- MORAWETZ, S. (1932): "Eine Art von Abtragungsvorgang". *Pett. Geogr. Mitt.*, 78, 231-233.
- MORE, R. (1967): "Hydrological models and Geography". En CHORLEY, R. J. y HAGGET, P. (EDS), *Models in Geography*, London, 145-185.
- MORENO, M. C. (1993): *Estudio del clima urbano de Barcelona: la "isla de calor"*, Oikos-tau, Barcelona.
- MORGAN, R. P. C.; QUINTON, J. N. y RICKSON, R. J. (1989): "Soil erosion prediction model for the European Community". *Sixth International Soil Conservation Conference*, Adis Abeba, Ethiopia.
- MUÑOZ, J. (1979): *El lugar de la Geografía Física*, Dpto. de Geografía, Universidad de Oviedo, 42 pp.
- MUÑOZ, J. (1984a): "Evolución y situación actual de la Geomorfología en Espa-



- ña". En: *Homenaje a D. Manuel de Terán*, Universidad Complutense, Madrid, 313-334.
- MUÑOZ, J. (1984b): "Métodos y técnicas recientes en Geografía Física: la renovación metodológica y técnica de la Geografía Física española a través de los trabajos publicados en el período 1973-1982". *VIII Col. Geog. Esp.*, Ponencia 1, 33-45.
- MURATI, N. (1957): "El seminario y sus funciones". En: BOUNOCOURE, D. (ED.) *Temas de Pedagogía Universitaria*. Univ. Nac. de Litoral, Sta. Fé.
- NADEN, P. S. (1988): "Models of sediment transport in natural streams". En: ANDERSON, M. G. (ED.): *Modelling geomorphological systems*, John Wiley and Sons, Chichester, 217-258.
- NASH, J. E. (1957): "The form of the instantaneous unit hydrograph". *IAHS Publ*, 45, 1141-61.
- NELSON, G. (1978): "From Candolle to Croizat: comments on the History of biogeography". *Journal of the History of Biology*, 11, 269-305.
- NELSON, G. y PLATNICK, N. I. (1981): *Systematic and Biogeography: Cladistics and Vicariance*. Columbia Univ. Press. New York.
- NEWBIGIN, M. I. (1936): *Plant and animal Geography*, Methuen, London.
- NIKIFOROFF, C. C. (1959): "Reappraisal of the soil", *Science*, 129, 186-196.
- ODUM, E. P. (1975): *Ecology*. 2nd. ed., Holt Reinhart y Winston, New York.
- OLDFIELD, F. (1983): "Man's impact on the environment: some recent perspectives". *Geography*, 68, 245-256.
- ORTEGA, F. (1983): "Corología, biología y biogeografía histórica en torno a las causas de la distribución geográfica de los seres vivos". *Anales de Geografía de la Univ. Complutense de Madrid*, 3, 43-58.
- PAGNEY, P. (1976): *Les climats de la Terre*, Masson, París. Traducción castellano (1982): *Introducción a la Climatología*, Oikos-tau, Barcelona, 143 pp.
- PANAREDA, J. M. (1994): "Pautas per a fer un estudi de vegetació". *L'estudi de la vegetació de Catalunya, passat, present i futur*, Centre Excursionista de Catalunya, Montblanc-Martín, Barcelona, 11-18.
- PANAREDA, J. M. y RÍOS, J. (1985): "La conservación de los espacios naturales en las áreas periurbanas: el caso del delta del Llobregat". *IX Coloquio de Geografía* (Murcia), Ponencia II, 9pp, CESPU, Valencia.
- PARDE, M. (1932): *Fleuves et rivières*, Colin, París, 224 pp.
- PARDE, M. (1965): "Interet d'études hydrologiques approfondies sur des bassins expérimentaux occupant plusieurs milliers de km<sup>2</sup>". *Bull. de l'A. I. S. H*, X, 4, 13-19, Louvain.
- PASSEGA, R. (1964): "Grain size representation by C-M patterns as a geological tool". *Journal of sedimentary petrology*, 34, 830-847.
- PATTISON, W. (1964): "The four traditions of Geography". *The Journal of Geography*, 63.
- PEDELABORDE, P. (1957): "Le tourbillon, principe général a la base de la Climatologie dynamique". *Annales de Géographie*, 358, 481-498.
- PEDELABORDE, P. (1958): *Le climat du bassin parisien: essai d'une méthode rationnelle de climatologie physique*, Gnin, París. 2 Vols, 539 pp. y 116 pp.
- PEGUY, CH. P. (1958): "Introduction l'emploi des méthodes statistiques en Géographie". *Rev. de Gographie Alpine*, 36, 1-103.
- PELTIER, L. C. (1950): "The geographic cycle in periglacial regions as it is related to climat geomorphology". *Ann. Ass. Amer. Geog.*, 40, 219-236.
- PENCK, W. (1924): *Die morphologische analyse*, Stuttgart. (Trad. inglés, 1953).
- PEÑA, J. L. (1987): *Proyecto Docente y de Investigación*. Dpto. de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza.
- PEÑA MONNE, J. L. (1991): *El relieve*. Col. Geografía de España, Síntesis, Madrid.
- PEÑA, J. L.; LOZANO, M. V. y SÁNCHEZ, M. (1989): *IV Curso de Geografía Física*, Universidad de Verano de Teruel, Teruel.
- PESCHEL, O. y LEIPOLDT, G. (1880): *Physische Erdkunde*, Dunker y Humboldt, Leipzig, 2 Vols.
- PHILIPPSON, A. (1921): *Grundzge der Allegemeinen Geographie*, Akademische Verlagssellschaft, Leipzig, 2 Vols., 513 pp.
- PIÑOL, J.; LLEDO, M. J. y ESCARRE, A. (1991): "Hydrological balance of two Mediterranean forested catchments (Prades, northeast Spain)". *Hyd. Sci. Journal*, 36, 2, 96-107.
- PITA LÓPEZ, M. F. (1982): "Evolución conceptual y metodológica de la Climatología durante el siglo XX". *II Jornadas de Metodología y didáctica de la Geografía en Extremadura*, 41-51.
- PITTY, A. F. (1982): *The nature of Geomorphology*, Methuen, London.
- PLANS P. (1975): "Algunos aspectos de la enseñanza de la Geografía en la Universidad". *Revista de Geografía*, IX, 1-2-, 93-105.
- POLUNIN, N. (1960): *Introduction to Plant Geography and Some Related Sciences*, Longman, London.
- PONCET, A. (1968): "Influences végétales, notamment forestières, sur le bilan hydrique et esquisse d'un programme montagnard". *Mélanges offerts. M. Parde*. Ophrys. GAP.
- POPPER, K. R. (1934): *The logic of Scientific Discovery*, Hutchinson, London. Trad. castellana (1973): *La lógica de la investigación científica*, Alianza, Madrid.
- POPPER, K. R. (1972): *Objective Knowledge*, Oxford University Press, Oxford. Trad. castellana (1982): *Conocimiento objetivo*, Tecnos, Madrid.
- PORTA, J. (DTOR.) (1988): *Introducció al coneixement del sòl: Sòls dels Païssos Catalans*, Fundació Enciclopèdia Catalana, Barcelona.
- PORTA, J.; GÓMEZ ACEVEDO, M. y ROQUERO, C. (1994): *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*, Mundi-Prensa, Madrid, 807 pp.
- PRENANT, M. (1933): *Géographie des Animaux*, Armand Colin, París.
- PRICE, W. E. y HEINDL, L. A. (1968): "What's Hydrology?". *Transactions, American Geophysical Union*, 49, 529-533.
- PUYOL, J. y FONS, J. L. (1981): *Los métodos de la enseñanza Universitaria*, EUNSA, Pamplona, 195 pp.
- QUENEY, P. (1963): *Recherches relatives l'influence du relief sur les éléments météorologiques*, Masson, París, 102 pp.

RAMOS, C. (1978): *Planificación física y ecología. Modelos y métodos*, EMESA, Madrid.

RAPP, A. (1960): "Recent development of mountain slopes in Kärkevagge and surrounding, northern Scandinavia". *Geogr. Annlr.*, 42, 65-100.

RASO, J. M.; MARTÍN VIDE, J. y CLAVERO, P. (1987): *Estadística básica para ciencias sociales*, Barcelona, Ariel.

RICHARDS, L. A. (1931): "Capillary conduction of liquids through porous mediums". *Physics*, 1, 318-333.

RICHARDS, K. S.; ARNETT, R. R. y ELLIS, S. (1985): *Geomorphology and Soils*, Allen y Unwin, London, 441 pp.

RICHTER, J. (1987): *The soil as a reactor: Modelling processes in the Soil*, Catena Verlag, Cremlingen, 192 pp.

RICHTOFEN, F. VON (1886): *Führer für Forschungsreisende. Anleitung zu Beobachtungen ber Gegenstnde der Physischen Geographie und Geologie*, Jnecke, Hannover, 719 pp.

RIECKEN, F. F. y SMITH, G. D. (1949): "Lower categories of soil classification: family, series, type and phase", *Soil Sci.*, 67, 107-115.

RIVAS MARTÍNEZ, S. (1962): "Contribución al estudio fitosociológico de los hayedos españoles". *Anales Inst. Bot. Cavanilles*, 20, 97-128.

RIVAS MARTÍNEZ, S. (1973): "Avance sobre una síntesis corológica de la Península Ibérica, Baleares y Canarias". *Anales del Instituto Botánico A. J. Cavanilles*, 33, 69-87. Madrid.

RIVIERE, J. W. M. LA (1991): "Cooperation between natural and social scientists in global change research: imperatives, realities, apportunities". *International Social Science Journal*, 130, 619-627.

RODRIGO, M. J. (1985): La teoría de Piaget. En: LA VEGA, J. (ED.): *Psicología evolutiva*, UNED, Madrid.

ROMERO DÍAZ, M. A.; LÓPEZ-BERMÚDEZ, F.; THORNES, J. B.; FRANCIS, C. y FISHER, G. C. (1988): "Variability of overland flow erosion rates in a semi-arid Mediterranean environment under matorral cover, Murcia, Spain". En HARVEY, A. y SALA, M. (EDS.) *Geomorphic Systems, Catena Sup.* 13, 1-12.

ROQUERO, C. (1949): "Las Actas de los Congresos Internacionales de Ciencia del Suelo". *Bol. Biblgr. Agrícola*, Madrid, 10, 218-221.

ROQUERO, C. (1956): "La Agricultura en las Etimologías de San Isidoro de Sevilla". *Bol. Biblgr. Agrícola*, Madrid, 37, 165-172.

ROSSELLO, V. M. (1970): Clima y morfología pleistocena en el litoral mediterráneo español. *Papeles Dept. Geografía Murcia*, 2, 79-119.

ROSSELLO, V. M. (DTOR.) (1983): "La riada del Júcar (Octubre 1982)". *Cuadernos de Geografía*, 32-33, 331 pp.

ROSS, S. M. (1987): "Energetics of Soil Processes". En K. J. GREGORY (ED.) *Energetics of Physical Environment*, John Wiley, London.

ROUSE, H. (1937): "Modern conceptions of mechanics of fluid turbulence". *Transactions American Society Civil Engineers*, 102, 436-505.

ROYSE, C. F. (1968): "Recognition of fluvial environments by particle-size characteristics". *Journal of Sedimentary Petrology*, 38, 1171-1178.

RUBEY, A. (1938): "The force required to move particles on a stream bed". *U. S. Geol. Survey Professional Paper*, 189-E.

RUBIO, J. M. (1982): "Conceptos y métodos en Biogeografía". *II Jornadas de Métodos y Didáctica de la Geografía*, 53-66. Universidad de Extremadura.

RUBIO, J. M. (1984): "Biogeografía y Medio Ambiente". *Geografía y Medio Ambiente*, 11-132. Ministerio de Obras Públicas.

RUNGE, E. C. A. (1973): "Soil development sequence and energy models", *Soil Science*, 115, 183-193.

SALA, M. (1983a): "Fluvial and slope processes om the Fuirosos basin, Catalan Ranges, North East Iberian Coast". *Zeitschrift für Geomorphologie*, 27, 4, 393-411.

SALA, M. (1983b): "Los experimentos de campo en Geomorfología". Sumario de Comunicaciones. *VIII Coloquio de Geógrafos Españoles*, Barcelona. 57-64.

SALA, M. (1984): "Geomorfología actual: guía conceptual, temática y bibliográfica". *Revista de Geografía*, XVIII, 1-2, 209-244.

SALA, M. y GALLART, F. (1988): *Métodos y técnicas para la medición en el campo de procesos geomorfológicos*, Sociedad Española de Geomorfología, Monografía 1, 103 pp.

SALA, M. y ROVIRA, (1986): "La xarxa de vigilància fluvial: concepte i tècniques d'aplicació". En: SALA, M. y MARTIN VIDE, J. (eds.): *Mesura i experimentació en Geografía Física. Notes de Geografía Física*, 15-16, 7-20.

SALA, M. y CALVO, A. (1990): "Response of Four Different Mediterranean Vegetation Cover Types to Runoff and Erosion". En THORNES, J. (ED.), *Vegetation and Erosion*, Wiley y Sons, Chichester, 347-363.

SALA, M.; RUBIO, J. L. y GARCÍA-RUIZ, J. M. (Eds.) (1991): *Soil Erosion Studies in Spain*, Geoforma, Logroño, 228 pp.

SALA, M. y INBAR, M. (1992): "Some hydrologic effects of urbanization in Catalan rivers" *Catena*, 19, 363-378.

SALA, M. y RUBIO, J. L. (1994): *Soil erosion and degradation as a consequence of forest fires*, Geoforma, Logroño, 275 pp.

SALAS, J. D. (1993): "Analysis and modeling of hydrologic time series". En: MAIDMENT, D. R. (ED.): *Handbook of Hydrology*, McGraw-Hill, New York.

SANCHO, J. (1980): "Las diapositivas, instrumento de gran valor didáctico para la enseñanza de la Geografía". *Didáctica Geográfica*, 6, 47-53.

SANCHO, C.; GUTIÉRREZ, M.; PEÑA, J. L. y BURILLO, F. (1988): A quantitative approach to scarp retreat starting from triangular slope facets, Central Ebro Basin, Spain. En HARVEY, A. y SALA, M. (EDS.) *Geomorphic Systems, Catena Sup.* 13, 139-146.

SANZ DONAIRE, J. J. (1974): La cabecera del arroyo de Navacerrada: un valle periglacial en cuna. *Geographica*, 16, 5-11.

SAUER, C. O. (1952): *Agricultural Origins and Dispersals*, American Geog. Soc., New York.

SAUER, C. O. (1956): "The agency of man on the earth". En W. L. THOMAS. Jr. (ED.): *Man's role in changing the face of the earth*, University of Chicago Press, Chicago, 49-60.

- SCHEIDEGGER, A. E. (1960): *The Physics of Flow through Porous Media*, Univ. of Toronto Press, Toronto.
- SCHEIDEGGER, A. E. (1961): "Mathematical models of slope development". *Bull. Geol. Soc. Am.*, 72, 37-49.
- SCHEIDEGGER, A. E. (1970): *Theoretical geomorphology*, Springer, Berlín.
- SCHICK, A. (1967): "Suspended sampler and fluorescent sand". En: *Etude des versants et dynamique fluviale*, Rev. Geomorph. Dyn., 4, 181-183.
- SCHICK, A. P. (1977): "A tentative sediment budget for an extremely arid watershed in the Southern Negev". En: DOEHRING, D. O. (ED.): *Geomorphology in Arid Regions*. Binghamton, NY, SUNY, 139-163.
- SCHICK, A. P. y LEKACH, J. (1993): "An evaluation of two ten-year sediment budgets, Nahal Yael, Israel". *Physical Geography*, 14, 225-238.
- SCHMIDT, J. (1991): "A mathematical simulation model to simulate rainfall erosion". En: BORK, H. R.; DE PLOEY, J. y SCHICK, A. P. (EDS.): *Erosion, transport and deposition processes*. Catena Suppl. 19, 101-109.
- SCHNEIDER, S. H. y DICKINSON, R. E. (1974): "Climate modelling", *Rev. of Geophys. y Space Physics*, 12, 447-493.
- SCHUMM, S. A. (1956): "Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey". *Bull. Geol. Soc. Am.*, 67, 597-646.
- SCHUMM, S. A. (1967): "Palaeohydrology: application of modern hydrologic data to problems of the ancient past". *Inter. Hydrol. Symp.* (Fort Collins) Proceedings, 1, 185-193.
- SCHUMM, S. A. (1977): *The Fluvial System*, John Wiley, New York.
- SCHUMM, S. A. y LICHTY, R. W. (1965): "Time, space and causality in geomorphology". *Amer. Journal Sci.*, 263, 110-119.
- SELLERS, W. D. (1973): "A new global climatic model". *Journal of Applied Meteorology*, 12, 241-254.
- SHAW, E. (1983): *Hydrology in practice*, Van Nostrand Reinhold International, London.
- SHEN, H. W. y JULIEN, P. (1993): "Erosion and sediment transport". En: MAIDMENT, D. R. (ED.): *Handbook of Hydrology*, McGraw-Hill, New York, 12. 1.
- SHERMAN, L. K. (1932): "Streamflow from rainfall by the unit-graph method". *Engineering News Record*, 108, 501-505.
- SHINOZAKI, K. (1964): A quantitative analysis of plant form. *Jap. Journal of Ecology*, 14, 97-105.
- SHREVE, R. L. (1975): "The probabilistic approach to drainage basin geomorphology". *Geology*, 3, 527-529.
- SIMBERLOFF, D. (1972): *Models in Biogeography*, Freeman, Cooper y Co., San Francisco.
- SIMMONS, I. G. (1974): *The Ecology of Natural Resources*, Arnold, London.
- SIMMONS, I. G. (1980): *Biogeography*, Arnold, London. Traducción al castellano (1985): *La Biogeografía*, México, Fondo de Cultura Económica.
- SIMONSON, R. W. (1959): "Outline of a generalized theory of soil genesis", *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 23, 152-156.
- SLAYMAKER, O. (1980): "Geomorphic field experiments. Inventory and prospect". *Z. Geomorph. Supp.*, 35, 183-194.
- SMITH, G. D. (1968): "Soil classification in the United States". En: *FAO: World Soil resources*, Rep. 32, 6-24.
- SOIL SURVEY STAFF (1960): *Soil classification, a comprehensive system. 7th approximation*, U. S. Dept. Agr. y U. S. Govt. Printing Office, Washington.
- SOLE SABARIS, L. (1940): "Superficies de erosión en las Cordilleras Litorales Catalanas", *Anales Univ. Barcelona*, I, 145-158.
- SOLE SABARIS, L. y LLOPIS LLADO, N. (1952): Geografía Física: el Relieve, En: TERAN, M. DE (DTOR.) *La Península Ibérica*, vol. I, Montaner y Simón, Barcelona.
- SOLER, F. (1987): *Memoria de Proyecto Docente*, ETSII, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.
- SOMERVILLE, M. (1848): *Physical Geography*, London.
- SORRE, M. (1934): "Introduction". En PIERY y AL., *Traité de Géographie*, París.
- SOUTHWOOD, T. R. E. (1978): *The components of diversity*, Blackwell Scientific Publishers, Oxford.
- SPOSITO, G. (1987): "The "Physics" of soil Water Physics", In E. R. LANDA y S. INCE, *The History of Hydrology*, American Geophysical Union, Washington, 93-98.
- STOCKING, M. A. (1980): "Soil loss estimation for rural development: a position of Geomorphology", *Zeitschrift fr Geomorphologie*, Sup. 36, 264-273.
- STODDART, D. R. (1966): "Darwin's impact on Geography". *Annals Association of American Geographers*, 56, 683-698.
- STODDART, D. R. (1967): "Organism and ecosystem as geographical models". En: CHORLEY, R. J. y HAGGETT, P. : *Models in Geography*, London, Methuen, 511-548.
- STODDART, D. R. (1981): "Biogeography: dispersal and drift". *Progress in Physical Geography*, 5, 575-590.
- STOTT, P. A. (1984): "History of Biogeography". En J. A. TAYLOR (ED.) *Themes in Biogeography*, Croom Helm, London, 1-24.
- STRAHLER, A. N. (1950): "Equilibrium theory of erosional slopes approached by frequency distribution analysis". *Am. Journal Sci.*, 248, 673-696.
- STRAHLER, A. N. (1951): *Physical Geography*, Wiley, New York, 746 pp.
- STRAHLER, A. N. (1952a): "Dynamic basis of geomorphology". *Bull. Geol. Soc. Amer.*, LXIII, 923-938.
- STRAHLER, A. N. (1952b): "Quantitative geomorphology of erosional landscapes". *XIX Congr. Geol. Inter., Alger*, XV, 341-354.
- STRAHLER, A. N. (1954): "Statistical analysis in geomorphic research". *Jour. Geol.*, LXII, 1-25.
- STRAHLER, A. N. (1964): "Quantitative Geomorphology of drainage basins and channel networks". En CHOW, V. T. (ED), *Handbook of applied Hydrology*, New York, McGraw-Hill.
- SUESS, M. J. (ed.) (1982): *Examination of water for pollution control*, Oxford, Pergamon.
- SUPAN, A. (1884): *Grundzüge der physischen Erdkunde*, Von Veit, Leipzig.
- SUPAN, A. y OBST, E. (1927-30): *Grundzüge der physischen Erdkunde*, W. de Gruyter, Berlín.

- SYNDER, F. F. (1938): "Synthetic unitgraphs". *Trans. American Geophys. Union*, 19, 447-458.
- TAMES, C. (1958): "Los grupos principales de suelos de la España Peninsular". En: *Mapa Agronómico Nacional*, Ministerio de Agricultura, Madrid.
- TANSLEY, A. G. (1923): *Practical Plant Ecology*, George Allen y Unwin, London.
- TARDY, Y. (1986): *Le cycle de l'eau*, Masson, Paris.
- TAYLOR, J. A. (1984a): "Biogeography". *Progress in Physical Geography*, 8, 1, 94-101.
- TAYLOR, J. A. (1984b): "Biogeography: heritage and challenge. En J. A. TAYLOR (ED.) *Themes in Biogeography*, Croom Helm, London, 336-381.
- THE ENCICLOPEDIA OF SEDIMENTOLOGY (1978): A: FAIRBRIDGE, R. W. y BOURGEOIS, J. (eds.): *Encyclopedia of Earth Sciences*, vol. VI, Pennsylvania, Dowden, Hutchinson y Ross, p. 378-379.
- THOMAS, H. A. y FIERING, M. B. (1962): "Mathematical synthesis of streamflow sequences for the analysis of river basins by simulation". En MAASS, T. H. : *Design of water resource systems*, Harvard University Press, Harvard.
- THORBURY, W. D. (1954): *Principles of Geomorphology*, John Wiley, New York.
- THORNE, C. R. y LEWIN, J. (1979): "Bank processes, bed material movement and planform development in a meandering river". En: RHODES, D. D. y WILLIAMS, G. P. (EDS.) *Adjustments of the fluvial system*, Kendall-Hunt, Dubuque, Iowa, 117-137.
- THORNES, J. B. (ED.) (1990): *Vegetation and Erosion: Processes and Environments*, Wiley y Sons, Chichester, 518 pp.
- THORNES, J. B. y BRUNSDEN, D. (1977): *Geomorphology and time*, Methuen, London.
- THORNTHWAITE, C. W. (1948): "An approach towards a rational classification of climate". *Geographical Review*, XXXVIII, 1, 55-94.
- THORP, J. y SMITH, G. D. (1949): "Higher categories of soil classification: order, suborder and great soils groups", *Soil Sci.*, 67, 117-126.
- TINLIN, R. M. y THAMES, J. L. (1969): A passive direct electric analog of a watershed. *Trans. American Geophys. Union*, 50, 609.
- TORRES CAMPOS, R. (1895): "Nuestros ríos". *Bol. Real Soc. Geográfica*, 37, 7-32.
- TRICART, J. (1952): "La géomorphologie et la notion d'échelle". *Rev. Geom. Dyn.*, III, 213-218.
- TRICART, J. (1953): "Climat et géomorphologie". *Cahiers de l'information géographique*, 2, 39-51.
- TRICART, J. (1962): *L'épiderme de la Terre. Esquisse d'une géomorphologie appliquée*, Masson, Paris.
- TRICART, J. y CAILLEUX, A. (1955): *Introduction a la Géomorphologie climatique*, CDU, Paris.
- TROLL, G. (1939): "La Geoeología y la diferenciación a escala planetaria de los ecosistemas de alta montaña". *Geographica*, 1973 Num. 2 (traduc. española).
- TRUDGILL, S. T. (1977): *Soil and Vegetation Systems*, Oxford University Press, London.
- TRUDGILL, S. T. (1983): "Soil Geography: spatial techniques and geomorphic relationships", *Progress in Physical Geography*, 345-360.
- TRUDGILL, S. T. y BRIGGS, D. J. (1977): Soil and land potential. *Progress in Physical Geography*, 1, 2, 319-332.
- TURC, L. (1961): "Evaluation des besoins en eau d'irrigation, vapotranspiration potentielle". *Ann. Agronom*, 12, 1, 13-49.
- ÚBEDA, X. y SALA, M. (1995): *Guia pràctica per a l'estudi dels sols*, Text-guia, Universitat de Barcelona, 47 pp.
- UDVARY, M. D. F. (1969): *Dynamic Zoogeography*, Van Nostrand Reinhold, Ney York.
- UNESCO (1976): *Atlas of the World Water Balance*, Hydro-Meteorological Pub. House, UNESCO Press.
- USDA (1982): Proceedings of the Workshop on estimating erosion and sediment yield in rangelands. *Agricultural Research Service*, ARM-W-26.
- VAN RIJN, L. C. (1984): Sediment transport, Part II: Suspended load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110, 11, 1613-1641.
- VAN WYCK, D. B. (1983): Apparatus for sampling of streams for chemical quality and sediment. *Water South African*, 9, 88-92.
- VILA VALENTI, J. (1983): *Introducción al Estudio Teórico de la Geografía*, Ariel, Barcelona, 377 pp.
- VERSTAPPEN, H. Th. (1968): *Geomorphology and Environment*, Inaugural Adress, I. T. C., Delf, 23 pp.
- WACKER, F. W. (1943): "Vergleichende Pr\_fung von Landwirtschaftlich brauchbaren. Verfahren der Grunlandsbestandesuntersuchung". *Pflanzenbau*, 19, 328-363.
- WALLING, D. E. (1977a): Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin. *Water Resources Research*, 13, 531-538.
- WALLING, D. E. (1977b): Limitation of the rating curve technique for estimating suspended sediment loads, with special reference to British rivers. *Int. Assoc. Sci. Hydrol. Publ.* 122, 34-48.
- WALLING, D. E. (1979): "Hydrological Processes". En GREGORY, K. J. y WALLING, D. E. (EDS.), *Man and Environmental Processes*, Dawson Publishing, Folkestone, 57-81.
- WARBURTON, J. y DAVIES, T. (1994): "Variability of bedload transport and channel morphology in a braided river hydraulic model". *Earth Surface Processes and Landforms*, 19, 403-421.
- WARD, R. C. (1970): "Some aspects of the recent growth of 'geographical' hydrology". *Geography*, 55, 390-406.
- WARD, R. C. (1975): *Principles of Hydrology*, McGraw-Hill, London, 367 pp.
- WATTS, D. (1971): *Principles of Biogeography: an Introduction into the Functional Mechanims of Ecosystems*, McGraw-Hill, London.
- WEBSTER, R.; LESSELLS, C. M. y HODGSON, J. M. (1976): "DECODE - computer program for translating soil profile descriptors into text", *Journal of Soil Science*, 27, 218-226.

- WEEKS, E. P. (1978): *Field determination of vertical permeability to air in the unsaturated zone*, US Geol. Surv. Prof. Paper, 1051.
- WHITTAKER, R. H. (1953): "A consideration of climax theory -the climax as a population and pattern". *Ecological Monographs*, 23, 41-78.
- WIGLEY, T. M. L.; INGRAM, M. J. y FARMER, G. (EDS.) (1981): *Climate and History*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 513 pp.
- WILSON, A. G. (1981): *Geography and the Environment Systems Analytical Methods*, John Wiley, Chichester, 267 pp.
- WISE (1977): "Geography in Universities and schools". *Geography*, 277, 249-258.
- WISCHMEIER, W. H. y SMITH, D. D. (1960): "A Universal Soil Loss Equation to guide conservation farm planning". *7th Inter. Congr. Soil Science*, 2, 418-425.
- WISCHMEIER, W. H. y SMITH, D. D. (1978): Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning. *U. S. D. A., Agric. Handbook*, 537.
- WOLMAN, M. G. y MILLER, J. P. (1960): "Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes". *Jour. Geol.*, LXVIII, 54-74.
- WOOLDRIDGE, S. W. (1950): "The Upland Plains of Britain: Their origin and Geographical significance". *Adv. Sci.*, 7, 16, 162-175.
- WORSLEY, P. (1985): "Physical Geography and the Natural environmental Sciences". En P. WORSLEY, *Physical Geography and the Natural Environmental Sciences*, London, Methuen, 27-43.
- YANG, C. T. y STALL, J. B. (1976): Applicability of unit stream power equation. *Journal of the Hydraulics Division*, 102, 559-568.
- YODER, D. y LOWN, J. (1995): "The future of RUSLE: Inside the new Revised Universal Soil Loss Equation". *Journal Soil y Water Conservation*, 50, 5, 484-489
- YOUNG, A. (1972): *Slopes*, Oliver and Boyd, Edinburgh, 288 pp.
- ZACAR, D. (1982): *Soil Erosion*, Elsevier, Amsterdam, 547 pp.
- ZEMAN, L. J. y NYBORG, E. O. (1974): "Collection of chemical fallout from the atmosphere". *Can. Agric. Eng.*, 16, 69-72.

## Índice de materias

- acumulación (principio de), 30, 47
- Agroclimatología, 54, 259
- Antropogeografía, 26
- Anuario de Aforos, 76
- argumento inductivo, 30
- asociación vegetal, 142
- atmósfera, 14, 41, 52, 55, 78
- estados atmosféricos, 41-43, 50, 61
- estructura vertical, 49
- sondeos aerológicos, 50
- balance,
- de sedimento, 175, 195
- energético, 61, 150, 167, 175,
- hidrológico, 61, 71, 77, 84, 175, 177
- hidroquímico, 199
- iónico, 221
- radiativo, 61
- térmico, 63
- Bernoulli (teorema de), 72
- biocenosis, 143, 156
- Bioclimatología, 54
- Biogeografía, 26, 118, 137-139, 142, 147, 151, 155
- ambiental, 157
- cladística, 140, 149
- cultural, 146, 152
- descriptiva, 144, 152
- ecológica, 142-143, 157
- funcional, 144, 152
- histórica, 152, 156-157
- medición en, 204
- modelización en, 143, 167
- natural, 152
- técnicas cuantitativas, 150, 153, 155
- tradicional o darwinista, 138-140
- biosfera, 138, 157
- Bjerknes (teoría de), 51, 58  
(véase también Frente Polar)
- Braun-Blanquet (sistema de), 140, 155, 205
- Cadenas de Markov, 165, 179
- canal de ensayos hidráulicos, 166, 168, 261  
(véase también modelos físicos a escala)
- Carta Mundial de Suelos, 129
- catastrofismo, 95, 105
- catena de suelos, 127, 136
- caudal (véase escorrentía, flujo de agua)
- Centro de Estudios Hidrográficos, 69, 77
- Chézy (fórmula de), 73, 88, 209

- ciclo geográfico o de erosión, 18, 93, 98-100, 109
- ciclo hidrológico, 68, 70-71, 81, 84  
elementos, 67-68, 78-79, 198  
modelización, 175
- Ciencia,  
de la Tierra, 19  
del Medio Ambiente Humano, 242  
del Suelo, 115, 117, 119, 123 (véase también Edafología)  
empírica, 21, 29  
normal, 35-36  
revoluciones científicas, 35-36, 98
- circulación general atmosférica, 46, 52-53, 55, 61, 179
- circulación superficial (véase escorrentía)
- cladograma, 140, 149
- clases prácticas, 241, 249-250, 261, 270  
de campo, 241, 249, 251, 255, 258, 261, 270  
de gabinete, 250  
de laboratorio, 250, 254, 261, 270
- clases teóricas, 241, 245, 261, 270  
en grandes grupos, 245  
en pequeños grupos, 247
- clasificación, 21, 155
- clima, 26, 41-42, 57, 59, 65  
análisis, 58  
cambio climático, 64  
clasificaciones, 42, 49-51, 63  
distribución, 42, 46-48  
elementos, 41, 48, 55, 59, 61  
mapas sinópticos, 48, 50, 62  
urbano, 54, 65
- Climatología, 26, 41-42, 118  
aplicada o ambiental, 42, 65  
analítica, 42, 55, 57, 60  
cuantitativa, 57  
dinámica, 42, 52, 55, 57, 61-63  
Escuelas, 52, 56  
estadística, 42, 53, 57  
física, 42  
histórica, 64  
modelización en, 53, 60, 179  
observación y medición en, 45-46, 58-60, 198-201
- regional, 42, 63  
sinóptica, 56, 62
- Climatonomía (véase Climatología física)
- Confederaciones Hidrográficas, 69, 77
- confirmación (principio de), 30
- continuidad, 70, 108, 164
- control (véase experimentación, medición)
- Corología, 148, 156
- Coriolis (teorema de), 46
- Cosmografía, 25-26
- Coweeta (laboratorio de Hidrología y cuencas experimentales), 74
- creacionismo, 95
- criticismo (principio de), 33
- cuenca de drenaje, 24, 71, 77-80, 83, 103, 127, 152, 198  
experimentación, 77, 83, 87, 193, 195, 214  
modelización, 81, 83, 162, 164, 166, 169, 173
- Darcy (ley de), 74, 86, 162, 204
- Davis (teoría de), 18, 93, 98, 116, 167  
(véase también ciclo de erosión o geográfico)
- Década Hidrológica Internacional, 77, 89
- deducción (principio de), 31, 33, 159, 187
- demarcación, 34
- denominación, 21
- denudación, 97-99, 176, 237
- deposición seca, 199-200
- desertificación, 65, 131
- diagrama termodinámico (véase Stüve)
- diseño experimental, 21, 33, 189, 191  
(véase también experimentos)
- docencia, 241  
en Geografía Física, 241, 253  
evaluación, 254  
métodos, 243  
técnicas, 253  
universitaria, 241, 245
- Dokuchaev, 18, 97, 120, 122, 125, 135  
(véase también clasificación y génesis del suelo)
- Du Buat (ecuación de), 73
- Ecética, 13
- ecosistema, 126, 143, 150, 152-153, 158  
homeóstasis, 151  
Ley de los mínimos, 151  
propiedades, 150
- ecuación de reserva, 175, 177
- Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (véase USLE)
- Edafología, 26, 115, 117-118, 123, 129, 133  
agronómico-práctica, 119  
ambiental, 128, 136  
cuantificación en, 127  
geológica-teórica, 119  
medición en, 132-134, 202-203, 225-226  
modelización en, 130  
(véase también Ciencia del Suelo)
- empirismo, 29-30, 33
- endopedón, 124
- enseñanza, 241-242  
(véase también docencia)
- entradas atmosféricas, 199, 214
- epipedón, 124
- equilibrio,  
dinámico, 97, 102-103, 109  
estable, 109
- erosión, 85, 87, 94, 96-98, 107, 116-117  
medición, 129-130, 132, 237  
modelización, 162, 171, 174
- escala, 14, 78, 108-109, 168  
modelos a, 82, 167-168
- escorrentía, 67, 69, 79, 89, 97, 101, 107, 169, 175, 179  
(véase también flujo de agua)
- Estación Internac. de Geobotánica Mediterr. y Alpina (Sigma), 142
- estaciones de aforo, 70, 85, 194, 211  
(véase también flujo de agua)
- evaporación, 68, 72, 79, 84, 200
- evapotranspiración, 63, 68, 78, 84  
potencial, 230-231
- excepcionalismo, 190
- experimentos, 21, 34, 83, 186-187, 189-191, 239
- de campo, 107  
en laboratorio, 107  
geomorfológicos, 107  
interpretación, 186, 191  
tipología, 107, 190  
(véase también diseño experimental)
- falsabilidad (principio de), 33
- Fisiografía, 26
- Fitoclimatología, 54
- Fitogeografía, 138, 147
- flujo de agua en cauces, 78  
análisis físico, 84, 87, 214, 219  
análisis químico y calidad, 68, 84, 89, 214-215, 220  
caudal, 70-72, 84, 87, 165, 185, 211  
frecuencia, 231-232  
medición, 71, 73, 211-212  
modelización, 74, 172, 178-179  
muestreo, 212-214, 216  
sucesos extremos, 85, 87, 233  
velocidad, 70, 72-74, 84, 88, 208-209  
(véase también escorrentía, transporte de sedimento)
- flujo de energía, 42, 61, 103, 126-127, 150, 167, 174
- flujo de materia, 103, 126-127, 150, 167, 174
- Fórmula Racional (en Hidrología), 165
- Frente Polar (teoría del), 51
- generalismo, 190
- Geobotánica, 115, 139, 154
- Geo-edafología, 115
- Geografía, 13, 17, 23, 68  
absoluta o matemática, 17  
comparativa, 17  
de las plantas, 147  
(véase también Biogeografía, Fito-geografía)
- de los suelos, 128  
(véase también Ciencia del Suelo, Edafología)
- disciplinas afines, 15, 23  
general, 17  
Humana, 13, 15-16, 19, 23, 138

médica, 54  
relativa o climática, 17  
Regional, 16, 18-19, 151  
revolución cuantitativa, 16, 29  
Geografía Física, 13-17, 20, 22-24, 117, 241-243  
ambiental o aplicada, 18, 20, 23, 185, 242  
analítica, 14  
cronológica, 20  
cuantitativa, 16, 29, 153, 170  
determinista, 18  
disciplinas afines, 15, 23  
Escuelas, 17-19  
libros de texto, 24-26  
ramas, 16, 20, 26  
universidades europeas, 241, 257  
geometría hidráulica, 104, 168, 208  
Geomorfología, 26, 67, 91, 117, 129, 133, 154  
ambiental, 110, 113  
climática, 100, 110, 112-113  
ciencias complementarias, 93, 94  
cuantificación en, 16, 94, 101, 105, 240  
davisiana, 59, 93, 98, 155  
de vertientes, 77, 104, 112, 167, 194  
dinámica o de procesos, 16, 20, 94, 101, 104, 112-113, 117  
estructural, 93, 99, 111-112  
experimentación en, 94, 105-107, 194  
fluvial, 76, 104, 112, 168, 194, 212, 214  
funcional, 104  
histórica, 98, 110, 113  
medición en, 107-108, 208, 214-219, 225  
modelización en, 108, 162  
regional, 114  
Gilbert, 97, 102  
hipótesis múltiples, 34  
ley de capacidad de transporte de cursos de agua de, 98  
gradualismo, 96  
Gumbel (distribución de), 233  
Hadley-Ferrel (teoría de), 46, 56, 58  
Hidrografía (véase Hidrología, disciplinas complementarias)

hidrograma unitario, 172  
Hidrología, 26, 67-68, 71, 93, 118  
ambiental, 88  
disciplinas complementarias, 67, 77, 87  
de lagos y mares, 87  
de vertientes, 74, 76, 83-85, 131, 194  
experimentación en, 74, 81, 83, 85, 194, 225  
fluvial, 76, 84, 86  
histórica, 87-88  
medición en, 86, 198, 202-203, 211-212  
modelización en, 81, 83, 162, 166, 175, 179  
regional, 76, 88  
subterránea, 67, 86, 169  
urbana, 68, 89  
hidrosfera, 14  
Hidrogeología (véase Hidrología subterránea)  
Horton (leyes de), 16, 74, 80-81, 101  
Huguet del Villar, 13, 19, 26, 115, 123, 146  
(véase también Geografía Física, Edafología, Geobotánica)  
humedad del suelo, 68, 84-85, 176, 179, 202, 225  
índices climáticos, 49  
índices de aridez específicos, 54  
inducción (principio de), 30, 33  
infiltración, 71-72, 78, 169, 176, 203-204  
Institutos Meteorológicos, 48  
interceptación, 68  
Jenny (ecuación de), 125-126  
Köppen (clasificación de), 41, 48-49, 63  
(véase también clima)  
Lakatos, 36  
(véase también programas de investigación)  
litosfera, 14, 77  
límites de Atterberg, 226

lógica científica, 29, 34  
LUCDEME (Lucha contra la Desertificación en el Mediterráneo), 195  
magnitud y frecuencia, 105, 193  
Manning (fórmula de), 74, 88, 210  
mediciones, 21, 187, 190, 192, 238-239  
de campo, 107, 198, 239  
de laboratorio, 107  
experimentales, 107, 186  
muestras, 188  
observacionales, 107  
y errores, 21, 187, 193  
y estadística, 187, 193  
y teoría científica, 186-187, 193  
(véase también métodos y técnicas)  
meteorización, 96, 194  
método científico, 29, 37, 71  
analítico, 14, 21  
deductivo, 21, 30, 33, 187, 189, 238-239  
inductivo, 30, 190  
métodos y técnicas, 192, 197  
de campo, 198  
de laboratorio, 155, 219  
docentes, 243  
en Biogeografía, 150, 155, 204  
en Climatología, 58-60, 198, 228, 230  
en Edafología, 129, 133, 202-204, 225, 227  
en Geomorfología, 105, 208, 214, 227, 235  
en Hidrología, 69-71, 84, 208, 211, 251  
modelado terrestre (véase relieve)  
modelización, 22, 108  
en ciencias puras, 160  
en Geografía Física, 161, 239  
en Ingeniería o ciencias aplicadas, 160  
leyes de (véase similitud dinámica)  
modelo,  
AR, 179  
ARMA, 179  
CREAMS, 173  
deductivo-nomológico, 31  
EROSION 2D, 174  
hexagonal, 241

geomorfológico de nueve unidades de vertiente, 127, 267  
GROWVEG, 178  
HEC-1, 174  
LINEAR, 178  
RUSLE, 130 (véase también USLE)  
STORFLO, 176  
TOPMODEL, 178  
USLE, 129, 171  
modelos, 22, 81, 159  
abstractos, 165  
analógicos, 108, 162, 169  
clasificaciones, 163, 166  
construcción y verificación, 160, 163, 171, 176, 181  
de balance de masa, 174-175  
de procesos, 174  
determinísticos, 22, 164, 171  
estocásticos, 22, 53, 164, 178  
físicos a escala, 73, 108, 167  
función, 160  
matemáticos, 108, 166, 169  
naturales representativos, 166  
y errores, 163, 183  
y teorías, 159-160, 163, 165  
Morfología, 25, 100  
morfometría, 74  
clasificaciones, 80-81  
(véase también leyes de Horton)  
muestreo (véase flujo de agua, sedimento)  
neptunismo, 95  
observaciones particulares, 30  
Oceanografía (véase Hidrología de aguas y mares)  
Ontografía, 26  
Organización Meteorológica Internacional, 48  
paisaje, 14, 24, 65, 91, 100, 138, 158  
Ecología del, 151  
geomorfológico, 94  
Morfología del, 151

Paleoclimatología (véase Climatología histórica)  
Paleohidrología (véase Hidrología histórica)  
Palinología, 148, 152  
paradigma científico, 20, 35-37, 93-94, 97, 103, 154  
Parques Nacionales, 158  
pedión, 128  
pediplanización, 100  
peneplanización, 98, 100  
Pedología, 115, 119  
(véase también Ciencia del Suelo, Edafología)  
permeabilidad, 203  
Playfair (ley de), 96  
porosidad, 226  
precipitación, 67-69, 71, 78, 198, 228  
  modelización, 165, 180  
programas de investigación, 36, 110, 258  
proyectos, 247, 252, 261, 268  
prueba estadística, 189, 193  
  
racionalismo, 31, 33  
racionalismo crítico, 33, 188, 191  
red de vigilancia fluvial, 195  
relativismo, 35  
relieve, 14, 26, 91, 95, 98, 105, 110  
  cuantificación, 101  
  modelización, 108, 166  
  sistema, 103  
RESEL (Red de Estaciones de Seguimiento y Evaluación de la Erosión), 195  
revolución científica (véase Ciencia)  
revolución cuantitativa (véase Geografía)  
Rossby (sistema de), 52, 58, 61  
  
sedimento, 152, 188  
  análisis, 225-227  
  concentración, 235  
  distribución granulométrica, 107, 188, 227-235, 239  
  material disuelto (véase total de sólidos disueltos)

  mineralogía, 227  
  muestreo, 188, 212-214  
  (véase también suelo, transporte de sedimento)  
  seminario, 247-249, 261, 262  
  similitud dinámica (leyes de), 167-168  
  sistema, 20, 24, 68, 170, 193  
    climático, 57  
    crecimiento-forma, 143  
    de vertientes, 24, 194, 214  
    filogenético, 140 (véase también Biogeografía cladística)  
    fitosociológico, 142, 155  
    fluvial, 24, 79, 194, 214  
    geomorfológico, 79, 97, 103  
    hidrológico, 79  
    modelización, 170, 176  
    morfogenético, 103, 112 (véase también Geomorfología climática)  
    suelo, 125-127  
    (véase también teoría de sistemas)  
  sólidos disueltos, 85, 214, 221  
  Stüve (diagrama de), 50  
  suelo, 26, 115-116, 121, 133, 169  
    agrícola, 115, 119-120, 123, 131, 133, 135  
    cartografía, 121, 123, 128, 131, 134  
    clasificación, 120-121, 124-125, 131, 135  
    conservación, 89, 129-130, 133, 135  
    degradación, 117, 129, 132-133, 136  
    distribución espacial, 117, 128, 136  
    estudios parciales, 116  
    génesis, 116-117, 119-120, 124, 127, 135  
    modelización, 130-131, 169, 177  
    muestreo, 134  
    normales y anormales, 122  
    procesos edáficos, 127, 130, 134-135  
    propiedades, 124, 126, 128, 134, 225  
  
  taxonomía, 150  
    de plantas, 143, 147  
    de suelos, 124  
  teoría, 31  
    científica, 21, 159, 197

  de ciclos, 167  
  de pediplanización, 100  
  de peneplanización, 98, 100 (véase también ciclo geográfico o de erosión)  
  de sistemas, 16, 79, 102, 150  
  de tectónica de placas, 93, 140, 149  
  estadística, 21, 22, 197  
  monoclimática, 144 (véase también vegetación climax-climática)  
  policíclica, 144  
  verificación, 159-160, 163-164, 189  
  y experimentación, 186  
  y modelos, 159-160  
  Thiessen (método de), 60, 228  
  Thornthwaite (método de)  
    clasificación de climas, 63  
    evapotranspiración potencial, 231  
    índice de aridez, 54  
    (véase también clima)  
  topoclimatología, 42  
  transporte de sedimento, 76, 80, 84-85, 87, 213, 233  
    cálculo, 237  
    modelización, 165, 166, 168, 172, 180

  muestreo, 212-213, 216-217  
  tutorías, 249, 261, 264

uniformitarismo, 96, 105  
UGI (Unión Geográfica Internacional), 16, 19  
USLE, 129, 171

vegetación, 14, 26, 138, 155  
  aspectos cualitativos, 206  
  aspectos cuantitativos, 204  
  biomasa, 132, 154, 206  
  cartografía, 156, 158  
  clasificaciones, 143, 155  
  climax-climática, 144-145, 157  
  descripción, 143-144  
  distribución espacial, 137, 139-140, 147, 156 (véase también Corología)  
  modelización, 143  
  productividad primaria neta, 154, 206  
  sucesión, 144-145, 157  
  vicariancia, 149, 156

Zoogeografía, 138, 140, 147, 156