

**LA INTERDISCIPLINARIEDAD A LA LUZ DE LA
HISTORIA DE LA CIENCIA: ALGUNOS EJEMPLOS
TOMADOS DE LA FÍSICA, LA MATEMÁTICA, LA
MEDICINA Y LAS CIENCIAS DE LA TIERRA**

José Manuel Sánchez Ron

SEMINARIO INTERDISCIPLINAR O(S) SENTIDO(S) DA(S) CULTURA(S)
Un diálogo aberto sobre o presente e futuro da Cultura

Coordinado por Ramón Maiz

CONSELLO DA CULTURA GALEGA

**MARTES 28 DE ABRIL ÁS 17 HORAS NO CONSELLO DA CULTURA
GALEGA**

José Manuel Sánchez Ron

CURRÍCULO

José Manuel Sánchez Ron (Madrid 1949) é Licenciado en Ciencias Físicas pola Universidade Complutense de Madrid (1971) e Doutor (*Ph.D.*) en Física pola Universidade de Londres (1978). Desde 1994 é Catedrático de Historia da Ciencia no Departamento de Física Teórica da Universidade Autónoma de Madrid, foi previamente (entre 1983 e 1994) Profesor Adxunto (numerario), primeiro, e Titular despois de Física Teórica na mesma Universidade.

En marzo de 2003 foi escollido membro da Real Academia Española, na que leu o seu discurso de ingreso o 19 de outubro de 2003. Ocupa a cadeira “G”. Desde decembro de 2006 desempeña o cargo de Bibliotecario.

En decembro de 2006 foi escollido académico correspondente da Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas e Naturais.

Desde novembro de 2003 é membro da Academia Europea de Ciencias e Artes (Academia Scientiarum et Artium Europaea). En 2006 foi elixido membro correspondente da Académie Internationale d’Histoire des Sciences de París.

En 2001 recibiu o Premio José Ortega y Gasset de Ensaio e Humanidades da Villa de Madrid polo libro *El Siglo de la Ciencia* (Taurus 2000).

En 2004 recibiu o Prisma da Casa das Ciencias da Coruña ao mellor artigo de divulgación científica publicado en 2003 polo seu artigo “¿Para qué la ciencia?”, publicado en *El País*.

É autor de máis de 300 publicacións, das cales figuran unha trintena de libros, entre os que se encontran títulos como *El origen y desarrollo de la relatividad* (1983); *Miguel Catalán. Su obra y su mundo* (1994); *Diccionario de la Ciencia* (1996); *Cinzel, martillo y piedra. Historia de la ciencia en España (siglos XIX y XX)* (1999); *El Siglo de la Ciencia* (2000); *Historia de la física cuántica, I: El período fundacional (1860-1926)* (2004); *El poder de la ciencia. Historia social, política y económica de la ciencia (siglos XIX y XX)* (2007), e, con Antonio Mingote, *¡Viva la ciencia!* (2008).

LA INTERDISCIPLINARIEDAD A LA LUZ DE LA HISTORIA DE LA CIENCIA: ALGUNOS EJEMPLOS TOMADOS DE LA FÍSICA, LA MATEMÁTICA, LA MEDICINA Y LAS CIENCIAS DE LA TIERRA

José Manuel Sánchez Ron

Interdisciplinariedad

La historia de la ciencia muestra cuánto hemos avanzado en el conocimiento de la naturaleza dividiéndola en compartimentos más o menos estancos; esto es, en disciplinas como la matemática, la física, la química, la biología o la geología. Entusiasmados por semejantes “purezas” disciplinares, tendemos a olvidar que la naturaleza es una, que no conoce de semejantes divisiones. Y no sólo esto tan obvio, sino que esa misma historia de la ciencia contiene en su seno episodios que revelan lo fructíferos que son los análisis interdisciplinares; esto es, el conocimientos y técnicas que trascienden una única disciplina científica, reuniendo varias. Es mi propósito en esta charla mostrar algunos ejemplos en tal sentido, de los que se pueden extraer valiosas conclusiones, especialmente si tenemos en cuenta que, en mi opinión, el camino que está siguiendo la ciencia en las últimas décadas es, crecientemente, el de la interdisciplinariedad, algo natural, por otra parte, ya que las disciplinas tradicionales están, en más de un sentido, llegando a su límite; necesitan penetrar y ser penetradas por otras, para así cumplir el objetivo último de la ciencia que no es otro que el de describir, “explicar” (ser capaces de predecir), los fenómenos que se producen en la naturaleza.

El principio de conservación de la energía: fisiología y física

Cualquiera que tenga algunas nociones de física sabe muy bien que uno de sus útiles más preciados es el principio de conservación de la energía. Si no se sabe nada de historia de la física se pensará que la formulación de tal principio se debe únicamente a los físicos. Pues bien, no es así.

En las primeras décadas del siglo XIX todavía persistía entre médicos y muchos científicos la creencia de que la vida no se podía explicar únicamente en términos de las fuerzas que utilizaban físicos y químicos, y que había que recurrir a un *principio vital*.

Pero surgieron quienes no pensaban en términos semejantes, quienes combatían los principios vitalistas buscando dar a la medicina una base científica. Convencidos de que los procesos *vitales* obedecían a leyes deterministas de la naturaleza, argumentaban que la medicina, la verdadera medicina, esto es, la *medicina científica*, debería encaminarse a determinar cómo se comportaban los cuerpos, sujetos a tales leyes, bajo condiciones alteradas. Así, en sus declaraciones programáticas, estos individuos hacían hincapié en la utilización de experimentos fisiológicos, anatomía patológica, microscopía, química, física y, por supuesto, observaciones clínicas, como las herramientas básicas para analizar las funciones corporales y la aparición de enfermedades. Y para ello necesitaban instrumentos refinados. Es ilustrativo el caso de Emil du Bois-Reymond (1818-1896), quien se distinguió por sus trabajos en electrofisiología, una disciplina cuyos orígenes se pueden asociar con la publicación de las investigaciones de Luigi Galvani (1737-1798), en

1791, con ranas decapitadas y el subsiguiente debate que mantuvo con Alessandro Volta (1747-1827) sobre la naturaleza de la “electricidad animal”, que llevó a éste a inventar su célebre “pila” eléctrica. A lo largo de su carrera, du Bois-Reymond concentró sus investigaciones en el desarrollo de dos tipos de instrumentos: electrodos para la conducción de corrientes bioeléctricas débiles sin distorsión, y aparatos para detectar y amplificar estas corrientes. Esta línea de investigación, en la que medicina, fisiología, química y física se fecundaban y enriquecían mutuamente, terminó conduciendo a la enunciación de uno de los instrumentos más fecundos para la ciencia de los siglos XIX y XX, el principio de conservación de la energía, formulado en su forma más general por Hermann von Helmholtz (1821-1894) en 1847.

El ejemplo de Hermann von Helmholtz es especialmente significativo. Nacido en Postdam, en 1838 Helmholtz se trasladó a Berlín para iniciar sus estudios médicos en el Instituto Real Federico Guillermo Médico-Quirúrgico, una escuela de medicina destinada a formar médicos militares. El que eligiese esta escuela se debía a que su familia no poseía medios suficientes, y en el Friedrich-Wilhelm Institut los estudiantes no tenían que pagar (de hecho recibían un estipendio), a cambio de comprometerse a dedicar los ocho años siguientes a su graduación al servicio del Ejército prusiano.

Una vez finalizados sus estudios, en octubre de 1843, Helmholtz fue nombrado oficial médico y destinado al hospital militar de Potsdam. Allí permaneció cinco años. Como sus obligaciones médicas no eran excesivas pudo compatibilizarlas con la investigación, estableciendo un pequeño laboratorio en un barracón, en el que se dedicó a estudiar la producción de calor durante la contracción muscular, dándose cuenta de que la explicación del calor animal en función de transformaciones químicas en los músculos encajaba perfectamente con los propósitos de una física que no fuese ajena a los fenómenos orgánicos. Demostró entonces que el calor no era transportado a los músculos a través de los nervios o de la sangre, sino que era producido por los propios tejidos. Cuantificando estos hechos fisiológicos, dedujo un equivalente mecánico del calor que incorporó en su gran memoria de 1847, *Über die Erhaltung der Kraft, Sobre la conservación de la fuerza (energía para nosotros)*.

Veamos cómo se refirió Helmholtz a su descubrimiento en su autobiografía:

“En aquella época la mayoría de los fisiólogos habían adoptado la solución de G. E. Stahl; es decir, que a pesar de ser las fuerzas físicas y químicas de los órganos y sustancias del cuerpo vivo las que actúan sobre él, existe también dentro de él un alma, o fuerza vital, que controla las actividades de estas fuerzas. Después de la muerte la libre acción de estas fuerzas físicas y químicas produce la descomposición, pero durante la vida su acción esta constantemente regulada por el alma vital. Yo tenía la sensación de que en esta explicación existía algo contrario a la naturaleza; me costó mucho esfuerzo, sin embargo, expresar mis dudas en forma de una pregunta definida. Finalmente, durante el último año de mi carrera como estudiante me di cuenta de que la teoría de Stahl trataba a todo cuerpo viviente como si fuera un *perpetuum mobile*. Yo estaba bastante bien informado de las controversias relativas al tema del movimiento perpetuo, y había oído discutirlo a mi padre y a nuestros

maestros de matemáticas durante mis días escolares. Además, mientras fui un estudiante en el Instituto Friedrich-Wilhelm ayudé en la biblioteca, y en mis ratos libres examiné los trabajos de Daniel Bernoulli, d'Alembert, y otros matemáticos del pasado siglo. De esta manera llegué a las preguntas: ¿Qué relaciones deben existir entre las diversas fuerzas naturales para que sea posible el movimiento perpetuo?, y existen de hecho tales relaciones?. En mi memoria 'La conservación de la fuerza' mi intención era simplemente suministrar un examen crítico de estas cuestiones y presentar los hechos para beneficio de los fisiólogos”.

La historia del principio de conservación de la energía está, como vemos, asociada a diversas disciplinas, casi se podría decir de él que constituye un paradigma del mestizaje. El que fuese un médico (Helmholtz), quien, realizando investigaciones fisiológicas y beneficiándose de los conocimientos acumulados en la física, formulase en toda su generalidad el principio de conservación de la energía tiene lecturas evidentes y muy instructivas. Como he indicado, este principio fue uno de los instrumentos más fecundos para la física decimonónica, una rama de la ciencia que en aquella centuria experimentó un desarrollo que nos hace recordar, cuando lo contemplamos retrospectivamente, los producidos en tiempos de Newton. Y no sólo de entonces, ya que continúa siendo hasta la fecha uno de los pilares de la física. Pues bien, ese pilar recibió su forma definitiva dentro de una disciplina que no era la física, un detalle que nos muestra que no es posible entender la historia de la física del siglo XIX sin tomar en cuenta al mismo tiempo la de la medicina y fisiología. Precisamente debido a este hecho, podemos comprender la carrera académica de Helmholtz a partir de 1847.

En 1848, Helmholtz pudo abandonar el Ejército y aceptar la oferta de enseñar anatomía en la Academia de Bellas Artes de Berlín. Allí estuvo únicamente un año, pasando a continuación a Königsberg como profesor asociado (catedrático desde 1851) de Fisiología, donde permaneció seis años, durante los cuales continuó sus investigaciones en fisiología de los nervios (midiendo, por ejemplo, la velocidad de los impulsos nerviosos), entrando, asimismo, en la óptica y acústica fisiológica, áreas en las que siguió interesándose los siguientes veinte años. Preparando una de sus clases, se dio cuenta de que las sencillas leyes de la óptica geométrica le permitían construir un instrumento de gran importancia potencial para la comunidad médica: el oftalmoscopio.

Lo que en realidad Helmholtz quería describir el fenómeno, observado por William Cummings, un médico inglés, y por Ernst Brücke, mediante el cual el ojo humano brilla en una habitación oscura cuando se dirige luz hacia él y un observador permanece próximo a la fuente luminosa. Ni Cummings ni Brücke habían podido ver la estructura interna del ojo; siempre que se acercaban al ojo lo suficiente para escudriñar dentro de él, el destello procedente de la fuente luminosa se difundía sobre toda la pupila. Mientras preparaba su clase, Helmholtz se preguntó cómo producían una imagen los rayos de luz reflejados; se vio conducido de esta manera a estudiar las trayectorias de los rayos, descubriendo que éstos seguían caminos idénticos tanto al entrar como al salir del ojo, lo que le permitió explicar la incapacidad de Brücke de ver la estructura interna. Para observarla habría tenido que situarse directamente en la trayectoria de los rayos, bloqueando así la fuente luminosa.

Una vez interesado en el problema, Helmholtz tardó únicamente ocho días en resolverlo y en inventar un instrumento que le permitía ver la retina de un ojo vivo.

En diciembre de 1850, Helmholtz escribió a su padre expresando su sorpresa porque nadie antes que él hubiese dado con la idea del oftalmoscopio, que -añadía- solamente necesitaba de sencillas leyes de óptica geométrica. Sin embargo, subestimaba el conocimiento matemático que se necesitaba para comprender la óptica geométrica en la que se basaba el oftalmoscopio, así como el valor de su formación pluridisciplinar, algo que queda patente en lo que escribió en su autobiografía:

“Conocía bien, de mis estudios médicos, las dificultades que tenían los oftalmólogos con los problemas entonces agrupados bajo el nombre de amaurosis, e inmediatamente me puse a construir el instrumento utilizando lentes de gafas y láminas de vidrio de las empleadas como portamuestras en los trabajos con microscopio. Al principio era difícil de usar, y si no hubiese tenido la firme convicción teórica de que tenía que funcionar, no habría perseverado. Al cabo de una semana, sin embargo, tuve el gran placer de ser el primer hombre en contemplar claramente una retina humana en un ser vivo.

La construcción del oftalmoscopio tuvo un efecto decisivo en mi posición a los ojos del mundo. Desde aquel momento conté con el reconocimiento inmediato de las autoridades y de mis colegas, así como con un fuerte deseo por satisfacer mis deseos. Fui de esta manera capaz de seguir mucho más libremente los impulsos de mis ansias de conocimiento. Debo decir, no obstante, que yo atribuyo mi éxito en gran medida al hecho de que, poseyendo algún entendimiento geométrico y equipado con un conocimiento de física, tuve la buena fortuna de ser lanzado a la medicina, en donde encontré en la fisiología un territorio virgen de gran fertilidad. Además, mi conocimiento de los procesos vitales me llevó a preguntas y puntos de vista que habitualmente son extraños a los matemáticos puros y a los físicos. Hasta entonces solamente había podido comparar mi habilidad matemática con la de mis compañeros de estudios y colegas médicos; el que en general yo fuese superior a ellos en este aspecto quizá no quería decir mucho. Además, las matemáticas fueron consideradas siempre en la escuela como un tema de importancia secundaria”.

El éxito le llegó, efectivamente. En 1855, aceptó una cátedra de Anatomía y Fisiología en la Universidad de Bonn, y en 1858 una de Fisiología en Heidelberg. En 1871, se reconocían públicamente las contribuciones que había realizado a la física, con una cátedra de Física en la Universidad de Berlín. Finalmente, en 1888 fue nombrado presidente del recién creado Physikalisch-Technische Reichsanstalt (Instituto Imperial de Física Técnica), el primer Laboratorio Nacional creado en la historia, destinado a ocuparse de problemas relacionados con la investigación física que pudiesen favorecer el desarrollo industrial.

El caso de Helmholtz y, en general, el de la relación entre fisiología, medicina, química y física a lo largo del siglo XIX, muestra que aunque nos empeñemos en introducir divisiones, existe una unidad intrínseca en la historia sin la cual difícilmente podremos comprender sus aspectos más interesantes. Así, el que durante el siglo XIX se produjese un avance espectacular en los saberes médicos se debe a que fue entonces cuando las ciencias físico-

químicas pusieron a su disposición los instrumentos imprescindibles. “Pusieron a su disposición” o, mejor, “fueron creando simultáneamente”, al menos en ocasiones.

Louis Pasteur, ejemplo de científico interdisciplinar

Louis Pasteur (1822-1895) es uno de los grandes nombres de la historia no ya de la ciencia únicamente, sino de la humanidad, pero yo voy a utilizarlo aquí como un ejemplo de enfoques interdisciplinarios.

Natural de Dole, en el denominado Franco Condado, e hijo de un curtidor, tras estudiar en el Collège Royal de Besançon, en donde obtuvo el grado de bachiller en letras (1840) y en ciencias (1842), Pasteur fue admitido (en 1843) en la sección científica de la École Normale Supérieure, completando sus estudios en 1845. Dos años más tarde logró el grado de doctor por la Universidad de París, con una tesis dividida en dos partes, una de química y otra de física, la primera titulada *Recherches sur la capacité de saturation de l'acide arsénieux. Étude des arsénites de potasse, de soude et d'ammoniaque* (*Investigaciones sobre la capacidad de saturación del ácido de arsénico. Estudio de los arsenuros de potasio, la soda y el amoniacó*), y la segunda, 1. *Étude des phénomènes relatifs à la polarisation rotatoire des liquides*. 2. *Application de la polarisation rotatoire des liquides à la solution de diverses questions de chimie* (1. *Estudio de fenómenos relativos a la polarización rotatoria de los líquidos*. 2. *Aplicación de la polarización rotatoria a la solución de diversas cuestiones de química*). Lejos de ser un trabajo correcto pero más o menos intrascendente, los contenidos de su tesis, sobre todo los de la segunda parte, pertenecientes al campo de la cristalografía y la simetría molecular, resultaron tan importantes que dieron origen a una nueva rama de la ciencia: la estereoquímica, que estudia las formas tridimensionales alternativas de las moléculas. Con anterioridad a la tesis de Pasteur, se sabía de la existencia de dos formas de ácido tartárico, una que hacía girar el plano de la luz polarizada hacia la derecha, y otra que no lo hacía girar en absoluto. Pasteur fue capaz de aislar un ácido tartárico desconocido entonces, que hacía girar la luz polarizada hacia la izquierda y no hacia la derecha, y demostrar que el ácido tartárico que no hacía girar el plano de polarización de la luz estaba compuesto de dos cristales diferentes, uno el que producía giros hacia la derecha, y otro hacia la izquierda; al coexistir cristales que giraban en sentidos opuestos, el resultado era que se neutralizaban entre sí.

Comenzó así un período de la vida (1847-1857) dominado por este tipo de investigaciones, un período en el que se fue estableciendo profesionalmente. En septiembre de 1848 fue designado profesor de física en el Liceo de Dijon, pero permaneció poco tiempo en aquel puesto, ya que en diciembre del mismo año fue nombrado profesor suplente de química de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Estrasburgo, pasando a catedrático titular en 1852. En 1854 pasaba a la Universidad de Lille, la ciudad de mayor actividad industrial del norte de Francia, como decano y profesor de química de la nueva Facultad de Ciencias. En 1856, la Royal Society londinense le otorgó la prestigiosa medalla Rumford por sus estudios de cristalografía, un reconocimiento que seguramente le ayudó en acceder, el año siguiente, a París, como administrador y director de la rama de ciencias de su antigua *alma mater*, la École Normale Supérieure.

Con la instalación en la capital, el centro neurálgico de la vida francesa – incluida la científica– los intereses profesionales de Pasteur pasaron al dominio de la fermentación y generación espontánea, al que estuvo dedicado plenamente hasta 1865. Después vendrían otras etapas de su vida científica, protagonizadas por investigaciones en: enfermedades del gusano de seda (1865-1870), estudios sobre la cerveza (1871-1876) y enfermedades infecciosas (1876-1895).

No es posible detenerse ni siquiera en esbozar las motivaciones y resultados del conjunto de la obra pasteuriana, pero de entrada dos hechos saltan a la vista: (a) fue un químico y físico que terminó ocupándose de problemas médicos, y (b) no eludió las investigaciones “aplicadas”. En realidad, ambos aspectos de su carrera están íntimamente relacionados, en una mezcla casi insoluble en la que se halla una parte importante de la explicación de sus éxitos. Por un lado, estaban sus conocimientos químicos y físicos; por otro, no era ajeno al mundo que le rodeaba, al mundo, por ejemplo, de la industria de la seda o de la cerveza, el mundo agrícola o el de las enfermedades. Ambos rasgos le fueron llevando, en una secuencia que a veces uno está tentado en considerar inevitable, de un tema de investigación a otro.

Así, sus estudios sobre disimetría molecular le condujeron a ocuparse del alcohol amílico, activo también ópticamente. Ahora bien, resulta que el alcohol amílico desempeña un papel importante en la fermentación láctica. Se abría de esta manera la puerta a las investigaciones de Pasteur sobre fermentación, un hecho éste que él mismo reconoció y explicó en la sección inicial de su primer artículo en este campo “Memoria sobre la fermentación llamada láctica” (1857), que habitualmente se considera marca el inicio de la bacteriología como ciencia: “Creo que es mi deber indicar con algunas palabras cómo me he visto conducido a ocuparme en investigaciones sobre las fermentaciones. Habiendo aplicado hasta el presente todos mis esfuerzos a tratar de descubrir los vínculos que existen entre las propiedades químicas, ópticas y cristalográficas de ciertos cuerpos con el fin de aclarar su constitución molecular, quizá pueda asombrar verme abordar un tema de química fisiológica, muy alejado en apariencia de mis primeros trabajos. Sin embargo, están relacionados de forma muy directa”.

En sus investigaciones sobre la fermentación, Pasteur demostró que ésta era resultado de la acción de organismos vivos microscópicos; que no se producía cuando se excluían o aniquilaban (sometiéndoles, por ejemplo, a la acción del calor, la forma más primitiva de un proceso que, tras ser perfeccionado, recibió en honor suyo el nombre de *pasteurización*). Al llegar a semejantes conclusiones, Pasteur se había adentrado, lo quisiese o no, en una cuestión tan básica como de larga historia: la de si era posible la generación espontánea; esto es, si seres vivos pueden surgir de sustancias inanimadas. En el curso de sus investigaciones sobre la fermentación, Pasteur puso punto final de manera definitiva a esta cuestión. El lugar en el que con más rotundidad y claridad expresó sus puntos de vista es en un artículo publicado en 1862: “Memoria sobre los corpúsculos organizados que existen en la atmósfera. Examen de la doctrina de las generaciones espontáneas”. En primer lugar, demostró que hay microorganismos que viven en el aire que nos rodea y que pueden contaminar incluso el cultivo más estéril. A continuación mostró que si un caldo de cultivo estéril era introducido en un recipiente sellado al vacío, en el que no podía penetrar el aire, no surgían en él ningún microorga-

nismo. “No, no hay ninguna circunstancia hoy conocida”, manifestaba orgullosamente en una conferencia que pronunció en la Sorbona en 1864 (“La generación espontánea”), “en la que se pueda afirmar que seres microscópicos han venido al mundo sin gérmenes, sin padres semejantes a ellos. Los que lo pretenden han sido juguetes de ilusiones, de experiencias mal hechas, plagadas de errores que no han sabido percibir o que no han sabido evitar”.

Establecido este punto, era razonable pensar en aplicar el nuevo planteamiento al origen de enfermedades. Semejante convicción fue la que llevó finalmente a Pasteur a la investigación médica, que inició con el estudio del ántrax o carbunco en 1877, cuya causa asoció también con un microorganismo, la “bacteridia”. En una conferencia que leyó ante la Academia de Medicina de París en 1878 (y en cuya preparación le ayudaron dos de sus colaboradores, Jules-François Joubert y Charles Chamberland), “La teoría de los gérmenes y sus aplicaciones a la medicina y la cirugía”, Pasteur explicó con claridad el origen y naturaleza de sus intereses médicos. al igual que algunos de los problemas con los que se encontraba:

“Todas las ciencias ganan si se prestan un apoyo mutuo. Cuando después de mis primeras comunicaciones sobre las fermentaciones en 1857-1858 puede admitirse que los fermentos propiamente dichos son seres vivos, que en la superficie de todos los objetos, en la atmósfera y las aguas abundan gérmenes de organismos microscópicos, que la hipótesis de una generación espontánea es una quimera, que el vino, la cerveza, el vinagre, la sangre, la orina y todos los líquidos del organismo no sufren ninguna de sus alteraciones comunes en contacto con el aire puro, la medicina y la cirugía han dirigido sus ojos a estas novedades tan evidentes. Un médico francés, el doctor [Casimir Joseph] Davaine, hizo la primera aplicación con éxito de estos principios a la medicina en 1863.

Nuestras investigaciones durante el último año han avanzado mucho menos en la etiología de la enfermedad pútrida o septicemia que en la del carbunco. Creíamos que la septicemia dependía de la presencia y multiplicación de un organismo microscópico, pero no ha podido demostrarse rigurosamente esta importante conclusión. Para afirmar de modo experimental que un organismo microscópico es en realidad el agente de la enfermedad y el contagio, no veo otro medio, en el estado actual de la ciencia, que el de someter al *microbio* (nueva y feliz expresión propuesta por Sédillot [1878]) al método de los cultivos fuera del organismo”.

Física y matemáticas: Newton y Einstein

La relación entre matemáticas y física es de otro tipo al que he tratado en los ejemplos precedentes. Es, en primer lugar, antigua y bien establecida, motivo éste por el que bien podría prescindir de tratarla aquí. No obstante, su importancia merece que le dedique algunos comentarios. En primer lugar el caso de Isaac Newton (1642-1727) a propósito de la invención del cálculo diferencial.

Sería erróneo considerar que Newton llegó al cálculo diferencial e integral únicamente porque deseaba un instrumento adecuado para construir una teoría del movimiento, una dinámica. Por supuesto que tal apartado se encontraba entre sus objetivos científicos, pero también lo estaba el de problemas de índole matemática como hallar la tangente a una curva en cualquiera de sus puntos, algo que requiere de la derivación, el mismo ente

matemático que describe la velocidad con que se mueve un cuerpo. En cualquier caso –y este es el punto que me interesa resaltar ahora–, de lo que no hay duda es de que el hecho de que en Newton se reunieran las habilidades matemáticas y físicas fue esencial para que pudiese producir esa joya inmortal del pensamiento científico que es *Principios matemáticos de la filosofía natural* (1687), los *Principia*.

Un caso diferente, pero también ilustrador es el de Albert Einstein (1879-1955), y el papel que la matemática desempeñó en la construcción de su teoría de la relatividad general.

Hacia 1912, Einstein llegó a la conclusión de que la teoría relativista de la gravitación que buscaba debía basarse en un espacio-tiempo cuya geometría dependiese de su contenido energético-material, o, en otras palabras, que la gravitación curva el espacio-tiempo. Sería éste, en consecuencia, no sólo una variedad métrica sino también una de geometría variable, no prefijada e inmutable como sucedía con todas las teorías físicas conocidas hasta entonces. Más aún, el objeto matemático que describía esa geometría debía ser el mismo que el que describiese la fuerza gravitacional. En este sentido, la gravitación se *geometriza*; se incluía, subsumía, la gravitación en la geometría. Einstein necesitaba, por tanto, recurrir a una geometría más compleja y general que la clásica establecida en los *Elementos* de Euclides, la geometría de los espacios bi- o tri-dimensionales planos, la que contiene un postulado (el quinto) que afirma que por un punto exterior a una recta sólo puede pasar una paralela a esta; la geometría en la que se cumplen propiedades tan familiares como la de que los ángulos interiores de un triángulo suman 180 grados. Afortunadamente, la base de esa geometría n -dimensional curva se había establecido durante el siglo XIX. En efecto, los repetidos esfuerzos encaminados a demostrar que el quinto postulado de los *Elementos* de Euclides era una pieza superflua en la estructura de la obra, que podía deducirse de otros axiomas, llevaron, durante el primer tercio del siglo XIX, a la sorprendente conclusión de que no solamente era realmente independiente, sino que de su negación no se deducían contradicciones; esto es, que se puede sustituir por otros postulados alternativos que conducen a geometrías diferentes de la euclídea, pero lógicamente correctas. Me estoy refiriendo a las geometrías asociadas primordialmente a los nombres de Carl Friedrich Gauss (1777-1855), Nicolai Ivanovich Lobachevskii (1792-1856) y Janos Bolyai (1802-1860). Inicialmente, el descubrimiento de las geometrías no euclídeas no atrajo excesivo interés, pero una combinación de sucesos relanzó su estudio. En primer lugar, está la publicación, entre 1860 y 1865, de la correspondencia de Gauss con su amigo, el astrónomo, Heinrich C. Schumacher (1780-1850), con su referencia favorable al trabajo de Lobachevskii. En segundo lugar, la demostración de Eugenio Beltrami (1835-1899), en 1868, de que la geometría de Lobachevskii podía interpretarse como la geometría de una superficie de curvatura constante y negativa. Finalmente, se tiene la lección de habilitación que Bernhard Riemann (1826-1866) pronunció en 1854: *Sobre las hipótesis que sirven de fundamento a la geometría*; de ahí que sea común hablar de “espacios riemannianos”.

El problema para Einstein es que reconocía la necesidad de recurrir a una geometría curva no estática, pero no disponía de los conocimientos necesarios. La ayuda le llegó de un amigo y compañero de estudios en el Politécnico de Zúrich, Marcel Grossmann (1878-1936), que ya había

intervenido decisivamente en su vida años antes, en 1902, cuando el padre de Grossmann logró que la Oficina de Patentes de Berna emplease al entonces desvalido Albert. Cuando en febrero de 1912 Einstein fue nombrado catedrático en su antigua *alma mater*, el Instituto Politécnico de Zúrich, se encontró allí con Grossmann, que ocupaba una cátedra de matemáticas. Fue una coincidencia afortunada, ya que Grossmann se había especializado precisamente en geometría diferencial. Juntos escribieron un artículo que representa un momento decisivo en la carrera de Einstein, así como en la historia de la física. En la carrera de Einstein porque el “estilo einsteniano” cambiaría de una manera radical a partir de entonces. En la historia de la física, porque nadie hasta entonces había hecho lo que sus autores llevaron a cabo en aquel trabajo: “reducir”, geometrizar, la gravitación; utilizar un marco geométrico curvo que dependía de su contenido energético-material.

El artículo en cuestión, que la editorial Teubner decidió publicar a finales de 1913 como un folleto de 28 páginas, se titulaba *Esbozo de una teoría general de la relatividad y de una teoría de la gravitación*. Su estructura no dejaba dudas acerca de las diferentes responsabilidades de sus autores: comenzaba con una “Parte física”, firmada por Einstein, y continuaba con una “Parte matemática”, debida a Grossmann.

Las ecuaciones del campo gravitacional que se proponían en este *Esbozo* no eran correctas y Einstein terminaría por abandonarlas. Comenzó entonces un largo, complejo y con frecuencia oscuro conceptualmente, período –que sólo finalizaría en noviembre de 1915– durante el cual Einstein pugnó por determinar los principios básicos de la teoría relativista de la gravitación que buscaba, incluyendo, claro, las ecuaciones del campo gravitacional. Pero para mis propósitos aquí lo realmente importante es señalar que aunque los argumentos físicos no desaparecieron de los razonamientos de Einstein, cada vez iban cobrando más fuerza los puramente matemáticos, con el cálculo tensorial ocupando una posición central. La fascinación que Einstein iba sintiendo por el poder de las matemáticas se hace patente en el pasaje inicial del artículo que leyó en la sesión plenaria de la Academia Prusiana de Ciencias el 4 de noviembre de 1915, en el que se quedó a un paso de formular la versión final de la teoría de la relatividad general: “Nadie que la haya entendido realmente [la teoría métrica que presentaba allí] puede escaparse de su belleza, porque significa el verdadero triunfo del cálculo diferencial absoluto tal y como fundado por Gauss, Riemann, Christoffel, Ricci y Levi-Civita”.

Veintiún días después, el 25 de noviembre de 1915, Einstein presentaba a la Academia Prusiana la formulación definitiva de la teoría general de la relatividad; esto es, la formulación que incluía las ecuaciones correctas del campo gravitacional, expresadas, por supuesto, en forma tensorial.

A partir de entonces, Einstein, el viejo seguidor de la filosofía de Ernst Mach (1838-1916), sucumbió al poder de la matemática como guía heurística para la física teórica, aunque, bien es cierto, nunca olvidó que el juez último de una teoría física es siempre la experiencia. De hecho, se puede decir que en lo que se refiere a su relación de madurez con las matemáticas se refiere, Einstein recuperó sensaciones que ya había experimentado cuando tenía doce años, momento en que, como recordó en sus *Notas autobiográficas*, cayó en sus manos un librito sobre geometría euclídea. “Había allí asertos”, recordaba entonces, “como la intersección de las tres alturas de un triángulo en un punto, por ejemplo, que –aunque en modo alguno evidentes– podían probarse con

tanta seguridad que parecían estar a salvo de toda duda. Esta claridad, esta certeza, ejerció sobre mí una impresión indescriptible”. Y enseguida añadía: “Si bien parecía que a través del pensamiento puro era posible lograr un conocimiento seguro sobre los objetos de la experiencia, el ‘milagro’ descansaba en un error. Mas, para quien lo vive por primera vez, no deja de ser bastante maravilloso que el hombre sea siquiera capaz de lograr, en el pensamiento puro, un grado de certidumbre y pureza como el que los griegos nos mostraron por primera vez en la geometría”.

De la mano de la teoría de la relatividad general, redescubrió, podríamos decir, el poder de la matemática; así, a partir de un cierto momento, en torno a 1920, no encontró más guía heurística para proseguir su búsqueda de una teoría del campo unificado (una teoría que reuniese las fuerzas electromagnética y gravitacional), que la matemática. Muy ilustrativo es lo que dijo en la conferencia Herbert Spencer que pronunció en Oxford el 10 de junio de 1933:

“Si es verdad... que la base axiomática de la física teórica no puede ser extraída de la experiencia y debe ser inventada con libertad, ¿podemos esperar que alguna vez hallemos el camino correcto?... Sin ninguna vacilación responderé que , según mi opinión, existe un camino correcto y que nosotros somos capaces de hallarlo.

Hasta el momento presente nuestra experiencia nos autoriza a creer que la naturaleza es la realización de las ideas matemáticas más simples que se pueda concebir. Estoy convencido de que, por medio de construcciones matemáticas, podemos descubrir los conceptos y las leyes que los conectan entre sí, que son los elementos que proporcionan la clave para la comprensión de los fenómenos naturales. La experiencia puede sugerir los conceptos matemáticos apropiados, pero éstos, sin duda ninguna, no pueden ser deducidos de ella. Por supuesto que la experiencia retiene su cualidad de criterio último de la utilidad física de una construcción matemática. Pero el principio creativo reside en la matemática. Por tanto, en cierto sentido, considero que el pensamiento puro puede captar la realidad, tal como los antiguos habían soñado”.

Matemáticas y economía: *The Theory of Games and Economic Behavior* de von Neumann y Morgenstern

La relación entre física y matemáticas constituye un buen ejemplo del papel beneficioso que para ambas disciplinas significa la relación entre ambas, pero es muy conocido y oculta el papel que la matemática desempeña en otras materias, como la economía. Para comentar sobre tal relación, voy a utilizar algunos pasajes del capítulo I de un libro clásico en la economía matemática: *Theory of Games and Economic Behavior*, del matemático John von Neumann y el economista Oskar Morgenstern y publicado en 1944 por Princeton University Press.

En el apartado 1.2 (“Dificultades en la aplicación del método matemático”), y tras señalar algunas de las características de la economía que dificultaban el que ya se dispusiese de una teoría económica satisfactoria, von Neumann y Morgenstern escribían: “La matemática se ha utilizado en la teoría económica, tal vez incluso de forma exagerada. Pero este uso no ha tenido

demasiado éxito. Esto es contrario a lo que vemos en otras ciencias: en ellas la matemática ha sido aplicada con gran éxito, y la mayoría de las ciencias difícilmente pueden sobrevivir sin ella”. El porqué de semejante hecho residía en su opinión en que “los problemas matemáticos no se han formulado con claridad y a menudo se presentan en términos tan vagos que hacen que un tratamiento matemático parezca *a priori* imposible”. Además, “el sustrato empírico de la ciencia económica es definitivamente inadecuado”. A pesar de todo esto, ellos creían en “la posibilidad de un tratamiento matemático de estos fenómenos”. Ahora bien, y esto es lo que me importa destacar, pensaban que seguramente sería necesario desarrollar nuevas ideas y técnicas matemáticas:

“La importancia de los fenómenos sociales, la riqueza y multiplicidad de sus manifestaciones, y la complejidad de sus estructuras, es como mínimo igual a las de la física. Por consiguiente, se debe esperar o temer— que se necesitarán descubrimientos matemáticos de una estatura comparable a la del cálculo para producir avances decisivos en este campo... *A fortiori* es improbable que una mera repetición de los trucos que sirvieron tan bien en la física sirvan también para los fenómenos sociales”.

En otras palabras: von Neumann y Morgenstern estaban reclamando un tipo de esfuerzo interdisciplinar; que se intentase ir más allá del método científico tradicional en el que el uso de la matemática estaba modelizado según el ejemplo de la física, y en particular de la física newtoniana. Esto requeriría de nuevas ideas matemáticas, algo que sería beneficioso para la teoría económica, sí, pero también para la propia matemática. De hecho, en *Theory of Games and Economic Behavior* se avanzaba en tal dirección, al utilizarse profusamente la teoría de juegos, de la que el propio von Neumann es considerado “padre” (J. von Neumann, “Zur theorie der Gesellschaftsspiele”, *Mathematische Annalen* 100, 295-300 [1928]).

Ahora bien, la teoría de juegos que se utilizaba en *Theory of Games and Economic Behavior* era la de “juegos cooperativos”, y en la realidad, social al igual que económica, no siempre se coopera. Un avance notable en la dirección de acercarse a la realidad económica vendría —lo mismo que sucedió en el caso del artículo de von Neumann de 1928— de la mano del matemático John Nash; más concretamente, de la tesis doctoral que éste completó en Princeton en 1950: *Non-Cooperative Games*. Podemos considerar un homenaje a la interdisciplinariedad el que en 1994 Nash recibiese (junto a John Harsanyi y Reinhard Selten) el Premio Nobel de Economía.

Interdisciplinariedad en las ciencias de la Tierra

Las ciencias de la Tierra ofrecen otro buen ejemplo de lo fructífera que es la interdisciplinariedad, la reunión de diferentes ciencias en pos de un objetivo común, el de comprender mejor la naturaleza.

Quiero referirme, en particular, a los problemas que encontró la teoría de la evolución de las especies de Darwin, que necesitaba de un pasado muy dilatado, en la física decimonónica. Es bien conocida, en concreto, la oposición que Kelvin presentó al argumentar que según la física conocida entonces (que se consideraba muy cercana a la definitiva) la Tierra tenía un pasado que no bastaba para admitir las lentas evoluciones que Darwin suponía habían tenido lugar.

El problema residía no sólo en que la física clásica distaba de ser correcta –y pronto se vería que así era con el descubrimiento de los rayos X y de la radiactividad–, sino también en lo mucho que se desconocía de la estructura de la Tierra. De hecho, y a pesar del descubrimiento, en 1896, de la radiactividad, hasta mediados de la década de 1920 muchos –la mayoría probablemente– sismólogos aceptaban la teoría de Kelvin de que el interior de la Tierra era sólido. Las diferencias en las velocidades de las ondas podían ser debidas no a cambios en el estado físico (sólido o líquido), sino a cambios en la densidad de los materiales producidas por modificaciones en la composición química. Además, el que la temperatura del interior de la Tierra fuese aumentando con la profundidad no implicaba necesariamente que el interior se fundiese, convirtiéndose en líquido; se sabía que el punto de fusión de una sustancia aumenta con la presión, y ésta obviamente crece con la profundidad.

Ahora bien, después de que Henri Becquerel descubriese en 1896 la radiactividad, y que dos años después Marie y Pierre Curie ampliaran la lista de elementos radiactivos –inicialmente formada sólo por el uranio– con el polonio y el radio, resultó que no era necesario que la temperatura del interior de la Tierra aumentase para explicar la generación de calor, que tanto había preocupado a Kelvin: los elementos radiactivos lo producían de forma natural durante períodos de tiempo extremadamente largos.

La introducción de la radiactividad en las ciencias de la Tierra constituyó un hecho decisivo. Veamos como ejemplo los trabajos del geofísico irlandés John Joly (1857-1933). Educado como físico, Joly demostró que los anillos oscuros que se observan en la mica eran debidos a la radiación producida por pequeñas inclusiones de materiales, como la apatita, que contienen uranio y torio. La conclusión inevitable era que estos elementos radiactivos abundan en las rocas y, por consiguiente, en la naturaleza, constituyendo así una fuente ubicua de calor. Y si sucedía esto, se tenía una fuerza de transformaciones geológicas. Joly propuso –en, por ejemplo, un libro publicado en 1925, *The Surface-History of the Earth*– que al irse acumulando este calor radiactivo el substrato terrestre comenzaba a fundirse. Se producirían episodios de fundición, durante los cuales los continentes se moverían bajo la influencia de fuerzas pequeñas, tales como pequeños efectos gravitacionales que en otras condiciones no producirían ningún efecto. Para Joly, estas funciones periódicas se podrían asociar a ciclos magmáticos durante los cuales se formarían montañas.

Un año antes de la publicación del libro de Joly que acabo de citar, había aparecido otro que resultó muy influyente; definió, de hecho, durante años el campo de la física del interior de la Tierra. Se trata de *The Earth*. Su autor, el matemático, astrónomo y geofísico británico Harold Jeffreys (1891-1989); argumentaba en él que al menos una gran parte del núcleo de la Tierra debe ser fluido. Entre las técnicas que utilizaba destacaban los análisis físico-matemático de propagación de ondas. Tales técnicas, desarrolladas básicamente durante el siglo XIX, permiten distinguir entre ondas longitudinales (producidas por un medio que se comprime y expande sucesivamente) y transversales (debidas a un medio que se tuerce), que en sismología se denominan, respectivamente, ondas P y S. Las ondas longitudinales (P) pueden propagarse en cualquier sustancia que resiste a la compresión y tiende a recuperar su volumen inicial cuando se elimina la presión, algo que sucede

tanto en sólidos como en líquidos o gases. Por el contrario, las ondas S únicamente se pueden producir en sólidos.

Como vemos, las técnicas y teorías físicas fueron imprescindibles para avanzar en el conocimiento de la Tierra; de ahí el nombre de *geofísica*.

Física y geofísica

En este punto, no obstante, tengo que hacer un alto y una precisión: la de que la alianza, la colaboración, entre física y geología no fue fácil, institucionalmente, al principio.

Veamos, en este sentido, lo que, recordando sus estudios universitarios en la Universidad de Toronto, manifestó Lawrence Morley, quien realizó importantes contribuciones al paleomagnetismo.

Morley comenzó a estudiar matemáticas y física en 1938, pero pronto – en su segundo año– pasó a cursar física y geología. “Pronto me di cuenta”, señalaba, que “este curso pretendía ser un experimento interdisciplinar y que solamente nos habíamos matriculado dos estudiantes, habiendo existido únicamente un estudiante graduado en los últimos seis años, J. Tuzo Wilson, que después fue mi supervisor de tesis y uno de los miembros del grupo que produjo la teoría y el nombre de *tectónica de placas*”.

Morley también se dio cuenta enseguida del “gran golfo que existía entonces entre la mente de un geólogo y la de los físicos. Éstos consideraban inferior a la geología, viéndola como un campo descriptivo y cualitativo que no era realmente una ciencia, y los geólogos pensaban que los físicos eran ‘cabezas de huevo’ que no vivían en el mundo real. No hace falta decir que los dos grupos tenían dificultades para comunicarse profesionalmente entre sí. El curso de física y geología fue establecido de manera que la mitad de mis clases se daban en el Departamento de Geología y la otra mitad en el Departamento de Física. Pasarían algunos años hasta que diese cuenta de cómo unir ambos campos”.

La deriva de los continentes

Cuando se habla de las ciencias de la Tierra y del siglo XX, es inevitable mencionar al meteorólogo y geofísico alemán Alfred Wegener (1880-1930). Aunque otros antes que él mencionaron la idea por la que le recordamos, fue Wegener quien con más argumentos e insistencia propuso, primero en 1912 y después en un libro que publicó en 1915, *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane (El origen de los continentes y océanos)*; la idea de que los continentes se encuentran en movimiento; que en el Pérmico, esto es, hace más de 250 millones de años, y durante el Triásico (hace entre 245 y 208 millones de años), los bloques continentales que conocemos estaban agrupados en un gran supercontinente, Pangea. Más tarde, en el Jurásico (hace 208-144 millones de años), apareció la primera fisura entre Europa y África, iniciándose un proceso que ha conducido a la geografía continental actual.

Afortunadamente, la ciencia no progresa siempre sin incoherencias, y es que la idea de Wegener no casaba particularmente bien con la teoría de Kelvin de que el interior de la Tierra era sólido. Todo lo contrario, la dificultaba enormemente. ¿Cómo se iban a producir tales movimientos en un substrato sólido?

Wegener, un personaje extraordinariamente interesante (combinó sus intereses académicos con la exploración polar, que aplicaba a investigaciones meteorológicas y geológicas; falleció mientras cruzaba el casquete ártico de Groenlandia, en lo que era su cuarta expedición polar), se refirió en su libro al origen de sus ideas en los términos siguientes: “Tuve la primera intuición de la movilidad continental ya en 1910, cuando, al contemplar un mapamundi, me impresionó la coincidencia de las costas de ambos lados del Atlántico; pero por el momento no hice caso de esta idea, que me pareció inverosímil. En el otoño de 1911 conocí, a través de un trabajo de síntesis que cayó en mis manos por casualidad, los resultados paleontológicos, para mí desconocidos hasta entonces, referentes a las primitivas conexiones continentales entre Brasil y África. Esto me llevó a un examen atento, aunque por el momento fugaz, de los resultados de las investigaciones geológicas y paleontológicas referidas a esta cuestión, investigaciones que produjeron en seguida confirmaciones tan importantes que hicieron arraigar en mí el convencimiento de que eran básicamente correctas”.

Ahora bien, la simple observación de la similitud entre los perfiles orientales y occidentales de, respectivamente, Sudamérica y África no eran suficientes para concluir que en el pasado habían formado parte de un mismo continente (en 1620, Francis Bacon, por ejemplo, ya se había dado cuenta de tal coincidencia, pero no pasó de ahí). Tampoco era nueva la observación del “parentesco” animal y vegetal entre ambos lugares, deducido de algunos restos fósiles encontrados a ambos lados del Atlántico.

Wegener encontró que la distribución geográfica de las lombrices de tierra aportaba buenos argumentos en favor de la teoría de la deriva de los continentes. También se preguntó por qué se produjeron glaciaciones en ciertas épocas del pasado en continentes que ahora son tropicales. Fue, en suma, un extenso conjunto de observaciones y argumentaciones paleontológicas y biológicas, paleoclimáticas, geológicas y geodésicas, entrelazadas todas por el hilo común de su interpretación, lo que dotó de fuerza a su idea. Sin embargo, durante casi medio siglo no fueron demasiados los que aceptaron tales puntos de vista. Existía un problema fundamental: ¿mediante qué mecanismo se desplazan los continentes? Una situación ésta que hace recordar a Galileo, que carecía de un mecánica que pudiese sostener la observación de que no sentimos que la Tierra se mueva, o a Charles Darwin, que no disponía de una teoría de la herencia que pudiese sustentar su teoría de la evolución y selección natural. “La determinación y la comprobación de las traslaciones continentales relativas se ha realizado”, escribía Wegener en el antepenúltimo capítulo de su libro, “de una forma puramente empírica, a partir de la totalidad de los datos geodésicos, geofísicos, biológicos y paleoclimáticos, pero sin haber hecho ninguna consideración sobre el origen de estos procesos. Este es el método inductivo, método que las ciencias naturales se ven forzadas a emplear en la mayoría de los casos. Las fórmulas de las leyes de la gravedad y de las órbitas planetarias se determinaron en un principio de una forma puramente inductiva, por observación; sólo después apareció Newton y mostró cómo derivar estas leyes deductivamente a partir de la fórmula única de la gravitación universal”. Y añadía: “Aún no ha aparecido el Newton de la teoría de los desplazamientos”.

El que Wegener se diese cuenta de que todavía no había aparecido el “Newton de la teoría de los desplazamientos”, no quiere decir, sin embargo, que se abstuviese de proponer algún mecanismo que explicase, al menos a *grosso modo*, el movimiento continental. Utilizando diversos datos y teorías geofísicas

argumentaba que los continentes, que consideraba formados por *sial* (sílicio y aluminio, que corresponden a rocas de granito) “flotaban”, cual icebergs, sobre los más densos fondos marinos y continentales (formados por *sima*, esto es, sílicio y magnesio, o rocas de basalto), y que su movimiento se debía a fuerzas de marea producidas por la Luna, junto a una fuerza centrífuga debida a la rotación de la Tierra.

Pero este mecanismo no convenció a los geólogos contemporáneos de Wegener, ni tampoco a los de las décadas siguientes: habría que esperar a después de la Segunda Guerra Mundial y al avance experimentado por la investigación oceanográfica, impulsada por el deseo de las grandes potencias de conocer la geografía y geología de los fondos marinos. No hay que olvidar la importancia política y militar que poseían los submarinos nucleares o convencionales, que hicieron de los océanos un potencial frente de guerra durante la Guerra Fría.

En particular, los estudios realizados sobre fondos marinos durante el Año Geofísico Internacional de 1957 marcaron el punto de partida efectivo de una serie de resultados importantes, entre los cuales hay que mencionar: los estudios de paleomagnetismo (esto es, el magnetismo que queda en las rocas cuando se forman por solidificación a partir del magma) llevados a cabo por los físicos británicos Patrick Blackett (1897-1974) y Keit Runcorn; el análisis de los flujos caloríficos en las fallas y dorsales oceánicas a cargo del geofísico británico Edward Bullard (1907-1980); los trabajos relativos a la actividad sísmológica de fondos marinos realizados por los estadounidenses Maurice Ewing y Bruce Essen; anomalías gravitacionales detectadas por el geofísico holandés Felix Andries y el norteamericano Harry Hess (1906-1969). Fue este último, Hess, quien reunió estos resultados proponiendo en 1960 la hipótesis conocida subsiguientemente como “expansión de los fondos marinos”, que fue confirmada a mediados de aquella década por los geofísicos británicos Frederich Vine (1939-1988) y Drummond Matthews (1931-1997), al analizar los patrones que seguían las anomalías magnéticas a ambos lados de las dorsales oceánicas.

El estudio de las anomalías magnéticas en ciertas líneas de los fondos oceánicos fue particularmente importante y merece la pena que me detenga en él, entre otras razones porque es uno de los lugares en los que la física se ha mostrado más relevante para las ciencias de la Tierra.

Es bien sabido que la Tierra posee un campo magnético similar al que tiene un imán en forma de barra, con los polos magnéticos sur y norte coincidiendo aproximadamente con los dos extremos del eje en torno al que gira la Tierra. Si se supone que nunca se han producido variaciones en el campo magnético terrestre, entonces midiendo la inclinación del campo magnético se obtiene la latitud geográfica en la que se formó una roca.

La magnetización remanente de las rocas sedimentarias e ígneas se produce de las siguientes maneras.

En las de *origen sedimentario* el mineral que las da la capacidad de retener el magnetismo terrestre es sobre todo la hematita (Fe_2O_3). Según las partículas se van sedimentando en aguas turbias, cada grano de hematita se comporta como una pequeña aguja de una brújula que se alinea en la dirección del campo magnético terrestre. Cuando se compacta con otros minerales no ferromagnéticos, toda la roca toma la dirección del campo geomagnético, reteniendo esta magnetización indefinidamente, salvo que se la vuelva a

magnetizar calentándola a temperaturas elevadas y enfriándola o someténdola a un gran campo magnético.

Las *rocas ígneas* reciben su magnetización del campo terrestre cuando se enfrían por debajo del “punto de Curie”, que en la magnetita (Fe_3O_4), el mineral más común en las rocas ígneas, corresponde a 582°C .

Fue, efectivamente, Pierre Curie quien descubrió que cuando se calienta un material ferromagnético por encima de cierta (y alta) temperatura –ahora llamado “punto de Curie”– pierde por completo su magnetismo remanente. Recíprocamente, si se le enfría partiendo de una temperatura por encima del “punto de Curie”, logra un intenso y permanente magnetismo remanente en la dirección del campo magnético terrestre.

Por consiguiente, si a lo largo de la historia de la Tierra ha variado su campo magnético, tales variaciones se podrían detectar en las rocas, en particular en las rocas volcánicas que comenzaron su vida en magmas a temperaturas superiores a las del punto de Curie. Y a mediados de siglo existían indicaciones a favor de que en la Tierra se han producido variaciones geomagnéticas seculares. Fue un físico, Walter Elsasser (1904-1991), quien primero propuso, en 1939, que el magnetismo terrestre se debe a corrientes termoeléctricas en el núcleo líquido terrestre, que se producen debido a la existencia de fuentes radiactivas de calor. Tras detener sus investigaciones debido a la guerra, en 1946 Elsasser volvió a este campo, desarrollando más sus trabajos anteriores. Descubrió, en particular, que podían existir campos toroidales en el núcleo, y éstos proporcionarían mecanismos de amplificación del campo. Asimismo, encontró que su teoría predecía la aparición de cambios seculares en el campo magnético terrestre.

Obviamente, semejante apoyo teórico favoreció los trabajos citados de Vine y Matthews en los que analizaron los patrones que seguían las anomalías magnéticas a ambos lados de las dorsales oceánicas, imprescindibles para la nueva teoría que surgió.

Con resultados como los anteriores, finalmente en 1965 Tuzo Wilson introdujo la idea de que la superficie terrestre está formada por varias capas rígidas pero móviles. Según esta nueva síntesis, denominada “Tectónica de Placas”, no son sólo los continentes los que se mueven, sino zonas más extensas de la corteza terrestre (“placas”), que incluyen partes de los océanos al igual que masas continentales. Las placas (seis grandes y varias más pequeñas) se mueven sobre estratos más profundos, siendo la fuerza motriz corrientes lentas de magma viscoso (el magma es el material fundido que existe en el interior de la Tierra, del que se forman las rocas ígneas; la lava es magma que ha alcanzado la superficie y que se solidifica perdiendo algunos de sus componentes en el camino).