



Tema 1

Introducción a los métodos de investigación en ecología

Esta asignatura trata los aspectos metodológicos generales de la investigación ecológica. En este sentido, la Ecología, como otras ciencias naturales, intenta explicar “cómo funciona el mundo” (Hilborn y Mangel, 1977), buscando descripciones generales de los diferentes procesos o fenómenos observables, y estableciendo modelos que permitan predecir, de la forma más general, exacta, precisa y sencilla posible, el resultado de dichos procesos o fenómenos. La ciencia se fundamenta en la obtención de datos que permitan confrontar las diferentes descripciones antes mencionadas. Estas descripciones o explicaciones de los fenómenos que ocurren en la naturaleza se denominan **hipótesis**, elemento central sobre el que se articula el método científico, y cuyos planteamientos filosóficos de deben principalmente a Karl Popper (Figura 1.1).

No existe una única definición de hipótesis. La presentada en el párrafo anterior es una definición planteada desde una perspectiva general, pero consideraremos también aquí algunas otras que la complementan. Así, una hipótesis puede definirse igualmente como una proposición del tipo “*si A, B, C y D se cumplen, entonces resulta X*” (Wiens, 1989), de lo que se deduce una característica importante: las hipótesis generan predicciones. De esta forma, una hipótesis científicamente aceptable debe establecer predicciones claras sobre el fenómeno objeto de estudio. Por otra parte, para Curtis y Barnes (2001) una hipótesis es “*una idea que puede ser investigada*



Figura 1.1. Karl Popper (1902-1994). Es considerado el filósofo de la ciencia más influyente del siglo XX.
Fuente: <http://plato.stanford.edu/entries/popper/>

científicamente". En este sentido apunta también la definición de Smith (1996): "*una afirmación de causalidad que puede ser contrastada experimentalmente*" Sin embargo, en el contexto de esta asignatura, esta última definición resulta demasiado restrictiva, ya que como se comentará más adelante, no siempre las hipótesis se refieren a relaciones de causalidad (esto es, explicaciones sobre las causas de un determinado fenómeno), y no siempre requieren la realización de experimentos para su contraste. Sobre estas cuestiones profundizaremos algo más en los siguientes apartados, aunque sí conviene establecer aquí la distinción entre las hipótesis de un test o prueba estadística (las denominadas hipótesis nula H_0 , y alternativa, H_1), y las hipótesis científicas (o *hipótesis de trabajo*) de las que venimos hablando hasta ahora. Por lo general, unas y otras no se formulan en el mismo sentido (James y McCulloch, 1985; Underwood, 1990), aunque implícitamente hacen referencia a la misma cuestión planteada. Por ejemplo, una hipótesis de trabajo sería: "la contaminación por plomo reduce la fertilidad de la especie X", mientras que una hipótesis nula estadística podría ser que "no existen diferencias entre las medias de fertilidad de individuos de la especie X expuestos y no expuestos a la contaminación por plomo".

En cualquier caso es importante considerar que las hipótesis representan conjeturas sobre la naturaleza, es decir, plantean cuestiones que aún no están resueltas (Wiens, 1989). Este punto resulta extremadamente importante, ya que revela la esencia del método científico: obtención de datos (información que permite contestar las preguntas planteadas) y confrontación de los datos con las hipótesis (para lo que se recurre a pruebas estadísticas). De esta manera, aceptar o rechazar hipótesis, siguiendo un método formalmente establecido, se convierte en una actividad fundamental de la investigación científica. En otras palabras, a diferencia de la **lógica** (que como actividad intelectual, abstracta, se encarga de identificar *lo posible*), la **ciencia** es fundamentalmente una actividad empírica y aplicada que pretende identificar *lo probable* (Peters, 1991).

La jerga científica lleva fácilmente a la confusión entre muchos de sus términos. En general se asume que un conjunto amplio de hipótesis sobre algún campo concreto dentro de una disciplina científica, constituye el cuerpo de una **teoría**. Las teorías universalmente aceptadas y confirmadas se convierten en **leyes**. De esta forma, podría considerarse la distinción entre ley, teoría, hipótesis y modelo, según el grado de confirmación y generalización (Peters, 1991; Hilborn y Mangel, 1997). En el nivel inferior

se situarían los **modelos** (término que será ampliamente utilizado en esta asignatura), entendidos como “*la representación formal de la realidad*” (Rodríguez, 1999). Aquí utilizaremos principalmente los denominados **modelos estadísticos**, pero en Ecología se utilizan frecuentemente otros muchos tipos que se derivan de diferentes criterios de clasificación; tenemos así, por ejemplo, modelos analíticos (como el conocido modelo logístico que describe la dinámica denso-dependiente de una población), verbales, matriciales, deterministas, estocásticos, etcétera.

No todos los científicos, sin embargo, utilizan los términos de la ciencia con el mismo significado. En el libro de Peters (1991), por ejemplo, los términos ley, teoría e hipótesis, son considerados sinónimos. Y, puesto que los modelos establecen predicciones, Smith (1996) los considera equivalentes a las hipótesis. Por el contrario, Hilborn y Mangel (1997) establecen claramente que los modelos no son hipótesis: son herramientas para evaluar las hipótesis. Este es el criterio que, en general, adoptaremos en esa asignatura. Nos plantearemos hipótesis (aseveraciones relacionadas con ideas o preguntas sobre algún fenómeno o proceso de la naturaleza), que intentaremos investigar formalizando el problema mediante algún modelo estadístico (usualmente representado por una ecuación más o menos compleja).

De todo lo comentado hasta ahora podemos resumir que los principales aspectos metodológicos sobre los que se desarrolla la asignatura son tres: el procedimiento de obtención de datos, la elección de las pruebas estadísticas adecuadas, y la interpretación de los resultados. Pero hay además otra fase de la investigación científica, la primera y más importante, resumida en la célebre frase de Einstein: “*la formulación de un problema es más importante que su solución*”. Es la fase creativa, la que consiste en tener ideas, en plantearse preguntas y, en definitiva, en establecer las hipótesis. Lamentablemente esto difícilmente puede enseñarse en una asignatura. En ésta, a lo sumo, intentaremos estimular la imaginación y provocar la curiosidad.

Contraste de hipótesis

La investigación científica sigue una estructura lógica que se fundamenta en el contraste de hipótesis. Un esquema metodológico general se presenta en la Figura 1.2. Partiendo del concepto de hipótesis como elemento central, el esquema plantea inicialmente dos vías diferentes: la **inductiva** (en la que las hipótesis se generan a partir de

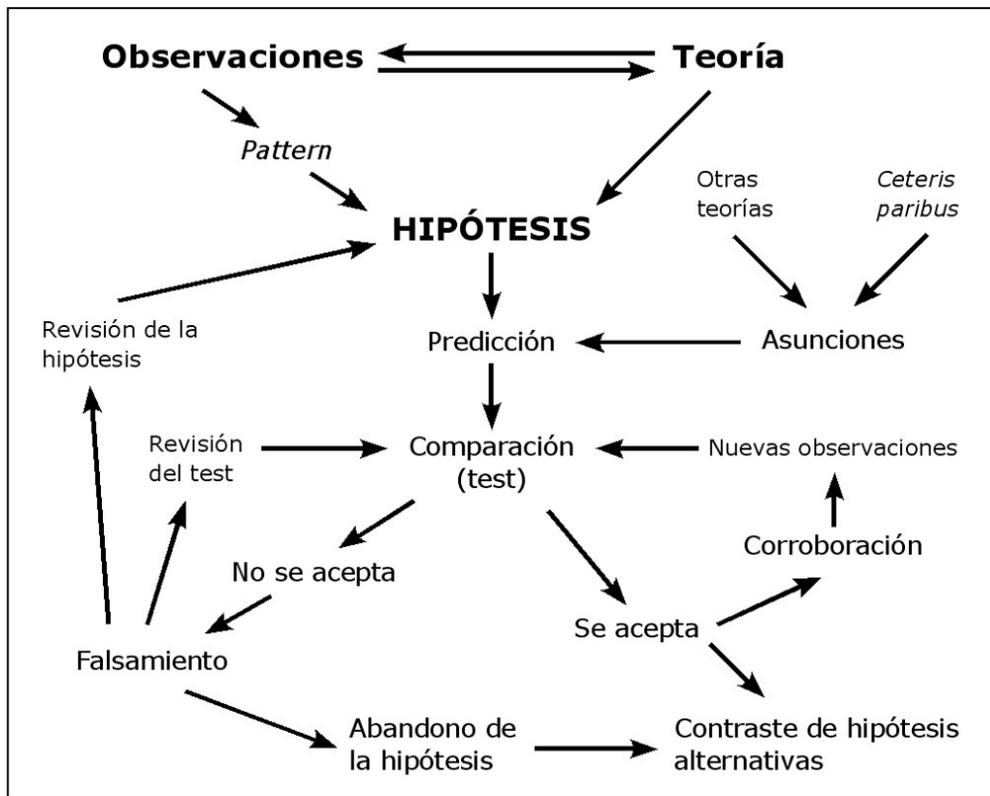


Figura 1.2. Esquema metodológico general del contraste de hipótesis. Adaptado de Wiens (1989).

observaciones empíricas) y la **deductiva** (en la que las hipótesis se derivan de una teoría previamente establecida). Bajo la enorme influencia de las ideas de Karl Popper, el método deductivo ha sido considerado, de forma clásica, como la aproximación “más adecuada” para el desarrollo del contraste de hipótesis. No obstante, el rígido esquema hipotético-deductivo propuesto por Popper ha sido fuertemente discutido (Mentis, 1988) y en la actualidad se acepta ampliamente que no existe una clara separación entre ambas vías, y que en la investigación ecológica se utilizan frecuentemente de manera complementaria (Smith, 1996). El esquema inductivo parte de la observación de la naturaleza y de la obtención de datos de los que emerge algún tipo de **pattern** (pauta): una configuración particular de las características de un sistema (Wiens, 1989). El concepto quizás se entienda mejor si se contrapone a **proceso**: la causa que origina un *pattern*. Por ejemplo, consideremos el hecho de que los individuos de dos especies presenten una distribución segregada en la naturaleza; esta circunstancia observable constituye un *pattern*, que podría estar causado, hipotéticamente, por un *proceso* de competencia interespecífica.

La distinción entre los conceptos de *pattern* y proceso no siempre resulta tan evidente en la investigación ecológica, pero permite aproximarnos a otros aspectos relevantes. Si la detección de un *pattern* se identifica con la aproximación inductiva (Figura 1.2), la explicación de un proceso está más relacionada con el método deductivo. En cierto modo esta dicotomía también tiene reflejo en la clasificación de los estudios ecológicos que consideraremos más adelante (muestreo *versus* experimentos).

Si las observaciones sugieren la existencia de un *pattern*, éste debe ser confirmado (o rechazado) mediante el contraste de hipótesis. Una vez planteada formalmente la hipótesis (y establecida claramente su predicción) se realiza el contraste (la confrontación de los datos con la hipótesis mediante una prueba estadística). Normalmente, el planteamiento de una hipótesis requiere asumir determinadas cuestiones o premisas que se aceptan como válidas aunque no son objeto de análisis. La cláusula *ceteris paribus* (“todo lo demás igual”) es especialmente importante en estudios de campo, reflejando la asunción de que todas las condiciones de la investigación se mantienen constantes, salvo aquellas que se pretende analizar (Wiens, 1989).

Una vez realizada la prueba estadística, el rechazo o aceptación de una hipótesis conduce respectivamente al falsamiento y a la corroboración. El esquema (Figura 1.2) señala la posibilidad de realiza en ambos casos un retorno a la hipótesis de partida, bien modificada en el caso de que inicialmente haya sido falsada (se trataría entonces de una hipótesis distinta), bien para validarla (corroborarla) con nuevos datos. Y en cualquier caso, también sería conveniente continuar el proceso contrastando hipótesis alternativas a la propuesta inicialmente.

Las implicaciones del falsamiento o corroboración de una hipótesis en el desarrollo de la ciencia resultan más complejas de lo que podría deducirse del esquema de la Figura 1.2. Para Popper las hipótesis sólo pueden ser falsadas, no pueden ser verificadas (a lo sumo *corroboradas*: algo así como una aceptación provisional, que puede ser cada vez más sólida pero nunca definitiva). No obstante, esta es una visión excesivamente rígida del método científico que está siendo actualmente reemplazada por planteamientos más flexibles. Por ejemplo, las ideas de Lakatos (que propugna la confrontación de múltiples hipótesis alternativas con los datos, en el contexto de los denominados *Programas de investigación científica*), junto con métodos estadísticos no clásicos (estadística bayesiana), configuran un interesante marco conceptual para el

desarrollo de una nueva metodología científica (Hilborn y Mangel, 1997), al igual que las aproximaciones al análisis de datos que se fundamentan en la selección de modelos mediante criterios relacionados con la teoría de la información y la denominada “inferencia multimodelos” (Burnham y Anderson, 2002).

Experimentos y muestreos

Como ya se ha comentado, la dicotomía presentada en párrafos anteriores sobre las vías inductiva y deductiva tiene sus implicaciones en el planteamiento y diseño de investigaciones científicas. Quizás la más evidente es la que se puede establecer entre la detección de *patterns* y la detección de procesos, hasta el punto de que se habla de “hipótesis de *patterns*” e “hipótesis de procesos” (Wiens, 1989). Llegar a concluir que un determinado proceso es la causa que origina un determinado *pattern* requiere del diseño de un procedimiento de investigación en el que todos los factores ambientales estén bajo control por parte del investigador. Como consecuencia es imprescindible manipular las condiciones en las que se realiza el estudio: se habla entonces de **experimentos** o **estudios experimentales** (Figura 1.3). Idealmente, los experimentos se realizan en el laboratorio, donde las condiciones ambientales pueden ser controladas de forma efectiva, pero en Ecología es también necesario realizar experimentación en la naturaleza, lo que entraña a menudo una gran dificultad.

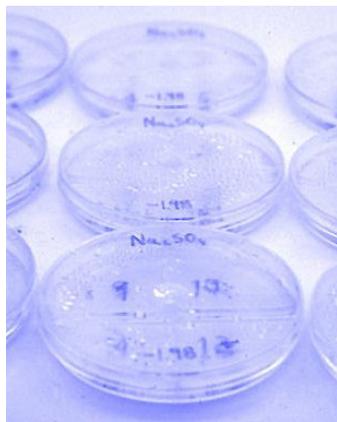


Figura 1.3. Experimentación en el laboratorio para investigar la influencia de la salinidad en la germinación de *Halocnemum strobilacium*. Autor: Juan Antonio Pujol Fructuoso.

Más frecuentemente, la investigación en la naturaleza se aborda mediante procedimientos de obtención de la información “no manipulativos” que reciben la denominación de **muestreos** (Figura 1.4). Esta característica de *no-manipulación*

convierte al muestreo exclusivamente en un procedimiento de observación y medida. Por ello, a este tipo de estudios se los conoce como **estudios observacionales** o “experimentos” mensurativos (frente a los experimentos *sensu stricto*, o experimentos “manipulativos”; Hulbert, 1984; Krebs, 1999). Además, dado que en un muestreo se aprovechan las variaciones naturales de los factores ambientales objeto de estudio, en ocasiones se los denomina también “experimentos naturales” (James y McCulloch, 1985; Diamond, 1986). Una tipología más detallada de los estudios ecológicos se presenta en el siguiente apartado.



Figura 1.4. Muestreo de vegetación.
Autora: María Luisa Suárez Alonso.

En el trasfondo de la dicotomía que venimos planteando figuran además dos visiones o enfoques científicos opuestos: el **reduccionismo** y el **holismo**. En ocasiones se ha argumentado que el desarrollo de la Ecología como ciencia debe sustentarse en la consideración de aspectos funcionales de la naturaleza (el estudio de procesos), más que en los meramente observacionales o descriptivos (el estudio de *patterns*). Sin embargo, la experimentación en los sistemas naturales puede conducir a una visión excesivamente reduccionista de la Ecología. Por el contrario, una aproximación holista representaría una mayor necesidad de observaciones y descripciones generales, especialmente para el estudio de fenómenos que ocurren a escalas espaciales y temporales muy amplias. Como en otros muchos aspectos, quizás la estrategia más inteligente consista en considerar ambos enfoques como necesarios y complementarios (Redfield, 1988).

Tipos de estudios ecológicos

Más allá de la distinción entre experimentos y muestreos, Eberhardt y Thomas (1991) propusieron una clasificación jerárquica de los estudios ecológicos, según la cual pueden reconocerse hasta 8 tipos diferentes en última instancia (Figura 1.5). En un primer grupo se incluyen los estudios experimentales. El resto tiene como objetivo el estudio de eventos no controlados por el investigador.

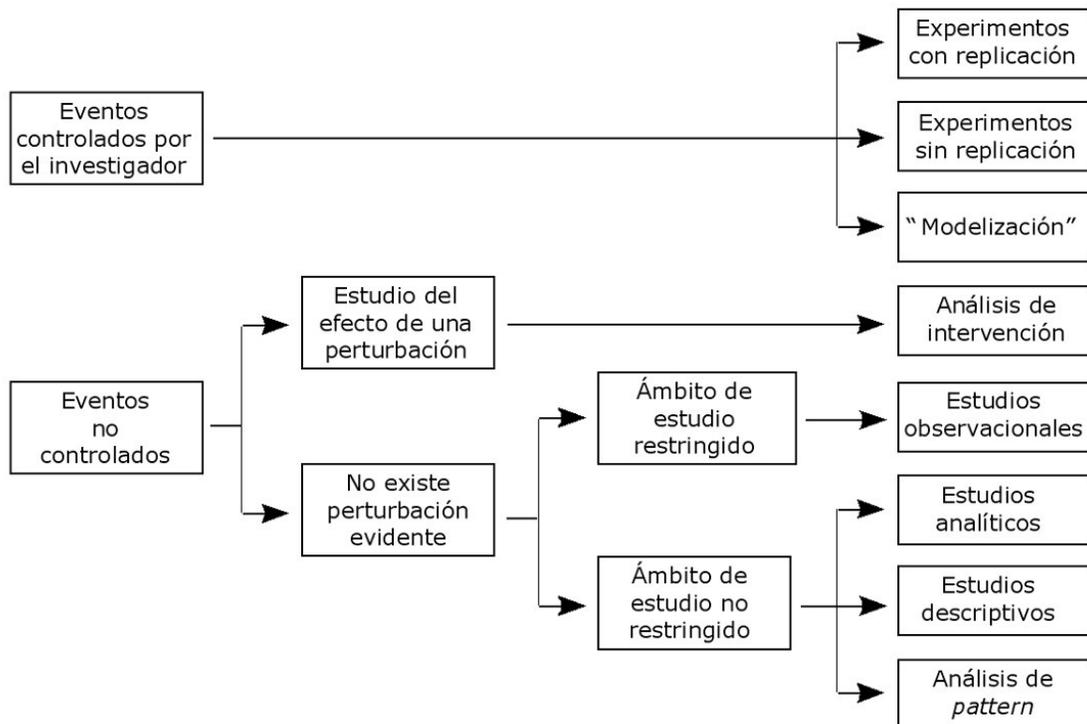


Figura 1.5. Tipología de estudios ecológicos (adaptado de Eberhardt y Thomas, 1991).

Experimentos con replicación: Son experimentos correctamente diseñados. Los diferentes tratamientos tienen sus correspondientes réplicas.

Experimentos sin replicación: Por determinadas circunstancias los tratamientos carecen de réplicas. Las conclusiones que se extraigan de los análisis estadísticos no pueden considerarse correctas.

Modelización: Se trata de experimentos realizados con objeto de calcular los parámetros de ecuaciones que describen el comportamiento de determinados procesos. En general son poco utilizados en Ecología.

Análisis de intervención: Son los típicos estudios de impacto ambiental en los que se investiga el efecto de alguna perturbación no controlada. Suele tratarse de análisis de series temporales (datos obtenidos antes y después de ocurrir la perturbación).

Estudios observacionales (sensu stricto): Realizados con objeto de analizar la influencia de factores ambientales concretos. Son los “experimentos naturales”, en los que se seleccionan específicamente las poblaciones objeto de estudio.

Estudios analíticos: Son similares a los observacionales, pero con la diferencia de que el ámbito de estudio de los analíticos es mucho más amplio. Como consecuencia no se establece una selección a priori de las poblaciones muestreadas.

Estudios descriptivos: Siguen la misma estrategia de muestreo que los analíticos (ámbito de estudio no restringido), pero tienen como objetivo una estimación eficiente de parámetros descriptivos, fundamentalmente de medias y totales (estimación de tamaños poblacionales).

Análisis de pattern: Se centran en la detección de pautas espaciales, fundamentalmente mapas de distribución.

Resumen: la importancia de los aspectos metodológicos, cuantitativos y estadísticos en la investigación ecológica

Los contenidos que se abordan en esta asignatura han sido tratados en un buen número de textos, aunque con mayor o menor extensión, desde distintos puntos de vista y bajo diferentes denominaciones: *ecología cuantitativa* (Kershaw, 1973; Poole, 1974; Greig-Smith, 1983); *ecología estadística* (Ludwig y Reynolds, 1988; Gotelli y Anderson, 2004); *ecología matemática* (Pielou, 1977); *ecología numérica* (Legendre y Legendre, 1998); *ecología descriptiva* (Margalef, 1974); *metodología ecológica* (Krebs,

1999; Figura 1.6); *análisis de datos en ecología* (Jongman *et al.*, 1995; Figura 1.6)... Otros muchos libros, de ámbito más restringido, se centran en campos concretos de la metodología ecológica, especialmente los relacionados con el muestreo (Montes y Ramírez-Díaz, 1978; Seber, 1982; Tellería, 1986; Begon, 1989). Tal abundancia de literatura refleja una preocupación constante de los ecólogos por la metodología y el análisis estadístico. Las causas hay que buscarlas en la complejidad de los sistemas naturales y en algunas características peculiares de los datos ecológicos. Margalef (1974) describe muy bien estas características cuando señala que “*la biología es una ciencia de clases esencialmente inhomogéneas*”. A esta particularidad habría que añadir las siguientes: los procesos ecológicos se manifiestan a escalas temporales muy largas (años, décadas); muchos sistemas ecológicos son difícilmente replicables; y el control total de factores ambientales en la experimentación ecológica es prácticamente imposible (Hilborn y Mangel, 1997).

Todo ello ha contribuido al convencimiento, en el ámbito de la Ecología, de la necesidad de métodos de muestreo y técnicas estadísticas rigurosas que permitan solventar los problemas inherentes a la obtención y análisis de datos ecológicos. Tales inquietudes se manifiestan a menudo en forma de “principios” o “reglas” en las que se proporcionan recomendaciones sobre la manera de proceder en la investigación ecológica; puesto que muchas de ellas resultan útiles en el contexto de esta asignatura, en la Tabla 1.1 se presentan las de Krebs (1999).

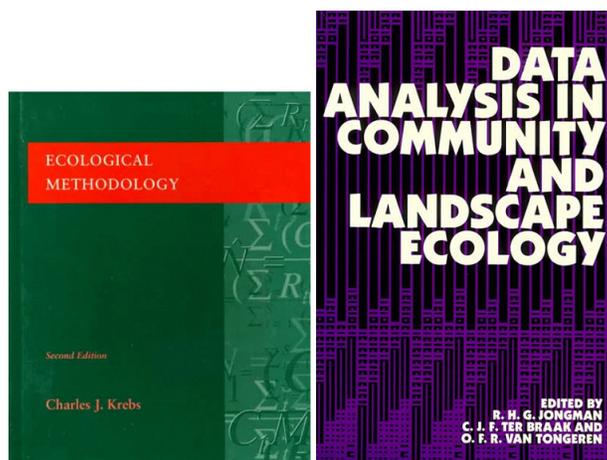


Figura 1.6. Portadas de los libros *Ecological Methodology* y *Data and Landscape Ecology*.

Tabla 1.1. Las “diez reglas” de Krebs (1999).

1. No todo lo que puede ser medido debe ser medido.
2. Encuentra un problema y establece tus objetivos claramente.
3. Toma los datos apropiados para conseguir tus objetivos y haz feliz a un estadístico.
4. Algunas cuestiones ecológicas son imposibles de contestar en la actualidad.
5. Ahorra tiempo y dinero decidiendo cuántos decimales son necesarios en los datos *antes* de empezar un experimento.
6. No proporciones nunca una estimación ecológica sin alguna medida del posible error.
7. Sé escéptico con los resultados de significación de un test estadístico.
8. *Nunca* confundas significación estadística con significación biológica.
9. Codifica tus datos y guárdalos en el ordenador.
10. Si entra basura, sale basura.

Referencias bibliográficas

- Begon, M. 1999. *Ecología animal. Modelos de cuantificación de las poblaciones*. Trillas. México, D.F.
- Burnham, K.P. y Anderson, D.R. 2002. *Model Selection and Multimodel Inference*. Springer-Verlag. New York.
- Curtis, H. y Barnes, N.S. 2001. *Biología*. 6ª ed. Panamericana. Buenos Aires.
- Diamond, J. 1986. Overview: laboratory experiments, field experiments, and natural experiments. En: Diamond, J. y Case, T.J. (eds.) *Community Ecology*. Harper & Row Publishers. New York. Págs.: 3-22.
- Eberhardt, L.L. y Thomas, J.M. 1991. Designing environmental field studies. *Ecological Monographs*, 61: 53-73.
- Greig-Smith, P. 1983. *Quantitative Plant Ecology*. 3ª ed. Blackwell. Oxford.
- Gotelli, N.J. y Ellison, A.M. 2004. *A Primer of Ecological Statistics*. Sinauer, Sunderland.
- Hilborn, R. y Mangel, M. 1997. *The Ecological Detective. Confronting Models with Data*. Princeton University Press. New Jersey.
- Hulbert, S.H. 1984. Pseudoreplication and the design of ecological field experiments. *Ecological Monographs*, 54: 187-211.
- James, F.C. y McCulloch, C.E. 1985. Data analysis and the design of experiments in ornithology. En: Johnston, R.F. (ed.) *Current Ornithology*. Volume 2. Plenum Press. New York. Págs.: 1-63.
- Jongman R.H.G.; ter Braak, C.J.F. y van Tongeren, O.F.R. (eds.) 1995. *Data Analysis in Community and Landscape Ecology*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Kershaw, K.A. 1973. *Quantitative and Dynamic Plant Ecology*. 2ª ed. Edward Arnold. London.
- Krebs, C.J. 1999. *Ecological Methodology*. 2ª ed. Benjaming/Cummings. Menlo Park, CA.
- Legendre, P. y Legendre, L. 1998. *Numerical Ecology*. 2ª ed. Elsevier. Amsterdam.
- Ludwig, J.A. y Reynolds, J.F. 1988. *Statistical Ecology*. John Wiley & Sons. New York.
- Margalef, R. 1974. *Ecología*. Omega. Barcelona.
- Mentis, M.T. 1988. Hypothetico-deductive and inductive approaches in ecology. *Functional Ecology*, 2: 5-14.
- Montes, C. y Ramírez-Díaz, L. 1978. *Descripción y muestreo de poblaciones y comunidades animales y vegetales*. Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla.
- Peters, R.H. 1991. *A Critique for Ecology*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Pielou, E.C. 1977. *Mathematical Ecology*. 2ª ed. John Wiley & Sons. New York.
- Poole, R.W. 1974. *An Introduction to Quantitative Ecology*. McGraw-Hill. New York.
- Redfield, G.W. 1988. Holism and reductionism in ecology. *Oikos*, 53: 276-278.
- Rodríguez, J. 1999. *Ecología*. Pirámide. Madrid.
- Seber, G.A.F. 1982. *The Estimation of Animal Abundance and Related Parameters*. 2ª ed. Charles Griffin & Company Limited. London.
- Smith, R.L. 1996. *Ecology and Field Biology*. 5ª ed. Addison-Wesley. Menlo Park. CA.
- Tellería, J.L. 1986. *Manual para el censo de los vertebrados terrestres*. Raíces. Madrid.
- Underwood, A.J. 1990. Experiments in ecology and management: Their logics, functions and interpretations. *Australian Journal of Ecology*, 15: 365-389.
- Wiens, J.A. 1989. *The Ecology of Bird Communities*. Volume 1. Foundations and Patterns. Cambridge University Press. Cambridge.