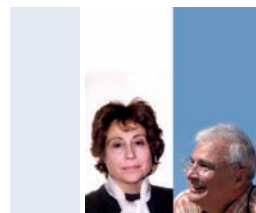


Un mapa cultural para situar la enseñanza de la ciencia: la revolución científica y el fin del aristotelismo

M.^a Carmen Refolio Refolio y
Jose María López Sancho*

Investigadora del programa El CSIC en la Escuela

Investigador y director del programa El CSIC en la Escuela



Palabras clave

Paradigma, modelo, revolución científica, arte, historia, Renacimiento, matemáticas, Barroco.

Resumen

En este artículo describiremos la evolución del paradigma científico desde la cultura clásica hasta la revolución científica. En artículos posteriores nos ocuparemos de los periodos restantes.

Imaginaremos que todo tienen lugar en un escenario cuyo telón de fondo es común a todos ellos, una especie de tapiz imaginario que representa el eje temporal de la historia. En él se pueden distinguir los periodos artísticos que conforman el armazón cultural sobre el que queremos situar la historia de la ciencia.

El objetivo de este enfoque es doble. Por un lado se logra ordenar los conocimientos científicos siguiendo un patrón temporal, engarzándolos con los hitos históricos que forman parte del bagaje cultural de los maestros, de tal manera que entiendan el papel de la ciencia como vertebrador de la cultura. Por otro lado, se expone claramente la relación entre conocimiento científico y progreso social, conexión fundamental sin la cual es imposible entender la evolución de la especie humana.

La ciencia en el mundo clásico

Tomando como punto de partida la Grecia Clásica, queremos poner de manifiesto un hecho algunas veces ignorado y extraño. Si el lector recuerda los nombres de los griegos que estudió en su niñez, la mayoría de ellos pertenecían a científicos. Lo mismo ocurre con la concentración sin precedentes de preguntas y modelos científicos nunca planteados anteriormente, en el periodo que va del siglo V a. C. al V d. C.

.....
* E-mail del autor: lopezsancho@cfmac.csic.es.

La hipótesis de la existencia de los átomos, la geometría de Euclides, la física de Aristóteles, la hidráulica de Arquímedes, las medidas y determinaciones astronómicas de la escuela de Alejandría, la elaboración de mapas y modelos del universo, etc., son algunos de los conocimientos que asociamos con esta época histórica, y que jugaron un papel fundamental en el arte de la época, en particular en la arquitectura, como atestigua el Partenón (**Imagen 1**).

De todos ellos queremos destacar, en primer lugar, el enunciado del Principio fundamental de la ciencia de Leucipo. Este principio asume que «la naturaleza se comporta de acuerdo con leyes fijas, y que los seres humanos las pueden descubrir».

Y en este periodo, también, se establece el primer paradigma de base empírica, debido a Aristóteles, que perduraría a lo largo de la Edad Media y el Renacimiento hasta el tiempo de Galileo, ya en pleno Barroco.



Imagen 1. El Partenón.

En el modelo aristotélico, el movimiento de un cuerpo se debía a la acción de una fuerza, ya que para él las fuerzas producían velocidades. Como ninguna fuerza podía ser lo suficientemente grande para mover la Tierra, esta debía permanecer inmóvil en el centro del universo (modelo geocéntrico).

La inteligencia de Aristóteles se pone de manifiesto en la sutileza de estos falsos conceptos. Ambas ideas eran tan atractivas que la humanidad tardó casi dos mil años en descubrir su falsedad. Su éxito durante todo el periodo medieval y parte del Renacimiento se debe a que la simplicidad de su planteamiento lo hace prácticamente intuitivo.

Aunque no queremos tratar aquí el problema de los preconceptos en enseñanza, sí queremos señalar que los alumnos llegan a los primeros cursos con el modelo de Aristóteles perfectamente interiorizado, aunque nunca hayan oído hablar de él. ¿Será que la enseñanza sigue el camino de la historia como la ontogenia sigue el de la filogenia?

Siguiendo con el mundo clásico, los experimentos de Arquímedes hacia el año 200 a. C. estudian las primeras fuerzas en acción: el peso y el empuje.

Con los experimentos de flotación se adquieren los conceptos de peso y empuje, de masa y densidad, y de composición de fuerzas. Hemos descubierto la estática. Al no relacionar la fuerza con la velocidad Arquímedes no entró en conflicto con Aristóteles.

Arquímedes completó la estática con su concepto de momento de una fuerza desarrollado en su estudio de la palanca. Con estos conocimientos podemos entender e incluso diseñar, como de hecho se hizo, los edificios construidos a base de piedras sillares, desde los templos griegos y los acueductos romanos a las catedrales góticas. Todos ellos se comprenden aplicando la sencilla regla de suma de fuerzas igual a cero y suma de los momentos de la fuerzas igual a cero, tal como la enunciamos nosotros en este momento.

Además, apoyados en la recopilación de la geometría que realizó Euclides, en esta época se elaboró el modelo de universo que habría de permanecer hasta 1543, como veremos.

En el siglo II Ptolomeo se apoyó en la idea aristotélica de que la Tierra se encuentra en el centro del universo para enunciar su modelo, según el cual la Luna, el Sol y los demás planetas (en aquella época se llamaban planeta a los siete cuerpos brillantes) giraban en torno a la Tierra en órbitas perfectamente circulares. Utilizando este modelo se desarrollaron métodos para medir los radios de la Tierra, de la Luna y del Sol, así como las distancias entre ellos.

Los resultados de estas medidas perduraron hasta hace relativamente poco tiempo y fueron utilizados tanto por Colón como por los que juzgaron sus propuestas.

Calzadas, circos, teatros, puentes y acueductos (**Imagen 2**) forman parte del paisaje cultural romano y nos sirven de miliarium para asociar la imagen con el periodo histórico.

Así como los griegos fueron grandes pensadores contribuyendo al desarrollo científico de la época, los romanos fueron grandes tecnólogos que aplicaron dichos conocimientos.

En esta época el pensamiento se hace platónico, de la mano de Agustín de Hipona, San Agustín, que preconiza la



Imagen 2. Acueducto de Segovia.

fe como única herramienta para conocer el mundo. Deberemos esperar a que llegue el siglo XIII para que otro santo, Santo Tomás, sustituya su filosofía por la de Aristóteles, un científico empirista.

El mundo medieval

Se suele tomar la caída del imperio romano, hacia el 455, como el comienzo de la Edad Media, cuya época oscura llega hasta el año 1000. En esa época se inicia un despertar que coincide con el tiempo del papa Silvestre II. Sin embargo, ese periodo de 550 años no fue tan oscuro como se suele pensar.

El arte árabe y el mozárabe nos ayudan a fijar la época del califato y de la reconquista, con sus inconfundibles construcciones (**Imagen 3**).

Sobre este decorado podemos proyectar los trabajos de los alquimistas, que desarrollaron una cantidad de conocimientos que, cuando llegó a la masa crítica, motivó la explosión de la ciencia química.

Los árabes aprendieron de los chinos la forma de fabricar papel, probablemente en Samarkanda, de manera que en el año 1100 se fabricaba papel en España.

También la matemática se enriqueció con la invención, o al menos con la formalización, del álgebra (la palabra álgebra deriva del árabe al-Jabru, reducción), aunque ya se hacía uso de sus métodos en la antigua Babilonia.

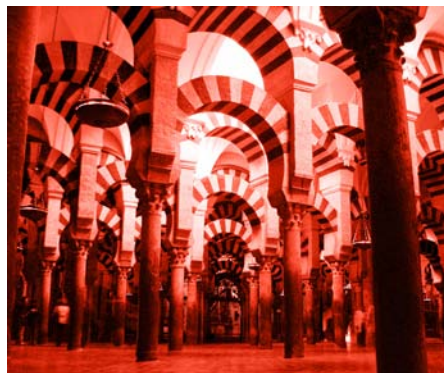


Imagen 3. Mezquita-Catedral de Córdoba.

Para entender su alcance debemos recordar que la aritmética consiste en el conjunto de operaciones que se pueden realizar con números, utilizando la suma, la resta, la multiplicación y la división. Así: $3 + 4 = 7$

es un ejemplo de operación aritmética, pero si sustituimos uno de los números por una letra, se convierte en una igualdad o ecuación algebraica: $3 + x = 7$

Si quitamos 3 a ambos lados de la igualdad obtendremos otra igualdad:

$$3 + x - 3 = 7 - 3 \rightarrow x = 4$$

Es fácil entender el enorme potencial de este invento ya que nos permite, aplicando reglas muy sencillas, descubrir qué números cumplen determinadas condiciones.

En el siglo IX, el matemático al-Jwrizm, escribió el primer libro sobre álgebra, exponiendo sus métodos y aplicándolo a numerosos ejemplos, llegando incluso a resolver ecuaciones de segundo grado.

Al Hazen, hacia el año mil modifica el modelo de visión de Euclides y Ptolomeo, negando que el ojo lanzase rayos. Además perfecciona la ley de la refracción de Ptolomeo.

Los reyes cristianos conquistan Toledo en 1085 y los mongoles traen a Europa, en el inicio de siglo XIII, el invento chino de la pólvora. A cambio, de Europa se lleva a China el proceso de obtención de alcohol mediante destilación.

En esta época comienzan a aparecer en Europa las primeras construcciones románicas (Abadía de Cluny). Por lo que respecta a España las arquitecturas visigoda, asturiana y mozárabe evolucionan hacia el románico (**Imagen 4**),

En Inglaterra los nobles obligan a Juan sin Tierra (hermano de Ricardo corazón de León) a establecer la Cámara Alta. Algo parecido ocurre en Aragón, donde los nobles obligan al Rey a jurar los fueros. Mientras sus coetáneos Alberto Magno y Tomás de Aquino redescubren a Aristóteles a través de las traducciones árabes y armonizan sus teorías con la Biblia (la Escolástica). Este paradigma duraría hasta el siglo XVI, en el que comienza la Revolución científica.



Imagen 4. Iglesia de Santa María del Naranco.

Las traducciones al latín del Álgebra de al-Jwarizm, el Almagesto y otros muchos libros de gran importancia, copiados en la Escuela de Traductores de Toledo, llegaron a toda Europa por los diferentes caminos de peregrinos que la recorrían.

Europa ya tiene una cultura común que la identifica y que romeros, palmeros y peregrinos se encargan de extender por toda su geografía. Estos caminos fueron las arterias por las que circularon los conocimientos clásicos, traducidos primero al árabe en Damasco y Córdoba y luego al latín en Sicilia y Toledo. Cualquier persona

que llegase viajando desde el Este entraría en un paisaje dominado por un mismo estilo en arquitectura e imagen. Estamos en el siglo XIII, ha nacido Europa y su cultura es románica. Aunque se perfila un nuevo estilo

Entre los pergaminos escritos en árabe que se tradujeron en las escuelas de traductores se encontraron muchos originales griegos que se creían perdidos, algunos de Aristóteles. Y como ya hemos señalado de la mano de Alberto Magno y Tomás de Aquino, que detectaron en la lógica aristotélica un enorme potencial, aparece la Escolástica que se desarrollaría en los siglos posteriores.

El pensamiento aristotélico, aunque genial para el siglo III a. C. no podía ser válido en el siglo XIII. Por ello y porque constituyó la base filosófica de la estructura social de la época, también descrita en la Divina Comedia de Dante, constituyó una barrera para el desarrollo de la Ciencia. Pero nació Roger Bacon y las cosas comenzaron a cambiar. Bacon propone, en contraste con la Escolástica, un enfoque empírico de la ciencia.

Su amigo Pedro Peregrino, en 1269, publica el primer trabajo científico sobre magnetismo, un buen ejemplo de empirismo. En una carta a un amigo explica su descubrimiento de la existencia de los polos y la razón por la que la brújula se orienta en la superficie de la Tierra enunciando las leyes que siguen los imanes. En realidad su nombre es Pierre de Maricourt y fue soldado de profesión en la cruzada del rey francés Luis IX.

La historia sigue. La aparición y el desarrollo de las ciudades hacen necesaria la construcción de edificios públicos que puedan acoger a mayor número de personas. Por otra parte la acumulación de conocimientos clásicos posibilita la exploración del mundo gótico. El paisaje adquiere una identidad diferente a la anterior, una identidad gótica como atestiguan las ciudades (**Imagen 5**).



Imagen 5. Esquema de catedral.

El Renacimiento

A partir de este momento los acontecimientos se suceden con rapidez.

Con las excavaciones en Roma que recuperan el arte romano clásico, aparece el Renacimiento, y el hombre es situado en el centro del universo liberándose de los condicionamientos del medievo. Pero esta posición privilegiada no durará mucho, como veremos, pues la revolución científica lo situará en el sitio que le corresponde, un humilde rincón del universo.

Por tanto, el redescubrimiento de muchos textos griegos a partir de la caída de Constantinopla en 1453 y la afluencia de sabios desde Bizancio a la Europa occidental hace que afloren nuevos conocimientos. La imprenta, que se inventa a mediados del siglo XV, facilita su difusión. Así, en el tiempo de los Reyes Católicos y de Colón ya existen los libros tal como los conocemos.

Los arquitectos cambian su material de construcción, la piedra cara y difícil de transportar, por el muro de mampostería, fácil de construir y de darle forma.

El Barroco

El periodo del Barroco también es próximo a nuestros alumnos. En España pintaba Velázquez y en Roma se estaba construyendo la Basílica de San Pedro (**Imagen 6**).

En este periodo se va a desarrollar la revolución científica. Muchos autores sitúan, por razones que luego se verán más adelante, el comienzo de la revolución científica en 1543 (Nicolás Copérnico).

En esta época se acumulan los acontecimientos y se contestan algunas preguntas que ya habían sido planteadas en el periodo clásico siendo el principal de ellos el abandono del modelo cosmológico de Aristóteles y de los principios de su física.



Imagen 6. La Basílica de San Pedro.

Francis Bacon, el segundo de los Bacon, introduce un giro en la forma de obtener respuestas a las preguntas científicas al establecer como único camino el del método experimental.

Los conocimientos de mecánica de Aristóteles y Arquímedes perduraron prácticamente sin variaciones mientras ocurrían tremendos cambios sociales: la caída de Roma, la invasión y conquista de los bárbaros del norte, la invasión de los árabes y la reconquista cristiana, el descubrimiento de América, etc.

Es justamente algo después de esta época, ya en el reinado de Carlos V, cuando Nicolás Copérnico publica el libro *De Revolutionibus Orbium Coelestium*. Aunque inicialmente ignorado el libro provocó, años después, la primera conmoción científica de la época, tan importante que desde entonces se conoce como **revolución** cualquier cambio o transformación radical y profunda respecto al pasado inmediato.

La revolución científica

Cuando se leía a Cervantes y se asistía a las representaciones de las obras de Shakespeare, cuando Monteverdi componía las primeras óperas y Purcell su música, Galileo lanza la hipótesis de que las fuerzas no son necesarias para que los cuerpos se muevan, sino para que se modifique su velocidad, ya sea en su valor numérico o en su dirección.

Esta sencilla observación constituye una forma de enunciar el **principio de la inercia**, que marca el comienzo de una nueva mecánica y una nueva forma de ver el mundo.

Aceptar este principio no era sencillo para una persona ilustrada del siglo XVII. Si viajamos a esa época, a Pisa concretamente, podríamos encontrarnos entre los alumnos de Galileo observando cómo la piedra que dejaba caer desde el punto más alto de la torre impactaba justamente al pie de ésta.

Desde los tiempos de Eratóstenes, en el siglo III a. C., se conocía ya el radio de la Tierra. Como esta daba una vuelta al día, cualquier punto de su superficie se movía con una velocidad de 1666 kilómetros por hora, es decir 463 metros por segundo.

Siendo la altura de la torre de 55 metros, el tiempo que tardaría en caer la piedra sería de algo más de tres segundos. Durante este intervalo, de acuerdo con los aristotélicos, el pie de la torre y todos los estudiantes habríamos avanzado un kilómetro y medio con lo que la piedra abandonada en el espacio, habría caído a un kilómetro y medio al Este de nosotros. Al no ocurrir de esta manera, necesariamente, la Tierra tenía que permanecer inmóvil.

Pero si interpretamos el mismo experimento aceptando el principio de inercia, admitiremos que tanto la superficie de la Tierra, como nosotros, la torre de Pisa, Galileo y la piedra nos movemos a la misma velocidad: 463 metros por segundo de Este a Oeste. Por esa razón la piedra cae en la misma base de la torre.

La caída del paradigma aristotélico arrastró todo el sistema de valores vigente durante los últimos 2000 años. Esto produjo fuertes resistencias sociales, políticas y religiosas. Y es que la historia no avanza sin esfuerzo.

Actualmente todos tenemos interiorizado el principio de la inercia. Nadie se sorprende al ver cómo un niño puede botar una pelota en el interior del AVE, a casi 300 kilómetros por hora (unos 83 metros por segundo) sin que ésta se quede retrasada respecto al movimiento del tren.

La revolución científica tuvo lugar no solo en el campo de la mecánica sino también, de manera decisiva, en la astronomía de la época: el universo ya no es geocéntrico (preconcepto aristotélico).

El modelo heliocéntrico de Copérnico quedó durante un tiempo como un truco matemático para predecir el movimiento de los planetas de una manera sencilla. Sin embargo, ya en pleno Barroco, como consecuencia de esta simplificación y a partir de las observaciones de Tycho Brahe, Johannes Kepler pudo ajustar las órbitas de los planetas alrededor del Sol mediante curvas sencillas (cónicas) y enunciar sus tres famosas leyes.

En la primera, de 1609, define la forma de las órbitas de los planetas: una elipse en uno de cuyos focos se encuentra el Sol.

En la segunda (1609) y tercera (1618) se relaciona la forma de la órbita con las características del movimiento de los planetas: periodos y distancias al Sol.

Aunque Kepler murió doce años antes que Galileo, mantuvieron una importante relación epistolar en la que se daban cuenta de sus trabajos y sus descubrimientos.

A la vez que Kepler enuncia sus dos primeras leyes, Galileo utiliza sus telescopios para mirar a la Luna y al Sol. Así descubrió que nuestro satélite es tan irregular como la Tierra, con sus valles y montañas y que el Sol presentaba manchas en su superficie, lo que permitía estudiar su movimiento de rotación.

Con estos descubrimientos se desploma otro de los preconceptos aristotélicos, el de la inmutabilidad de las esferas celestes y la perfección de los cuerpos por encima de la esfera de la Luna.

En esta misma época René Descartes, gran pensador y matemático dio un paso más en el camino de la abstracción, uniendo por primera vez la geometría y la aritmética, ramas de la ciencia completamente separadas hasta ese momento.

Si en la expresión aritmética $3 + 4 = 7$, sustituimos el número cuatro por una letra x se convierte en la ecuación algebraica: $3 + x = 7$

Si ahora sustituimos el número tres por otra letra, y , obtenemos: $y + x = 7$

¿Cómo debemos manejar esta expresión? Descartes fue dando valores numéricos a la x , obteniendo los valores correspondientes para la y que satisficieran la igualdad.

Si x vale 1, y tiene que valer 6. Si x toma el valor de 2, y tiene que valer 5, y así sucesivamente. El resultado es una serie de parejas de valores: $(0,7)$; $(1,6)$; $(2,5)$; $(3,4)$; $(4,3)$, que alguna relación tendrían con la ecuación original.

Y Descartes, recordando las ciudades romanas (**Imagen 7**) con sus dos calles principales, Cardo y Decúmeno representó esas parejas de valores en unos ejes perpendiculares X , Y en su honor llamados **ejes cartesianos**. Descartes advirtió que dichas parejas formaban una recta.

De la misma forma que la ecuación $x + y = 7$ representa una recta se pueden hallar ecuaciones que representen cualquier tipo de curvas, con lo cual es posible estudiar numéricamente las formas geométricas. Ya nada sería igual en matemáticas.

El mismo año 1642 (en el calendario gregoriano) en que moría Galileo Galilei en Florencia nacía Isaac Newton (año juliano) en Inglaterra.

Robert Boyle, un joven inglés que a la sazón se encontraba en Florencia quedó impresionado por la popularidad de Galileo y la resonancia de su muerte. Boyle, junto con otros muchos, sembraron la semilla de los nuevos métodos de investigación y la nueva ciencia.

Basándose en las observaciones de Galileo, Newton admitió el principio de la inercia como el primero de sus tres principios, desarrollando la mecánica moderna.

A partir de este momento la humanidad dispone de un modelo que permite predecir el movimiento de los astros y diseñar tanto las máquinas que produjeron la revolución industrial como calcular los vuelos interplanetarios del siglo veinte.

Ha nacido la **dinámica moderna**, la ciencia que relaciona las fuerzas con las masas y los movimientos de los cuerpos.

Así mismo Newton pudo deducir las tres leyes de Kepler a partir de una nueva ley, la de la **gravitación universal**.

De acuerdo con esta ley dos cuerpos se atraen con una fuerza directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de su distancia. Esta ley es obedecida tanto por las manzanas que caen de los árboles como por los cuerpos celestes. Es difícil exagerar la repercusión que esta ley tuvo en el pensamiento científico.

Newton llegó más lejos que Galileo y Kepler porque, en sus propias palabras, «estaba apoyado sobre hombros de gigantes». Newton muere en 1727, cuando en España reinaba Felipe V.

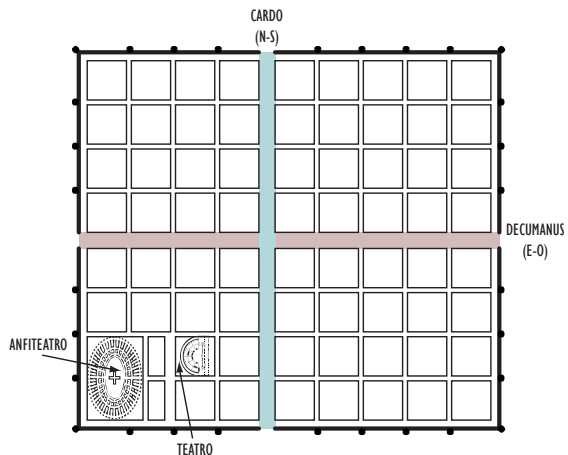


Imagen 7. Plano de una ciudad romana.

Quince años después Daniel Bernoulli deduce la ley de los gases (descubierta por Boyle), a partir del modelo molecular suponiendo que las moléculas son pequeñas bolas perfectamente elásticas, y aplicando las tres leyes de Newton.

Por tanto estas leyes no solo son aplicables a la escala planetaria y de los objetos de nuestro entorno si no también a la escala microscópica de las moléculas.

Parecía que el comportamiento del universo estaba explicado. Así caen los últimos preconceptos aristotélicos: el del «diferente comportamiento de la materia según estuviera por debajo o por encima de la esfera de la Luna», el de «la independencia

de la materia y la forma» (Bernoulli demostró que el comportamiento de los cuerpos depende solo de su composición molecular) y el del «horror al vacío» ya que el concepto de presión por choques moleculares lo explicaba

Ha comenzado una nueva época que culminaran con la revolución industrial.

Nos encontramos en plena época neoclásica, con la música de Mozart y Haydn y la pintura de Goya e Ingres.

Recursos complementarios

La Tierra en el Universo. Museo Virtual de la Ciencia. CSIC [en línea]:
<<http://museovirtual.csic.es/salas/universo/universo1.htm>> [consulta: Junio 2010].

Referencias bibliográficas

ASIMOV, Isaac. *Enciclopedia biográfica de Ciencia y Tecnología*. Madrid: Alianza Editorial, 1987. 320 pp.

GOMBRICH, Ernst H. *La historia del Arte*. Londres: Phaidon Press Limited, 2008. 688 pp.

GRIBBIN, John. *Historia de la ciencia 1543-2001*. Barcelona: Crítica, 2006. 553 pp.