

Aspectos histórico-didácticos acerca del elemento químico

Mónica Franco Noceto

Profesora de educación media en la especialidad Química, egresada del IPA. Diploma de Estudios Profundos en Didáctica (DEA) de las Disciplinas Científicas por la Universidad Lyon I, Francia. Diploma de Evaluación de Aprendizajes (UCU). Posgrado en Gestión Educativa (FLACSO). Coautora del libro *Didáctica de las Ciencias Experimentales: Aportes y Reflexiones desde la Educación Química*; de libros de Química para tercer año de Ciclo Básico y primer año de Bachillerato, *Todo se transforma*. Autora y coautora de varios artículos sobre Didáctica y Educación en Ciencias. Es Inspectora de Química Grado I del CES, en funciones de Asesora Docente del Departamento Docente desde 2015. Profesora efectiva de Didáctica Especial de Química del Instituto de Profesores "Artigas".

Manuel Nieto Espiñeira

Profesor de educación media en la especialidad Química, egresado del IPA. Post grado en Gestión de Centros Educativos (UCU). Magíster en Educación, especialista en Currículum y Evaluación (UCU). Diploma en Evaluación de Aprendizajes (UCU). Otros estudios a nivel de post título: Materiales Didácticos (Flacso), Neuroeducación (Asociación Educar). Es coautor del libro *Didáctica de las Ciencia Experimentales: Aportes y Reflexiones desde la Educación Química*; de libros de Química para cuarto año: *Química: un enfoque planetario* y para Magisterio, *Física y Química para Magisterio*. Es autor y coautor de diferentes trabajos y artículos para diferentes eventos académicos y publicaciones en Didáctica y educación en Ciencias. Es Inspector de Química Grado I del CES y Profesor efectivo de Didáctica Especial de Química del Instituto de Profesores "Artigas".

Resumen

La construcción del concepto de elemento químico, en tanto que estructurante de la disciplina, constituye uno de los objetivos de aprendizaje pretendidos por los docentes. Este concepto se encuentra estrechamente vinculado con otros tales como los de sustancia simple, sustancia compuesta y reacción química, ideas fundantes de la química. En este artículo presentamos un recorrido histórico desde las primeras consideraciones al respecto hasta las ideas actuales, con un abordaje desde la Didáctica de la Química. Pensamos que la reflexión sobre los aspectos epistemológicos y didácticos vinculados con el concepto de elemento químico puede ser importante para los profesores a la hora de diseñar estrategias didácticas al respecto.

Palabras clave: elemento químico; sustancia.

Title: *Historic and didactic aspects of the chemical element.*

Abstract

The chemical element concept construction gives shape to the discipline and is also one of the teacher's learning goals. It is closely linked with other concepts such as simple substance, compound substance and chemical reaction, fundamental ideas of chemistry. From a Didactics of Chemistry approach, we present in this paper a historical journey from the first considerations in this matter to the ideas of today. We think that reflection on the epistemological and didactic aspects

related to the concept of chemical element can be important for teachers when designing didactic strategies for this topic.

Keywords: chemical element, substance.

Una aproximación histórica al concepto de elemento químico

Desde tiempos remotos, la humanidad ha buscado comprender la composición de la materia y la naturaleza de sus transformaciones. Por primera vez en la historia de occidente, fueron los griegos, 600 años A.C., quienes buscaron explicar los fenómenos de la naturaleza de manera racional, por oposición a las visiones mágicas propuestas con anterioridad. Durante los cien primeros años de ese periodo, los filósofos griegos creyeron que toda la materia estaba formada de una sola sustancia o elemento. Tales (650 A.C.), primer filósofo griego que desarrolló esta idea, consideraba que esa sustancia era el agua, mientras que Anaximandro (610 - 517 A.C.) pensaba que se trataba de una sustancia imposible de conocer, que existía bajo cuatro formas diferentes: agua, bruma, fuego y tierra. Anaxímenes (550 - 480 A.C.) creía que el ingrediente esencial era la bruma.

Para Heráclito (540 - 450 A.C.) toda la materia se habría formado a partir del fuego al cual adjudicaba una naturaleza material; atribuyó el origen y las transformaciones de la materia a ese elemento. Contrariamente, Parménides (540 - 450 A.C.) se negaba a aceptar la realidad de los cambios, considerando que el ser es inmutable, por

lo que si el ser cambiara sería el no ser y este no existe. Por otra parte, Empédocles (490 A.C.) propuso la existencia, no de una sola sustancia, sino de cuatro elementos distintos – agua, fuego, aire y tierra– que compondrían toda la materia. Es preciso señalar que en esta época no eran las sustancias sino sus propiedades las que se consideraban elementales.

Entre los filósofos chinos e indios, los elementos considerados no diferían mayormente de las ideas de los griegos. Lao Tze en el siglo VI A.C. consideró cuatro elementos: madera, tierra, metal y agua, que podrían convertirse uno en otro y una teoría budista maneja ideas semejantes a las ideas de Empédocles.

La primera teoría corpuscular de la materia fue planteada por los griegos Leucipo y Demócrito (460 A.C.); para ellos, el universo estaba compuesto de átomos que se movían en el vacío. Siendo todos los átomos sólidos, debían estar compuestos de un mismo elemento desconocido. Una gran variedad de tamaños y formas de los átomos debía diferenciar los diversos tipos de materia. Los átomos eran considerados indivisibles, de ahí la elección del nombre *a-tomo* que en griego significa 'que no se puede dividir'.

Esta visión atomista de la materia fue fuertemente criticada por Aristóteles (350 A.C.) quien no admitía la existencia de espacio vacío entre los átomos. Retomó las ideas anteriores afirmando que toda la materia estaba constituida por proporciones variadas de los elementos agua, fuego, tierra y aire, siendo cada uno de ellos una forma diferente de una misma



Desde tiempos remotos, la humanidad ha buscado comprender la composición de la materia y la naturaleza de sus transformaciones. Por primera vez en la historia de occidente, fueron los griegos, 600 años A.C., quienes buscaron explicar los fenómenos de la naturaleza de manera racional, por oposición a las visiones mágicas propuestas con anterioridad. Durante los cien primeros años de ese periodo, los filósofos griegos creyeron que toda la materia estaba formada de una sola sustancia o elemento.

materia primaria, eterna e imposible de aislar. La doctrina aristotélica se extendió y dominó la civilización occidental, prácticamente hasta el siglo XVII.

En la Edad Media, según De Vos (1985), se propuso otra teoría corpuscular de la materia conocida como teoría de los *mínima naturalia* según Bartolomeu y García (2006: 24). En el marco de esa teoría, cada sustancia debería estar compuesta por *mínima naturalia* –partes pequeñas de las cosas– que conservarían las propiedades de las mismas, excepto la divisibilidad. Es importante considerar estas ideas, ya que se encuentran en los estudiantes, quienes presentan una tendencia a atribuir a las partículas individuales las características observables de las sustancias. Esto se ha denominado en ocasiones *sustancialismo* (M. Franco, 1990). Sin embargo, algunos autores pensaban que las partículas podían ser divididas sin límite.

Hacia la segunda mitad del Siglo XV, los *mínima naturalia* comenzaron a ser identificados con partículas, renovándose el interés por las ideas atomistas, lo cual se vio reflejado en numerosas obras como las del alemán D. Sennert o el alquimista norteamericano G. Starkey. Las nuevas formulaciones del atomismo tuvieron entre sus defensores a R. Descartes y R. Boyle, entre otros. Todos ellos pretendían explicar los fenómenos que observaban mediante figuras, representando los movimientos y choques de estas partículas que formaban todos los cuerpos.

La naturaleza de los elementos

En el siglo XVII las ideas acerca de la composición de la materia cambiaron. En ese momento, los investigadores analizaron en profundidad el poema *De Rerum Natura* (*De la Naturaleza de las cosas*, traducido 2003) del atomista griego Lucrecio (año 100 A.C.), donde sostenía que ciertas leyes naturales gobernaban el mundo.



Figura 1. *De Rerum Natura*. Imagen recuperada 15/06/19 en https://www.google.com/search?q=de+rerum+natura&client=ubuntu&hs=nUU&channel=fs&source=lnms&tbn=isc&sa=X&ved=0ahUKewji84aN5oTjAhXAGbkGHWARBa8Q_AUIECgB&biw=1313&bih=579#imgcr=rNS_xWfCR4UyVM: (15/06/19)

Ese análisis condujo a interpretar los elementos de Aristóteles en términos atomistas. Citemos como ejemplo al astrónomo italiano G. Galilei, que desarrolló una explicación atómica de las propiedades de los sólidos y los líquidos.

El físico inglés R. Boyle, luego de haber tratado de aislar los cuatro elementos de Aristóteles con técnicas analíticas sin éxito, adhirió también a las ideas atomistas. Marcó el punto de inflexión respecto de la antigua filosofía, proponiendo una definición de elemento. Así definió los cuerpos simples como aquellos que constituyen los cuerpos mixtos o compuestos. Boyle descartó la idea de transmutación de las sustancias tan fuertemente sostenida por los alquimistas árabes en la Edad Media. Para Boyle, a cada elemento le corresponde un tipo de átomo, y cada uno de ellos está formado por una misma sustancia primaria. La diferencia entre los átomos de los diversos elementos radica en el tamaño, la forma y el movimiento de estos. Así distingue las *texturas* (combinaciones de partículas del mismo tipo) y las *mixturas* (combinaciones de partículas de diferentes tipos), las cuales corresponderían a lo que posteriormente fueron consideradas como moléculas de un cuerpo simple y de un cuerpo compuesto, respectivamente.

Por otra parte, las ideas de Newton imponían la concepción corpuscular de la materia, a partir de un razonamiento irrefutable:

El desgaste de los cuerpos solo se puede realizar mediante fraccionamiento en partículas. Estas últimas son duras y no se pueden dividir... Por lo tanto, para que la materia pueda ser duradera, la alteración de los seres corporales debe consistir solo en diferentes separaciones, nuevos ensamblajes y movimientos de estas partículas permanentes. (New-

ton, citado por Taton 1957-1964).

El estudio de los gases, los líquidos y los sólidos avanzó muchísimo durante parte del siglo XVIII. Fue el químico francés A. Lavoisier, quien realizó grandes contribuciones a esos estudios y propuso una definición de elemento químico. En el *Tratado elemental de Química* escribió:

Vinculamos al nombre de elementos o principios de los cuerpos la idea del último término al que llega el análisis; todas las sustancias que no hemos podido descomponer de ninguna manera, son elementos para nosotros (Lavoisier, citado por Partington, 1962).

Esta definición se asemeja a la propuesta por Boyle veinte años antes.

Lavoisier elaboró una lista de cuarenta sustancias elementales (incluyendo algunos compuestos como la soda, que no habían podido ser descompuestos en ese entonces). Este constituye un primer ensayo de clasificación de las sustancias. Asimismo, buscó promover el uso de un sistema de notación universal para las sustancias químicas, con base en una idea de interdependencia del lenguaje con las teorías químicas.

En 1787, Lavoisier, Guyton de Morveau, Berthollet y Fourcroy propusieron un método de nomenclatura química. Este sistema continuó desarrollándose en los años siguientes y fue adoptado por la comunidad científica, constituyendo la base del sistema actual de nomenclatura química (Priesner, 1989).

Figura 2. Símbolos de los elementos según Lavoisier. Imagen extraída de "Breve historia de la nomenclatura y la formulación químicas". Publicado el 7/09/13. Recuperado el 15/06/19 en <http://thesciencewatcher.blogspot.com/2013/09/breve-historia-de-la-nomenclatura-y.html>.

La Teoría Atómica de Dalton

Ha sido el químico inglés John Dalton quien desarrolló el nuevo concepto de elemento químico de Lavoisier en términos atómicos. Según Partington, en 1803 sus reportes contenían las siguientes ideas:

- La materia está compuesta por pequeñas partículas o átomos.
- Los átomos son indivisibles. No pueden ser creados ni destruidos.
- Todos los átomos de un elemento son idénticos y po-

seen el mismo peso invariable.

- Los átomos de elementos diferentes poseen pesos diferentes.
- Las partículas de los compuestos están formadas por un número fijo de átomos de los elementos que los constituyen.
- El peso de una partícula de un compuesto es la suma de los pesos de los átomos que la forman.
- El peso de un átomo de un elemento es el mismo en todos sus compuestos.

En el marco de esta teoría, las leyes ponderales pudieron ser explicadas perfectamente, lo que contribuyó a la aceptación de la misma entre los químicos. Si el átomo es la menor cantidad de un elemento que puede intervenir en una reacción química, la cantidad de dicho elemento que participa en una reacción corresponde a un número entero de átomos. En consecuencia, la teoría ha podido explicar la discontinuidad observada en las proporciones en las cuales los elementos se combinan mediante la discontinuidad de la materia en sí misma.

Son conocidas las dificultades que la teoría atómica de Dalton presentaba. En 1809 el químico francés J. Gay Lussac mostró que en condiciones de presión y temperatura constantes existen relaciones simples entre los volúmenes de los elementos que reaccionan y los volúmenes del compuesto que se obtenía. Las relaciones volumétricas que encontraba en las combinaciones gaseosas no podían ser explicadas mediante la teoría atómica. El proble-

ma pudo resolverse a partir de una hipótesis planteada por el italiano A. Avogadro, quien propuso que en circunstancias similares, los elementos gaseosos están compuestos por moléculas, cada una de las cuales posee dos átomos. Esta hipótesis fue ignorada por la comunidad científica y fuertemente rechazada por algunos químicos, lo que impidió elaborar una escala de masas atómicas y, en consecuencia, una teoría corpuscular coherente.

La introducción de la noción de molécula hizo evolucionar la concepción sobre la naturaleza corpuscular de la materia. La aceptación de la hipótesis de Avogadro había sido preconizada por Canizzaro en 1860. Apoyado en esa hipótesis propuso que podía establecerse un sistema de pesos atómicos coherente. Luego de Canizzaro, los científicos obtuvieron valores muy precisos de masas atómicas de los elementos estables. Las ideas de Dalton acerca de que los átomos de elementos diferentes poseen masas diferentes y que los átomos se conservan durante las reacciones químicas perduraron.

Una vez que las ideas fundamentales de la teoría atómica y la hipótesis molecular fueron aceptadas, los químicos buscaron poner de manifiesto cierto orden entre los elementos y los átomos, y clasificarlos según sus propiedades. En la historia de la Química se han propuesto docenas de ordenamientos diferentes, tema que será tratado en otro trabajo de los autores.

Hacia la conceptualización actual del elemento químico

La comunidad científica continuó avanzando en conceptualizaciones sobre el elemento químico. A su vez, constituida la Didáctica de las Ciencias y posteriormente de la Química como disciplinas científicas, las consideraciones acerca del concepto de elemento químico no demoraron en aparecer.

En nuestro país, Z. Berardi y otras (1991) explican que el concepto de elemento es de naturaleza abstracta, el cual muchas veces se confunde con el concepto de sustancia simple, diciendo:

Elemento químico es el componente común a una sustancia simple, a sus alótropas y a todas las sustancias compuestas que, por descomposición originan dicha sustancia simple. Este tratamiento justifica la necesidad de no confundir dos conceptos distintos: sustancia y elemento químico.

Las autoras distinguen definiciones de este concepto en dos niveles de formulación, uno independiente de la teoría atómica y otro basado en la teoría sobre la estructura corpuscular de la materia. Plantean la limitación de emplear el nivel macroscópico para explicar el concepto mencionando que el estudio de las propiedades observables y medibles, así como la relación entre ellas, resulta insuficiente cuando se trabaja a nivel de la teoría corpuscular. Expresan que *La interrelación entre estas nociones corpusculares permite elaborar un concepto unificador que es el de elemento químico.* Y luego

agregan, a partir de un ejemplo,

No es correcto referirse a propiedades químicas del elemento: el átomo de bromo y el ion bromuro no tienen las mismas propiedades químicas. Sin embargo, el átomo de bromo, sus isótopos, el ion bromuro y todas las especies químicas que contienen bromo manifiestan una propiedad común: el espectro. Las propiedades espectrales caracterizan al elemento químico, independientemente de la especie considerada.

En la actualidad, el concepto de elemento propuesto por IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) y por lo tanto, aceptado por la comunidad científica, se encuentra en *Compendium of Chemical Terminology*. Gold Book PDF Version 2.3.3. (2014), en el cual figuran las siguientes definiciones:

Elemento químico:

1. *Una especie de átomos; todos los átomos con el mismo número de protones en el núcleo atómico.*
2. *Una sustancia pura compuesta por átomos con el mismo número de protones en el núcleo atómico. Algunas veces este concepto se denomina sustancia simple distinguiéndolo de elemento tal como se define en 1, pero generalmente el término elemento químico se emplea para ambos conceptos.*

El complemento que se encuentra en esta segunda definición, en cierto modo, nos retrotrae a las ideas de Lavoisier, lo cual resulta controversial desde el punto de vista didáctico.

Consideraciones didácticas en torno al concepto de elemento

El concepto de elemento es estructurante para la química. A su vez, la construcción de esta idea por parte de los estudiantes resulta compleja, por la naturaleza misma del concepto, así como las relaciones que posee con otros conceptos fundantes de la disciplina.

En química se realizan observaciones y experimentos a nivel macroscópico, se interpretan estas observaciones y resultados a nivel corpuscular y se realizan representaciones simbólicamente.

Siguiendo las ideas de Johnstone (1982) distinguimos tres niveles de representación con los que se trabaja en química:

- descriptivo y funcional (nivel macroscópico);
- explicativo-interpretativo, que emplea un modelo de partículas (a veces llamado corpuscular, microscópico o submicroscópico);
- simbólico o representativo.

Muchos de los problemas de aprendizaje que se han detectado en química tendrían relación con dificultades de comprensión conceptual que podrían ser el resultado de un trabajo poco integrado en los tres niveles de representación. En general, en las clases de química se hace demasiado hincapié en el nivel simbólico (D. Gabel, 1999). Con frecuencia se pone énfasis en los símbolos, fórmulas y ecuaciones químicas, dejando de lado el trabajo de integración de conceptos y modelos. De esa

manera el estudiante no logra interpretar aquello que los símbolos representan y los confunde con la realidad misma. Por otra parte, en las clases, así como en los textos de química, se emplean descripciones macroscópicas, interpretaciones empleando modelos de partículas además de las fórmulas y ecuaciones propias de la disciplina, sin analizar ni distinguir esos niveles, lo cual vuelve la comprensión de las situaciones mucho más compleja.

La diferenciación de estos niveles, el análisis de los sistemas y las transformaciones que experimentan –diferenciando esos planos o niveles– resulta indispensable para el logro de los objetivos de aprendizaje.

Si consideramos el nivel macroscópico, el elemento químico puede definirse como parte integrante de las sustancias. El tratamiento del concepto en este nivel frecuentemente se asocia a actividades experimentales de descomposición de sustancias compuestas, y se distinguen estas de las sustancias simples que se originan en esos procesos. Asimismo, se puede determinar que los elementos se conservan en los procesos químicos.

Desde la perspectiva del modelo de partículas (nivel corpuscular), un elemento se caracteriza porque los átomos que lo constituyen poseen todos el mismo número atómico (Z), es decir, igual cantidad de protones en el núcleo. Cada elemento químico se representa mediante un símbolo vinculado a su nombre, que lo caracteriza (nivel simbólico). El nombre puede tener diverso origen: en algunos casos se vincula a alguna sus propiedades físicas o químicas, en otros a un astro,

Muchos de los problemas de aprendizaje que se han detectado en química tendrían relación con dificultades de comprensión conceptual que podrían ser el resultado de un trabajo poco integrado en los tres niveles de representación. En general, en las clases de química se hace demasiado hincapié en el nivel simbólico (D. Gabel, 1999). Con frecuencia se pone énfasis en los símbolos, fórmulas y ecuaciones químicas, dejando de lado el trabajo de integración de conceptos y modelos. De esa manera el estudiante no logra interpretar aquello que los símbolos representan y los confunde con la realidad misma.

al nombre de un científico que lo descubriera o al país de su origen o donde se llevaron a cabo los estudios acerca de ese elemento, entre otros.

Es importante tener presente que el concepto de elemento químico que hemos presentado desde la didáctica de la disciplina difiere significativamente del planteo de la IUPAC citado precedentemente, el cual da cuenta también de una superposición de niveles, además de considerar equivalentes las conceptualizaciones de elemento químico. Cabe mencionar que, tal como expresan Benia, I. y otros (2013),

Los químicos, siguiendo el criterio de la IUPAC, emplean como sinónimos los términos sustancia simple y elemento. En cambio, en las aulas de Nivel Medio se suelen distinguir estos conceptos, señalando las diferencias entre ellos.

Al respecto, C. Furió expresó en la XV Reunión Argentina de Educación Química que tuvo lu-

gar en Buenos Aires en el mes de mayo de 2011:

No suele ser conocido por el profesorado que el modelo atómico-molecular fue muy criticado durante todo el siglo XIX (Rocke, 1986) por químicos equivalentistas (Ostwald) y físicos termodinámicos (Duhem). Y todo ello a pesar de que en el Congreso de Karlsruhe (1860) se había llegado a un consenso entre atomistas y equivalentistas, no solamente sobre la formulación y nomenclatura químicas, sino también sobre la definición de elemento químico.

Resulta evidente que la IUPAC aceptó en 1923 una definición dual de elemento químico que se sigue empleando entre profesores de Química a nivel medio y superior, desconociendo el acuerdo logrado en el mencionado congreso, nada menos que en 1860.

Y continúa preguntándose Furió, respecto a la segunda acepción que propone IUPAC

para definir el concepto de elemento químico:

¿No es esta segunda definición de elemento químico un ejemplo típico de superposición de los niveles de representación submicroscópico y macroscópico que nos indica la investigación en didáctica de las ciencias (Gable, 1998; Treagust, Chittleborough & Mamiala, 2003)? ¿Cómo podemos seguir asumiendo, desde el punto de vista químico y filosófico, que el elemento y la sustancia simple son conceptos idénticos?

Consideraciones finales

El presente trabajo plantea, de modo breve, las ideas respecto al concepto de elemento que en la historia de la humanidad han surgido y cómo ellas evolucionaron. Estas ideas pueden constituir oportunidades de reflexión para los docentes a la hora de elaborar propuestas didácticas o de diseñar estrategias para el abordaje del concepto de elemento en los cursos de Química. Si bien algunas investigaciones didácticas muestran cierto paralelismo entre las dificultades que históricamente han existido para la elaboración del concepto de elemento químico, con las que se encuentran en los estudiantes para la construcción de este concepto, no parece razonable que los alumnos recorran un camino similar en los cursos de Química, no solo por el tiempo de que se dispone, sino fundamentalmente porque un recorrido histórico podría llevar a introducir o fijar obstáculos didáctico-epistemológicos en los estudiantes, lo cual interferiría

con los aprendizajes pretendidos.

Pensamos que el tratamiento didáctico del concepto de elemento químico, distinguiendo los diferentes niveles de formulación, constituye un camino didáctico recomendable. Este puede conducir a una mejor comprensión del concepto y, en consecuencia, a la construcción de otros vinculados al mismo.

Bibliografía

BARTOLOMEU, J. R.; A. GARCÍA (2006): *La Revolución Química. Entre la historia y la memoria*. España: Universidad de Valencia.

BENIA, I. y otros (2013): *Didáctica de las Ciencias Experimentales. Aportes y Reflexiones sobre la Educación Química*. Montevideo: Grupo Magro.

BERARDI, Z.; PRATO, C.; M. C. SANZ (1991): "Elemento químico". *Asociación de Educadores en Química*. Año III. N°5. Montevideo.

DE VOS, W. (1985): *Corpusculum Delicti: molecules and atoms in elementary education*. Utrech: Universidad de Utrech (disertación).

FRANCO, M. (1990): *Apprentissage de quelques concepts fondamentaux en chimie: étude des représentations des élèves*. Lyon, Francia: Université Claude Bernard Lyon 1.

GABEL, D. (1999): "Improving teaching and learning through chemistry education research: a look to future". *Journal of Chemical Education*. Vol. 76 (4).

IUPAC (2014) *Compendium of Chemical Terminology - Gold Book* PDF. Version 2.3.3.

<https://goldbook.iupac.org/files/pdf/goldbook.pdf>

JOHNSTONE, A. (1982): "Macro- and micro-chemistry". *The School Science Review*, 64 (227).

LUCRECIO CARO, T. (2003): *De la naturaleza de las cosas*. Biblioteca Virtual Universal. (libro en internet). <http://www.biblioteca.org.ar/libros/89401.pdf>

PARTINGTON, J. R. (1962): *A History of Chemistry* Vol. 3 Mac-millan & Co. (Lavoisier, citado por Partington, 1962).

PRIESNER, C. (1989): How the language of chemistry developed. *Chemical International* Vol, 11, N° 6: 216-224, 237-238.

TATON, R. (1957-1964): *Histoire générale des sciences*. Vol. 2: *La Science moderne*. Francia: P.U.F.