



2. Introducción al método científico

2. Introducción al método científico

Muchas culturas han basado sus conocimientos en la sabiduría popular, en la que los hechos, mil veces interiorizados, se transmiten oralmente de generación en generación; muchas preguntas pueden ser contestadas por la voz de la experiencia; todos tenemos nuestras opiniones sobre los diversos aspectos que nos envuelven. Pero nada de esto tiene que ver con la ciencia. La ciencia acumula hechos y conocimientos mediante una metodología muy estricta con el fin de garantizar su objetividad. En ciencia no valen las opiniones sino los datos y los análisis que de ellos se desprenden.

Es posible que buena parte de la sociedad se sienta alejada del proceso científico y de los investigadores que con su trabajo hacen ciencia. Este proceso no sigue, sin embargo, una metodología extraña o complicada: aunque de forma estricta y sistemática, los diferentes procesos siguen razonamientos muy lógicos. El objetivo que me he planteado con el presente capítulo es aproximar el lector al proceso de hacer ciencia y facilitarle una mayor comprensión de los capítulos que seguirán; además, verá qué es lo que motiva a los científicos a complicarse tanto la vida para conseguir que sus intuiciones o ideas se conviertan en hechos científicamente aceptados.

El arte de formular preguntas

Hacer ciencia es observar, formular preguntas y buscar la respuesta a las mismas (Barnard et al., 1993b). A pesar de esta aparente simplicidad, hacer ciencia no es tan fácil porque las preguntas se han de formular de forma adecuada para poder obtener respuestas. Imaginemos que estamos caminando por un parque y vemos un pájaro muy coloreado cantando, bajando las alas y dando pequeños saltos. Nos podemos preguntar por qué la naturaleza es tan colorista. Esta pregunta, sin embargo, es demasiado general para poder obtener una respuesta concreta. Una mejor pregunta sería, ¿por qué este pájaro tiene un plumaje tan coloreado? o, mejor todavía, aumentar la

concreción de nuestra pregunta: ¿por qué aquel pájaro presenta una mancha de color amarillo tan extensa en el ala? Si nos fijamos más en el pájaro, veremos que los pequeños saltos los realiza delante de otro individuo mucho menos coloreado. Una pregunta todavía más precisa podría ser ¿por qué un individuo tiene la mancha amarilla del ala de mayor tamaño que el otro?, ¿será un individuo macho y el otro hembra? Y si esto es verdad, ¿quién tendrá más color, el macho o la hembra?, ¿y por qué?...

Hacer ciencia es, por tanto, plantearse preguntas adecuadas de la forma más correcta posible para poder encontrar la respuesta. Las preguntas surgen de diversas maneras: de la curiosidad innata que todos llevamos dentro en mayor o menor grado, de sucesos o resultados casuales durante una investigación, de conversaciones con otros colegas, de la lectura de estudios previos, consultando bibliografía, o del análisis exploratorio de los datos de que disponemos (Barnard et al., 1993b). De todas maneras, plantear buenas preguntas es un trabajo complejo, que está directamente relacionado con la creatividad y la imaginación de cada investigador. Darwin ya afirmó que, mirando hacia atrás, le fue más difícil ver cuáles eran los problemas que encontrarles solución (James & McCulloch, 1985). Por lo tanto, aquí no trataremos acerca de cómo plantear buenas preguntas, sino de cómo plantearlas correctamente.

Sobre los datos y las variables

Los datos son la materia prima de la ciencia. En el ejemplo anterior, los datos estarían formados por una serie de medidas tomadas sobre el amarillo del ala de los machos y las hembras. Con objeto de organizarlos mejor, los datos se agrupan bajo un encabezamiento al que llamaremos variables. La longitud del amarillo del ala es una variable, el sexo otra variable. Hay diversos tipos de variables: la longitud de la mancha amarilla es una variable cuantitativa con valores concretos muy distintos según los individuos, el sexo es una variable cualitativa con sólo dos casos: macho y hembra. Sin el soporte de los datos ninguna afirmación tiene valor, y es por ello por lo que los científicos invierten mucho esfuerzo en medir las diferentes variables. Encontrar cuáles son las variables más adecuadas para medir, las que mejor se ajustan para responder nuestras preguntas, es otro de los retos de los científicos, donde queda reflejada su intuición y experiencia (Krebs, 1989a). Parte de la discusión que sigue intenta dar algunas de las directrices a seguir.

Dos formas de buscar respuestas: el método inductivo frente al hipotético-deductivo

Existen dos formas de buscar respuestas. Hasta los años setenta el método más generalizado era el inductivo, que a partir del estudio de casos particulares extraía una generalización. Esta aproximación estuvo ligada en parte al sentimiento de que la estadística, especialmente la multivariante, lo podía resolver todo. En este periodo, en la universidad se nos enseñaba a recoger los máximos datos posibles y de cuantas más variables mejor, y extraer con su posterior

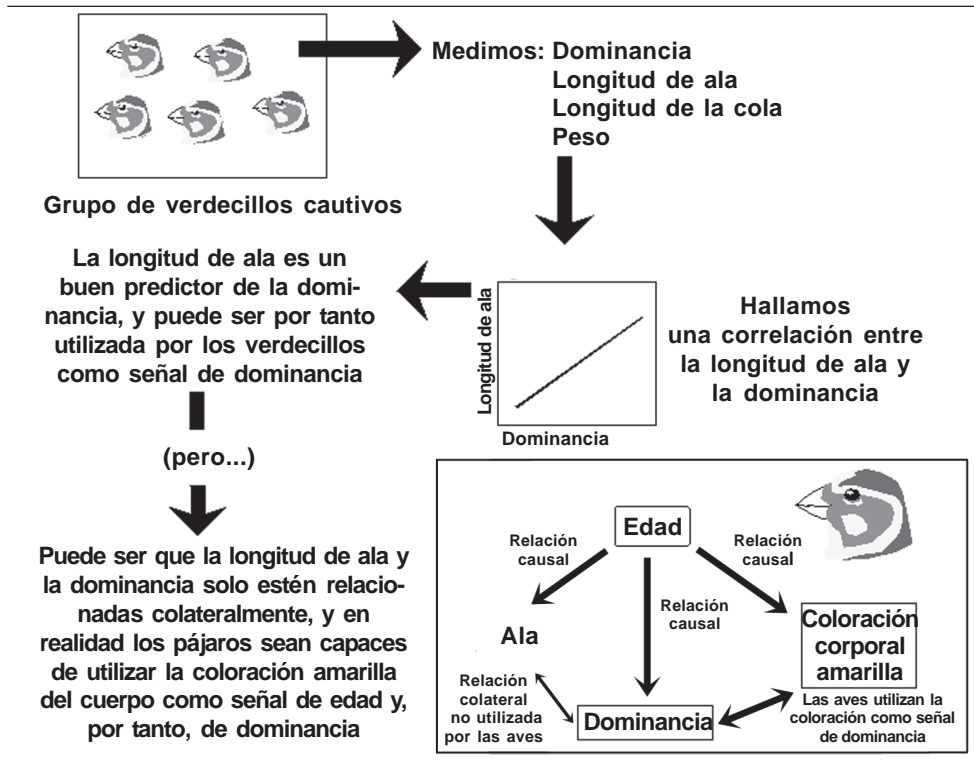


Fig. 2.1 – Imaginémonos que cogemos un grupo de verdecillos en cautividad y nos dedicamos a anotar qué individuos son los que ganan los diferentes enfrentamientos que tienen lugar para conseguir el alimento. Con estos datos podemos establecer un ranking de dominancia, ordenando a los individuos de mayor a menor dominancia. Posteriormente correlacionamos esta dominancia con una serie de variables morfométricas, como por ejemplo la longitud del ala, la cola, el peso, etcétera. Y encontramos que cuanto más grande es el ala de un pájaro más dominante es. A partir de estos datos podemos generalizar que el ala es una variable predictiva de la dominancia y que por tanto puede ser utilizada por los diferentes individuos del grupo como una señal de dominancia. Esta generalización no tiene porque ser cierta: en el presente estudio no se ha tenido en cuenta la edad de los diferentes individuos. Los individuos adultos tienen las alas más largas que los de primer año. Y también son dominantes sobre ellos, por tanto la correlación que hemos encontrado entre longitud del ala y dominancia podría ser un efecto colateral de la edad. Además, como los adultos son más amarillos que los pájaros de primer año y el amarillo es mucho más fácil de advertir que la longitud del ala, es posible que el ala no sea utilizada para señalar la dominancia y que, en cambio, los verdecillos se fijen en el amarillo del oponente como un indicativo de su edad y, por tanto, de su dominancia. Este ejemplo nos muestra de forma muy clara hasta qué punto puede ser peligroso efectuar una generalización a partir del análisis de una serie de datos sin partir de una hipótesis previa.

análisis los diferentes patrones que nos permitiesen interpretar el funcionamiento del mundo natural. El problema, con esta aproximación, es que aun cuando partiendo de la variabilidad observada se puede extraer una generalización, no podemos estar seguros de que esta sea la correcta. En la figura 2.1 se presenta un ejemplo de lo equívoca que puede ser una generalización a partir del análisis de datos concretos, sin tener ninguna hipótesis previa. Por ello, actualmente se dice que el método inductivo sirve para plantear hipótesis, pero no para probarlas.

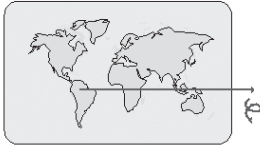
A principios de los años setenta, Popper (1959, 1968) planteó que la investigación científica no era acumular información y posteriormente buscar patrones, sino que hacer ciencia habría de ser una actividad dedicada a resolver problemas (James & McCulloch, 1985). Era el nacimiento del método científico hipotético–deductivo. Este método consiste en formular hipótesis que planteen una posible solución a una pregunta previamente determinada. Para que una hipótesis sea cierta, deberían cumplirse una serie de hechos y predicciones. En el método hipotético–deductivo se recogen los datos que creamos necesarios para resolver la hipótesis planteada y se analizan. Si las predicciones no se cumplen, rechazamos la hipótesis; si se cumplen, de momento podemos aceptar la hipótesis como una posible explicación o respuesta a la cuestión sometida a estudio. La ciencia es muy conservadora y no considera nunca cierta, del todo, una hipótesis (Barnard et al., 1993b). Esto se debe a que si una hipótesis es rechazada, podemos estar seguros de que es errónea, pero si no es rechazada siempre queda la duda de no haber planteado las predicciones de forma correcta. Imaginemos que estamos en la edad media e hipotetizamos que la Tierra es redonda, en contra de la creencia alternativa y más generalizada de que es plana. Si esta hipótesis es cierta, podemos predecir que al viajar en línea recta, después de un tiempo determinado volveremos al punto de partida, cosa que no sucedería en el caso de que la Tierra fuera plana, ya que después de un tiempo determinado los exploradores caerían al vacío. Supongamos que disponemos de los medios técnicos adecuados para viajar en línea recta y que volvemos al punto de partida. Los resultados de los experimentos nos permitirían rechazar la hipótesis de que la Tierra fuera plana, pero la hipótesis de que es redonda no sería totalmente aceptada, sino que simplemente aumentaría su credibilidad. Por ejemplo, a pesar de que se cumpliera la predicción, podría suceder que la tierra fuera cilíndrica y que por casualidad hubiéramos tomado la dirección adecuada para no caer al vacío (fig. 2.2).

Análisis de diferencias y tendencias frente a trabajos experimentales

Los datos para comprobar la validez de una hipótesis se pueden obtener y analizar de dos maneras: con una cuantificación y posterior análisis de patrones, o con una aproximación experimental con manipulación de variables. En un principio los científicos naturalistas se dedicaban a la descripción de las diferentes expresiones de la vida: se describían nuevas especies, su distribución o su comportamiento. Un avance importante fue darse cuenta que dentro de una misma especie, la morfología, el comportamiento o la ecología presentaban una gran variabilidad (Lott, 1991), que hacía necesaria su cuantificación. La estadística pasó a ser una herramienta

Hipótesis: la Tierra es redonda

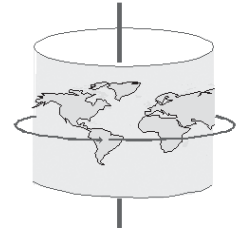
Predicción: si nos desplazamos en línea recta, tras un cierto tiempo desconocido volveremos al punto de salida



Si viajando en línea recta y caemos al vacío, podemos rechazar la hipótesis de que la Tierra es redonda



Si después de viajar en línea recta volvemos al punto de origen, la hipótesis de que la Tierra es redonda no queda rechazada...



...pero esto no quiere decir que sea cierta, puesto que aunque se haya cumplido la predicción, podría suceder que la Tierra fuera cilíndrica y que por casualidad hubiéramos elegido la dirección adecuada para no caer al vacío

Fig. 2.2 – Ilustración con un ejemplo imaginario de cómo las predicciones sirven para rechazar hipótesis pero no pueden ser utilizadas como demostración incuestionable de nuestra hipótesis.

imprescindible para el análisis de los fenómenos biológicos, hasta el punto que actualmente la mayoría de predicciones tienen unas formulaciones estadísticas. Pero esto no nos debe asustar, ya que la mayoría de formulaciones se presentan simplemente en forma de análisis de diferencias o tendencias (Barnard et al., 1993b). Un ejemplo de diferencia es analizar si los adultos tienen las plumas de la cola más largas que los jóvenes, y un ejemplo de tendencia es analizar si la longitud de la cola tiende a aumentar con el tamaño del individuo (fig. 2.3).

El inconveniente del análisis de tendencias y diferencias es que no podemos extraer relaciones de causa–efecto. El descenso en el número de niños nacidos en Europa Central desde mediados de siglo muestra una fuerte correlación con la reducción del tamaño de la población de cigüeñas (James & McCulloch, 1985). Esta simpática coincidencia no quiere decir, evidentemente, que exista una relación de causa–efecto y que a los niños los traiga la cigüeña según la conocida leyenda. Lo que sucede es que las dos variables están ligadas por una tercera, el desarrollo industrial, que es la causa de la disminución tanto del número de cigüeñas como de la tasa de natalidad. En el capítulo cuatro veremos que en el lúgano se ha encontrado una correlación entre la dominancia y el tamaño de la mancha negra que tiene bajo el pico. Que exista esta correlación no quiere decir que los animales

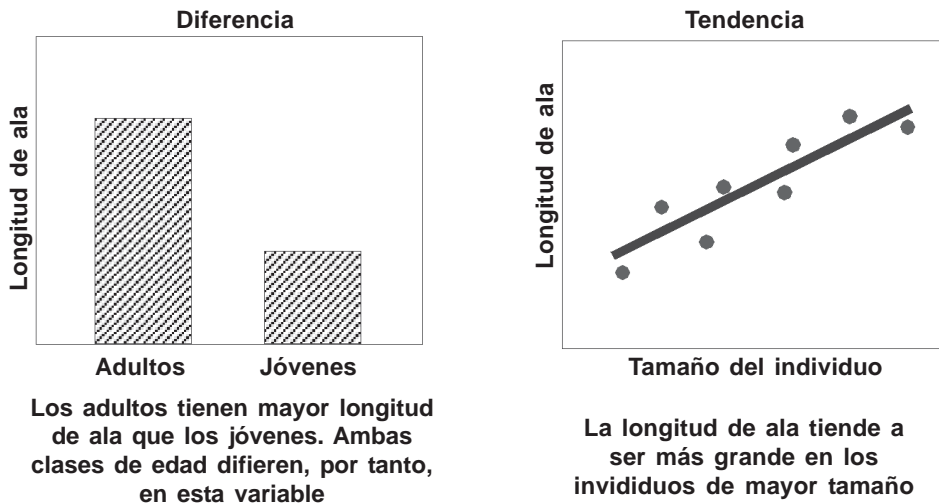


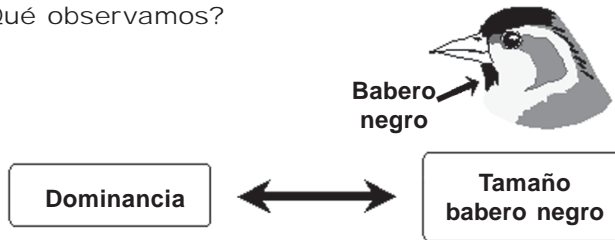
Fig. 2.3 – La mayoría de tests estadísticos pretenden comprobar si una variable difiere según los valores de otra variable (por ejemplo, longitud del ala con relación a la edad), o si una variable muestra una determinada tendencia con relación a la variación de otra variable (por ejemplo, longitud del ala con relación al tamaño general del cuerpo). En el análisis de diferencias, la variable de comparación toma valores cualitativos (por ejemplo, adultos con relación a jóvenes), mientras que en el análisis de tendencias toma valores cuantitativos continuos (por ejemplo, diferentes valores del tamaño del cuerpo).

utilicen esta mancha como señal de dominancia. Podría ser, como en el ejemplo anterior de la figura 2.4, que exista esta correlación porque las dos variables están correlacionadas con una tercera (por ejemplo, la edad). La única manera que tenemos de demostrar que esta correlación responde a una relación causal será realizar un experimento: si manipulamos la mancha negra, pintándola más grande o reduciéndola, y los animales responden a esta manipulación, podremos concluir que el cambio en el comportamiento es debido al único cambio producido, que es la apariencia de dicha mancha y que esta es utilizada como señal.

Los principios del diseño experimental: qué medir y qué manipular

La clave de un buen trabajo experimental está en su diseño. La primera norma es definir claramente cuáles son las variables a estudiar. Se definen tres tipos de variables: las dependientes, las independientes y las secundarias. La **variable dependiente**, como su nombre indica, es la que varía por efecto de otras variables. Si estamos estudiando cómo determina la disponibilidad de alimento la longitud de las plumas de la cola que un individuo desarrollará durante la muda, la

¿Qué observamos?



¿Cuál es la relación real?

- | | |
|---|---|
| A | B |
| Existe relación causal entre dominancia y tamaño del babero | La correlación observada es debida a una relación colateral entre la edad y dos variables estudiadas |
| Los individuos más dominantes desarrollan mayores baberos, y estos son utilizados como señales de dominancia | A más edad, más babero negro y a más edad, más dominancia. Como resultado aparece la relación no causal entre tamaño del babero y dominancia |

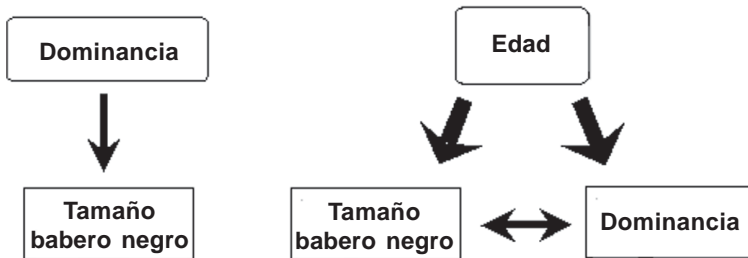


Fig. 2.4 – Ejemplo de cómo la relación entre dos variables puede estar motivada por la relación causal entre estas dos variables y una tercera. El lúgano presenta un babero negro bajo el pico, cuyo tamaño está correlacionado con la dominancia del individuo: a mayor dominancia, mayor babero (Senar et al., 1993). Esta relación no tiene porque ser causal: podría ser que fuera simplemente un resultado colateral de que ambas variables estuviesen relacionadas con la edad del individuo.

longitud de las plumas es la variable dependiente: la longitud de la cola depende de la cantidad de alimento disponible, pero no al contrario. La variable dependiente se refiere a la variable objeto de nuestro estudio y, por lo tanto, es la variable a medir para comprobar su variación en función de las otras variables (fig. 2.5).

La **variable independiente** es aquella en la que nos basamos para efectuar el estudio y, por tanto, la variable a manipular: en nuestro caso es la disponibilidad de alimento durante el periodo en que el pájaro está mudando. Esta variable se

Hipótesis: la disponibilidad de alimento afecta al crecimiento de las plumas
Predicción: los animales que ingieran una dieta rica en proteínas desarrollarán colas más largas

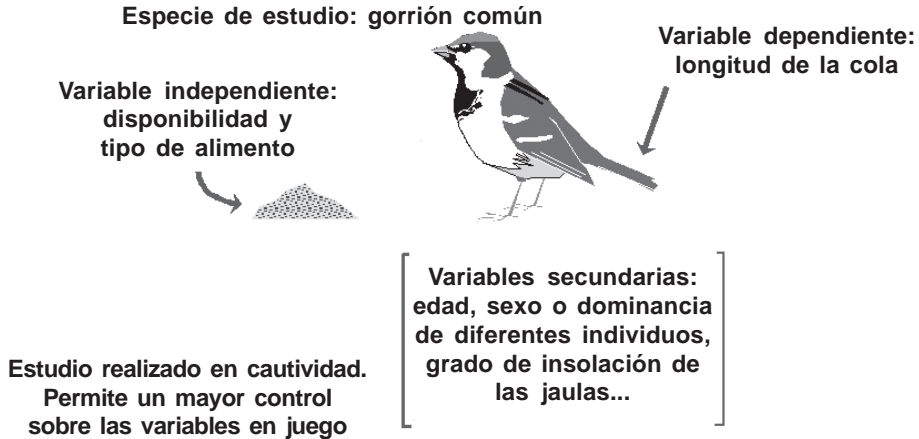


Fig. 2.5 – Esquema de un diseño experimental hipotético en el que queremos comprobar si la disponibilidad de alimento durante el periodo de muda afecta al crecimiento de las plumas desarrolladas. Se detalla cuáles habrían de ser en este caso la variable dependiente, la independiente y las variables secundarias.

podría manipular, por ejemplo, variando la cantidad de alimento suministrado a individuos en cautividad (fig. 2.5). Por el contrario, si lo que estamos estudiando es cómo afecta la longitud de la cola a la maniobrabilidad durante el vuelo, la variable independiente a manipular pasa a ser la longitud de la cola, que se puede manipular recortándola a diferentes longitudes, y la maniobrabilidad será la variable dependiente, que varía según la longitud de la cola. En este segundo caso, el problema será como medir la maniobrabilidad. Este es un buen ejemplo de cómo el ingenio y la pericia del investigador pueden ser determinantes: Neil Metcalfe y Susan Ure (1995) midieron la maniobrabilidad de vuelo de los diamantes moteados colocando en una jaula muy alta diferentes obstáculos, obligando a los pájaros que alzaban el vuelo a volar salvándolos y realizar de esta manera una especie de *slalom*; en cada experimento, Metcalfe y Ure asustaban a los pájaros y medían el tiempo que necesitaba cada individuo para salvar aquella distancia: este valor se utilizó como medida de habilidad de maniobra. Anders Møller (1991a), estudiando la habilidad de vuelo de las golondrinas en función de la longitud de la cola, realizó un diseño experimental todavía más complicado: en una jaula de unos cuatro metros de longitud, colgó numerosas cuerdas de color blanco; justamente antes de dejar pasar a las golondrinas de un extremo a otro de la jaula, les pintó las puntas del

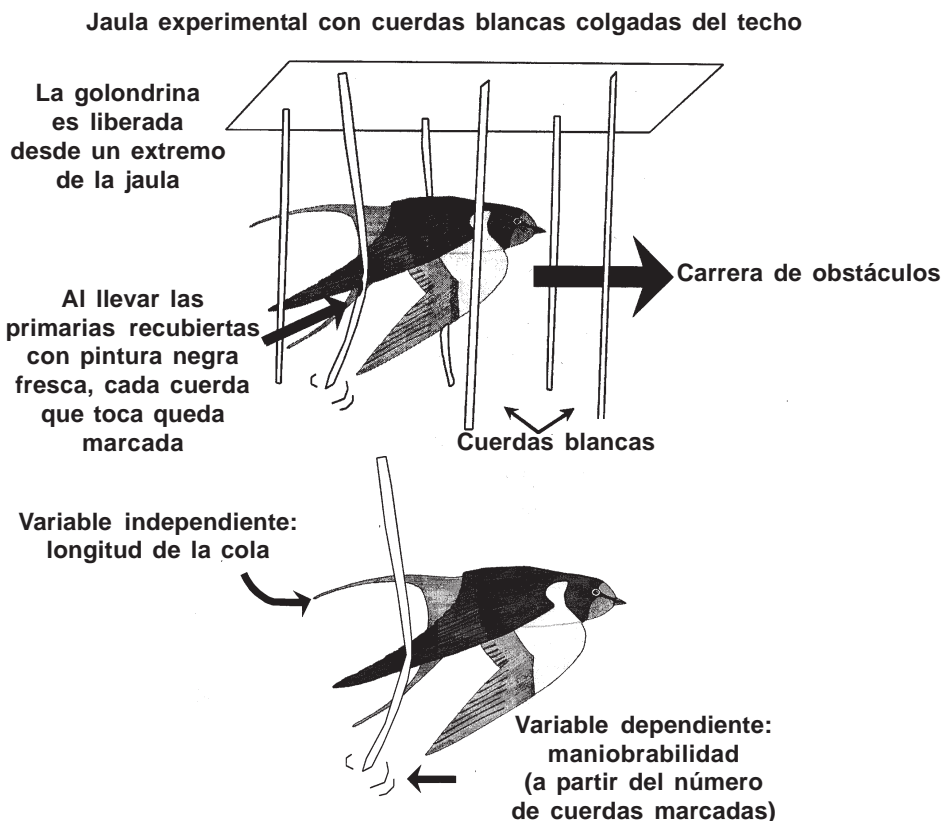


Fig. 2.6 – Esquema del experimento de Møller (1991a) para estudiar la habilidad de vuelo de las golondrinas en función de la longitud de la cola. En este experimento, la variable independiente pasa a ser la longitud de la cola, que se manipula recortándola o implantando plumas más largas; la variable dependiente es la maniobrabilidad, medida como el inverso del número de cuerdas que quedan marcadas.

ala con tinta negra; el animal huía del experimentador sorteando los obstáculos y cuantas más cuerdas dejaba manchadas de negro por los impactos durante el vuelo, peor era la habilidad de maniobra de aquel individuo (fig. 2.6).

Las variables secundarias son otras variables adicionales, en algunos casos imprevisibles, que pueden afectar a la variable dependiente y enmascararla, pero que habrían de ser tenidas en cuenta a la hora de efectuar el diseño experimental. Por ejemplo, en el experimento con pájaros cautivos en que analizábamos la relación entre cantidad de alimento disponible y longitud de las plumas de la cola, el grado de insolación de las diferentes jaulas o la edad, sexo o dominancia de los diferentes individuos analizados podría afectar en grado desconocido al crecimiento de las plumas (fig. 2.5).

La utilización de controles

En todo experimento de manipulación de variables, uno de los grupos experimentales no ha de estar manipulado y se utilizará como patrón de comparación. A este grupo no manipulado se le da el nombre de control. Por ejemplo, imaginemos que queremos demostrar que la cantidad de pulgas y ácaros que normalmente hay en los nidos de carboneros (Christe et al., 1996) afecta a la intensidad del color amarillo que los pollos desarrollan. Una buena aproximación experimental para demostrar esto sería fumigar los nidos con insecticida antes de que los pollos nazcan, y medirles el color una vez estén ya desarrollados. El amarillo de estos pájaros debería de ser de más intensidad que el color amarillo estándar de los carboneros; el problema es que definir este estándar puede resultar muy complicado, ya que el amarillo varía de año en año y de una zona a otra (Slagsvold & Lifjeld, 1985). La solución es diseñar el experimento de forma que una parte de los nidos los fumiguemos con insecticida y otra no, y la comparación la realicemos entre los nidos tratados y los no tratados; en este caso, a los nidos a los que no les hemos administrado insecticida les llamaremos nidos control (fig. 2.7).

Las variables secundarias

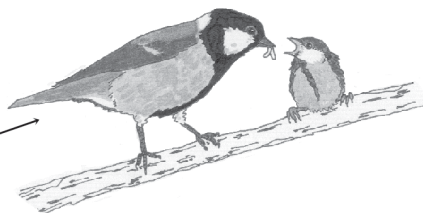
Para evitar el efecto colateral de las variables secundarias existen diferentes métodos. El primero es la utilización de controles, como en el ejemplo anterior. Imaginemos que como Collias y sus colaboradores (Collias et al., 1979), queremos comprobar si el tamaño de la mancha amarilla que presentan en las alas los machos del tejedor les sirve para atraer a las hembras y aumentar su éxito de apareamiento. El estudio lo llevamos a cabo en cautividad, en un gran jaulón con diferentes individuos de ambos sexos. Para estar seguros de que la relación es causal, reducimos la mancha amarilla de una parte de los machos pintando el amarillo con un rotulador negro, y los volvemos a dejar en el jaulón. Al resto de los machos no se les manipula (serán controles) y comparamos el éxito de apareamiento de los dos grupos de machos. El experimento parece en principio estar bien diseñado, pero si pensamos con más detalle en el posible efecto de variables colaterales, observaremos que los controles que nosotros hemos definido como tales no son verdaderos controles ya que no han sido tratados exactamente igual que los individuos manipulados. La reducción en el éxito de apareamiento de los individuos manipulados frente a los no manipulados podría ser debido al propio estrés de la manipulación y no al hecho de tener una mancha amarilla más pequeña: por ejemplo, las hembras podrían no querer aparearse con ellos porque los perciban más estresados o por algún otro efecto colateral de la manipulación. Para evitar el efecto de esta posible variable colateral secundaria, habríamos de capturar también al grupo control y manipularlo de manera similar simulando que le pintamos la mancha. Conclusión: es imprescindible recordar que si en un diseño experimental no se ha tenido en cuenta la inclusión de controles, no se puede concluir nada definitivo sobre el experimento (Krebs, 1989a).

Una segunda manera de tratar los efectos de las variables secundarias es que todo experimento se lleve a cabo con el valor de la variable secundaria constante. Por ejemplo, si no sabemos si la edad de los individuos experimentales puede

La utilización de cajas nido control permite conocer el efecto del grado de parasitación de las cajas nido sobre el amarillo de los pollos

Especie de estudio: carbonero común

Variable dependiente:
intensidad del amarillo
de los pollos ya crecidos



Variable independiente: ausencia o presencia de parásitos en el nido

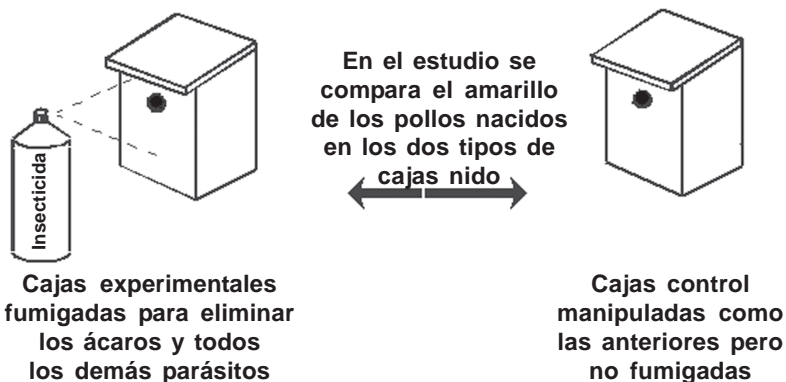


Fig. 2.7 – Al realizar un experimento, uno de los grupos experimentales no ha de estar manipulado para que pueda ser utilizado como patrón de comparación. Es lo que se denomina un grupo control. En la figura esto se ilustra con un estudio que pretende demostrar la influencia negativa de los parásitos que hay en el nido sobre la intensidad del plumaje amarillo de los pollos de carbonero.

afectar al resultado de los experimentos, este se puede diseñar de forma que todos los individuos utilizados sean adultos o todos jóvenes. El problema de este método es que reduce la capacidad de generalización de nuestro experimento: si solamente utilizamos individuos adultos, no sabemos si los resultados obtenidos se pueden generalizar a los individuos jóvenes (Kamil, 1988).

Una tercera forma de tratar las variables secundarias es la llamada sistematización del experimento. En este caso, la variable secundaria se introduce en el análisis como variable independiente o como covariante. Recordemos el experimento en el que queríamos ver si la cantidad de alimento ingerida durante la muda afecta a la longitud de la cola que el pájaro desarrolla. Un buen diseño puede ser establecer

dos grupos de pájaros cautivos, a uno de los cuales se les suministra alimento suplementario mientras al otro se le deja como control, y comprobar cómo afecta esto al crecimiento de las plumas. Nos podemos preguntar si la edad influye en esta relación, a causa de diferencias metabólicas entre individuos jóvenes y adultos, y si dichas diferencias hacen que la cantidad de alimento ingerido sea más importante para el crecimiento de las plumas de los pájaros jóvenes respecto a los adultos. En este caso, la edad se podría incluir en el análisis como una variable más. La ventaja de esta aproximación es que permite detectar interacciones como la mencionada. La desventaja es que la sistematización, al introducir nuevas variables en el análisis, reduce la potencia de los tests estadísticos. Además, en algunos casos la sistematización es impracticable (Kamil, 1988).

La cuarta manera de tratar variables secundarias es que en los diferentes experimentos estas varíen de forma aleatoria (aleatorización). Por ejemplo, si no estamos interesados en qué efecto ejerce la edad de los diferentes individuos sobre la relación entre alimentos ingeridos y longitud de la cola, sino que simplemente queremos eliminar el posible efecto colateral, los diferentes pájaros habrían de ser escogidos al azar con relación a esta variable. La ventaja de esta aproximación es que aumenta la generalización del experimento, mientras su desventaja es que aumenta la varianza de los diferentes resultados con la correspondiente reducción del poder de los tests estadísticos utilizados.

La necesidad de replicar los experimentos

Los experimentos se han de repetir, es decir, replicar, varias veces. No se puede utilizar un solo individuo experimental y sacar conclusiones, de la misma manera que una sola observación de un hecho no conduce a realizar extrapolaciones generales. Replicar un experimento nos permite extraer valores de dispersión y, por tanto, nos permite comparar los resultados con los de otros experimentos (fig. 2.8). La replicación también permite aumentar la precisión de las medidas obtenidas y evitar los efectos del azar. Imaginemos que estamos estudiando un individuo y que no nos hemos percatado de que estaba enfermo; como resultado del experimento vemos que por mucho alimento complementario que le demos, las plumas de la cola no experimentan un mayor crecimiento. Si sólo utilizamos este individuo experimental, el grado de crecimiento de sus plumas no es representativo del efecto de la alimentación complementaria en este crecimiento.

El error más corriente en un diseño experimental es utilizar réplicas que no son independientes entre sí. Por ejemplo, si queremos comprobar si las hembras de carbonero con plumaje muy amarillo ponen más huevos que las menos amarillas, la unidad muestral, las réplicas, no son los diferentes huevos, sino las diferentes puestas. Los huevos de una misma puesta se parecen más entre ellos que a los de otras puestas, por lo que cada puesta se ha de considerar como una unidad. En un estudio de este tipo lo que hay que hacer es computar la media de tamaño de los huevos de cada puesta y correlacionar estos valores con el amarillo de las diferentes hembras que los pusieron (fig. 2.9). Realmente, estaríamos efectuando una falsa replicación del experimento, error que se conoce con el nombre de pseudoreplicación (Hurlbert, 1984; Bart et al., 1998).

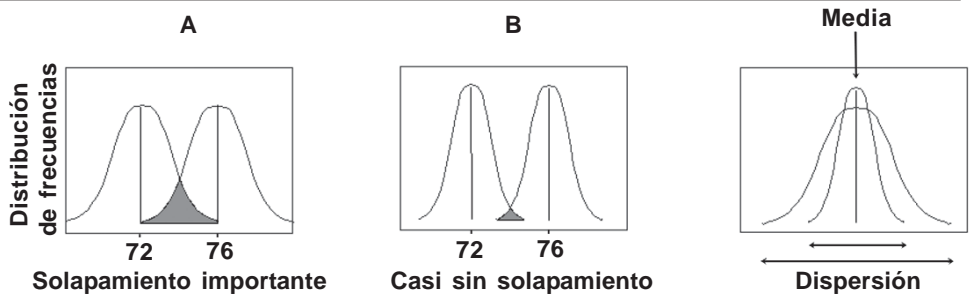


Fig. 2.8 – En estadística, para ver si dos medias procedentes de dos poblaciones difieren se necesita conocer el grado de dispersión de la variable medida. Dicho de otra manera, se necesita saber cuánto se solapan las dos curvas de frecuencias. En el ejemplo se representa la longitud del ala de los machos en una especie cualquiera, con una media de 76 mm, y la de las hembras, con una media de 72 mm. En el caso A, las dos poblaciones (machos y hembras) presentan un gran solapamiento de medidas, con muchas hembras próximas a los 76 mm y muchos machos próximos a los 72 mm. En el caso B, casi no hay solapamiento. Por tanto, a pesar de que en ambos casos las medias sean las mismas, en el caso A no encontraremos diferencias significativas entre machos y hembras y en el caso B las diferencias serán muy significativas. La dispersión (por ejemplo la varianza o el error estándar) es, por lo tanto, una medida imprescindible y tan importante como la media. Para extraer el valor de dispersión y comparar dos poblaciones se necesita, evidentemente, tomar medidas a varios individuos; de forma similar, para comparar dos experimentos se necesitan varias réplicas de cada uno.

Cuando existen varias réplicas, los elementos de las mismas, o sea, los diferentes individuos, han de estar asignados a cada experimento de forma adecuada para evitar efectos colaterales. Para realizar esta asignación existen diversos métodos, que pueden consultarse en la referencia bibliográfica (Kamil, 1988)

Experimentos naturales y diseños *quasi*experimentales

Muchas veces, a pesar de ver claramente cómo debería realizarse un experimento, cuestiones prácticas o éticas no nos dejan llevar a termino un diseño experimental técnicamente correcto. Por ejemplo para ver cómo afecta un incendio o la tala de un bosque a la fauna que lo habita, es evidente que no podemos escoger al azar diferentes bosques y prenderles fuego o talarlos. Lo mismo pasaría si quisiéramos conocer el efecto de una determinada droga o enfermedad. En estos casos, lo aconsejable sería obtener datos de situaciones lo más aproximadas posibles al caso que pretendemos estudiar y analizarlos

Hipótesis: la intensidad de color del plumaje de un individuo refleja su calidad
Predicción: las dimensiones de los huevos puestos por las hembras del herrerillo común (una medida de calidad), estarán correlacionados con la intensidad de la coloración amarilla del plumaje

Los huevos de una misma puesta se parecen más entre ellos que los de las otras puestas, por lo que no se pueden tomar como "unidades" independientes. La unidad muestral no son los diferentes huevos, sino las diferentes puestas.

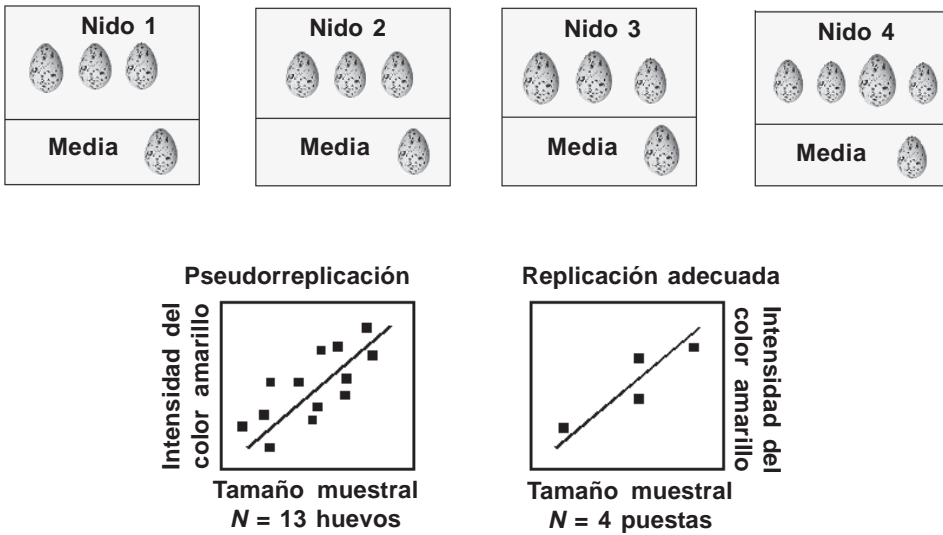


Fig. 2.9 – Ejemplo de un típico error de pseudorreplicación, en el que los datos son ficticiamente replicados. La figura simula un estudio en el que se quiere relacionar la intensidad del amarillo del plumaje de las hembras con el tamaño de los huevos que ponen, basándonos en la premisa de que el tamaño del huevo es importante para la supervivencia posterior de los pollos y que las hembras bien alimentadas y de calidad ponen huevos de mayor tamaño.

siendo conscientes de las limitaciones que estos estudios presentan y de que muchas veces impiden establecer una relación causa–efecto (James & McCulloch, 1985; Kamil, 1988).

Tapio Eeva et al. (1998) querían demostrar que el grado de polución ambiental de metales pesados afectaba a la coloración del plumaje amarillo de los carboneros. El estudio era interesante ya que permitía utilizar la intensidad de la coloración de este plumaje como bioindicador de la calidad del hábitat. Como era éticamente inviable contaminar al azar bosques con diferentes concentraciones de metales pesados y comprobar seguidamente cómo podía afectar esta situación experimen-

tal a la coloración del plumaje, lo que hicieron fue establecer una serie de estaciones de muestreo a diferentes distancias de una fábrica productora de cobre, níquel y fertilizantes del sur de Finlandia que se había comprobado que desprendía metales pesados. A diferentes distancias de la fábrica colocaron cajas nido en las cuales criaban los carboneros. De esta manera podían medir fácilmente el color amarillo de los pollos desarrollados bajo diferentes grados de polución. La media del amarillo de los pollos de cada nido era una réplica, y la distancia de la fábrica a las diferentes zonas de estudio se consideraba el "tratamiento". Si utilizásemos cada pollo como una réplica caeríamos en el típico error de la pseudorreplicación. Este experimento se podría haber mejorado realizándolo al mismo tiempo en un bosque no contaminado, determinando un punto al azar desde donde establecer estaciones de muestreo. Este bosque actuaría, por lo tanto, de "control". Su trabajo demostró que, efectivamente, el color amarillo de los carboneros era menos intenso cuanto más cerca se encontraban de la fábrica y cuanto mayor era la concentración de elementos polucionantes (Eeva et al., 1998).

A veces la imposibilidad de establecer un diseño experimental con manipulación de variables no se debe a una cuestión ética, sino a que simplemente es inviable. Jordi Figuerola (1999) quería demostrar que dentro de los limícolas, las especies que realizan despliegues sexuales en vuelo tienen mayor superficie de ala que los que realizan el cortejo en tierra. Para realizar este estudio, evidentemente, no se podía llevar a cabo ninguna manipulación del comportamiento de los individuos de estas especies para ver si los comportamientos seleccionaban evolutivamente determinadas formas de ala o superficies. Lo que se hizo fue agrupar las diferentes especies en parejas de pájaros del mismo género, pero de manera que dentro de cada pareja una especie efectuara vuelos sexuales y la otra no. En este caso, cada género actuaba como una réplica y el hecho de realizar despliegues de vuelo o no se consideraba que eran los "tratamientos". El estudio pudo demostrar que una mayor superficie alar y un ala más redondeada es una adaptación morfológica a los vuelos sexuales.

Diseños avanzados

Hasta aquí hemos desarrollado la forma básica de plantear el diseño de un experimento. Existen además otras formas de diseño experimental: diseños aparejados, diseños factoriales, diseños anidados, etcétera, que se pueden adaptar a las necesidades particulares de cada experimento. Aconsejo la lectura de los manuales de Krebs (1989a), Kamil (1988) o Scheiner y Gurevitch (1993a) a los lectores a quienes les interese profundizar más en estos diseños.

Decálogo del investigador

Como en cualquier otra disciplina científica, el estudio del plumaje necesita que establezcamos de forma clara cuáles son las preguntas que queremos responder. Estas preguntas las hemos de formular como hipótesis y hemos de establecer cuáles son las predicciones que de ellas se desprenden. Es muy importante que definamos qué variables hemos de medir y cómo hemos de tomar estas medidas. A lo largo del presente capítulo hemos realizado un repaso general de los pasos a

seguir en la realización de cualquier experimento. Los resumimos en el siguiente decálogo (adaptado a partir de Kamil (1988), Barnard et al. (1993b) y Krebs (1989a): 1. Ten una idea original y plantéate bien una pregunta; 2. Identifica la especie y la población ideal para responder la pregunta; 3. Plantéate una hipótesis y las predicciones que se desprenden; 4. Define cuáles serán las variables dependientes y las independientes, y cómo se establecerá el control; programa con antelación lo que has de medir y como lo has de medir; 5. Identifica las variables secundarias y cómo controlarlas; 6. Escribe sobre un papel cuál puede ser el posible diseño experimental y, si tienes posibilidad, coméntalo con alguna persona con criterio; 7. Comprueba que tu diseño pueda ser controlado estadísticamente y ahorra tiempo y dinero computando el tamaño muestral que puedes necesitar antes de empezar; 8. Recuerda que las relaciones causales solamente se pueden determinar con experimentos; 9. Replica el experimento suficientemente pero evita la pseudorreplicación; 10. Si no has tenido suerte, vuelve a plantearte tu hipótesis y sus predicciones

Existe una extensa literatura sobre el diseño experimental. Aconsejaría, por tanto, al lector interesado que consulte las diferentes obras especializadas que existen sobre el tema (Quinn & Dunham, 1983; Hurlbert, 1984; James & McCulloch, 1985; Loehle, 1987; Mentis, 1988; Kamil, 1988; Hairston, 1989; Krebs, 1989a; Kepler, 1990; Maxwell & Delany, 1990; Martin & Bateson, 1993; Scheiner & Gurevitch, 1993a; Barnard et al., 1993b). De todos modos, el objetivo del presente capítulo es que el lector se sienta familiarizado con los conceptos del diseño experimental y del método científico, de forma que el resto de capítulos del libro puedan resultarle más comprensibles.



Frank Götmark es el investigador más representativo en el estudio de los mecanismos de caza de los depredadores aéreos y el rol de la coloración de sus presas sobre el éxito de captura, siendo referencia obligada en este tema.
