

¿Qué es la ciencia?

Introducción

Aun cuando parezca paradójico, la mayoría de las personas que se dedican a la investigación científica y que contribuyen al desarrollo y progreso de la disciplina que cultivan, no podrían formular con precisión su concepto de lo que es la ciencia, ni fijar los propósitos que persiguen, ni detallar los métodos que emplean en sus estudios, ni justificar estos métodos. Probablemente la mejor respuesta obtenible es que la ciencia es el tema del cual tratan los libros y revistas científicas, y que el método científico es el que siguen los hombres de ciencia en sus laboratorios o gabinetes, cuando se dedican a la investigación científica.

Esto se debe, a que la mayoría de los hombres de ciencia se han encauzado en su disciplina, iniciándose como aprendices junto a un maestro. Como jóvenes estudiantes, leyeron algunos tratados científicos y escucharon cierto número de conferencias sobre algún tema. El concepto general e impreciso que se formó en su mente despertó su interés. Cuando se presentaron ante el hombre de ciencia que dirigía un laboratorio o departamento, y manifestaron su deseo de dedicarse a dicha disciplina científica no preguntaron, ni se les dijo, cuál era la meta final de sus labores. El maestro no les señaló los motivos, probablemente oscuros para él mismo, que le condujeron a seleccionar el problema que les asignó. Si la capacidad del estudiante y su intuición fueron apropiadas, este primer paso, en el

maravilloso y siempre nuevo mundo de la investigación científica, les sugirió posteriormente nuevas excursiones cada vez más fructíferas. Su experiencia creció, y con ella maduró su iniciativa. Conocieron el método científico como aprendices, lo que los capacitó para elaborar contribuciones científicas importantes, y de aprendices pasaron a maestros, capaces de guiar a los aprendices de las generaciones siguientes.

La vaguedad del concepto que tienen gran parte de los hombres de ciencia sobre su disciplina, se hace ostensible en los asertos que hacen sobre la ciencia, o han hecho, algunos de ellos. Así, por ejemplo, el biólogo inglés Huxley dijo en cierta ocasión que “la ciencia es sentido común organizado.” Aparte de la dificultad de precisar qué debe entenderse por sentido común y cuál, del número indefinido de acepciones que es posible darle al término organización, es la que le correspondería en este caso a la ciencia, es obvio que, de acuerdo con el uso habitual de la expresión “sentido común,” los conocimientos científicos no son conocimientos de orden común. El “sentido común” hace generalizaciones que, en general, no se ocupa de comprobar. La ciencia exige que sus generalizaciones estén basadas en pruebas rigurosas que, o bien hayan sido verificadas, o bien sean susceptibles de verificación.

Otro biólogo inglés, Woodger, en su tratado sobre los *Principios biológicos* dice: “Una ciencia es un conjunto sistematizado de proposiciones que se refieren a un tema determinado.” De acuerdo con esta definición, una colección de chistes sobre los pericos, en que aparecieran éstos por orden alfabético, sería un tratado científico.

Hay otra serie de asertos acerca de lo que es la ciencia, que conviene subrayar y criticar. Son los que han hecho algunos filósofos. En este caso, tales personas conocen generalmente los principios de la crítica de los conceptos, sus aseveraciones son lógicas y, a menudo, hasta retóricas. El filósofo, sin embargo, frecuentemente no conoce la ciencia, porque nunca ha sido hombre de ciencia, ni ha pasado por el largo aprendizaje indispensable para la formación del hombre de ciencia. Sus juicios son, a menudo, falsos e incompletos. Por ejemplo, el filósofo francés Meyerson dice que la investigación científica abarca dos tipos de actividades: la descriptiva y la explicativa. La primera sería la que se ocupa del descubrimiento de las leyes que rigen los eventos naturales. La actividad explicativa tendría por función la de explicar esas leyes, transformándolas de aseveraciones empíricas en asertos de identidad en el tiempo (el término de invariancia sería más apropiado que el de identidad). La formulación de las leyes de los fenómenos naturales es, en efecto, una de las metas importantes de la ciencia, pero no es la única. Por otra parte, la explicación científica no consiste en la separación de las relaciones invariantes de las contingentes, como se discutirá más adelante.

Es interesante notar que los mejores críticos y analistas de la ciencia y del método científico, toman el concepto de la ciencia por concedido. Así,

en toda la magnífica serie de obras que el gran matemático francés Poincaré consagra al método científico, no está expresada ninguna definición de la ciencia, ni hay ninguna puntualización sobre las finalidades específicas o generales que la ciencia persigue. De manera semejante, los estudios excelentes de Whitehead y los de Russell versan sobre temas específicos relacionados con el método científico, pero no se preocupan por caracterizar este método en su conjunto.

PARA HACER CIENCIA ¿ES NECESARIO SABER QUE ES ÉSTA? Repito, sin embargo, que aun cuando no se tenga sino una noción vaga e imprecisa de la meta perseguida, se pueden hacer contribuciones importantes al desarrollo de una ciencia. Los principios generales de método, adquiridos por la lectura y durante el "aprendizaje," bastan para orientar una investigación determinada. Se pueden hacer estudios científicos valiosos con una actitud filosófica ingenua, con respecto a los fenómenos de la naturaleza que se investigan, a los procesos mentales que estos fenómenos desencadenan en el experimentador, y a las relaciones que hay entre dichos fenómenos y la teoría científica que resultó de los procesos mentales del investigador. Es sobre todo en las ciencias jóvenes o poco desarrolladas donde esta actitud no suscita obstáculos ni provoca tropiezos. Se puede, por ejemplo, contribuir a la fisiología sin haber llegado a ninguna decisión acerca de si los organismos animales tienen, o no, propiedades intrínsecas que les son privativas, y que los distinguirían cualitativamente de la materia inanimada. Es éste uno de los problemas básicos de la biología y su solución no podrá obtenerse con argumentos ingenuos o arbitrarios. En la física, las nociones ingenuas sobre el espacio y el tiempo, sobre la materia y la energía, pudieron sostenerse casi hasta fines del siglo pasado, para después colapsarse en bancarrota absoluta en el siglo presente.

La selección de problemas específicos para estudio siempre se basa, en gran parte, en la intuición. Pero, si bien es posible contribuir de modo importante al caudal científico sin un análisis, sin una crítica previa de lo que es, de lo que persigue el estudio científico y de cómo debe procederse para lograrlo, pienso que este análisis, y esta crítica, no pueden sino ayudar al investigador a obtener mejor fruto de su trabajo. La crítica no merma a la intuición en lo que ésta tiene de creadora y de fértil. La intuición sugiere, inventa, pero sólo la crítica puede mostrar cuando las invenciones o las sugerencias son malas y deben ser desechadas.

La crítica de los conceptos básicos de la ciencia y del método científico tienen, así, un doble interés. Contribuye al progreso de los investigadores y de las ciencias, aún en aquellos campos en los cuales esta crítica no es, por ahora, indispensable. Es, además, parte integrante de la ciencia en general, ya que hay campos de estudio que no pueden abordarse sin esta crítica previa. Pero sigamos buscando nuestra definición, ahora examinando los criterios populares.

LOS CRITERIOS POPULARES. Los criterios populares han evolucionado con el tiempo. La idea popular de la ciencia ha variado de acuerdo con los distintos tipos de individuos en quienes se pensaba residía la ciencia, o a quienes se consideraba como hombres de ciencia. Seguramente que los brujos, los hechiceros y los sacerdotes, fueron los primeros que fueron tomados como prototipos de seres que poseían la ciencia. Puesto que sabían comunicarse con los dioses eran, sin duda, los mejor dotados para trazar los caminos del progreso, o del bienestar común. Siguieron en turno los filósofos, los astrónomos y los astrólogos. Si ellos intentaban dar una explicación del Universo, o lo observaban directamente, o lo estudiaban acuciosamente ellos, seguramente, poseían la ciencia. Los alquimistas también tuvieron su lugar, junto con los herbolarios, agregaban la experimentación a la observación, y perseguían objetivos que parecían muy importantes. Más tarde, la ciencia empezó a desligarse de las profesiones y empezó a hacerse ciencia por el conocimiento mismo. Según los conceptos populares la ciencia parecía mostrar dos tendencias. Una, la de buscar el beneficio del hombre y de la humanidad. Su imagen estaría representada por el hombre de bata blanca, comiendo y durmiendo poco, trabajando sin descanso en un laboratorio oscuro, con grandes dificultades económicas, pero al fin triunfante en el hallazgo de un suero o una vacuna: la cura mágica de una enfermedad. La segunda tendencia, popularizada en las novelas, la de lograr el dominio, el poder y la fuerza, pasando por encima de las reglas éticas tradicionales. Representada ésta por el hombre encorvado, de torvo mirar, que incluso haría experimentos con el mismo hombre y crearía monstruos o máquinas de destrucción.

Los criterios populares para calificar un procedimiento o un estudio como científicos han sido también diversos. Entre ellos se puede mencionar a los siguientes:

a) La *descripción* de los hechos o eventos. Se ha dicho que el objeto primordial de la ciencia es la descripción precisa de la naturaleza. Este criterio es insatisfactorio. Es cierto que hay disciplinas científicas en las cuales la descripción ocupa un lugar preponderante. Así, la *anatomía*, el estudio detallado de la morfología de los organismos animales y vegetales, es una de las divisiones importantes de la biología. Pero la mera descripción, por minuciosa que sea, no constituye una aportación científica significativa; cuando mucho es solamente un primer paso rudimentario en el desarrollo del conocimiento. La descripción minuciosa de un edificio o de un paisaje no constituyen una aportación científica.

b) La *sistematización* de los hechos o eventos. Este criterio, que no es tan sólo popular (véase antes la crítica al biólogo Woodger), es a su vez, poco satisfactorio. Cualquier grupo o clase de hechos o eventos puede ser sistematizado en formas muy diversas, muchas de estas sistematizaciones serán totalmente ajenas a los propósitos científicos. Citemos como ejemplo el directorio telefónico. Como la descripción, la sistematización, aunque

necesaria en la ciencia, no constituye sino una etapa preliminar en el desarrollo del conocimiento.

c) La *medida*. Es este uno de los criterios más populares de la elaboración científica. Cuando un industrial ofrece al público productos ensayados "científicamente" quiere decir habitualmente que, en vez de usar procedimientos empíricos para caracterizar algunas de las propiedades de su producto, se ha recurrido a un aparato de medida. Las mediciones son, en efecto, procedimientos usuales y esenciales en la ciencia. La observación científica se reduce, en última instancia, a una serie de mediciones. Pero las medidas, por sí solas, no constituyen una aportación científica. Es obvio que si una persona mide, con un gran número de decimales, las dimensiones de un edificio o de un mueble con propósitos de calcular el valor comercial, no estará haciendo labor científica.

d) La *explicación* de los hechos. Es común decir que la ciencia busca la explicación de los eventos o fenómenos. Esencialmente, explicar algo a alguien, es procurarle una satisfacción subjetiva que es sólo incidental en los propósitos de la ciencia. Este criterio, por lo tanto, tampoco es bueno por sí solo.

e) La *predicción*. Este criterio es aceptable, pero tiene limitaciones. En efecto, como mostraremos más adelante, la ciencia permite el hacer predicciones, pero no es ésta su única misión.

f) El *conocimiento* del Universo. Es este un criterio más maduro que los anteriores. Es quizá el más favorecido por los mismos hombres de ciencia. Hay una sola objeción que hacer a este punto de vista, pero ella es importante. La noción de conocimiento es subjetiva y tiene varias acepciones. Para puntualizar la acepción que corresponde al caso de la ciencia, o recurrimos a otros criterios o los englobamos con algún calificativo que, en último análisis, será equivalente a la afirmación, obviamente circular, que el estudio científico busca el conocimiento científico. Quedaría entonces por determinar cuáles son las particularidades de este modo de *conocer* que lo individualiza y lo separa de otros modos.

COMO SE HACE LA CIENCIA. Podemos abordar el problema desde otro punto de vista, o sea señalando los problemas de la investigación científica, o examinando lo que tendrían en común los tratados científicos. Para el conocimiento científico se selecciona un fenómeno o una serie de fenómenos. Para el no iniciado, esta selección podría parecer arbitraria, pero en realidad rara vez lo es. Depende de muy diversos factores que serán analizados más adelante. Estos fenómenos son siempre abstracciones de un orden elemental, ya que nunca es posible abarcar la realidad externa en su totalidad. En otras palabras, el conocimiento científico busca regularidades en la naturaleza; se ocupa de los aspectos dinámicos reproducibles de los fenómenos naturales. Se trata de establecer relaciones, entre objetos o fenómenos, que son invariantes en el tiempo y en el espacio. Se afirma

que si estas relaciones existen hoy, existieron también ayer y existirán mañana. Ahora bien, la probabilidad de que un fenómeno dado se reproduzca en su totalidad es nula: es seguro que no han habido, ni habrán jamás dos situaciones idénticas en todos sus aspectos. Es evidente, entonces, que la búsqueda de uniformidades y de reproducibilidades implica una abstracción. En una situación compleja dada, se seleccionan algunos aspectos, algunas *variables* como importantes o pertinentes, y se hace caso omiso de otras que se consideran contingentes e incidentales, desde el punto de vista de la relación particular que se explora.

La selección que hemos hecho de estas determinadas variables constituye una nueva abstracción, ahora de un orden más elevado. Se buscan entonces las relaciones funcionales entre estas variables. La formulación de estas relaciones representa una nueva abstracción, a la que llamamos una ley científica o ley natural. En cuanto posible, se busca relacionar estas leyes con otras, y relacionarlas también con objetos, hechos o eventos, distintos de aquellos a partir de los cuales se inició el estudio. A un sistema de leyes, con relaciones mutuas, lo llamamos una teoría. La teoría es tanto mejor cuanto más general es, o sea, cuanto mayor la fracción del Universo a la cual es aplicable. Hay teorías que son aplicables a todo el Universo y de ellas se enorgullecen, con toda propiedad, los hombres de ciencia que las han formulado.

Es importante que la formulación de las leyes y de sus relaciones sea rigurosa. No hay sino un lenguaje o simbolismo apropiado para este rigor, es el de las matemáticas. Por lo tanto, aun cuando son posibles y útiles las teorías científicas sin matemáticas, no son ni tan importantes, ni tan precisas como las que pueden formularse a través de ecuaciones diferenciales.

Las leyes y las teorías solamente son manejables cuando son relativamente sencillas. Como dijo Poincaré, es una fortuna que algunos de los aspectos del Universo sean relativamente sencillos. Si en vez de poco más de un centenar de elementos químicos, hubiera varios millones de ellos, la labor del químico sería prácticamente imposible.

Hemos visto que para elaborar leyes y teorías a partir de lo concreto, se procede por abstracciones sucesivas. Para probar los resultados de observaciones aún no realizadas, o para comprobar una teoría, es preciso proceder a la inversa, o sea, volver de lo abstracto a lo concreto. Uno de los problemas más interesantes en el método científico es la formulación de reglas que nos permitan pasar del fenómeno natural, de la realidad del mundo exterior, a los símbolos con los cuales expresamos las características que hemos juzgado son importantes, es decir, las reglas de adaptación de los símbolos a los hechos. Tenemos también que fijar reglas para expresar con estos símbolos las relaciones funcionales que atribuimos a las variables correspondientes, y reglas que nos permitan descubrir relaciones nuevas entre estos símbolos y otras variables. Como hemos dicho que es necesario que nuestro conocimiento no sólo codifique la experiencia presente y la pasada.

sino que también sea aplicable a la futura, permitiéndonos predecirla y controlarla, necesitamos también reglas para volver de nuestros símbolos a los fenómenos naturales. Una de las tareas más difíciles de la intuición científica es la selección de las variables pertinentes.

En otras palabras, podemos decir que la ciencia busca modelos abstractos o teóricos lógicos, que representen fielmente las relaciones funcionales invariantes que existen en la naturaleza. Estos modelos parten de experiencias pasadas y deben ser aplicables a las futuras. La ciencia empieza y acaba siempre en la naturaleza, en una realidad externa que se postula.

Tenemos así, que los criterios que mencionamos antes como inadecuados para caracterizar a la ciencia, no representan sino aspectos parciales de ella. La descripción y la sistematización son preliminares indispensables para la identificación de los fenómenos y para la selección de las variables. Las mediciones ocupan un lugar central en el método científico. Intervienen a cada paso en la evolución de una teoría, pero una teoría esencialmente cualitativa es mejor y más útil para la ciencia que una serie muy exacta de medidas que no conducen a una teoría. Nuestros métodos de medida siempre introducen un error. Por lo que se refiere a la explicación de los fenómenos, o al conocimiento de la naturaleza, podemos decir que serán tanto más completos cuanto menor es el margen de error de nuestras medidas. Si este error pudiera ser cero, la teoría científica correspondiente sería una verdad absoluta. De hecho, las teorías siempre tienen algún error, la concordancia con los fenómenos naturales es únicamente relativa. El hombre de ciencia no tiene por qué preocuparse por la atmósfera de la infalibilidad que pudiera parecer asfixiante. El error es un incentivo intelectual y es, además, un incentivo estético. La perfección absoluta no es bella, sino en tanto que es una asíntota, un ideal.

En resumen, podemos admitir que la ciencia es el conocimiento ordenado de los fenómenos naturales y de sus relaciones mutuas. Que el conocimiento científico se ocupa de los aspectos reproducibles de la naturaleza. Que el hombre de ciencia quiere sistematizar y legislar la experiencia pasada y predecir y controlar la futura.

Los pasos sucesivos en la evolución de una teoría son:

1. Selección de las variables pertinentes en un evento o fenómeno.
2. Establecer las relaciones funcionales entre estas variables.
3. Dar valores de las constantes numéricas de estas relaciones.
4. Buscar relaciones entre ésta y otras teorías.

La base de la ciencia es que el hombre tiene la curiosidad de conocer o entender a la naturaleza. Tiene el deseo de conocer el pasado, el presente, el futuro y la concatenación temporal de los fenómenos naturales. Este programa tiene, como base filosófica, la afirmación de que existe un Universo exterior, con el cual nos podemos poner en contacto a través de nuestras sensaciones. Hay que admitir que este Universo exterior es el responsable

del desarrollo de nuestras sensaciones. Hay que postular, en seguida, que hay propiedades comunes a estos diversos entes materiales que hemos construido a partir de nuestras sensaciones. Por último, se afirma que existen regularidades o uniformidades en la sucesión temporal de los eventos que ocurren en el Universo, y que estas uniformidades son susceptibles de ser formuladas bajo la forma de leyes abstractas e invariantes en el tiempo.

¿PODEMOS DEFINIR AHORA LO QUE ES UNA OBRA CIENTÍFICA? Apliquemos ahora los conceptos anteriores. Supongamos que seleccionamos los libros siguientes:

1. El *Quijote* de Cervantes o el *Hamlet* de Shakespeare.
2. Un directorio de teléfonos.
3. Una de las obras filosóficas de Russell.
4. La *Historia de la Revolución Francesa*, de Michelet.
5. Un catálogo de una casa comercial.
6. Un tratado de anatomía humana.
7. Un texto de paleontología.
8. El tratado sobre óptica fisiológica de Helmholtz.
9. La *Teoría de la electricidad*, de Maxwell.
10. Un tratado de ecuaciones diferenciales.

Preguntamos en seguida a un grupo de personas cultas cuáles de estos libros son, en su opinión, obras científicas. Creo que habrá unanimidad en el rechazo de los tres primeros. Creo que habrá diferencias de opinión, en lo que se refiere a los cuatro siguientes. Supongo que la mayoría aceptará los tres últimos, y que coincidirán en aceptar el tratado de matemáticas como uno de los ejemplos más puros de contribución científica.

El directorio de teléfonos, es altamente abstracto y sistematizado, pero sería una base muy pobre para la formulación de leyes o teorías. La información que contiene el catálogo comercial, no sería aplicable o extensible a otros hechos u objetos. *Hamlet* o el *Quijote*, encierran conocimientos profundos y leyes sobre las relaciones interhumanas pero, por su índole, las leyes que contienen tácitamente son de aplicabilidad restringida; no se prestan para la generalización. Su arte es supremo, pero su ciencia es pobre.

El texto de historia está lleno de fechas, de datos y de hechos. Es un ejemplo de labor científica tan rudimentaria, que no puede ser considerado como obra científica. La ciencia de la historia está por hacerse. Cuando exista una teoría elaborada a partir de las variables pertinentes, que permita correlacionar los eventos de distintas épocas, y cuando se puedan extrapolar a épocas no conocidas, pasadas o futuras, las leyes aplicables a las situaciones conocidas, entonces habrá una historia científica.

En realidad, de acuerdo con los criterios que hemos adoptado, *Hamlet* o *Don Quijote* son mejor material científico que un texto de historia que se limita a citar gobernantes, batallas y otros sucesos.

Las matemáticas puras no son, en mi opinión, una ciencia. Constituyen sólo parte del método científico y difieren fundamentalmente de las ciencias en muchos aspectos que serán tratados más adelante.

Finalmente, la obra de Helmholtz y la de Maxwell, son ejemplos elevados de obras científicas de primera categoría.

Ejemplos de teorías científicas. El movimiento. El concepto de movimiento, incluye la noción de velocidad y la noción de dirección. La velocidad es espacio recorrido por unidad de tiempo. Como lleva dirección es un vector. Si la velocidad es variable, queda representada por la derivada de la distancia, con respecto al tiempo.

Una partícula puede llevar velocidades en distintas direcciones, simultáneamente. La regla para combinar estas velocidades, fue inventada por Galileo; es la llamada ley del paralelogramo, o sea la expresión de la suma de los vectores correspondientes a cada una de las velocidades. La velocidad resultante es la derivada de los cambios de posición, con respecto al tiempo.

La medida de las velocidades se hace siguiendo estas definiciones, y escogiendo un sistema adecuado de unidades. Las medidas en el espacio se hacen con reglas graduadas. Las del tiempo se hacen comparándolas con un reloj, o sea, algún sistema o mecanismo que suponemos que tiene oscilaciones cíclicas regulares.

La aceleración representa los cambios de la velocidad y corresponde, por lo tanto, a la derivada de la velocidad con respecto al tiempo, o sea, a la segunda derivada de la distancia, con respecto al tiempo. Es evidente que la aceleración es también un vector, es decir, que tiene dirección y magnitud.

La medida experimental de los valores de la aceleración de los cuerpos que suben o caen en el vacío cerca de la superficie de la Tierra, tiene un valor que es constante para un sitio determinado. Newton atribuyó estas aceleraciones a la acción de la gravedad terrestre. Es fácil demostrar que, para que un cuerpo describa un movimiento circular o elíptico alrededor de otro tomado como centro del círculo, o como uno de los focos de la elipse, es necesario aplicar al primero, una aceleración del mismo tipo de la que corresponde a la fuerza de la gravedad.

La noción de *tiempo* la percibimos directamente. La adquirimos a través de la memoria. Nos percatamos de que las sensaciones que tenemos en un momento dado, tienen una calidad, enteramente distinta para nosotros, de otras que hemos tenido en el pasado. Llegamos así, a la noción de una sucesión temporal de nuestras sensaciones. La medida del tiempo a través de un reloj lleva ya una hipótesis implícita, la de que las oscilaciones cíclicas de nuestro reloj son regulares, por ejemplo, la sucesión temporal del día y de la noche, o la llegada del sol al cenit. Corroboramos esta regularidad, porque podemos poner en fase a distintos relojes, el del sol, el de un péndulo, o el de la frecuencia que le atribuimos a un determinado sonido.

La noción de *espacio* es inferida o aprendida. La asociamos primordialmente con nuestros movimientos, con el esfuerzo que tenemos que desarrollar para alcanzar determinado objeto que nos aparece inmóvil. Después asociamos diferencias en nuestras sensaciones visuales con estas nociones de distancia, que nos dieron los receptores quinestésicos. En la práctica, para el juicio de las distancias relativamente cortas, usamos las sensaciones que corresponden a la visión más bien que cualesquiera otras de las que poseemos para hacer estos juicios. Que esta noción del espacio es aprendida, se aprecia claramente por las observaciones que se han hecho sobre ciegos de nacimiento, y que han adquirido la vista posteriormente, a una edad madura. En este tipo de inválidos, se pasan meses, y hasta años, antes de que logren construir un espacio visual e integrarlo con el espacio quinestésico que ya tenían conocido.

De los conocimientos anteriores, se pasó enseguida a conceptos abstractos elementales, los que ya no están directamente relacionados con las percepciones inmediatas. El hecho de que objetos de dimensiones semejantes, a juzgar por las sensaciones visuales, requieran esfuerzos musculares distintos para levantarlos, o sostenerlos, condujo a la noción abstracta de *peso* o *masa*. El hecho de que se necesite un esfuerzo muscular más intenso para moverlos, condujo a las nociones de *inercia* y de *fuerza*. Para que estos conceptos sean científicamente aceptables, deben llenar determinados requisitos. El primero, es que sean susceptibles de medida exacta. Ya Galileo hizo énfasis sobre la indispensabilidad de la medición rigurosa de las propiedades que se atribuyen a la materia, y lo hizo porque quería que las leyes que describieran las relaciones entre estas propiedades fueran matemáticas. El segundo requisito es que se establezca, explícitamente, y sin ambigüedades, el método que se ha de seguir para medirlas. La consecuencia lógica de estos requisitos, es que las propiedades quedan definidas exclusivamente a través de los métodos de medida.

Se dice todavía, en tratados de física que se consideran modernos, que la masa de un cuerpo indica la cantidad de materia que contiene dicho cuerpo. Esta afirmación es de una epistemología burdamente ingenua. La masa (m) de un cuerpo no constituye sino la medida numérica, en unidades convencionales, que resulta de la aplicación de un método especificado de medida. La forma más sencilla de medirla es por medio de una balanza, comparándola con una masa unitaria convencional. Se puede emplear como método de medida, el grado de distorsión que el cuerpo imprime a un resorte fijo por uno de sus extremos. Si estas distorsiones se calibran poniéndoles una escala, el método permite, en principio, la estimación de la masa. Pero si se toma el mismo cuerpo y el mismo resorte, y primero se mide la distorsión en el ecuador y después en el polo, las distorsiones no serán iguales. Se dice entonces, que la distorsión no depende de la masa sino del peso del cuerpo, y que hay una proporcionalidad entre masa y peso. Esta proporción depende de la fuerza gravitacional de la Tierra (g),

que es menor en el ecuador que en el polo, ya que la distancia de estos dos sitios al centro de la Tierra, es mayor en el primer caso.

En este caso pudo hacerse ya una inferencia teórica, o sea, la definición del peso (p): $p = mg$., el peso varía cuando varía la gravedad, pero la masa no varía. Puede además concluirse que las definiciones de velocidad, de peso y de masa, deben hacerse exclusivamente a través de los métodos de medida. Falta incluir otra abstracción elemental importante en la mecánica clásica, la del *momento*. El momento se define como el producto de la masa por la velocidad.

A partir de estas definiciones, de las abstracciones elementales, y de una serie de observaciones y experimentos, formuló Newton sus tres leyes del movimiento que fueron consideradas como exactas por mucho tiempo:

1a. Cada partícula de materia, permanece en un estado de reposo o de movimiento uniforme en línea recta, si no actúa sobre ella una fuerza exterior.

2a. La derivada del movimiento de una partícula, con respecto al tiempo es proporcional a la fuerza que actúa sobre ella, y tiene la misma dirección que la fuerza actuante.

3a. A cada acción corresponde una reacción igual y de dirección opuesta.

La primera ley se debe a Galileo, que fue el primero en reconocer que no es la velocidad de un cuerpo, sino su aceleración, lo que indica que hay fuerzas que actúan sobre él.

La segunda define a las fuerzas: la fuerza es igual al producto de la masa por la aceleración. En esta ley se basaba la teoría de Newton acerca de la inercia.

En la tercera, las acciones de las que se habla corresponden a fuerzas.

Con estas tres leyes y con la ley de la gravitación, que dice que cada partícula del Universo, atrae a cada una de las otras partículas con una fuerza que es directamente proporcional al producto de las masas de las partículas e inversamente proporcional al cuadrado de su distancia, se intentó derivar nuevas leyes aplicables a todos los tipos de movimiento de cuerpos, tanto en la Tierra como los de los cuerpos astronómicos.

El intento no fue satisfactorio. Para lograr leyes ajustables a los fenómenos fue preciso recurrir a hipótesis subsidiarias, a fuerzas arbitrarias adicionales que no aparecen en las leyes formuladas. La primera fue la de la fuerza centrífuga, una fuerza que se desarrolla cuando giran los cuerpos perpendicularmente al eje de rotación y con una dirección que los aleja de dicho eje. No bastó esta hipótesis subsidiaria aunque era suficiente, por ejemplo, para explicar la rotación de la Tierra alrededor del Sol, cuando se considera al Sol como fijo y a la Tierra como el elemento móvil. Desde luego, tal hipótesis sería inadecuada para explicar la rotación del Sol alrededor de la Tierra, si consideráramos a la Tierra como inmóvil, es decir, si tomáramos su centro como el eje de nuestro sistema de coordenadas. Tal

explicación implica que el Sol puede acelerar a la Tierra, pero ésta sería incapaz de acelerar al Sol. En otras palabras, no todos los sistemas de coordenadas empleados para describir los movimientos, eran satisfactorios. Para subsanar esta nueva dificultad, fue preciso formular una nueva hipótesis: la del espacio absoluto.

La segunda ley de Newton afirmaba entonces que la fuerza es el producto de la masa por la aceleración absoluta, o sea, la aceleración en el espacio absoluto. Las medidas deberían entonces hacerse, centrando a los ejes del espacio en los cuerpos tales como el Sol. Estos sistemas de coordenadas se designan con el nombre de inerciales.

Aún así, la teoría no es suficiente para explicar todos los movimientos. Fue preciso introducir nuevas fuerzas, por ejemplo, las de Coriolis que podían explicar la rotación del plano en el cual se mueve el péndulo de Foucault con respecto a la superficie de la Tierra.

No viene al caso detallar la historia ulterior del desarrollo de la mecánica. Mach, en 1872, fue uno de los primeros en someter la teoría de Newton a una crítica severa, y en señalar la arbitrariedad que se cometía al glorificar determinados marcos de referencia o sistemas de coordenadas, como los únicos apropiados para el estudio del movimiento, y en insistir que todos los movimientos son relativos, con respecto a los cuerpos que se mueven. Fue también el primero en sugerir que la fuerza inercial podía ser debida a una influencia de la materia de todo el Universo, teoría acerca de la cual no hay todavía una opinión unánime entre los físicos (véase Sciama, 1959). Las teorías sucesivas propuestas, culminaron con la teoría general de la relatividad formulada por Einstein, en la cual ya no es la masa, sino la energía, la que representa un papel preponderante. En esta teoría, los momentos no ocurren como una sucesión temporal de posiciones en el espacio Euclidiano tridimensional, sino que ocurren como eventos sucesivos en un espacio Riemanniano de cuatro dimensiones.

Es importante señalar la otra revolución en los conceptos de la física, la que se refiere a los modelos teóricos de la materia, que han ido cambiando en el transcurso del desarrollo de la mecánica cuántica. El modelo atómico desapareció. La masa y la energía dejaron de ser conceptos separables. La luz, considerada como un ejemplo de energía, se comporta, o como un efecto ondulatorio, o como si estuviera constituida por corpúsculos. Los únicos modelos de los átomos y de las partículas más elementales que los constituyen, así como los de los fotones de luz, son modelos estrictamente matemáticos, son ecuaciones que permiten calcular las propiedades asignadas a la materia o a la energía, y pasar después a los eventos naturales registrados, directa o indirectamente a través de nuestros órganos de los sentidos, para la verificación de las teorías. Se puede apreciar así, el alejamiento progresivo de las abstracciones elementales antropomórficas con las que empezó la física, hasta llegar a un modelo estrictamente abstracto de la materia.

La física se ocupa de las propiedades universales de la materia. Consideremos ahora otras ciencias. Durante muchos siglos, la química fue juzgada como una ciencia independiente de la física. No tenía la universalidad de ésta, ya que se ocupaba del estudio de distintos tipos de materia, de los elementos químicos y de sus combinaciones. En el curso de los últimos 70 años, ha desaparecido esta distinción radical entre estas dos ciencias. Las propiedades químicas de los distintos átomos, se pueden explicar por organizaciones distintas de las mismas partículas elementales. La diferencia entre dos elementos es consecuencia de diferencias en estructura atómica; número de protones, de neutrones, de electrones, etc., que contiene cada átomo, pero las propiedades de estos protones, neutrones y electrones son siempre las mismas, cualquiera que sea el elemento. Las propiedades químicas se pueden inferir así, de las leyes físicas. La química es realmente una rama de la física.

Por ahora, no se puede decir lo mismo de la biología. La biología escoge como su tema de estudio a ciertos tipos especiales de agrupaciones atómicas y moleculares, los organismos vivos. Estos organismos tienen propiedades características que los singularizan de otras agrupaciones atómicas y moleculares que no presentan estas características, y a las que designamos con las expresiones inadecuadas de materia inerte o inanimada; el adjetivo más apropiado sería el de "no vivos."

La afirmación anterior no implica que las leyes de la física o las de la química no sean aplicables a los organismos vivos. Estas leyes son rigurosamente aplicables para ellos, como para todos los demás objetos materiales. Por esto me parece inaceptable la definición que da Bohr de la física. Bohr afirma que la física es el estudio de las leyes elementales, que rigen sobre las propiedades de la materia inanimada.

El problema en la biología es el de señalar las leyes que corresponden a la organización característica de la materia de los seres vivos, lo que da lugar a la aparición de los fenómenos que nos permiten distinguir a estos organismos de otras entidades materiales. La actitud del biólogo es más semejante a la del ingeniero que a la del físico. A un ingeniero se le puede presentar el problema de diseñar un aparato que sea capaz de realizar determinadas operaciones físicas específicas, o bien, se le puede pedir que explique cuáles son los elementos desconocidos de un aparato que realiza determinadas funciones. El problema del biólogo es análogo a este segundo problema de la ingeniería. Dado un organismo vivo, que presenta determinadas propiedades ¿cuál es la estructura física y química que le permite realizar ciertas funciones cuando está colocado en un medio exterior adecuado? Si se tiene en cuenta la diferencia profunda entre las preguntas que hace a la naturaleza el físico por una parte, y el biólogo o el fisiólogo por la otra, es de suponer, *a priori*, que las leyes y teorías que formulan el uno y los otros tendrán que presentar también diferencias importantes.

Tenemos como ejemplo la teoría de la evolución de Darwin. Este tipo de teoría, no cabría dentro de los marcos de la física. Es una teoría esencialmente de tipo histórico, que no es formulable en términos matemáticos. Representa sin embargo, una de las contribuciones más importantes que se han hecho hasta ahora en biología. Hay teorías de tipo semejante en el campo de lo no-viviente, por ejemplo, las de la astronomía que se refieren a la evolución de las estrellas y galaxias. Pero aquí otra vez, la astronomía se sale del campo de la física; ya no está estudiando las leyes elementales de la materia, sino leyes que se refieren a organismos complejos, como son las estrellas y las galaxias. En ninguno de los dos casos, el biológico y el astronómico, se violan o contradicen las leyes de la física en la formulación de las teorías, pero no basta con aplicar estas leyes para hacer una reconstrucción adecuada del pasado, y del futuro de los seres vivos y de los astros.

Consideremos otras dos leyes de la neurofisiología: la ley del todo o nada, y la de la no especificidad de los impulsos nerviosos. La primera afirma que la iniciación de impulsos que se propagan en las fibras nerviosas, es un fenómeno cuántico; el estímulo tiene que sobrepasar un umbral de intensidad o de duración para poder iniciar un impulso, pero la magnitud y las características del impulso iniciado, no tienen relación alguna con las intensidades o duraciones del estímulo con valores superiores a los del umbral. La segunda afirma que los impulsos nerviosos, son semejantes en todas las fibras nerviosas, tanto en las motoras como en las sensoriales, cualesquiera que sean los músculos o los sistemas sensoriales que consideremos, tienen también las mismas características en las fibras del sistema nervioso central. Aquí, nuevamente, esta ley no es susceptible de expresión matemática y la formulación matemática de la primera, no ayudaría en nada ni para el rigor de su formulación ni para su aplicación. Son ellas, leyes que no satisfacen los requisitos que exige la física para las suyas. Son sin embargo, fundamentales para la comprensión del funcionamiento del sistema nervioso. Le imponen restricciones rígidas y le limitan los grados de libertad que posee. Un sistema nervioso, en el cual los elementos no siguieran estas leyes, tendría propiedades radicalmente distintas de las que encontramos en las especies de organismos que poseen sistema nervioso.

No quiero dejar la impresión de que ninguna de las leyes de la fisiología, es susceptible de ser expresada en ecuaciones. Las hay, y son numerosas, las que pueden ser formuladas de esa manera. Algunas de ellas son derivaciones directas de las de la física o de la química, otras no, ya que se refieren a fenómenos de los que son específicos de los organismos vivos. Muchas son meramente empíricas, es decir, que encierran parámetros y aún conceptos arbitrarios no definidos ni física ni fisiológicamente, por ejemplo, las de las teorías de la excitabilidad de las fibras nerviosas y musculares. Pienso, sin embargo, que en todo caso aparecerán en biología teorías y leyes del tipo de la teoría de la evolución que, a pesar de que no sean

susceptibles de formulación matemática son importantes, porque señalan uniformidades de aplicación muy general.

Las diversas ramas de la biología ilustran en una forma interesante, los diversos aspectos de los estudios científicos. La anatomía no es sino una descripción sistemática y detallada de la estructura de las células, de los tejidos y de los órganos de un ser vivo; no se ocupa de problemas dinámicos ni conduce a la formulación de leyes. La taxonomía no es sino la sistematización o clasificación racional de los diversos organismos, tampoco se ocupa de problemas dinámicos ni conduce a la formulación de leyes. Consideradas como disciplinas aisladas, probablemente, no merecerían el calificativo de científicas pero, sin ellas, el estudio de los procesos dinámicos, la embriología, el crecimiento, la fisiología, etc., se verían seriamente limitados o serían imposibles.

La observación y la experimentación

Es clásico dividir a las ciencias en dos grupos, uno el de las de observación, por ejemplo, la astronomía; y el otro, el de las experimentales, como la física o la fisiología. Esta división implica que hay diferencias esenciales entre la observación y la experimentación científicas. De hecho, muchos de los analistas del método científico, aceptan estas diferencias e intentan proponer criterios para distinguir una de la otra.

Se dice frecuentemente que la diferencia entre una observación y un experimento, estriba en que en la primera el fenómeno en estudio se desarrolla sin interferencia externa, en tanto que en la segunda, el desarrollo de los hechos ocurre en condiciones previamente planeadas y controladas. Dicho de otro modo, la observación sería el registro, o simplemente la contemplación pasiva, de los hechos o fenómenos, tal como se presentan en la naturaleza; en tanto que la experimentación sería activa, ya que el experimentador ocasiona o suscita los fenómenos que desea estudiar. La contemplación del observador sería imparcial y pasiva, en contraste con la actitud del experimentador que sería selectiva y activa. Estas definiciones encierran dos criterios independientes para hacer la distinción de que estamos tratando: primero, el contraste entre la pasividad del observador con la actividad del experimentador y, segundo, el que se refiere a la naturaleza de los hechos estudiados, que se califican de “naturales” en la observación, y “provocados” en la experimentación.