

# De caracoles y berilio

## Tensiones entre datos y teorías

### Un caracol insólito y la ingenuidad del alumno

A un los genios deben aprender a pensar científicamente. No solo a realizar observaciones sagaces y experimentos ingeniosos sino, también, muy especialmente, a interpretar los resultados que obtienen con esos experimentos y observaciones. Los datos solo tienen sentido en el contexto de las ideas, es decir, de teorías, pero existe una tensión no siempre sencilla de disipar entre lo que vemos y lo que inferimos, entre el dato y la teoría. Charles Darwin (1809-1882) se tropezó por primera vez con esa dura realidad de la ciencia una noche de agosto de 1831, cuando el geólogo Adam Sedgewick (1785-1873), una figura importante de los inicios la geología moderna, lo contradujo frente a su familia paterna.

Darwin tenía entonces veintidós años y era estudiante en la Universidad de Cambridge. No era un alumno muy aplicado: dedicaba la mayor parte de su tiempo a cabalgar, cazar y salir de parranda. El botánico John Henslow (1796-1861), un destacado profesor de quien era amigo, pidió en una ocasión a Sedgewick que llevara al joven Charles en una de sus expediciones geológicas por el oeste de Inglaterra.

La excursión iba a durar unos siete días y partiría de Shrewsbury, localidad cercana de la frontera con Gales, donde estaba la casa paterna de Darwin. Charles invitó al geólogo a pasar en ella la noche anterior a la partida y, durante la cena con su padre y hermanos, mencionó con entusiasmo el

hallazgo en una cantera vecina del fósil de un caracol tropical, quizá queriendo impresionar a Sedgewick. Pero este solo rió y explicó que si se tomara en serio el hallazgo habría que descartar todo lo sabido sobre la estructura geológica de la región. Lo más probable, sugirió, es que alguien hubiese dejado caer allí ese fósil.

La lección implícita en la anécdota era clara: las teorías son sólidas estructuras que permiten encontrar sentido a una multiplicidad de datos y observaciones; por ello, el hecho de que una sola observación no coincida con lo que predice la teoría correspondiente no es motivo suficiente para descartar esa teoría. En un

caso así, es más sensato descartar el dato. Darwin debió advertir esa noche que mucho le restaba por aprender sobre cómo opera la ciencia.

### Orden: un fin deseable para la enseñanza y la investigación

Como muchos estudiantes jóvenes, ese día Darwin fue al mismo tiempo ingenuo y osado. La osadía, sin embargo, no es atributo exclusivo de los estudiantes. El químico

Casa paterna de Charles Darwin en Shrewsbury, en el oeste de la región inglesa de los Midlands, cerca de la frontera con Gales.



#### ¿DE QUÉ SE TRATA?

Las historias de Darwin y Mendeleiev ilustran acerca de la relación entre teoría y datos en la investigación científica, y revelan aspectos que a veces no se tienen presentes de la índole de esta.

## UN EXPERIMENTO MUY SIMPLE

Dimitri Mendeleiev (1834-1907) cometió sus actos de osadía académica cuando ya no era alumno sino maestro. Como profesor de la Universidad de San Petersburgo, hacia fines de la década de 1860, procuraba transmitir a sus estudiantes una cantidad descomunal de información sobre miles de sustancias químicas. Buscando orden en el caos de datos, decidió estudiar las propiedades fundamentales de los elementos químicos que componen esas sustancias y notó determinadas regularidades que le permitieron confeccionar la primera versión de lo que hoy llamamos la tabla periódica. Más concretamente, percibió que si ordenaba los elementos por peso atómico creciente, ciertas propiedades parecían repetirse en forma periódica. Sobre esa base construyó una tabla con ocho columnas que agrupan elementos de propiedades químicas parecidas.

Hoy la tabla se enseña en escuelas y universidades de todo el mundo; es sintética y engañosamente sencilla, pero a Mendeleiev no le resultó fácil armarla, convencerse de su validez y persuadir a sus colegas. La verdad es que si en ese momento se ordenaban todos los elementos químicos conocidos como Mendeleiev lo sugería, no se advertían las regularidades que este había imaginado. Pero osadamente cambió algunas cosas y forzó otras; si los datos no encajaban a primera vista, siguió mirando sin amedrentarse. Como bien podía suceder que no todos los elementos hubiesen sido descubiertos, dejó casilleros vacíos en su tabla inicial. Pero aun así, había elementos que no encajaban bien, como es el caso del berilio.

## Un metal misterioso y el ingenio del maestro

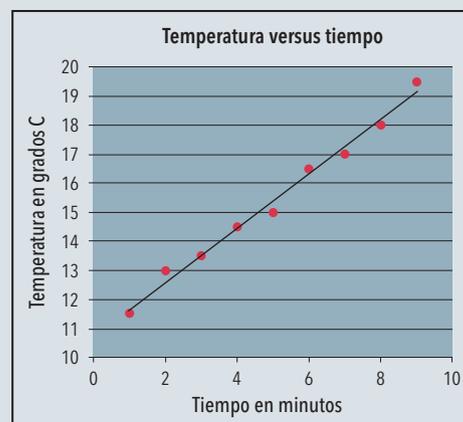
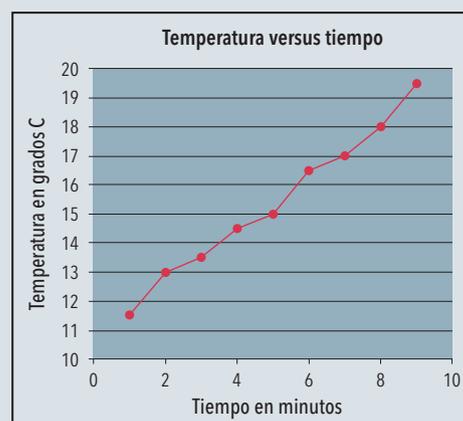
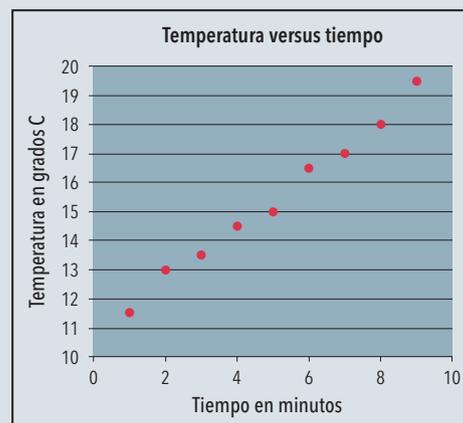
El berilio es un elemento relativamente escaso, tanto en la Tierra como en otros cuerpos celestes. En estado puro o elemental, en el que no es encontrado en la corteza terrestre, es un metal plateado y liviano, reminiscente del aluminio. Se extrae del mineral *berilo*, un silicato de berilio y aluminio  $[\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6]$  algunas de cuyas formas se consideran piedras preciosas (como la esmeralda) o semipreciosas. En la época de Mendeleiev se asignaba al berilio un peso atómico de 14,6, que lo ponía muy cerca del nitrógeno y del oxígeno, en la parte derecha de la tabla periódica, donde se alojan los no metales. Sin embargo,

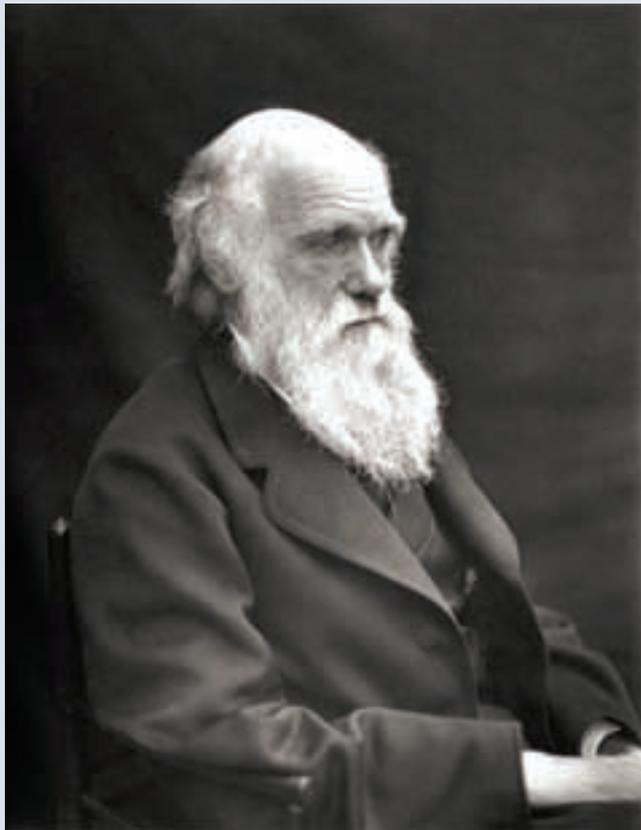
Imaginem que realizamos en el aula una medición sencillísima con una masa de agua fría que se calienta lentamente por contacto con su entorno más caliente, el cual actúa como una fuente constante de calor. Con cierta frecuencia, digamos cada minuto, medimos la temperatura del agua. Queremos saber si aumenta de manera regular, es decir, a velocidad constante. Obtenemos los datos y los registramos en un gráfico de temperatura en función del tiempo. ¿Qué hacer con esto?

Los puntos nos dan cierta idea, pero mejor sería saber qué pasa con nuestra muestra de agua en todo momento, a pesar de que no hemos medido la temperatura sino cada minuto. Es probable que la primera reacción de los alumnos sea unir los puntos con segmentos de recta, pero un poco de reflexión indica que esto no sería una buena descripción de la realidad, porque parece extraño que la tasa de calentamiento cambie bruscamente cada vez que a nosotros se nos ocurre tomar una medición (como puede verse por los cambios de pendiente en cada segmento del gráfico). Sin duda la mejor aproximación a la realidad del fenómeno es la curva que mejor acomode los datos, la cual puede obtenerse a simple 'ojo', o matemáticamente evaluando diferentes funciones por el método de los cuadrados mínimos (este elige la curva conocida para la cual la suma de los alejamientos de cada punto sea mínima). Por uno u otro camino seguramente llegaremos a una recta inclinada como indica el tercer gráfico.

Si queremos saber la temperatura del agua entre dos de nuestras mediciones, la curva sin duda nos dará una buena respuesta. Pero si nos preguntamos cuál era la temperatura a los 2 minutos de empezada la medición, nos encontramos ante dos respuestas divergentes: el dato que efectivamente medimos (13 grados) y el número que nos devuelve la curva que mejor refleja el conjunto de todos los datos (12,6 grados). ¿En qué confiar: en el dato tomado por nosotros o en el que resulta de la curva? ¿Cuál es más *real*?

La curva es una entidad teórica, una visión hipotética —y si se quiere aventurada— de la realidad, basada en datos observables y en ciertas suposiciones, como la de que los fenómenos naturales tienen cierta regularidad. Sin embargo, como acomoda muchos datos, y no solamente uno, *para sacar conclusiones generales* podemos confiar más en ella que en cualquiera de las observaciones individuales, que pudieron haber sufrido la influencia de innumerables circunstancias inadvertidas, incluso errores en el procedimiento o los instrumentos de medición.





Charles Darwin



Dimitri Mendeleiev

el peso atómico asignado al berilio sugería que debía ser menos metálico que el nitrógeno, lo cual no tenía sentido. Mendeleiev concluyó entonces que el peso atómico del berilio debía estar mal determinado.

Su conclusión no fue desatinada. Los métodos para determinar sin ambigüedades los pesos atómicos de los elementos eran entonces bastante recientes. El mejor de ellos, derivado del trabajo del químico siciliano Stanislao Cannizzaro (1826-1910) solo servía para elementos que formarían numerosos compuestos gaseosos. Para los metales se usaba la ley definida en 1819 por los físicos franceses Pierre Dulong y Alexis Petit, que hoy lleva sus nombres, según la cual el producto de la capacidad calorífica y el peso atómico es aproximadamente constante. Era una ley derivada de observaciones, sin el apoyo de una teoría, por lo que Mendeleiev se sintió autorizado a ponerla en tela de juicio. Notó que el berilio se parecía en algo a los metales alcalinotérreos, como el calcio y el magnesio, y sugirió que su peso atómico debía ser de alrededor de 9, con lo que ocuparía el cuarto puesto en la tabla periódica, después del litio y antes del boro, y encabezaría la columna de dichos metales alcalinotérreos.

El tiempo le dio la razón. Además se comprobó que la ley de Dulong y Petit se cumple mejor a altas temperaturas, y en ese caso el peso atómico del berilio sí se ajustaba a lo sugerido por Mendeleiev.

Algo parecido sucedió con el uranio, cuyo peso atómico aceptado era de 120, lo que lo ponía en un lugar ya ocupado de la tabla. Primero Mendeleiev pensó que esto se debía a un ligero error y sugirió un peso atómico de 116, pero más tarde, tras realizar varios experimentos, concluyó que el peso atómico del uranio era el doble, 240, valor vigente hoy.

Estos no fueron los únicos casos en que Mendeleiev revisó, dudó, cuestionó y replanteó datos aceptados para acomodarlos al orden que demandaba su concepción de la tabla, es decir, a la teoría que estaba elaborando.

## Teoría y datos

Al comparar estas dos historias –la del joven alumno Darwin y la del veterano maestro Mendeleiev– advertimos la presencia de una de las complejidades más interesantes que suelen aparecer en la ciencia y en su enseñanza: una tensión

entre, por un lado, aquello que vemos y medimos, que da origen a los datos con que trabajamos, y por otro lado el conjunto de ideas que elaboramos para dar sentido a esos datos y observaciones, es decir, las teorías.

Las teorías ordenan mentalmente y dan sentido a la realidad mediante esquemas racionales de ideas. Pero hacen mucho más: ofrecen una visión de la realidad que trasciende los detalles y accidentes observables y revela sus causas. En esas circunstancias, ¿qué debe primar: la contundencia de un dato concreto que efectivamente se observa y registra mediante los sentidos y los instrumentos, o una idea abstracta sobre cómo debe ser la realidad, algo no observable pero racionalmente fundado? O dicho de otra manera: ¿a qué debe asignarse más peso: a la observación primaria y concreta, o a las de ideas que ordenan y proporcionan sentido a un conjunto grande de datos?

Las dos historias relatadas muestran que la buena ciencia consiste en evaluar críticamente los datos empíricos en función de las ideas teóricas que los ponen en contexto. Un fósil individual de caracol difícilmente pueda poner en cuestión una compleja construcción de ideas acerca

## LA TABLA PERIÓDICA

La tabla periódica de los elementos es el símbolo universal de la disciplina química. Su principal función es *ordenar, clasificar y organizar* la gran variedad de elementos químicos *según sus propiedades*. El análisis de su historia muestra que no surgió en forma espontánea, ni fue el producto de la imaginación de los químicos, sino que constituyó la culminación de un largo proceso. De este, por lo menos tres aspectos constituyen los hitos salientes en el camino de la construcción de la tabla periódica.

En primer lugar, el descubrimiento de los propios elementos, que proveen el material básico del que está compuesta la tabla. Los antiguos solo conocían unos pocos, pero para la época en que se construyó la tabla ese conocimiento se había extendido a más de sesenta, gracias a los descubrimientos de la química y la física de los siglos XVIII y XIX.

En segundo lugar, el conocimiento de las propiedades de esos elementos, el cual reveló que existían ciertas semejanzas y regularidades

entre ellos. Esto motivó un interés natural en clasificarlos y ordenarlos. Un avance notable en ese esfuerzo organizativo fue la clasificación primaria de los elementos en metales y no metales, inicialmente sugerida por Antoine Lavoisier (1743-1794).

Y en tercer lugar, la medición, si bien inicialmente imprecisa, de los pesos atómicos de los elementos, una propiedad clave para ordenarlos. Las imprecisiones de los experimentos por los que se establecían esos pesos dieron lugar a polémicas y condujeron a sucesivas modificaciones de la tabla, como describe el texto para el caso del elemento berilio.

Como en otras ocasiones en la historia de la ciencia, sucedió que el importante descubrimiento de la tabla periódica acaeció casi simultáneamente en más de un lugar del mundo, señal clara de que las condiciones estaban maduras para su alumbramiento. En 1869, Dimitri Mendeleiev publicó una primera versión de ella, basada en dos premisas: la ubicación de los elementos

en el orden de su peso atómico creciente, y el agrupamiento de aquellos de propiedades similares. La versión moderna de la tabla que aquí presentamos, algo distinta de la definida inicialmente por Mendeleiev, permite apreciar la forma que toma ese agrupamiento, sin entrar en detalles que llevarían técnicamente muy lejos.

Un año después, el químico alemán Lothar Meyer (1830-1895) publicó una tabla análoga, apoyada en principios similares. Un gran mérito de Mendeleiev consistió en pronosticar la existencia de nuevos elementos, cuyas casillas habían quedado inicialmente vacías en su tabla; incluso se aventuró a pronosticar sus propiedades. Esos elementos se descubrieron con el correr de los años, y se constató experimentalmente que sus propiedades coincidieron con las vaticinadas por Mendeleiev. Este hecho, sumado a su precedencia en publicar la tabla, llevó a que los químicos, en forma unánime, lo consideren el padre de la tabla periódica.

Los números atómicos entre corchetes son estimados. Los nombres completos de los elementos se pueden encontrar en <http://www.lenntech.es/periodica/nombre/alfabeticamente.htm>

Alejandro C Olivieri  
Universidad Nacional de Rosario

Grupo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Período																		
1	H 1,008																	He 4,003
2	Li 6,941	Be 9,012											B 10,81	C 12,01	N 14,01	O 16,00	F 19,00	Ne 20,18
3	Na 22,99	Mg 24,31											Al 26,98	Si 28,09	P 30,97	S 32,07	Cl 35,45	Ar 39,95
4	K 39,10	Ca 40,08	Sc 44,96	Ti 47,87	V 50,94	Cr 52,00	Mn 54,94	Fe 55,84	Co 58,93	Ni 58,69	Cu 63,55	Zn 65,39	Ga 69,72	Ge 72,63	As 74,92	Se 78,96	Br 79,90	Kr 83,80
5	Rb 85,47	Sr 87,62	Y 88,91	Zr 91,22	Nb 92,91	Mo 95,94	Tc [98]	Ru 101,07	Rh 102,91	Pd 106,42	Ag 107,87	Cd 112,41	In 114,82	Sn 118,71	Sb 121,76	Te 127,60	I 126,90	Xe 131,29
6	Cs 132,91	Ba 137,33	*	Hf 178,49	Ta 180,95	W 183,84	Re 186,21	Os 190,23	Ir 192,22	Pt 195,08	Au 196,97	Hg 200,59	Tl 204,38	Pb 207,2	Bi 208,98	Po [209]	At [210]	Rn [222]
7	Fr [223]	Ra [226]	**	Rf [267]	Db [268]	Sg [269]	Bh [270]	Hs [269]	Mt [278]	Ds [281]	Rg [281]	Cn [285]	Uut [286]	Fl [289]	Uup [289]	Lv [293]	Uus [294]	Uuo [294]
* Lantánidos	La 138,91	Ce 140,12	Pr 140,91	Nd 144,24	Pm [145]	Sm 150,36	Eu 151,96	Gd 157,25	Tb 158,93	Dy 162,50	Ho 164,93	Er 167,26	Tm 168,93	Yb 173,04	Lu 174,97			
** Actínidos	Ac [227]	Th 232,04	Pa 231,04	U 238,03	Np [237]	Pu [244]	Am [243]	Cm [247]	Bk [247]	Cf [251]	Es [252]	Fm [257]	Md [258]	No [259]	Lr [262]			

## Clave de los colores

Metales					Metaloides	Elementos no metálicos			Propiedades químicas desconocidas
Metales alcalinos	Metales alcalino-térreos	Metales internos de transición		Metales de transición		Metales post-transicionales	Otros no metálicos	Halógenos	
		Lantánidos	Actínidos						

de la estratigrafía y el pasado geológico probable de una región, a pesar de que su estructura conceptual contenga partes oscuras o imperfectas. Lo mismo se puede decir acerca del metal díscolo. De hecho sucedió que, por más cuidado que se había puesto, la observación (o, como diría un científico, el dato experimental) estaba mal, porque las técnicas de medición no eran adecuadas o porque hubiese sido necesario tomar la capacidad calorífica a altas temperaturas.

Una de las bellezas de los cuerpos de teoría es que ayudan a decidir en qué datos confiar y cuáles revisar. Pero es una belleza no exenta de peligros, porque así como una teoría puede revelar lo que era invisible, puede llevarnos a ignorar alguna faceta de la realidad que asoma bajo nuestras mismas narices.

## De alumno a maestro

La humillación de Darwin no cayó en saco roto. En su viaje de estudio por las colinas de los Midlands ingleses y de Gales, Sedgewick no se cansó de demostrar cómo opera la ciencia geológica: caminando, haciendo innumerables observaciones en el campo, obteniendo numerosos datos y tratando de acomodar lo que se observa en el marco de lo que se sabe y se cree, en un cuidadoso proceso de modificación de las ideas y de calibración de lo que se mira y se busca.

En pocos días, el maestro y el alumno reelaboraron la concepción vigente sobre la geología de esa región particular de las islas británicas y el segundo aprendió una lección profunda. En poco tiempo zarpó en su histórico viaje a bordo del *Beagle*, durante el cual aplicó y hasta superó lo aprendido de Sedgewick. Llevó consigo un libro que le estaba proporcionando un nuevo y ambicioso marco teórico a la geología, escrito por Charles Lyell (1797-1875).

Darwin aprendió a leer la naturaleza en el espejo de ese nuevo marco general, que le resultó no solo ordenador sino también altamente inspirador, dos atributos centrales de las teorías científicas. Al final de su viaje, poco quedaba del estudiante avergonzado por Sedgewick. En pocos años más publicó su notablemente poderoso marco teórico: la teoría de la evolución por selección natural.

En *El origen de las especies* Darwin dedicó dos capítulos a argumentar por

qué el registro fósil, tan fragmentado, debe ser tomado con cautela a la hora de analizar las fortalezas y debilidades de su teoría. No solo un caracol tropical en una cantera inglesa: el registro fósil en su totalidad debía ser puesto en tela de juicio. La transformación era para entonces completa: había aprendido la fuerza de los marcos teóricos. El alumno se había convertido en maestro.

## En el aula

Sedgewick y Mendeleiev conocían perfectamente los complejos caminos por los que opera la ciencia. Como Darwin en su juventud, los alumnos de ciencias tienen dificultades en apreciar esa característica de la investigación científica. No es infrecuente que piensen que los datos son siempre confiables y que deben acumularse hasta que su sentido resulte obvio. O que crean que una simple observación brillante puede hacer desmoronar de un solo golpe el castillo de una teoría científica.

Como sucedió con Darwin, la visión ingenua del proceder científico debe ser reemplazada por otra más real, producto del trabajo educativo. ¿Cómo puede hacerse? La historia relatada sugiere que una excelente manera es salir a caminar por las colinas del oeste de Inglaterra con el mejor geólogo del momento, para hacer ciencia con él. Pero esto difícilmente resultará posible para los docentes y alumnos a quienes más probablemente llegue esta

nota. Algunos podrán hacer excursiones por la llanura pampeana, la Patagonia o los Andes centrales, por donde también anduvo Darwin con la lección aprendida de Sedgewick. Pero todos pueden ganar en comprensión de la tarea científica valiéndose del análisis de algunos cuerpos de teoría y su génesis, con la precaución de destacar al hacerlo las características que hemos puntualizado.

En otras palabras, aunque no se recurra a palabras difíciles, es necesario tener claro el criterio epistemológico implícito en lo que se desea enseñar. En nuestra concepción de la naturaleza de la ciencia y de las características de las teorías científicas, debemos incluir la no siempre fácil relación entre las observaciones, los datos que obtenemos de ellas y las ideas teóricas que nos permiten entenderlos. Los alumnos, idealmente, deberían poder enfrentarse con datos divergentes y resolver las dudas y los temores que generan. También deberían ser conducidos a observar cómo los científicos han lidiado con esas cuestiones.

Es parte de la madurez científica de un estudiante apreciar que (aun en un caso tan simple como el de la curva presentada en el recuadro 'Un experimento muy simple') es más razonable aceptar como verdadero aquello que dedujimos con muchos datos, aunque entre en cierto conflicto con cada uno de los datos individuales que registramos. Las teorías amplias nos indican el orden general de las cosas y nos dicen qué hacer o no hacer con moluscos díscolos y metales desconcertantes. **CH**

### LECTURAS SUGERIDAS

**BARLOW N** (ed.), 1958 [1887], *The Autobiography of Charles Darwin 1809-1882*, John Murray, Londres. En castellano se puede consultar: Charles Darwin, *Autobiografía*, en <http://fierasysabandijas.galeon.com/enlaces/libros/darwauto.pdf>.

**BROWNE J**, 1995, *Charles Darwin. Voyaging*, Princeton University Press.

**SCERRI ER**, 2007, *The Periodic Table. Its History and Significance*, Oxford University Press.



#### Gabriel Gellon

Doctor en ciencias biológicas (PhD), Universidad de Yale.  
Presidente, Asociación Civil Expedición Ciencia.