

THE COPERNICUS COMPLEX. THE QUEST FOR OUR COSMIC (IN)SIGNIFICANCE

Por Caleb Scharf. Allen Lane, Londres, 2014.

Léase un extracto de este libro en «Insignificancia cósmica», por Caleb Scharf, en este mismo número.

Copernicanismo

Principio copernicano, principio cosmológico y principio antrópico

Para apear al hombre de pretendidos pedestales se recuerda que Copérnico lo sacó del centro del universo, Darwin le quitó su singularidad en el reino animal y Freud le despojó del cetro de la consciencia. El principio de Copérnico establece que el Sol, y no la Tierra, ocupa el centro del cosmos; igual que el resto de los planetas, esta gira en órbita alrededor del astro. Lejos de ocupar el ombligo del mundo, vivimos en un suelo astronómicamente irrelevante. Salvo por la presencia de vida. Tierra y vida han tejido una historia entrelazada que se inició hace unos 3800 millones de años. Pero nada obsta que no seamos más que un mundo ocupado entre miles de millones. Y lo que pudiera resultar incluso más sorprendente, cabría incluso admitir que el nuestro sea uno en un conjunto cuasi infinito de universos que emergen a partir de las características fundamentales del vacío. Cuando Copérnico propuso que la Tierra no constituía el centro, fijo, del universo sacudió los cimientos de la ciencia occidental. Pero el principio copernicano nunca fue absolutamente cierto. Vivimos en un tiempo particular, en un lugar determinado y bajo circunstancias específicas.

Nicolás Copérnico expuso su modelo heliocéntrico en *De revolutionibus orbium coelestium*, aparecido en 1543. A finales de la centuria, se conoció una novedosa técnica que incrementaba el tamaño de los objetos observados a través de una serie de objetivos. Galileo Galilei, con su telescopio manufacturado, contempló lunas de Júpiter y fases de Venus, convenciéndose de que Copérnico tenía razón. Johannes Kepler avanzó un paso más y estableció que las órbitas de los planetas, la Tierra incluida, no trazaban círculos perfectos, sino elipses excéntricas, poniendo en cuestión la idea de un universo racional.

En 1687, Isaac Newton publicó sus monumentales *Philosophiae naturalis principia mathematica*, que establecían las leyes de la gravitación y de la mecánica, con la inclusión de los conceptos de inercia, momento, fuerza y aceleración. Newton se percató de que la atracción entre los cuerpos podía describirse a través de una fuerza que aumentaba con la masa y disminuía con el inverso del cuadrado de la distancia. A partir de esa hipótesis derivó la prueba matemática de las leyes empíricas de Kepler. Demostró que las reglas que gobiernan los planetas emergen de la física fundamental.

Con anterioridad, en 1674, Anthony van Leeuwenhoek fabricó el primer microscopio y lo aplicó a una gota de agua de un lago cercano. Descubrió un mundo desconocido hasta entonces y habitado por extrañas figuras espirales y enroscadas, manchas animadas, seres acompañados con sutiles colas, que iban, venían, giraban y nadaban con absoluta despreocupación de la mirada ajena. En sus reiteradas observaciones descubrió miles de animálculos que nadaban en repulsivos océanos en miniatura, un submundo microbiano que representa el grueso de la vida sobre el planeta.

El principio copernicano tuvo un precedente en Aristarco de Samos, que vivió en el siglo III a.C. También él propuso que la Tierra giraba alrededor del Sol. Era una idea extraña en aquellos tiempos. Los recuerdos, fragmentarios, que nos han llegado de su obra se refieren a los argumentos geométricos esgrimidos para defender que el Sol era notablemente mayor que la Tierra. De ahí dedujo que el astro residía en el centro del universo conocido y que las estrellas se encontraban sumamente distantes. Para ello necesitaba entender el fenómeno de la paralaje

(desplazamiento aparente de un objeto distante, con respecto a un fondo mucho más alejado, cuando lo contemplamos desde dos posiciones diferentes). Cuanto más alejados se hallen los objetos, menor será el desplazamiento aparente.

Con anterioridad, Aristóteles había despreciado ya la posibilidad de que las estrellas se hallaran más lejanas que los planetas, apelando a la falta de paralaje. El argumento de Aristóteles se basaba en la razón y en el sentido común. Creía que, si no podía observarse paralaje en las estrellas, si no existía desplazamiento relativo mutuo, deberían encontrarse fijas en alguna capa del firmamento que nos rodea. La cosmología de Aristóteles constaba de unas 55 esferas concéntricas, cristalinas y transparentes en torno a la Tierra que permitían la acción y el movimiento de los planetas. En este universo geocéntrico, estrellas y planetas giraban a nuestro alrededor. Mas, a diferencia de las estrellas, los planetas se movían de una manera complicada. Estos movimientos singulares constituían una pieza importante del rompecabezas que Aristarco y, más tarde, Copérnico se aprestaron a solucionar, destronando a la Tierra. La palabra planeta, de origen griego, significa «estrella errante». Los planetas brillan al reflejar la luz y parecen moverse en relación a las estrellas; a veces vuelven hacia atrás, en movimiento retrógrado, formando una suerte de bucles. Modifican su brillo e incluso velocidad aparente en diferentes tiempos.

Apolonio de Pérgamo, en el siglo II a.C., aportó una primera solución al problema planetario, explicación que incluyó más tarde Claudio Ptolomeo, cuyo *Almagesto* se convertiría en texto canónico sobre cosmología a lo largo de 1400 años. En el sistema ptolemaico la Tierra se halla estacionaria y ocupa el centro del cosmos. En dirección hacia el exterior se encuentran la Luna, Mercurio, Venus, el Sol, Marte, Júpiter y las estrellas fijas. Todos seguían trayectorias circulares. Para conjugar esos movimientos con los movimientos erráticos que aparecían en el firmamento, Ptolomeo añadió un conjunto de movimientos adicionales: deferentes y epiciclos.

Copérnico había recibido una cuidadosa formación en matemática y astronomía en su Polonia natal. Prosiguió sus estudios en Italia, donde se interesó en las desviaciones de la Luna y los planetas respecto del sistema ptolemaico. A comienzos de 1500 esbozó lo que más tarde sería su modelo heliocéntrico: el *Commentariolus*, que no se publicó en vida del autor, aun-

que circularon varias copias del original. Para Copérnico, la distancia de la Tierra al Sol es imperceptible si la comparamos con la distancia a las estrellas, por lo que no se observa paralaje en las estrellas; la rotación de la Tierra explica la aparente rotación diaria del Sol y las estrellas fijas a través del firmamento; las variaciones anuales del movimiento celeste del Sol están, en realidad, causadas por la revolución de la Tierra alrededor del Sol; el movimiento retrógrado que observamos para los planetas se halla causado por el movimiento de la Tierra. Y agrega en el *Commentariolus*: «Basta el movimiento de la Tierra para explicar las irregularidades de los cielos». Tras la edición del *De revolutionibus* menudearon las voces críticas contra la tesis ptolemaica, no siempre relacionadas con Copérnico. Así, Giordano Bruno, que nació en 1548, defendió no solo el heliocentrismo, sino también la idea de un universo realmente infinito, del que el Sol era una estrella más. Abogaba por un número ilimitado de mundos habitados.

Por las mismas fechas, Tycho Brahe daba pasos importantes en la observación astronómica. Sin telescopios, aunque con ingeniosos aparatos de medición, con nuevas versiones de cuadrantes, sextantes y esferas armilares midió ángulos, posiciones y sistemas de coordenadas. Cierta noche de 1572, descubrió una nueva estrella en el firmamento. No había estado allí las noches precedentes, por lo que dedujo que el universo no era inmutable, sino que podía cambiar. Se supone que lo que Tycho observó fue una supernova, una explosión espectacular de una enana blanca, a unos 8000 años luz del sistema solar. Brahe contó con la ayuda de Johannes Kepler en las tabulaciones de las posiciones y variaciones de los cuerpos celestes. Por su propia cuenta este publicó *Astronomia nova*, donde presentaba sus dos primeras leyes del movimiento planetario: la trayectoria de cada planeta dibuja una elipse con un foco en el Sol y el radio vector que une un planeta y el Sol barre áreas iguales en tiempos iguales. El año en que murió Galileo, 1642, nació Newton.

Para Newton, la belleza explicativa de la física del movimiento planetario constituía una prueba de la divinidad suprema, que mantenía las trayectorias de los planetas en una danza perfecta cronométrica. Para otros pensadores del siglo siguiente, como Pierre-Simon Laplace, ello significaba justamente lo contrario. No se necesitaba ninguna mano guiadora, ni

A finales del siglo XIX se comenzó a tomar conciencia de la inmensidad del universo

trayectorias o configuraciones preordenadas en un universo copernicano; bastaban las leyes físicas innatas para determinar dónde y cuándo un objeto se hallaría a sí mismo. Armado con esas leyes, y con un conocimiento cabal de todos los lugares y movimientos de todos los cuerpos en un momento dado, Laplace confiaba desentrañar el pasado y el futuro. Tras las huellas de Newton, Christiaan Huygens se manifestó a favor de la posibilidad de vida extraterrestre un poco antes de su fallecimiento en 1695. Huygens estaba convencido de la existencia de pluralidad de mundos. Se imaginaba múltiples lugares hospitalarios de agua y vida abundante, que él decía inferir de sus observaciones telescópicas. El fenómeno de la vida se le antojaba inevitable en otros planetas.

A finales del siglo XIX se comenzó a tomar conciencia de la inmensidad del universo. Se aceptaba que las estrellas se encontraban a distancias enormes. Se habían descubierto nuevos planetas (Urano y Neptuno). A través de los espectros de luz, empezó a revelarse la composición elemental de objetos extraterrestres. Así se descubrió cierta especie atómica en el Sol, el helio. Pero persistían sin respuesta otras cuestiones fundamentales: ¿era infinito en espacio y tiempo el universo? ¿Era la Vía Láctea el universo entero o habría más galaxias, como quizás esas nebulosidades que conformaban Andrómeda? En una eclosión sin precedentes de descubrimientos e invención, en las tres primeras décadas del siglo XX se produjo también una cascada de revoluciones científicas: la teoría de la relatividad de Albert Einstein, la medición de la verdadera escala del cosmos y la naturaleza de las galaxias y el desarrollo de la mecánica cuántica. Las visiones radicales de la naturaleza resultantes abordaban propiedades interrelacionadas que iban de lo macroscópico a lo microscópico.

El modelo heliocéntrico copernicano implicaba que el universo semejaba el mismo, cualquiera que fuera el planeta desde donde lo contempláramos. Podía

generalizarse y proclamar que el universo parecería el mismo desde cualquier punto donde nos halláramos, desde nuestro sistema solar o desde otro, desde nuestra galaxia o desde otra. Eso afirma el principio cosmológico, que dicta que el universo es homogéneo e isótropo, esto es, presenta la misma distribución básica de materia y energía. El principio cosmológico constituye una aplicación particular del principio copernicano general aplicado a la cosmología. Hasta la fecha, el principio cosmológico es coherente con la observación astronómica. Una versión rígida de ese principio, denominada principio cosmológico fuerte, sostiene que el universo parecería también el mismo en cualquier momento de su historia pasada o de su futuro.

La primera vez que se puso en conexión el principio cosmológico con el principio copernicano fue a comienzos de los años cincuenta del siglo XX, cuando Hermann Bondi empleó la expresión principio cosmológico copernicano en su exposición de un modelo cosmológico, hoy rechazado, que se conoce por teoría del estado estacionario. La teoría del estado estacionario proponía que el universo era eterno, sin principio ni fin. Bondi defendía que el universo aparecía él mismo en cualquier dirección que mirásemos y para cualquier observador de cualquier tiempo. La prueba final y definitiva de que el universo tenía una edad finita llegó en 1965 con el descubrimiento de la radiación cósmica del fondo de microondas, fotones que se generaron en el cosmos joven.

Los cosmólogos se percataron de la existencia de sorprendentes coincidencias en el valor de constantes físicas fundamentales. Algunas combinaciones de esos números producían unas relaciones inesperadas, que propiciaban la aparición de vida inteligente, como si hubiera una conexión singular entre nuestra presencia y las propiedades físicas actuales del cosmos. A esa vinculación, Brandon Carter la llamó en 1973 principio antrópico. No es fácil acotar las características que revisten mayor interés para la aparición de la vida. Bernard Carr y Martin Rees incoaron un primer esbozo matemático en 1979, que Rees reelaboró en 1999 al reducir a seis números el elenco de exigencias; entre otras, la razón entre la intensidad de la fuerza de la gravedad y la intensidad de la fuerza electromagnética, la densidad total de materia normal del cosmos o el número real de dimensiones espaciales del universo.

—Luis Alonso

SciLogs



La mayor red de blogs
de investigadores científicos

www.scilog.es

*Sigue de cerca
el desarrollo
de la ciencia*

*Pasado y presente
de la investigación
biomédica*

Historia de las biociencias

M. García-Sancho

Universidad
de Edimburgo

*Más allá
de las leyendas*

Ciencia marina

**Luis Cardona
Pascual**

Universidad
de Barcelona

*Con los pies
en el suelo*

Astronomía con rayos X

Xavier Barcons

Instituto de Física
de Cantabria

*Blues
del planeta azul*

Una nueva perspectiva
sobre la Tierra

Pedro Castiñeiras

Universidad
Complutense
de Madrid

Materia blanda

Física experimental

Ángel Garcimartín

Montero
Universidad
de Navarra

Ciencia y cultura

Al servicio
del progreso social

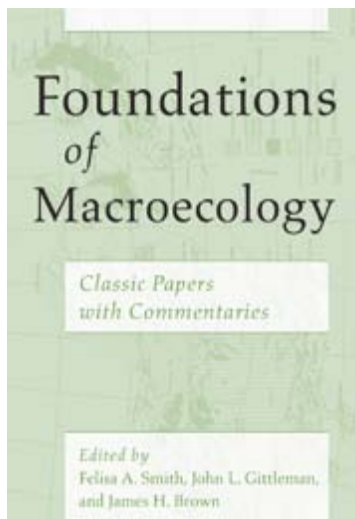
J. A. López Cerezo

Universidad
de Oviedo

Y muchos
más...



Sigue también Scilog internacional | .com | .be | .fr | .de



**FOUNDATIONS OF MACROECOLOGY.
CLASSIC PAPERS WITH COMMENTARIES**

Coordinado por Felisa A. Smith, John L. Gittleman y James H. Brown. The University of Chicago Press, Chicago, 2014.

Macroecología

Textos canónicos de una disciplina en plena eferescencia

Aunque el término *macroecología* fue acuñado hace unos veinte años, el planteamiento macroecológico cuenta con una historia secular. James H. Brown, de la Universidad de Arizona, y su alumno Brian A. Maurer se percataron de la importancia de los censos (abundancia media, tamaño del rango geográfico y tamaño corporal de los individuos) para estudiar las tendencias de las poblaciones en determinados ecosistemas. Brown y Maurer pensaban que su labor podría inscribirse en una suerte de «mecánica estadística» aplicada a ecosistemas, pero la expresión *ecología estadística* había recibido ya otro uso. Y acuñaron el término *macroecología* para reflejar la idea de que la ecología avanzaba con el estudio conjunto de muchas especies. Publicaron en el número de *Science* del 3 de marzo de 1989 el ensayo «Macroecology: The division of food and space among species on continents», donde ofrecían una visión sintética del dominio, fundamentos conceptuales y apartados empíricos y teóricos que conformaban la nueva disciplina.

Pero no se partía de la nada. Desde los naturalistas españoles del siglo xvi y posteriores, desde Linneo y sus discípulos, con particular énfasis en los biogeógrafos del siglo xix y cuantos vinieron después, se practicaba una macroecología *avant la lettre*. Más cercanos en el tiempo, entre los años 1920 y 1998, la disciplina fue adquiriendo músculo y se gestaron los conceptos clave: relaciones entre superficie y especie, relación entre tamaño corporal y tasa metabólica, gradiente latitudinal de la abundancia de especies, etcétera. De todo ello se ocupa esta obra,

que se divide en dos partes, a saber, macroecología antes de la macroecología y dimensiones de la macroecología. A cada ensayo original le acompaña un comentario que lo enmarca en su tiempo y evolución del tema.

Tras un período de inducción, centrada en la cuantificación de pautas empíricas, llegaron las explicaciones deductivas a partir de hipótesis y creación de modelos para interpretar los datos. Abrió surco Olaf Arrhenius en 1920 con un trabajo sobre la relación entre áreas y especies. Para Arrhenius, esa relación podía expresarse mediante una fórmula matemática sencilla, una función potencial. Aunque desde mediados del siglo xix había constancia de las pautas del incremento de la diversidad específica con el área de la muestra, Arrhenius lo caracterizó cuantitativa y analíticamente; ajustó las relaciones entre especies y áreas a leyes de potencias. Esa línea de investigación (formulación matemática de las relaciones) fue seguida por C. B. Williams, Frank Preston, Robert MacArthur y Edward O. Wilson.

A lo largo de los dos últimos decenios, hemos asistido a un crecimiento exponencial del número de publicaciones sobre macroecología. Han aumentado a un ritmo del 34 por ciento anual, lo que supera de lejos el crecimiento del 2,5 por ciento registrado en el resto de las disciplinas científicas. No se trata de divagaciones sobre cuestiones marginales, sino que en buena medida se abordan temas centrales, como el trabajo recién publicado en *Science* sobre la paradoja que representa que la mayoría de los ecosistemas que mantienen una abundante vida vegetal no parezcan resentirse de

la acción de los herbívoros. En torno al particular se había avanzado una doble hipótesis: de acuerdo con la primera, las plantas se beneficiarían de la presencia de carnívoros; de acuerdo con la segunda hipótesis, la resistencia se debería a la adquisición de defensas químicas y estructurales por las propias plantas. Se propone ahora una explicación en la que la solución reside en la interacción entre ambos fenómenos.

La macroecología se caracteriza por la descripción y explicación de pautas y procesos en escalas espaciales y temporales diversas. La disciplina se centra en las propiedades estadísticas emergentes de un número elevado de «partículas» ecológicas, sean genes, individuos, poblaciones o especies. Se parte de una tesis admitida: las pautas estadísticas que son similares a través de escalas temporales, espaciales o ambas obedecen a mecanismos causales similares. Aunque formalizada en trabajos de James H. Brown y Brian A. Maurer, esa perspectiva la encontramos ya en François de Liocourt, quien en 1898 estudiaba la influencia de las prácticas de gestión de los bosques franceses. De Liocourt halló que, en la naturaleza, el número de árboles declinaba exponencialmente con el crecimiento del diámetro del tronco. Con anterioridad, Augustin Pyramus De Candolle había reparado ya en otra pauta macroecológica, la relación entre extensión del terreno y especie; por su parte, Alfred R. Wallace registró el gradiente latitudinal de la riqueza de especies.

Es sabido que muchas características de los organismos varían sistemáticamente con el tamaño del cuerpo. Esas relaciones aparecieron cuantificadas y sintetizadas en libros seminales sobre alometría por D'Arcy Thomson y Julian Huxley a comienzos del siglo xx. Pero fue el trabajo de Max Kleiber de 1932 el que despertó el interés y estimuló la investigación subsiguiente sobre relaciones de escala en el tamaño corporal. Kleiber puso de manifiesto la relación entre tamaño corporal y tasa metabólica. Descubrió que la tasa metabólica de mamíferos y aves era proporcional a la potencia 3/4 de su masa corporal. Esa propuesta ponía en cuestión las ideas establecidas sobre tasa metabólica que la situaba en una potencia 2/3, así como otros rasgos con característica de potencias 1/3 que reflejaban las escalas de longitud, superficie y volumen. El artículo de Kleiber y el libro subsiguiente (*The fire of life*) continúa siendo objeto de acicate para la investiga-

ción. Un decenio después, Ronald Fisher trajo a primer plano la distribución de la abundancia de especies.

C. B. Williams reúne méritos suficientes para ser considerado padre de la macroecología. En 1947, acometió una de las primeras aplicaciones del análisis de modelo nulo. Abordó el problema con un enfoque estadístico, pues en la mayoría de las comunidades animales y vegetales, los géneros con una, dos, tres... especies forman una serie matemática cercana a una serie logarítmica. Un año antes, J. Elton había demostrado que la razón entre especie y género en comunidades insulares pequeñas. Por encima de cualquiera de sus antecesores y contemporáneos, Williams no solo documentó las pautas generales de abundancia, distribución y diversidad de especies, sino que advirtió que muchos de esos patrones hundían sus raíces en procesos fundamentales del uso de los recursos, demografía, dispersión, especiación, extinción y asociación de las comunidades. Resumió su pensamiento en *Patterns in the balance of nature and related problems in quantitative ecology* (1964), la primera síntesis de macroecología. Este libro reclamó la atención sobre la existencia de pautas empíricas estadísticas generales. En su mayoría, las unidades de los ejemplos eran las especies. Unos años más tarde, R. W. Sheldon y su equipo extendieron el horizonte de la macroecología; mostraron que algunas de esas pautas generales eran independientes de las especies linneanas. La abundancia de organismos pelágicos en el océano reflejaba una distribución de ley de potencias de suerte tal que la biomasa total permanecía invariante, del plancton a las ballenas.

G. E. Hutchinson fue el ecólogo de mayor influencia a mediados del siglo xx. Con Robert MacArthur, su alumno más brillante, escribió un artículo programático: cuantificaron la distribución de frecuencias del tamaño corporal entre especies de mamíferos. Develaron la heterogeneidad casi fractal del entorno, quince años antes de que Benoît Mandelbrot describiera el fenómeno de la fractalidad y acuñara el término. Si examinamos la fauna de cualquier zona, escribían en 1959, Hutchinson y MacArthur, observamos que los grupos que contienen un número mayor de especies son, por regla general, las de tamaño pequeño. Dieron ellos a conocer un modelo de distribución del tamaño entre especies animales. Se trataba de un modelo basado en el nicho.

Los biólogos tardaron en apreciar la importancia de la alometría en ecología. Uno de los primeros en integrarla fue Brian MacNab, quien puso de manifiesto que la tasa metabólica, al fijar las exigencias de alimentación, condicionaba la influencia de los animales sobre el uso del espacio. Todos los animales se encuentran limitados en la extensión de su deambulación diaria. Resulta obvio que el tamaño del mamífero condiciona el radio máximo de acción. Pero el tamaño corporal comporta otra influencia independiente: las especies mayores deben adquirir más energía para hacer frente a sus requerimientos que las especies menores. McNab mostró que el área del espacio empleado por un individuo variaba siguiendo una ley potencial con la masa del cuerpo y difería sistemáticamente entre herbívoros y carnívoros.

La gran mayoría de las investigaciones pioneras sobre tamaño corporal y alometría se realizaron sobre animales. Las plantas presentan una variación enorme en tamaño corporal y su influjo sobre morfología, fisiología y ecología. Debemos a J. Yoda y sus colaboradores uno de los primeros trabajos alométricos en vegetales. En 1963 dieron a conocer un patrón general de autoaclareo o autoatenuación: se incrementa el tamaño y disminuye la densidad.

En los años sesenta se generalizaron varios métodos para calcular la cantidad y distribución de material particulado suspendido en el medio marino: filtros de diferente tamaño de poro, conteo, medición con el microscopio y medición de la dispersión y transmisión de la luz. Se conoció también el contador de Coulter, que poseía la doble ventaja de ser más rápido y ofrecer resultados más finos. El espectro de tamaños de un material particulado en el mar, reseñaban, en 1967, R. W. Sheldon y T. R. Parsons, se expresa mediante el volumen de la partícula en función del logaritmo del diámetro de la partícula. Constituye hoy, proseguían, la forma de presentar los datos que proporciona mayor información; además, su aplicación resulta muy apta para la división clásica entre nanoplancton, microplancton y macroplancton. La relación entre el tamaño de una partícula y el número de partículas de ese tamaño se convertiría en una de las pautas macroecológicas fundamentales en ecología marina.

El espectro del tamaño acuático se parece a la ley del autoaclareo de los árboles de Yoda, otra pauta macroecológica

fundamental. Ambas relaciones se centran en la distribución de frecuencias del tamaño en un ecosistema. Sin embargo, el autoaclareo se centra en el tamaño de un solo nivel trófico (árboles), mientras que el espectro de tamaño acuático comprende taxones muy dispares y grupos tróficos múltiples (fitoplancton, zooplancton, herbívoros y peces depredadores).

En buena parte de su historia, el estudio del registro fósil fue coto privado de la paleontología, rama de la geología hasta que, con el advenimiento de la nueva síntesis darwinista y las publicaciones seminales de G. G. Simpson, pasó a formar parte de la biología. Desarrolló entonces un enfoque más abarcador y holista de la historia de la vida y se transformó en paleobiología. Ahora, la investigación paleoecológica constituye un recurso imprescindible en macroecología y aporta una perspectiva temporal esencial sobre pautas y procesos. Al poner de manifiesto que los conjuntos fósiles formaban comunidades ecológicas y analizar su composición empleando un marco comparado cuantitativo y un marco funcional, el trabajo de E. C. Olson marca un hito en paleoecología y macroecología.

La producción primaria neta es una variable de interés capital en macroecología, aunque hasta los sesenta y los setenta no se obtuvieron estimaciones fiables de las tasas de producción primaria en medios continentales y acuáticos. Michael Rosenzweig demostró que la producción primaria neta podía predecirse a partir de variables climáticas básicas recogidas en las estaciones meteorológicas. No es fácil estudiar el mar en su inmensidad. Por eso, la ecología marina ha ido en muchos aspectos a remolque de la ecología continental. La zona intermareal ha constituido una fuente fecunda de inspiración para muchos ecólogos y en ella se han realizado importantes experimentos. En los años sesenta, los ecólogos eran conscientes de las pautas a macroescala de la diversidad marina, tales como la riqueza de los hábitats de arrecife tropical o la menguada cuantía de especies de algunos hábitats polares. Entre los métodos resaltados para medir la diversidad del bentos aparece aquí el índice de Margalef, en honor del ecólogo español Ramón Margalef López, que lo propuso en 1957 y cuya formulación reza: $d = (S - 1) / \ln N$, donde S designa el número de especies, N es el número de individuos y d indica el índice de diversidad.

—Luis Alonso



SCIENTIFIC INFERENCE. LEARNING FROM DATA

Por Simon Vaughan. Cambridge University Press; Cambridge, 2013.

Cuestiones metacientíficas

Inferencia científica y sus clases

Existen diferentes corrientes de filosofía de la ciencia, pero todas reconocen determinados elementos característicos del método científico. Cuatro de manera señalada: teoría (hipótesis o modelo propuesto), predicciones (sobre los datos posibles), datos e inferencia. Una hipótesis, un modelo, constituye una explicación de un fenómeno en términos de otros o una sugerencia de nexo entre fenómenos; además, una hipótesis útil permitirá que se avancen predicciones sobre el resultado de los experimentos u observaciones. Lo que distingue a la ciencia de otras disciplinas es la contrastación de las ideas con la realidad de la naturaleza; corresponde a las hipótesis formular predicciones que puedan someterse a contrastación empírica. Las observaciones que encajan con las predicciones de una hipótesis se consideran prueba en apoyo de la hipótesis. Si las observaciones difieren significativamente de las predicciones, entonces se toman por prueba contra la hipótesis. La inferencia remite a la comparación entre predicciones y observaciones que nos permite manejar información sobre la hipótesis o modelo.

No solo los filósofos se ocupan de esas cuestiones. Al abrir un libro científico e incluso una revista especializada no es infrecuente que nos encontremos, siquiera de forma indirecta, con problemas metacientíficos y reflexiones epistemológicas. El ejemplo de la inferencia es paradigmático. Tomemos un caso al azar: el entorno planetario. En 1917 y para explicar la depresión del componente horizontal del campo magnético de la Tierra durante las tormentas geomagnéticas, emergió la idea de la plausible existencia de una corriente

anular de partículas atrapadas que ceñían a la Tierra en altas latitudes. Una hipótesis que resultó ser acertada, tras realizarse, medio siglo después, mediciones del alcance y composición de esa corriente. Más tarde se observaron corrientes anulares de una naturaleza diferente en Júpiter, exactamente en 2001, y se infirieron en Saturno. Inferencia que se transformó en demostración en 2007 merced a las imágenes de la corriente anular en cuestión, tomadas por la sonda espacial *Cassini*. La corriente de Saturno, altamente variable, presenta fuertes asimetrías longitudinales que giran (corrotan) casi rígidamente con el planeta.

La matemática, por su parte, se basa en el razonamiento deductivo. Partimos de axiomas, aplicamos las reglas de la lógica y llegamos a teoremas. (Hemos de distinguir entre teorías y teoremas; los teoremas son producto del razonamiento deductivo; no así las teorías.)

Por inferencia hemos de entender el proceso que consiste en extraer una conclusión a partir de premisas o supuestos, un proceso que nos traslada desde la aceptación (a menudo provisional) de una proposición a la aceptación de otras; evalúa entre enunciados. También se llama inferencia a la propia conclusión. Es un concepto ligado al de argumento, constituido por un conjunto de enunciados, uno de los cuales es la conclusión y el resto lo forman las premisas. La creencia es esencial en la inferencia. Solo hay inferencia si, en razón de la creencia en las premisas, aceptamos la conclusión o afianzamos nuestra adhesión a esta con mayor firmeza que antes. Ahora bien, nadie infiere deliberadamente una contra-

dicción. En una *reductio ad absurdum* el argumento deduce una autocontradicción a partir de determinadas premisas; infiere que ciertas premisas son contradictorias. Una inferencia deductiva válida se corresponde con un argumento deductivo válido. Es lógicamente imposible que todas las premisas sean verdaderas cuando la conclusión es falsa.

La lógica y la epistemología clásicas distinguieron varias clases de inferencia y esbozaron algunos principios para separar las buenas inferencias de las malas. Entendida como deducción o ajuste de una creencia ante una nueva información, se reconocen tres modos de inferencia: deductiva, inductiva y abductiva. En las teorías deductivas, una inferencia se justifica si se conforma con un argumento válido. Desde Frege se mantiene que, aunque la inferencia sea un proceso psicológico (creencia), los principios que la hacen deductivamente correcta son válidos independientemente de cualquier hecho psicológico.

El razonamiento inductivo es un tipo de razonamiento no deductivo. De la inducción se dice que describe argumentos procediendo de casos particulares a casos generales, de los efectos a las causas. Si observamos que el Sol sale cada amanecer a lo largo de muchos días, podemos razonar inductivamente que lo hará también en días ulteriores. No podemos deducir directamente que mañana no saldrá el Sol. (No existe contradicción lógica si no sale.) De donde se desprende que el razonamiento inductivo no tiene la misma fuerza que el razonamiento deductivo: una conclusión a la que se llega a través de un razonamiento deductivo es necesariamente verdadera si las premisas son verdaderas, en tanto que una conclusión alcanzada a través de razonamiento inductivo no es necesariamente verdadera, pues se basa en información incompleta. No podemos deducir (demostrar) que el Sol saldrá mañana, lo que no obsta para que tengamos confianza en que así ocurra.

Podríamos resumir que el razonamiento deductivo concierne a enunciados que son verdaderos o falsos, mientras que el razonamiento inductivo concierne a enunciados cuyo valor de verdad se desconoce y sobre los cuales es mejor hablar de grado de creencia o de confianza. Pongamos un ejemplo: 1) premisa mayor: a todos los monos que hemos estudiado les gusta la uva; 2) premisa menor: Zipi es un mono; 3) conclusión: a Zipi le gusta

la uva. La conclusión no es inevitable y caben otras conclusiones. No existe contradicción si concluimos: a Zipi no le gusta la uva. Pese a todo, las premisas ofrecen cierta información. Parece plausible, probable incluso, que a Zipi le gusten las uvas.

Las inferencias inductivas se proyectan más allá de los datos conocidos. De la observación pertinaz de que las esmeraldas que vamos descubriendo son verdes inferimos, generalizamos, que todas las esmeraldas son verdes. Desde los tiempos de Francis Bacon, los filósofos se han afanado en la búsqueda de una lógica inductiva que especificara las condiciones bajo las cuales se justificasen tales proyecciones. Pero las objeciones parecen inapelables. Ejemplo histórico famoso es el problema de Hume. David Hume (1711-1776) denunció la propensión humana a formular predicciones a partir de regularidades observadas; mostró que no había base racional para ello. Volviendo al caso de las esmeraldas, que todas las vistas hasta ahora sean verdes es un hecho que no nos faculta para decidir que todas las demás lo serán también. El razonamiento inductivo mantiene connotaciones evidentes con el razonamiento probabilista. Se acepta que una inferencia está justificada si es conforme con los teoremas del cálculo de probabilidades.

También la abducción suele considerarse un caso especial de la inducción, en cuanto establece creencias genéricas a partir de datos conocidos. Desde hace algún tiempo importa sobre todo la abducción que es inferencia a partir de la mejor explicación, un medio de justificar la propuesta avanzada de fenómenos inobservables basándose en la fuerza de las explicaciones esgrimidas sobre fenómenos observables. En una inferencia a partir de la mejor explicación se acepta un enunciado porque constituye la mejor explicación disponible de las pruebas aducidas; se trata de derivar la conclusión que mejor explique las premisas. El concepto de inferencia a partir de la mejor explicación fue formulado por Gilbert Harman en un artículo publicado en 1965 («The inference to the best explanation»).

La regla lógica de la inferencia tiene un antecedente clásico en otro famoso ensayo, de Lewis Carroll: «What the tortoise said to Achilles», aparecido en la revista *Mind* en 1895. Planteaba, a la manera de Zenón, el problema del inicio de una prueba. Supongamos que poseo

como premisas (1) p y (2) $p \rightarrow q$. ¿Puedo inferir q ? Solo, tal parece, si estoy seguro de (3) $(p \& p \rightarrow q) \rightarrow q$. ¿Puedo entonces inferir q ? Solo, tal parece, si estoy seguro de (4) $(p \& p \rightarrow q \& (p \rightarrow q) \rightarrow q) \rightarrow q$. Para cada nuevo axioma (N) necesito un axioma ulterior ($N + 1$) que declare que lo establecido hasta entonces implica q . La regresión no termina nunca. La solución habitual acostumbra abordar un sistema como si contuviera no solo axiomas, sino también reglas de inferencia, para proceder a partir de los axiomas. La regla del *modus ponens* nos permite proceder de las primeras dos premisas a q .

Lo que distingue a la ciencia de otras disciplinas es la contrastación de las ideas con la realidad de la naturaleza

El libro escolar de Vaughan se centra, sobre todo, en la inferencia estadística, porque la ciencia, razona, no es sobre la certeza, sino que se aplica en el tratamiento riguroso de la incertidumbre. Y para ello echa mano de la estadística. La estadística y el análisis de los datos constituyen, pues, una parte esencial del método científico y de la práctica científica. En la mente del autor, el alumno debe estar capacitado para 1) explicar aspectos del método científico, tipos de razonamiento lógico y análisis de datos, así como analizar críticamente los razonamientos estadísticos y científicos; 2) calcular e interpretar resúmenes estadísticos cuantitativos y gráficos; 3) utilizar e interpretar los resultados de tests estadísticos sobre diferencia y asociación y ajuste de línea recta; 4) utilizar el cálculo de probabilidades para manipular funciones de probabilidad básicas; 5) aplicar e interpretar el ajuste de modelos, sirviéndose de mínimos cuadrados, verosimilitud máxima; 6) evaluar e interpretar intervalos de confianza y tests de significación. Del lector se demanda cierta familiaridad con los rudi-

mentos de cálculo diferencial e integral, y álgebra de matrices.

Importa atender a la recogida y manipulación de los datos. Denominado a veces análisis conformacional de datos, podemos dividir el análisis inferencial de los datos en dos tareas: comprobación de modelos y estimación de parámetros. El proceso del que se ocupa la primera consiste en escoger qué modelo, entre un grupo de ellos, aporta la explicación más convincente de los datos; la segunda corresponde al proceso de estimar valores de parámetros desconocidos de un modelo. El análisis inferencial se propone elaborar inferencias razonables y justificadas basadas en datos y en hipótesis.

Hay varias clases de datos. Los tipos principales son los siguientes: categóricos, ordinales, discretos y continuos. Los categóricos toman valores que no son numéricos, sino que pueden acomodarse en categorías específicas (registros de género: varón, mujer; tipos de partículas: piones, electrones, muones, etcétera). Los datos ordinales toman valores que pueden ser ordenados o llevan adjunta una escala, aunque la diferencia entre rangos no puede ser comparada. La escala de Likert, por ejemplo: 1. muy en desacuerdo; 2. desacuerdo; 3. neutro; 4. de acuerdo; 5. muy de acuerdo. Estos tienen un orden definido, pero la diferencia entre las opciones 1 y 2 pudiera no ser la misma que la diferencia entre 3 y 4. Los datos discretos tienen valores numéricos que son distintos y separados (1, 2, 3, etcétera). Pensemos en el número de planetas en torno al Sol o el número de partículas detectadas en un intervalo temporal. Los datos continuos pueden tomar cualquier valor dentro de un intervalo finito o infinito. Podemos contar, ordenar y medir datos continuos; por ejemplo, la energía de una partícula acelerada, la temperatura de una estrella o la intensidad del campo magnético.

Los datos pueden tener muchas dimensiones. Los hay de una sola variable (temperatura de una estrella en una muestra), de dos variables (temperatura y luminosidad de una estrella en una muestra) o varias variables (temperatura, luminosidad, distancia, de las estrellas). En el caso de dos variables, cada punto contiene dos valores, como las coordenadas de un punto en el plano; en el caso de muchas variables, cada punto es un punto en un espacio N -dimensional o vector N -dimensional.

—Luis Alonso