Nicolo Fontana, Tartaglia
Portada de *Quesiti et Inventioni Diverse*
M D L I I I I

MATHEMA

Colección dirigida por:
Carlos Alvarez - Rafael Martínez

Nicolo Tartaglia

La Nueva Ciencia

Estudio Introductorio,
traducción directa del italiano y notas
J. Rafael Martínez-E. y J. César Guevara Bravo

Génesis de una nueva ciencia

Parecían bellotas metálicas, despedidas por una llamarada acompañada de un horrísono trueno... no era suficiente que hasta ahora el encolerizado Dios enviase sus rayos desde el cielo, no: el hombrecillo debe tronar también desde la tierra. Su ira impura imita el rayo, y el horror que hasta ahora se abatía desde las nubes divinamente sobre el hombre tembloroso, lo lanza ahora el guerrero mismo a través de un tubo hacia otros guerreros. Esta peste era hasta hace poco tan rara que se la miraba como un prodigio; pero ahora parece haberse generalizado tanto y haberse hecho tan corriente como cualquier otra clase de armas.

Petrarca

En 1537 aparece publicada *La Nova Scientia* y, como lo indica su título, quien lo escribe pretende anunciar la invención de una nueva ciencia: la balística. Inscrita en el seno de las disciplinas matemáticas, la balística se propone como tarea responder a las nuevas interrogantes y preocupaciones que surgían en los círculos de quienes eran los responsables de manejar las piezas de artillería que servirían para lanzar proyectiles a grandes distancias. Nicolo Fontana (1499/50-1557), *detto* Tartaglia,[1] autor de *La Nueva Ciencia*, reconoce en particular la existencia de un problema fundamental que, soslayado por la tradición filosófica, requiere de una pronta solución: la determinación de la forma que adopta la trayectoria de una bala de cañón.

1. Tartalea en el original, que literalmente significa tartamudo.

Educado en los talleres de donde surgían los artistas que mucho tenían de científicos y de artesanos, Tartaglia participó de esa cultura en la que el ideal se alcanza en la figura de Arquímedes, para quien la teoría y la práctica, el conocimiento y su aplicación, son momentos de un afán que es el conocimiento científico. Así, Tartaglia encarna la imagen misma del ingeniero-matemático que aparece en Italia en el *Cinquecento*, y que ligado a los arsenales tiene como razón de ser "resolver los problemas de su profesión y de cultivar el arte de inventar[2] con el fin de asegurar... su gloria" (Moscovici, *Essai sur*...).

El interés por el movimiento de proyectiles no era nuevo. Había estado presente desde que Aristóteles lo introdujo como parte de sus argumentos acerca del movimiento o el cambio en general (*Física*, Libros IV y VII; *De caelo*, Libro III). Estas discusiones fueron moduladas y enriquecidas durante los siglos subsiguientes, en particular en las postrimerías de la Edad Media, donde se integraron al cuerpo de la escolástica y de sus proyecciones hacia el Renacimiento. Comprender y valorar los trabajos de la ciencia que se despliega en el siglo XVI requiere, por consiguiente, considerar el clima intelectual en el que se educaron sus autores y frente al cual debieron éstos enfrentar sus argumentos. Presentar un panorama completo de los esquemas explicativos sobre el movimiento, desde Aristóteles hasta la aparición de *La Nueva Ciencia*, e insertar en dicha trama el problema del lanzamiento de proyectiles, es algo que rebasa nuestras intenciones. Sin embargo, lo que sí nos proponemos es recuperar algunas de las motivaciones y dificultades que acompañaron a quienes a través de la observación y el análisis o descomposición del movimiento buscaron arrancar de la naturaleza ese rostro o imagen de la trayectoria de una bala que, con teoría o sin ella, ya sembraba el terror en los campos de batalla del Renacimiento.

2. Su tarea era generar nuevas y más poderosas máquinas de guerra y, paradójicamente, también la de diseñar las fortificaciones que anularían el desempeño de aquéllas y de otras máquinas diseñadas con el mismo propósito.

La nueva imagen de las disciplinas matemáticas

El frontispicio de *La Nueva Ciencia* ilustra las ambiciones de corte humanista de ingenieros que, al igual que Tartaglia, aspiraban a recibir la misma clase de honores otorgada a los filósofos que navegaban sobre las venerables aguas de la tradición clásica (fig. 1). Inspirado en una alegoría platónica, el grabado muestra dos santuarios: uno, el más alto, presidido por Filosofía, la reina de las artes liberales, quien a su vez

Figura 1 Frontispicio de *La Nueva Ciencia*

está flanqueada por Platón y Aristóteles, maestros indiscutibles de los dos principales filones del saber de los antiguos. El espacio inferior corresponde al otro santuario, donde se desplaza una selecta corte que incluye a las damas del *cuadrivium* —Música, Aritmética, Geometría y Astronomía— y junto a ellas, para cerrar el círculo, aparece la Perspectiva, de reciente aceptación en tan selecto grupo. En el centro aparece nada menos que Tartaglia, fungiendo como maestro de ceremonias en un escenario donde se presentan, a la vista de todos, los principios de la ciencia que constituyen la balística.

Quienes deseen entrar en este *sancta sanctorum* del conocimiento deben cruzar la puerta cuyo paso está resguardado por Euclides. Aquéllos que sin toparse con Euclides busquen ingresar a los espacios donde se mueven las señoras de la sabiduría estarán condenados al fracaso, como lo ilustra el ignorante que a la izquierda intenta saltar la muralla apoyándose en una escalera tan corta que ni siquiera alcanzará a atisbar lo que ocurre en el interior.

Para el *Cinquecento* los *Elementos* constituían no sólo el fundamento, sino el paradigma o forma de acceso de toda sapiencia cierta, característica que separaba a las llamadas disciplinas matemáticas de cualquier otro tipo de conocimiento. Educado bajo estos supuestos, Tartaglia publicó para sus colegas menos instruidos —sobre todo quienes no leían en latín— la primera traducción a lengua vernácula de los *Elementos*[3] (1543). Con comentarios del propio Tartaglia, esta edición pretendía que "cualquier inteligencia mediocre pudiera entenderla, aun sin el conocimiento de alguna otra ciencia". La razón de ello radicaba en que las disciplinas matemáticas, en particular la Geometría y la Aritmética, que son las puras,

> por sí mismas se sostienen, por sí mismas se verifican, por sí mismas se aprueban, y no por el [peso] de la autoridad o la opinión de los hombres, como ocurre con otras ciencias, sino por demostración (edición de 1565).

3. Publicado en Venecia.

La cuestión de cuáles disciplinas eran matemáticas, y por lo tanto dignas de toda confianza en cuanto a sus resultados, era por entonces motivo de debate. En el prefacio a su edición de los *Elementos*, Tartaglia resume lo que a su entender parece evidente:

> Las Ciencias, Artes o Disciplinas Matemáticas son muchas, según el vulgo,... Aritmética, Geometría, Música, Astronomía, Astrología, Cosmografía, Corografía[4], Perspectiva, Especularia, la ciencia de los pesos, Arquitectura y muchas más. Sin embargo, Ma. Bovetio Severino y Giorgio Valla, tomando las opiniones de algunos griegos insisten en que las disciplinas Matemáticas sean sólo cuatro, Aritmética, Geometría, Música y Astronomía, y que las demás sean subalternas, es decir, dependientes de las susodichas cuatro. Pero Fra Luca dal Borgo San Sepulchro[5] quiere que las mencionadas disciplinas matemáticas sean cinco (agregando la Perspectiva a las cuatro anteriores) o tres, excluyendo a la Música... y Pietro, Cardenal de Aliaco, quien en su primera cuestión sobre Juan de Sacrobosco concluye que la Música, la Astronomía e igualmente la Perspectiva no son Matemáticas puras (como es cierto), sino intermedias entre las Matemáticas y la ciencia natural...
> Concluiremos entonces que sólo la Aritmética y la Geometría, de las que se ocupa especulativamente nuestro Euclides, son las disciplinas Matemáticas puras. (Tartaglia, *Euclide Megarense*, f. 5v-6r)

De lo anterior se desprende la importancia que habían venido adquiriendo las disciplinas matemáticas por sí mismas, por sus usos prácticos y por su valor propedéutico en estudios tan aparentemente ajenos como podrían parecer la Teología y el Derecho. Así, más y más disciplinas se inscribieron entre las que guardaban una estricta dependencia de las matemáticas puras. Tal fue el caso de varias áreas de estudio que típicamente se enseñaban en las *bothegue* o escuelas de oficios

4. Topografía.

5. Luca Pacioli (1445-1514 c.), el más célebre matemático de su tiempo, autor de una *Summa* de aritmética y geometría teórica y práctica publicada en Venecia en 1494, y de *La Divina Proporción* (1509), obra a la que debe su fama.

donde se aprendía Topografía, Gnomónica, Geografía, Óptica y Perspectiva. Las divisiones o subdivisiones a las que dio lugar tal profusión de actividades que se apoyaban en las matemáticas llevó a que gentes de la talla de Tartaglia, Federigo Commandino (1509-1575) —a quien Tartaglia calificara de 'perittisimo mathematico'— y Cristóforo Clavio (o Clavius) (1523-1610)[6] aportaran razones poderosas para defender una u otro alternativa de clasificación. Es el caso, por ejemplo, que Commandino incluyera actividades cuyo desarrollo todavía no era espectacular pero que ya permitían establecer diferencias:

> Hecha otra división, decimos que las facultades matemáticas se ocupan de las cosas intelegibles o de las sensibles: de las intelegibles al referirse a todas aquellas consideraciones que el alma por sí misma suele excitar despojándose de las formas materiales, y de este género de matemáticas tenemos dos especies principales... la Geometría y la Aritmética. En cuanto al otro género, que hace profesión de ocuparse de las cosas que afectan los sentidos, se divide en seis partes: el arte de las máquinas, Astrología, Óptica, Geodesia, Canónica o Música y aquélla que se ocupa de hacer cuentas (Prolegómenos a los *Elementos*).

Si se pasa a las subdivisiones se tiene que la Astronomía a su vez se subdivide en Gnomónica, Meteoroscópica[7], Dióptrica[8], Óptica o Perspectiva, que a su vez se divide en Óptica, Catóptrica o Especularia[9] y Escenografía[10].

Este tipo de subdivisiones es aceptable para Clavio, quien sólo sustituye el 'arte de las máquinas' por la 'Mechanica'. A esta última la subdivide, según su actividad, en áreas que se ocupan

6. Hombre clave en la educación científica de los colegios jesuitas, para los cuales escribió textos sobre las diferentes disciplinas matemáticas adaptados a los lineamientos filosófico-pedagógicos de la orden.

7. "Se ocupa de las diferencias entre las elevaciones y las distancias de las estrellas y enseña otros teoremas que pertenecen a la Astrología".

8. Por medio de instrumentos investiga las distancias del sol y de la luna y de otras estrellas.

9. Estudia las leyes de reflexión de la luz sobre espejos.

10. Proporciona reglas prácticas para engañar al ojo de un espectador creando la ilusión de tridimensionalidad en el decorado de un teatro.

ya sea de la construcción de 'ingenios' o máquinas, o de la construcción de elementos bélicos, de autómatas, y también de estudios sobre el movimiento y el equilibrio de los pesos.

Un problema medieval de movimiento

Desde mediados del siglo XIII la pólvora era conocida en Europa, pero fue sólo hasta bien entrado el Renacimiento que la tecnología militar pudo utilizarla de manera que resultara más peligrosa para el enemigo que para el propio artillero. Previo a esto, el uso de bombardas, morteros y cañones no había jugado un papel decisivo en el resultado de las guerras, sirviendo más para infundir pánico entre los habitantes de una ciudad bajo sitio que para efectivamente derribar murallas y dispersar ejércitos. La creciente importancia que fueron adquiriendo las armas de fuego al aumentar su poder destructivo y su precisión para dar en el blanco se puede constatar en la forma como son presentadas en grabados y pinturas de la época, siendo usual que a mediados del siglo XV aparecieran como elementos decorativos en planos posteriores o a los costados de las ilustraciones (fig. 2), en tanto que cincuenta años más tarde llegaron a ocupar posiciones centrales en los cuadros donde se celebraban las grandes batallas (fig. 3).

Conforme se avanzó en el conocimiento de todo aquéllo que circundaba al uso de la artillería, las discusiones sobre la trayectoria de las balas salieron del ámbito universitario y de la escolástica y pasaron a ser parte de una cuestión con múltiples facetas: prácticas, estratégicas, matemáticas, físicas y filosóficas. Lo que se discutía era algo de tal profundidad y riqueza intelectual que el problema del movimiento o trayectoria de un proyectil pasó a ser una de las cuestiones definitorias de la transición que ocurrió en la mentalidad de la época.

Figura 2 *Alegoría de la Guerra y la Paz.* Grabado de autor anónimo, 1459.

El principal problema que se presentaba al analizar el movimiento de una bala de cañón es que aún persistían ideas bastante confusas respecto de lo que ocurría una vez que la bala estaba en el aire. Para intentar resolver esta problemática y aclarar el panorama, dos clérigos franceses, Jean Buridan y Nicole Oresme, habían introducido en la discusión la noción de ímpetu, enmarcándola en las doctrinas aristotélicas comúnmente aceptadas en el siglo XVI. Sin embargo estas ideas sólo apuntaban a resolver cuestiones del orden cualitativo y poco ayudaban a responder las preguntas básicas de un artillero: ¿qué tanto hay que levantar sobre el horizonte un cañón para que la bala acierte sobre un blanco colocado a una determinada

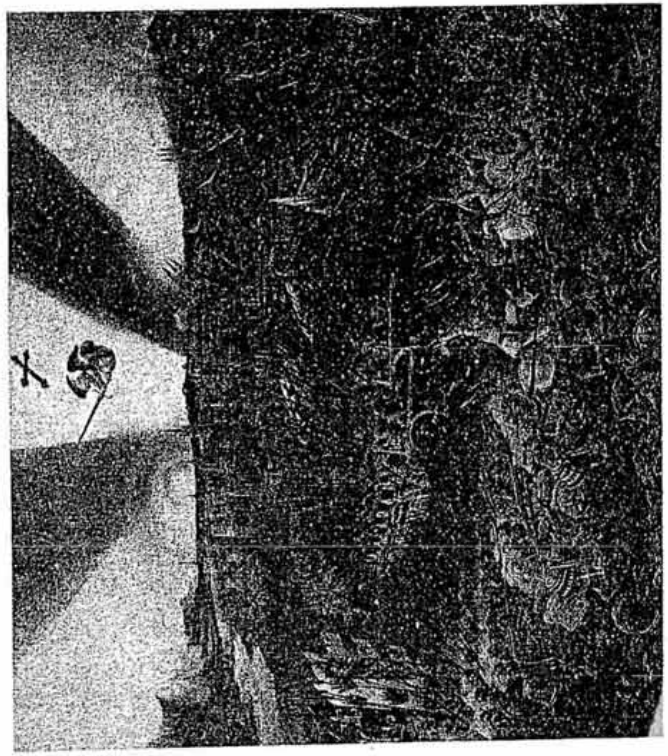

Figura 3 Albrecht Altdorfer. *Batalla contra los hunos en las afueras de Regensburg.* 1518. Nuremberg.

distancia?, ¿con qué inclinación se debe disparar una bala para que su alcance sea máximo? Éstas y otras preguntas semejantes bullían en las cabezas de los ingenieros militares que sabían el poder que alcanzarían los ejércitos que poseyeran estos conocimientos. Era evidente que las doctrinas que se ocupaban del movimiento deberían dar el siguiente paso y responder cuantitativamente a estas demandas.

Cosa curiosa, las primeras respuestas a dichas interrogantes vinieron de los claustros universitarios y fueron emitidas precisamente por Tartaglia, profesor de matemáticas en la universidad de Venecia pero que siempre mostró un gran interés por los asuntos del orden práctico. Como ya se mencionó, los resultados iniciales los presentó en *La Nueva Ciencia* (1537). En sus páginas se encuentran dos cosas que lo han hecho pasar a la historia. Una es la afirmación de que el máximo alcance para el disparo de una bala se logra inclinando el cañón a 45° sobre la horizontal, en tanto que la otra fue algo que impactó a los sabios y filósofos de la época, pues afirmaba que la trayectoria que seguía la bala en el aire incluía una parte curva, con lo cual estaba haciendo caso omiso de uno de los puntos centrales de la doctrina aristotélica del movimiento. Según este canon, el movimiento que debería seguir la bala al salir del cañón era a lo largo de una recta y así se mantendría hasta alcanzar su máxima altura. Acto seguido la bala caería, también siguiendo una trayectoria rectilínea, en dirección del centro de la tierra (fig. 4). Era imposible, por lo tanto, que el movimiento curvo del que hablaba Tartaglia ocurriera aquí en la tierra; dicho movimiento estaba reservado únicamente para los objetos celestes, es decir, aquéllos que se mueven más allá de la esfera lunar y que se someten por consiguiente a leyes diferentes de las terrenales.

La historia de la transición de los modos de pensar medievales a los que constituyen los inicios de la llamada ciencia moderna —la que surge en el siglo XVI y alcanza su cima

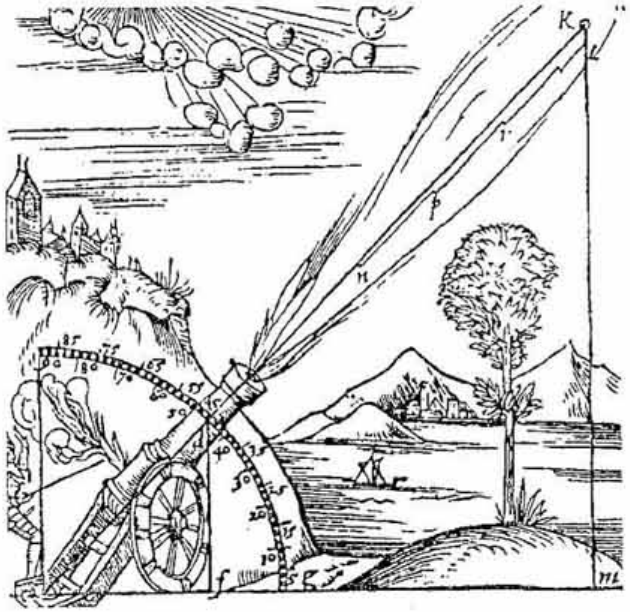

Figura 4 Daniel Santbech. *Problematum Astronomicorum*, Basilea, 1561.

en el XVII con figuras de la talla de Descartes, Newton y Leibniz— es muy amplia y con múltiples vertientes. Por ello en las líneas que siguen sólo se esbozarán algunas de las cuestiones más relevantes y que a su vez inciden directamente sobre el marco de trabajo que define Tartaglia en el seno de *La Nueva Ciencia*.

Los antecedentes teóricos que se someten a discusión en *La Nueva Ciencia* se remontan a las ideas aristotélicas sobre movimiento que habían atravesado el Medievo latino, ganando en sofisticación y propiciando la acumulación y asimilación de nuevos conceptos que buscaban mantener la supremacía de los viejos esquemas explicativos del mundo físico.

Para entender mejor la importancia del trabajo de Tartaglia es necesario presentar algunos aspectos de lo que era la ciencia del movimiento que vino a revolucionar, iniciando por analizar

lo que aparentemente en nuestros días es fácil intuir y, más fácil aun, describir y controlar, pero que todavía en los tiempos copernicanos estaba rodeado de nociones difíciles de entender y manejar. Lo primero que hay que tomar en cuenta es que para el Medievo el movimiento era algo que podía ocurrir en una de las siguientes cuatro categorías: en la de lugar, y se le llamaba entonces 'locomoción' o 'movimiento local'; en la de cualidad, y se llamaba 'alteración', como cuando un cuerpo se enfría o se calienta; en la de cantidad, y correspondía a la de aumento o disminución, como sucede en el caso de un cuerpo que crece o disminuye de tamaño y, por último, en la de sustancia, refiriéndose a cuando ocurre generación o corrupción de una porción de materia.

Las discusiones sobre aspectos relacionados con movimiento alcanzaron altos niveles de complejidad, en ocasiones por razones tan sutiles como la distinción entre cambio y movimiento, el primero siendo algo que uno deduce mediante el raciocinio —como cuando se comparan las sensaciones experimentadas en dos instantes diferentes y, dándose uno cuenta que no son las mismas, se dice que ocurrió un cambio—, en tanto que el segundo, el movimiento, es en esencia algo que se muestra ante los sentidos, siendo algo fenoménico. Percibimos el movimiento cuando está ocurriendo, pero deducimos que algo ha cambiado sólo después de ocurrido el hecho. Se podría decir que el cambio es la diferencia entre estados sucesivos, como por ejemplo el cambio de posiciones de alguien que de estar dentro de una habitación pasa a estar fuera.

Es evidente que cualquier objeto en movimiento local sufre un cambio en su posición. Por ello se dice que cambio y movimiento parecen ser cosas distintas, si bien ocurren de manera conjunta. Siguiendo un análisis que presenta Edith Sylla diremos que el movimiento es un fenómeno sensorial claramente determinado y que corresponde a un concepto o idea bien determinado. Por su parte, el cambio puede parecer

indeterminado para los sentidos pero corresponde a una idea mental muy clara. Lo usual entonces es que se busque establecer una imagen mental del movimiento en términos del cambio (Sylla, *Oxford Calculators*, 275-277).

Desde esta perspectiva es común señalar que el análisis del movimiento en los primeros siglos de este milenio interpretaba un movimiento completo como un cambio, considerando unitariamente al primero en términos del móvil y de los puntos correspondientes al inicio y el término del movimiento (lo cual aporta una especie de imagen del movimiento), si bien acotando que de hecho el móvil no se encuentra fijo —en reposo— sino que está realizando la transición entre los dos puntos extremos. Esta interpretación concibe al movimiento como un flujo, y no corresponde, por tanto, a la misma categoría de los elementos que constituyen los extremos del movimiento (lugares), es decir, el movimiento consiste en el pasaje o tránsito de un algo hacia otro algo en la categoría de lugar y no es, por sí mismo, elemento de esta categoría. De estas teorías o maneras de concebir el movimiento se dice que son platónicas, ya que únicamente consideran dos formas distinguibles —el principio y el fin del movimiento—, y sólo permiten que los puntos intermedios correspondan vagamente a prefiguraciones del elemento final del movimiento. Según esta visión existe primero un estado de llegar a ser —flujo— y luego el punto final o término del movimiento (el *productum esse*, *factum esse*, *motum esse*, para seguir la terminología utilizada por Santo Tomás en la *quaestione* 3, artículo 2 de su *Quodlibet*).

Según otra tradición —que se desarrolla hacia el crepúsculo del Medievo—, había que ocuparse no sólo del principio y del fin —los extremos— del movimiento, sino de todos los puntos intermedios. Es un hecho que ya desde mediados del siglo XIV quienes se ocupaban de estos problemas consideraban al movimiento en términos de los lugares y magnitudes de las cualidades —ya las escuelas de Oxford y de París habían

mostrado grandes y sugerentes avances en estos estudios— ocupadas, adquiridas o transitadas por el móvil en cada instante del movimiento. A este enfoque se le ha calificado de aristotélico en tanto que se ocupa de las formas que de hecho considera inherentes al móvil y no de aproximaciones o sombras imperfectas de los extremos. Para quienes se encontraban inmersos en esta corriente, el movimiento estaba conformado por el móvil y una serie de lugares, cualidades y cantidades bien diferenciadas que dicho móvil poseía en cada instante del 'recorrido'. Estas formas eran conocidas en lo general como *forma fluens* y, en el caso del movimiento local, como *ubi fluens* (Murdoch, *The Science of Motion*, 215; Wallace, *Causality*, 55-58).

Entender en qué consistía el movimiento provocaba múltiples debates, y frente a este marco de referencia los seguidores de Guillermo de Occam (c. 1300-c. 1349) sostenían que la noción de 'movimiento' se refería única y exclusivamente al móvil y a los lugares, grados de cualidad o cantidades que aquél adquiría de manera sucesiva. Esta opinión era defendida por un grupo bastante amplio de los *Calculatores* (Bradwardine, Heytesbury y Richard Swinehead). Pero también había quienes sostenían que tal manera de concebir el movimiento era inadecuada y que debería haber algo más que tomar en cuenta si se quería realmente aprehender su esencia. Este algo resultó ser llamado el *fluxus* y uno de sus defensores más connotados fue Walter Burley, otro miembro del grupo de los *Calculatores* de Oxford (Maier, *Studien*, 106-117).

Burley presenta una teoría del cambio cualitativo en términos de lo que él llamó 'la sucesión de las formas' y mediante las cuales concebía al movimiento en forma global y no sólo en términos de los puntos de inicio y de fin del proceso. Según esta teoría no existe un punto final o *terminus* del movimiento sino un número infinito de éstos, correspondiendo cada uno a cada instante del movimiento. Lo anterior conducía a que

no se tuviera un sólo movimiento o punto final alcanzado, sino que ahora se tendría un número infinito de transformaciones o cambios seguidos de un infinito de puntos finales alcanzados. Con esto Burley lograba una descripción más detallada de lo que sería el movimiento. Sin embargo el problema de la continuidad seguía vigente. Si nos atenemos a lo expresado por Burley, resulta que nunca ocurre que dos formas adquiridas sean inmediatas una de la otra, y si bien en número son infinitas esto no permite concluir que la trayectoria forme un continuo. Sólo si se permitía agregar la noción de flujo a esta visión era posible sostener la idea de continuidad como algo sustantivo para el movimiento. Es evidente que las antiguas discusiones sobre la naturaleza del continuo habían transmitido su falta de claridad al ámbito de la conceptualización del movimiento. De cualquier manera, el hecho de haber planteado una reformulación del problema de la naturaleza del movimiento y de las vías más adecuadas para su descripción —en las que se ponía especial énfasis en los fuertes lazos que las diversas teorías mantenían con las matemáticas, en particular por el hecho de que muchas de las discusiones remitían a imágenes de corte geométrico— era un paso más en la dirección que resultaría hegemónica en el siglo XVII. Era, ni más ni menos, sostener que las matemáticas y el mundo real estaban íntimamente enlazados, lo cual a fines de la Edad Media todavía era algo extraño para el sentido común y sostenible sólo en el mundo platónico de lo que siempre es y que por ende nunca sufre del dolor que acompaña al llegar a ser.

Quien penetre en aquellos mundos tan lejanos no dejará de notar que el poder de las matemáticas como lenguaje que exhibe o explica al mundo externo distaba todavía de alcanzar la claridad que cuatro siglos de triunfos sucesivos nos han hecho aceptar como evidente.

De la causa y cuantificación del movimiento

Las ideas que de manera explosiva irrumpieron en la cultura europea de mediados del siglo XIV, y que en forma natural llevaron a vestir al movimiento con los velos de las matemáticas, pronto se perdieron en los laberintos de las viejas discusiones sobre el continuo matemático y los desbordes imaginativos de la teoría de las latitudes, debiendo esperar otros tiempos para su resurgimiento. Lo que siguió siendo discutido en los círculos intelectuales fue la idea de movimiento y de sus causas y, como era de esperarse, Aristóteles era el punto de partida que guiaba toda discusión (Lindberg, *Western Science*, 290-307; Murdoch, *The Science of Motion*, 206-264).

En cuanto a la modelación del mundo había algo peculiar en el enfoque aristotélico, y es que tenía en muy alta estima a la razón humana y no confiaba mucho en los datos que pudieran surgir de mediciones, pues en éstas participaban los cinco sentidos y había muchos argumentos que demostraban su falta de objetividad. Sobre este hecho Platón decía que cuando el alma depende de los sentidos para obtener información "es arrastrada hacia el reino de lo variable, y confundida y mareada, pierde el camino" (*Dialogues*, 62). Aristóteles, por su parte, afirmaba que el matemático realiza mediciones sólo después de "haber despojado [al objeto] de toda cualidad sensible, tal como peso, dureza,... calor, frío y otros contrarios que se aprecian con los sentidos" (*Works*, 8, 1061 a.). Heredera de estas ideas, la Edad Media consideraba a la descripción y al análisis más útil en los asuntos cualitativos que en los cuantitativos. No sorprende, entonces, que el análisis medieval del movimiento se ocupara más de cuestiones cualitativas que de las cuantitativas que en el siglo XVI se pondrían a la vanguardia de la discusión. Había también cierta reticencia para ocuparse de las cuestiones cuantitativas dado que, según Guillermo de Occam, nominalista por excelencia, éstas simplemente no existían. Las únicas realidades existentes eran las *res absolutae*, a saber, las sustancias —o materia— y las cualidades —color, calor, forma y pesantez—, todas ellas cosas absolutas con capacidad de existir de manera independiente.

La palabra 'cantidad' era considerada por Occam como un nombre abstracto, ya que no existe por sí misma. Puede aumentar o disminuir y hasta desaparecer si Dios así lo desea, y todo ello sin afectar la sustancia o sus cualidades. Esto es evidente en el fenómeno de la condensación, donde el volumen ocupado por un cuerpo cambia sin que ello conlleve un cambio en la cantidad de materia, forma sustancial o cualquiera de las cualidades absolutas. Llevado al extremo, Dios puede condensar todo el universo, eliminando toda extensión, es decir, reducirlo a un punto en el espacio. Según Occam, algo semejante ocurre con el misterio de la Eucaristía, donde las distintas partes que integran el cuerpo, la sangre y la forma de Cristo, se mantienen a pesar de no poseer extensión espacial. Este modo de discurrir lo llevó a reducir todos los problemas vinculados con cantidades físicas a problemas de lógica o de gramática.

Refiriéndose al movimiento, Occam concluye que términos como movimiento, cambio, crecimiento, condensación y otros relacionados con éstos, corresponden a ficciones que designan no otra cosa sino la materia individual, la forma o la cualidad. Según él, el concepto de movimiento se construye de dos elementos, uno positivo y otro negativo. El primero es el cuerpo o cualidad al que se refiere Aristóteles al hablar del 'cuerpo en acto'. El elemento negativo corresponde a la negación del reposo, y está implícito cuando se habla del cuerpo 'en potencia'. Esto último no puede existir fuera de la mente, ya que sólo el cuerpo como individuo ya acabado y en reposo puede ser considerado como real. De ahí que por 'movimiento' se entienda a un cuerpo del que se dice no estar en reposo. Aceptado esto, bastaba un paso para que Occam considerara superfluo hablar de las causas del movimiento, pues nada po-

dría estar por encima del cuerpo en tanto que ente físico, es decir, dotado de existencia. Seguir esta línea de pensamiento obviamente llevaba a un callejón sin salida. Afortunadamente el occamismo no gozó de mucha fortuna entre los filósofos naturales, ya que en dicho contexto nadie vería la necesidad de proponer teoría alguna para explicar el movimiento de un proyectil por ser éste una ficción que por consiguiente no requería una explicación causal.

Siguiendo a Aristóteles, cuando se discutía acerca del movimiento se buscaba identificar sus causas, sus formas de actuar y las relaciones que se podían establecer entre la fuerza motriz, el peso del móvil, la distancia recorrida y el tiempo transcurrido. Aristóteles distingue dos tipos básicos de movimiento: el natural y el violento o forzado. En ambos casos se requería, a lo largo del movimiento, que a éste lo mantuviera un agente que actuara de manera continua. Si se trata del movimiento natural el agente era la propia naturaleza del cuerpo. Así ocurría en el mundo supralunar, en el que los astros y los planetas están animados por un movimiento natural y circular alrededor del centro de la tierra. Por el contrario, dentro de la esfera de la luna los objetos tienden unos hacia el centro de la tierra —a los que se denomina graves— y otros en dirección opuesta —conocidos como ligeros—, siempre hacia lo que sería su lugar natural. Así, la caída de cuerpos graves o pesados es natural en vista de que el lugar natural que le corresponde a los graves es el centro del mundo, en tanto que el de los ligeros es la superficie interna de la esfera sobre la que se mueve la luna. Se tenía por cierto que conforme se acercaba el cuerpo grave a su lugar natural mayor sería su velocidad; esto por la alegría que le provocaba aproximarse al sitio que su naturaleza le reservaba como propio.

El otro caso, el del movimiento violento, está típicamente representado por el lanzamiento de un proyectil, donde la causa del movimiento es tanto la mano o instrumento que lo lanza como el aire que lo empuja y que por consiguiente sostiene

el movimiento. Es evidente que en esta situación la causa del movimiento era una causa externa al móvil. Según Duhem (*Etudes sur Léonardo*, 3), Aristóteles presentaba dos posibles explicaciones, la de αντιπεριστασιζ, que sostenía que el aire desplazado al frente por el proyectil se movía hacia la parte posterior del mismo para llenar lo que podría quedar vacío si nada lo ocupara. La otra posibilidad era a la que apostaba Aristóteles, para quien era el propio medio, en este caso el aire, el que poseía la capacidad o poder de mover y transportar el proyectil hasta que dicha capacidad era agotada. Esto conllevaba una especie de contradicción pues planteaba que el aire actuaba tanto como motor del movimiento como de agente que genera resistencia al mismo. Asumir la contradicción o buscar una solución alterna era motivo de debate y finalmente fue la segunda posición la que prevaleció en las teorías del ímpetu que a mediados del siglo XIV surgirían (Taton, *Histoire*, Vol I).

Otro elemento que intervino en la discusión fue la regla del paralelogramo para componer movimientos, utilizada por Aristóteles al afirmar que si un móvil se desplaza con dos movimientos simultáneos tales que las distancias recorridas en un mismo tiempo guardan una relación invariable, dicho móvil se desplaza siguiendo la diagonal de un paralelogramo que tiene por lados dos líneas cuyas longitudes guardan la misma relación. En el contexto del Renacimiento esta regla permitía pocas posibilidades para el desarrollo de una vía de estudio cuantitativa del movimiento de proyectiles, ya que entrañaba la posibilidad, hasta entonces no justificada, de componer un movimiento natural con uno violento.

Una manera de resolver una cuestión entre teorías o puntos de vista que no alcanzan a convencer ni tampoco a destruir lo que se les opone es proponer una teoría nueva que explique todo lo que comprendían las anteriores, y que las supere en aquéllo que no lograban someter de manera coherente a su sistema. En este caso tal teoría fue la del ímpetu, presentada

alrededor de 1340 por Jean Buridan (c. 1300-c. 1358), quien fuera rector de la Universidad de París (Clagett, *Mechanics*, 521-522), y que aparentemente fue sugerida poco antes por Francisco de Marchia (1319) (Weisheipl, *Motion*, 31), y ya desde el siglo VI d.C. por Juan Filopón (Sorabji, *Motion*, 227-248). Aunque es casi unánime la opinión de que los trabajos de este último no pasaron al Occidente medieval (Maier, *Zwei Grundprobleme*, 127-133), lo cierto es que sus argumentos para refutar la teoría del movimiento de Aristóteles en lo que concierne al agente que mantiene al móvil en movimiento violento son muy semejantes a los presentados por Buridan, Oresme y el resto de sus seguidores.

Filopón sostiene que el medio no puede ser la causa del movimiento de una piedra o proyectil, ya que si así fuera, ¿por qué haría falta que la mano tocara la piedra? Uno puede golpear o desplazar al aire con vigor y no por ello se moverá la piedra. También ocurre que una piedra relativamente pesada puede ser lanzada más lejos que una más ligera, lo cual debería ocurrir al contrario si el aire fuera el responsable del movimiento. Más aun, todo medio, incluido el aire, ofrece resistencia al movimiento, de manera que en lugar de ser una causa resulta ser un impedimento. Todo esto lo lleva a concluir que la teoría aristotélica no puede explicar el movimiento violento: "...por el contrario, es necesario que un cierto poder motriz incorpóreo sea transmitido al proyectil mediante el acto del lanzamiento". (Citado por Weisheipl, *Motion*, 29). Este poder o ενεργεια sólo es tomado como algo prestado y decrece como consecuencia de las tendencias naturales del objeto y de la resistencia del medio.

Cuando Duhem descubrió la teoría del ímpetu en los escritos de Jean Buridan y de sus seguidores pensó que por fin había encontrado a los precursores parisinos a los que Galileo hizo referencia en sus primeros escritos, a los que A. Favaro bautizó como *Juvenilia* (Galileo, *Opere*, Vol. 1). Duhem sostuvo que el principio de inercia fue el producto natural de la derrota que sufrió la distinción aristotélica entre movimiento natural y movimiento violento de manos de la teoría del ímpetu. Esta opinión no es compartida por muchos, Anneliese Maier entre ellos, al considerar que Duhem exageró la importancia del concepto de ímpetu, además de concebir erróneamente el problema histórico. Según Maier, la teoría del ímpetu surge como un desarrollo natural de la doctrina aristotélica y resulta un tanto ajena al principio de inercia que aparecerá en el siglo XVII (Maier, *Zwei Grundprobleme*, 113-114).

La nueva ciencia del movimiento. Vidas paralelas: teoría y práctica

El problema del movimiento compuesto o mixto fue retomado con seriedad por Leonardo da Vinci. Heredero de una larga tradición que integraba los conocimientos de ingenieros, artistas y artesanos, todos ellos usuarios de saberes al servicio de cuestiones prácticas, Leonardo aprende a pensar y a trabajar con engranes, poleas, ruedas, balanzas, molinos, barcos y planos inclinados. Se nutre de la tradición arquimediana y de los trabajos teóricos de Swinehead y de Buridan, posiblemente a través de Alberto de Sajonia y de Nicolás de Cusa (Dugas, *Histoire de la Mécanique*, 47-82), por lo que el estudio de los fenómenos tal y como ocurren en la naturaleza lo realiza frente a ésta y no a través de los tratados de la escolástica. Esto le lleva a analizar el movimiento de un cuerpo grave que se desliza sobre un plano inclinado y a enunciar como resultado de sus experimentos que todo cuerpo grave desea caer hacia el centro de la tierra y la oposición que le resulta más oblicua le produce la menor de las resistencias. Al referirse a la noción de ímpetu de la que, como se ha mencionado, ya se había ocupado Buridan, la trata como una virtud creada por el movimiento y transmitida por el motor al móvil (Barbin, *Mathématiques, Art*, 53).

Con respecto a la caída de los graves concluye que la velocidad que adquiere el cuerpo que cae es proporcional al tiempo

que ha transcurrido durante la caída (*Notebooks*, 67). Estos planteamientos muestran el afán de abstraer de la realidad los comportamientos regulares y de encuadrarlos en enunciados que fácilmente pueden ser traducidos como proposiciones matemáticas, convencido de que no existe certidumbre alguna ahí donde no penetran las ciencias matemáticas o aquéllas cuyo sustento remite a las matemáticas (*Notebooks*, 7).

Sin mayores reticencias en cuanto a considerar situaciones que aparentemente escapan al aristotelismo medieval, Leonardo se atrevió a no desdeñar la posibilidad de que existiera un cierto tipo de movimiento compuesto por un movimiento natural y otro violento, dando lugar a lo que sería un movimiento mixto. Sin duda sus preocupaciones teóricas se enlazan con el valor práctico de recabar ciertos conocimientos sobre el movimiento real de objetos que en el marco teórico de la época podrían considerarse sometidos a ciertas etapas de movimiento natural y a otras de movimiento violento. Sus ilustraciones sobre disparos de bombardas o de fuentes de agua muestran un fuerte sentido crítico y su inmensa capacidad de representar fielmente lo que se mostraba ante sus ojos (fig. 5 y 6). En ambas ilustraciones difícilmente podría uno reconocer semejanza alguna

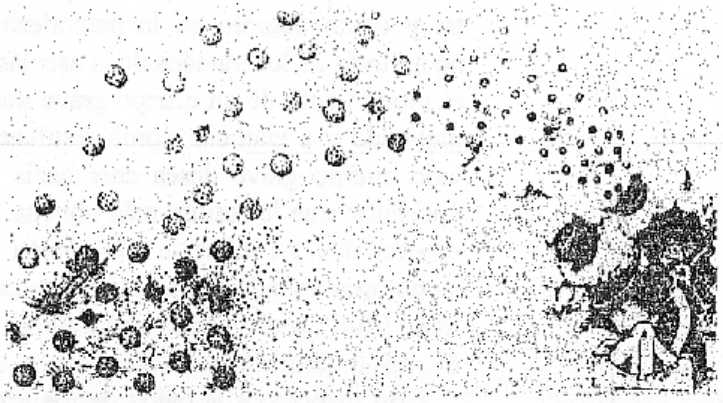

Figura 5 Leonardo. *Códice Atlántico*, fol. 9 v.A., Biblioteca Ambrosiana.

Leonardo se pregunta cuál de estas caídas de agua posee mayor potencia o poder de percusión para mover una rueda. Argumentando que se da un balance entre el poder de percusión y el 'peso del agua', concluye que todas poseen la misma potencia.

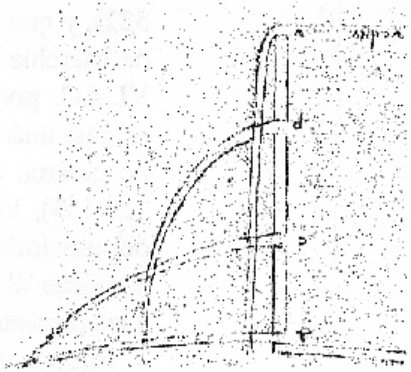

Figura 6 Leonardo. *Códice Madrid* I, 134v.

con los diagramas contemporáneos de cómo se comportaban los objetos lanzados al aire en trayectorias oblicuas.

Más impactante aun es la ilustración donde a la manera de surtidor de agua Leonardo muestra la trayectoria de balas disparadas por morteros (fig. 7). Esto sitúa a Leonardo al lado de

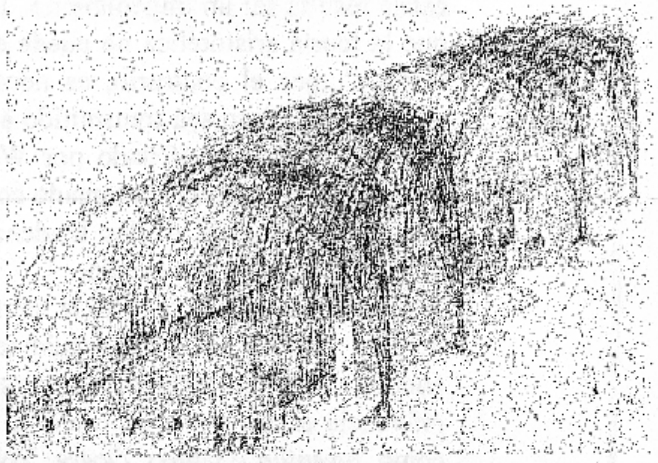

Figura 7 Leonardo. Cuatro morteros lanzando piedras sobre el patio de una fortaleza. *Windsor*, Leoni, 12275.

muchos artistas que supieron observar que la ruta seguida por un objeto lanzado en dirección oblicua es una curva (fig. 8)

Lo que hay de inquietante en el análisis que hace Leonardo sobre este tipo de trayectorias es que las concibe como movimientos que se pueden descomponer en tres partes: una primera en la que el movimiento es estrictamente 'violento', bajo el efecto solitario del ímpetu inicial, una tercera etapa en la que el movimiento es sólo natural, afectado únicamente por aquéllo que lo hace dirigirse hacia el centro de la tierra. Y, como algo novedoso, la etapa intermedia del movimiento que enlaza a los otros dos, y que es tenida por Leonardo como sometida a un 'ímpetu compuesto', lo cual hace que esta etapa sea considerada un movimiento mixto. Este nuevo tipo de ímpetu requiere un comentario en cuanto a su significado. Para Leonardo, ímpetu compuesto es aquél en el que participan tanto el ímpetu del motor como el ímpetu del móvil, y de ahí que movimiento mixto sea el que se sostiene gracias a la participación de ambos ímpetus.

Figura 8 Miniatura de autor anónimo (ca. 1170-1200). *Ms. Harley 1585*, Museo Británico.

Estas ideas parecían prefigurar los trabajos de Tartaglia, pero a pesar de la fama de Leonardo sus escritos sobre mecánica no recibieron una amplia difusión, por lo que los estudios sobre el lanzamiento de proyectiles de la primera mi-

tad del siglo XVI partieron una vez más de un esfuerzo por analizar dicho movimiento en términos aristotélicos. Esta línea de argumentación generó dos casos que tuvieron una gran trascendencia: el de Copérnico, al reconocer que una piedra que cae se ve afectada por un movimiento rectilíneo y otro circular, y el de Tartaglia, al estudiar el gran problema de los artilleros: la bala que al ser lanzada considera sometida a los dos movimientos señalados por Copérnico.

El empirismo del artillero

Las referencias de Petrarca a las nuevas armas que comenzaban a invadir los campos de batalla de mediados del siglo XIV es un testimonio confiable de lo extendido que era su manejo. Sin embargo, a pesar de lo espectacular que podría parecer el estallido de un cañón, lo cierto es que su uso era aún problemático. Muchos eran los factores que se sumaban para hacer que las armas de fuego no fueran el recurso maravilloso que reportaría victorias inmediatas (fig. 9). A pesar de que Roger Bacon ya conociera el secreto de cómo provocar ese efecto 'más fuerte que una tempestad' que se obtiene de

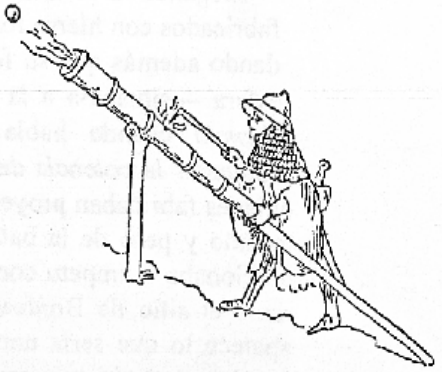

Figura 9 Konrad Kyesser. *Bellifortes* (ca. 1400-1405). Ed. de G. Quarg, Düsseldorf, 1967.

mezclar azufre, salitre y una 'tercera fuerza' cuya identidad omitía mencionar 'para preservar a la humanidad', pero que revelaba mediante enigmas en forma de anagramas en *su Epistolae de secretis operibus artis et naturae et de nullitate magiae* (1260), es un hecho que inicialmente los efectos de la pólvora eran poco controlables (Frischler, *Armas Prodigiosas*, 216). También estaba el problema de la falta de predictibilidad en cuanto a cómo y cuándo se produciría el estallido de la pólvora, por depender éste en parte de la velocidad con que le llegara el oxígeno al receptáculo que la almacenaba. Por su parte, el procedimiento para efectuar el disparo requería de dos hombres para manejar el cañón, uno que apuntara —y que debía agacharse enseguida 'encomendando su alma a Dios'— y otro que acercara la mecha a la pólvora. Éstos y otros problemas presentaban obstáculos que impulsaron a numerosos hombres de genio a ocuparse de nuevas y variadas ramas técnicas: unas relacionadas con la metalurgia, y otras con el diseño y la producción en serie tanto de las armas como de las balas pues, como se ha de suponer, se requería de una precisión 'casi matemática' para que entre el diámetro del proyectil y el cañón del arma hubiera el ajuste del cual dependía la fuerza del disparo.

Llegando a la mitad de este milenio los proyectiles eran fabricados con hierro forjado y calibrados según sus pesos, cuidando además que su forma fuera la más cercana a la de una esfera —situación a la que Tartaglia se refiere en *La Nueva Ciencia* cuando habla de cuerpos 'igualmente graves'—. Aumentar la potencia destructiva era uno de los propósitos de quienes fabricaban proyectiles, y al principio esto dependía del tamaño y peso de la bala, así como de la explosión que proporcionaba el ímpetu con que ésta era disparada. En 1452, durante el sitio de Bordeaux (Barbin, *Mathematiques, Art*, 55) aparece lo que sería uno de los grandes adelantos bélicos: la bomba, es decir, un proyectil cargado con pólvora que explo-

taba en el momento del impacto, provocando un efecto que iba mucho más allá del que producía el mero ímpetu que poseía la bala.

Con todo, había un elemento al que se le había dado poca importancia, y éste era el cómo apuntar hacia un objetivo sobre el que se deseara hacer blanco. Durante el primer par de siglos de uso del cañón la idea era lanzar los proyectiles e ir ajustando, por ensayo y error, la posición del cañón, las más de las veces limitándose a realizar disparos con un ángulo apenas por encima de la horizontal. Sin embargo, los avances en cuanto a la posibilidad de controlar la potencia del disparo, de hacer más confiable la supuesta relación entre la situación inicial —peso de la bala, inclinación del tubo del cañón, cantidad de pólvora, etc.— y el sitio donde caía el proyectil, hicieron que adquiriera sentido el estudio de las trayectorias de los proyectiles. Que éste no era asunto sencillo queda de manifiesto en *L'art de jeter les bombes* (1699), donde su autor Blondel critica a los filósofos de antaño porque a pesar de tanto haber discurrido sobre la esencia del movimiento natural y del violento, "no dicen absolutamente nada sobre lo que finalmente es el efecto de este movimiento, [refiriéndose con ello a] la trayectoria del proyectil". Según Blondel

> no existía conocimiento alguno ni de las matemáticas ni de ninguna otra ciencia que pudiera enseñar [a los artilleros] la naturaleza del movimiento de las bombas y de la línea curva que éstas describían en el aire..., o de la diferencia en su alcance dependiendo de las diferencias en la elevación [del tubo del cañón]... y por ello se quejaban del peligro de que las bombas que se pensaba lanzar sobre la plaza pasaran de largo

y fueran a matar a quienes de sus propios ejércitos estaban en las trincheras del otro lado de la fortificación (Barbin, *Mathématiques, Art*, 4-5).

Extraer de entre toda esta maraña de ideas el conjunto de experiencias, datos y principios que dieran cuerpo a una teoría

del movimiento que explicara y describiera la forma de la trayectoria de un proyectil con movimiento oblicuo no era tarea sencilla. Tan es así que todavía en 1613 se publica un *Tratado de Artillería* en el que su autor, Diego Ufano, capitán español con fama de experto artillero, sigue considerando que son tres los movimientos que participan en la determinación de la ruta seguida por una bala:

> ...estos tiros se producían primeramente como un movimiento violento o recto, luego como un movimiento mezclado en el que la bala declina de la línea recta con la que salió del mortero y sigue un arco o línea curva; finalmente, cuando ya perdió toda su fuerza, sigue el movimiento natural buscando el centro [de la tierra] de arriba hacia abajo, como aparece en la figura.... (fig. 10) (Barbin, *Mathématiques, Art*,).

Según esto un cañón colocado sobre una torre tiene mayor alcance que el situado en la base de dicha torre. En la figura correspondiente la tercera parte de la trayectoria está muy cercana a la dirección vertical que defiende en el texto (fig. 11). Lo que resulta

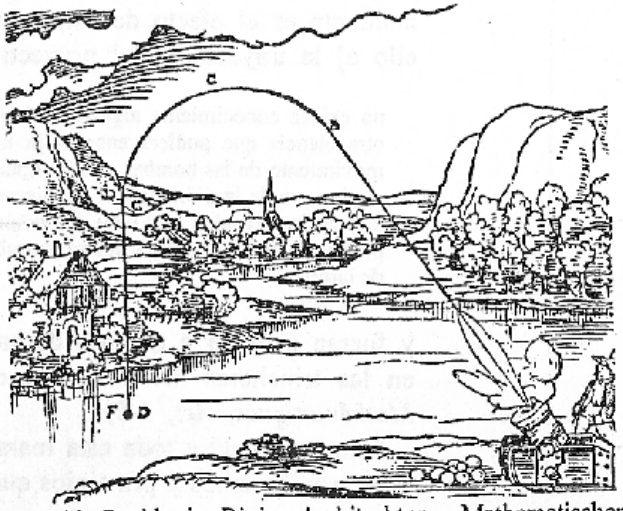

Figura 10 Gaultherius Rivius, Architechtur ... Mathematischen ... Kunst, 1547.

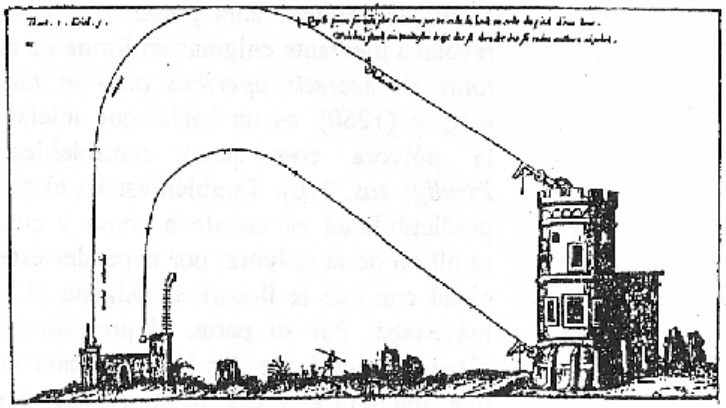

Figura 11 Diego Ufano. *Tratado de artillería*. Bruselas, 1613.

evidente es que aún a principios del siglo XVII no existía claridad en cuanto a la forma ni a los elementos participantes en la trayectoria de una bala disparada oblicuamente.

Pareciera como si toda la ciencia, todas las búsquedas de conocimiento, se hubieran ocupado tan solo de aquellos aspectos en los que participaba la mano del hombre —fabricación del cañón y fabricación de la pólvora— o de sus efectos de primera instancia —la explosión—, dejando que la naturaleza se encargara de gobernar todo lo que ocurría después. Hasta entonces sólo se habían emprendido acciones de carácter empírico para 'conocer' el comportamiento de un cañón, bombarda o cualquier arma de fuego en cuanto a su alcance con relación a las diferentes inclinaciones con las que se efectuaba el disparo. Esta problemática correspondía a otra visión del problema, una que se habría venido incubando en otros ámbitos y que tenía sus raíces en la pintura, la óptica, las técnicas de representación (Edgerton, *Science*; Cardano, *Liber primus*, 394) y el afán de cuantificar que surge a fines del Medievo (Crosby, *Measure*, 129-137). Es frente a una necesidad y con

una nueva panorámica que el artillero se pregunta sobre la relación que existe entre el alcance de un disparo y el ángulo de tiro, y sobre la forma y las medidas de la trayectoria del proyectil. El mérito de Tartaglia radica en haber sido el primero en buscar respuestas a estas demandas del espíritu práctico, si bien sus logros no alcanzan inicialmente a colmar sus ambiciones. *Es evidente que la ciencia que pretende estar inaugurando sólo está emitiendo sus primeros balbuceos.*

La balística de Nicolo Tartaglia

La Nueva Ciencia no es un tratado de movimiento en el sentido medieval, es decir, no discute la naturaleza del movimiento. Se ocupa exclusivamente del movimiento de los cuerpos que llama 'igualmente graves', que son aquéllos que por su forma —esférica— y su materia no encuentran una oposición sensible por parte del aire. Y la manera de ocuparse del movimiento es el 'modo geométrico': siguiendo el modelo euclidiano, primero presenta definiciones, seguidas de suposiciones y nociones comunes para luego pasar a deducir los que serían los teoremas de su nueva ciencia. Y tan era una ciencia en construcción, y por ende aún en búsqueda de respuestas para muchas de las cuestiones más inmediatas, que Tartaglia no llega a establecer, a pesar de haberlo prometido al Duque de Urbino en su prefacio, la relación entre el ángulo de tiro y el alcance de los disparos.

Por otra parte, el texto de Tartaglia tampoco se acomoda a los manuales producidos por los constructores de cañones donde sólo aparecen recetas y esfuerzos tempranos por establecer principios que gobiernen su arte. Dichos principios distan mucho de formar parte de una concepción más general de lo real. Más ambicioso que los artilleros y los constructores de cañones, Tartaglia sí pretende esbozar una teoría que sustente que *La Nueva Ciencia* sea precisamente eso, una ciencia.

Dadas las circunstancias, esta ciencia no alcanza a desprenderse del discurso que tradicionalmente se había ocupado del problema del movimiento. Con todo, Tartaglia está introduciendo nuevos moldes que eventualmente servirían para transformar la identidad de la naturaleza que expresaban.

Es evidente que en las definiciones que presenta Tartaglia no busca introducir ninguna novedad en el cuerpo aristotélico de ideas que se ocupan del movimiento. Por ello, cuando dice en *La Nueva Ciencia* que se ocupará de estudiar el movimiento de un proyectil disparado por un cañón, se refiere a que estudiará el movimiento provocado por una potencia, definida ésta como cualquier tipo de "máquina artificial o materia que sea apta para empujar o lanzar un cuerpo igualmente grave violentamente por el aire" (Definición XIII). Este hecho merece por sí mismo algo de atención, pues impone un giro a la forma en que la escolástica enmarcaba un problema de movimiento. Para quien discurría desde este marco de referencia, la acción de una máquina no sería sino un elemento incidental en un ejemplo donde se analiza el movimiento, no pudiendo de manera alguna formar parte constitutiva de la teoría. En oposición a este planteamiento, Tartaglia adopta una actitud más acorde con el fenómeno que estudia e incluye a la máquina artificial como parte del marco teórico, sumándose con ello a quienes habían mantenido viva la tradición arquimediana[11] en el estudio del mundo natural. Esta corriente había venido adquiriendo fuerza desde mediados del siglo XV, y sus adherentes eran ingenieros y quienes se habían formado en los

11. Tartaglia era un entusiasta seguidor de los razonamientos heurísticos de Arquímedes. En 1543 publicó en latín el tratado de Arquímedes sobre el comportamiento de cuerpos sumergidos en agua y que incluye la anécdota del grito "¡Eureka!". Algo relevante en este escrito es que su autor muestra cómo se pueden analizar ciertas características de los cuerpos sumergidos en diversos medios recurriendo a cantidades medibles como son los puntos de equilibrio, el peso, los brazos de palanca, etc. Esto apuntaba a que se podrían explicar los fenómenos apelando a las herramientas de tipo geométrico y olvidarse de los argumentos que recurrían a conceptos tan ambiguos como el de las cualidades ocultas.

talleres de artesanos del norte de Italia y en sitios similares de Alemania y de la entonces poderosa Liga Hanseática. Era ésta la época del surgimiento de la máquina y de sus artificios como vía para investigar el mundo. Podría decirse que *La Nueva Ciencia* es una de las obras clave para el reemplazo del filósofo natural por el filósofo mecanicista.

Como ya se dijo antes, aunque se trata de estudiar el movimiento de proyectiles lanzados por un cañón, Tartaglia no busca penetrar en la esencia de lo que es el movimiento. Las definiciones que ofrece no son sino una puntualización para el caso que le interesa de lo ya establecido por la filosofía natural, y ni siquiera intenta distinguir el movimiento natural del violento en términos de las causas teleológicas de uno y de otro. Lo que pretende al explicitar ciertos conceptos es plantear un lenguaje en el que resulte claro lo que se está diciendo y que circunscriba la noción de movimiento natural a la caída de cuerpos graves y la de movimiento violento al resultado de proyectar los cuerpos mediante una máquina cuyo elemento representativo es un cañón. Esta última sustituye o hace las veces de la potencia aristotélica que provocaba el movimiento violento.

Después de señalar —inspirado sin duda en el modelo euclidiano de los *Elementos*— lo que entiende por "cuerpos igualmente graves" y por instante, hace explícito que una medida del movimiento se puede establecer en términos del tiempo. Finalmente, en la Definición V, y sin olvidar que Aristóteles ya hablaba en la *Física* de hasta seis clases de movimientos, se queda con sólo una de ellas al definir al movimiento como "aquélla transmutación que se realiza de un lugar a otro...", tomando como casos particulares al movimiento natural y al violento. Al tratar al primero como el "que se realiza de un lugar superior a otro inferior, perpendicularmente y sin violencia alguna", reduce el movimiento natural al caso exclusivo de la caída libre de cuerpos graves.

Igualmente, la definición que da de movimiento violento limita a éste al caso de proyectiles lanzados por un cañón.

Después de plantear varias suposiciones y sentencias comunes sobre los efectos que producen los móviles dependiendo de sus velocidades, pasa a las proposiciones donde establece una simetría en el comportamiento de cualquier móvil igualmente grave según se mueve éste con un movimiento natural o con uno violento. Para el primer caso —Proposición I— argumenta que el móvil va más rápido conforme se aleja del inicio del movimiento o conforme se acerca al punto de destino. Acto seguido, en la Proposición II, establece que si dos cuerpos igualmente graves parten con movimientos naturales a la misma velocidad, el que recorriese una mayor distancia iría más veloz, sin que ello significase una proporcionalidad entre la velocidad y el espacio recorrido. Lo que para el siglo XVI sería la pregunta inmediata, a saber, si el aumento en velocidad del cuerpo que cae es proporcional a la distancia recorrida o al tiempo transcurrido —pues serían las suposiciones más fáciles de manejar matemáticamente—, no es planteada por Tartaglia. Aparentemente lo que logra con la Proposición II es darle un rodeo a la pregunta a través de establecer la comparación entre los movimientos relativos entre dos cuerpos. Habría que esperar casi un siglo para que Galileo[12] diera la respuesta correcta, estableciendo que al desplazarse en caída libre un cuerpo aumenta su velocidad en proporción del tiempo transcurrido (Cohen, *El descubrimiento*, 95-109; Drake, *Pioneer Scientist*, 9-31).

Como corolario de la Proposición III, misma que establece que en un movimiento violento el móvil se desplaza más lentamente conforme se aleja del principio o se acerca al final del movimiento, Tartaglia concluye que no existe una aceleración en la primera parte del movimiento violento y lo reafirma con el hecho de que no aumenta en este caso la po-

12. Los escritos de Galileo sobre movimiento abarcan el periodo 1602-1637, desde el *De Motu* hasta los *Discursos sobre las Dos Nuevas Ciencias*.

tencia del choque con el alejamiento del móvil de su punto de lanzamiento. Con base en los mismos argumentos concluye que un proyectil que se desplaza con movimiento violento está impedido de tener una misma velocidad en dos momentos diferentes. Además, como lo señala Koyré, de lo dicho por Tartaglia se sigue que "todos los cuerpos igualmente graves, semejantes e iguales, [lanzados con movimiento violento] irán al final de su movimiento con igual velocidad, cualquiera que haya sido la que tenían al principio" (*Estudios de Historia*, 107-108). Esto tiene una consecuencia muy interesante en cuanto a la forma de las trayectorias de los proyectiles, pues sin haber establecido cuáles serían dichas formas, con la Proposición IV enfrenta al lector al dibujo de las trayectorias, que si bien es algo eminentemente cualitativo sí se aparta de lo establecido por el pensamiento aristotélico al incluir una sección curva en la parte intermedia de la trayectoria (fig. 12).

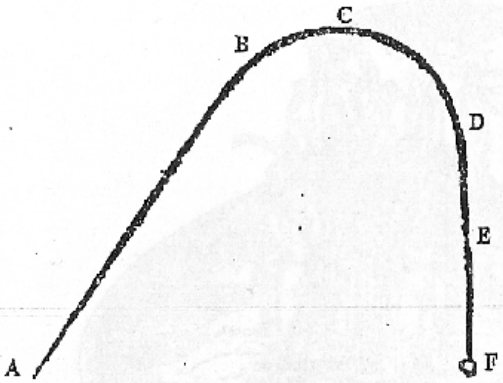

Figura 12 Tartaglia. *La Nueva Ciencia*, 1558

La Proposición V juega un papel crucial como impedimento para la comprensión de cómo se podría configurar la trayectoria curvilínea de un proyectil lanzado al aire en dirección

oblicua. Al negar la posibilidad de que un móvil pudiera "recorrer algún espacio de tiempo o de lugar, con movimiento natural y movimiento violento en forma simultánea", cancelaba la posibilidad de que se diera un movimiento mixto o compuesto. Esto se podía entender en el marco de referencia aristotélico en el que sería absurdo pensar que un cuerpo, al estar sometido a los dos tipos de movimiento ya mencionados, estuviera disminuyendo y aumentando su velocidad simultáneamente. Esta manera de concebir el fenómeno según la cual las causas se debían sumar y su efecto manifestarse en acto, no correspondería cualitativamente a la generación de un efecto que se produciría como resultado de la composición de dos desplazamientos. En esta última situación sí era evidente que se podría hablar de un desplazamiento resultante que era equivalente a la composición de otros movimientos.

El hecho de sustituir por otra una situación como la planteada en el párrafo anterior no era algo del todo nuevo, teniendo como antecedente inmediato el llamado teorema del Colegio Merton, mismo que se ocupaba del caso en que un móvil se desplaza con aceleración constante y para el cual se demuestra que un desplazamiento con estas características es equivalente, en cuanto a distancia recorrida, a uno que se realiza durante el mismo intervalo temporal con una velocidad igual a la media aritmética de las velocidades inicial y final del movimiento acelerado (Lindberg, *Western Science*, 300).

Lo que sugiere la lógica es que la Proposición V llevaría a que la trayectoria del proyectil lanzado por un cañón estaría compuesta por dos partes: una recta inclinada u oblicua que se mantiene hasta que se agota o cesa el movimiento violento, y luego una recta vertical que correspondería al movimiento natural. Sin embargo, lo que plantea Tartaglia en la discusión que sigue a la Proposición V es que la trayectoria en cuestión se compone de tres partes: una rectilínea que corresponde a la etapa en que el movimiento violento se mantiene puro; le

sigue una segunda sección donde ocurre que se desvanece el movimiento violento y "entra en conflicto con el movimiento natural", pues "una parte es de movimiento violento puro y la otra de movimiento natural puro". No lo dice, pero el movimiento en esta etapa es circular, ya que así lo ilustra en el texto (¿o sería ésta una pequeña libertad que se tomó el ilustrador?).

Más adelante, en el Libro II, aparecen las definiciones y suposiciones que enriquecen el formato científico de la obra. En particular, la Suposición III especifica que el tránsito de movimiento violento a natural se realiza al finalizar la curva, de manera contingente —con lo cual quiere decir tangente—, es decir, de manera continua y sin brusquedad en el cambio de la curva a la recta vertical que corresponde al movimiento natural y que constituye la tercera de las tres partes a las que se hace mención líneas atrás.

Estas consideraciones le permiten a Tartaglia dejar de lado la posibilidad de una trayectoria que cambie de orientación de manera abrupta y coincidir así con los testimonios de los artilleros. A pesar de ello, la trayectoria que se integra con dos segmentos rectos y uno curvilíneo (una sección de círculo, argumentará Tartaglia en el Libro II) que los une, plantea un problema de origen: ¿en qué momento y por qué razones inicia la etapa curva de la trayectoria? La respuesta que ofrece Tartaglia como Suposición II (Libro II) en cierto modo contradice lo expresado en la Proposición V del Libro I, pero lo suaviza diciendo que la trayectoria en cuestión no posee ninguna parte perfectamente recta debido a la "gravedad que se encuentra en tal cuerpo, la cual continuamente lo va ... dirigiendo en dirección del centro del mundo". Pero como en cierta etapa la trayectoria es insensiblemente curva cabe entonces suponerla recta, y lo mismo se hace con la porción curva a la cual se supone como parte de la circunferencia de un círculo por no apartarse sensiblemente de ella.

Lo curioso de la última aseveración es que el frontispicio de *La Nueva Ciencia* muestra una bombarda lanzando un proyectil en una trayectoria que evidentemente es curva y que difícilmente podría ser tomada como cercana a una circunferencia. Si se observa el otro cañón, la bala que dispara sigue una trayectoria más cercana a la horizontal, mas no horizontal, de donde se concluye que Tartaglia no considera que haya un desplazamiento rectilíneo en ninguna porción de las trayectorias (fig. 13). Con todo, no ofrece ninguna evidencia de precupación por conocer con certeza la forma geométrica a la que se constriñe la trayectoria del obús. Esto podría ser un indicio de que la poca difusión del conocimiento geométrico de las curvas construibles sistemáticamente no permitía vislumbrar la posibilidad de que la naturaleza llevase a cabo sus actos de manera que siempre se acomodaran a las abstracciones estudiadas por Euclides, Apolonio, Proclo y demás geómetras griegos.

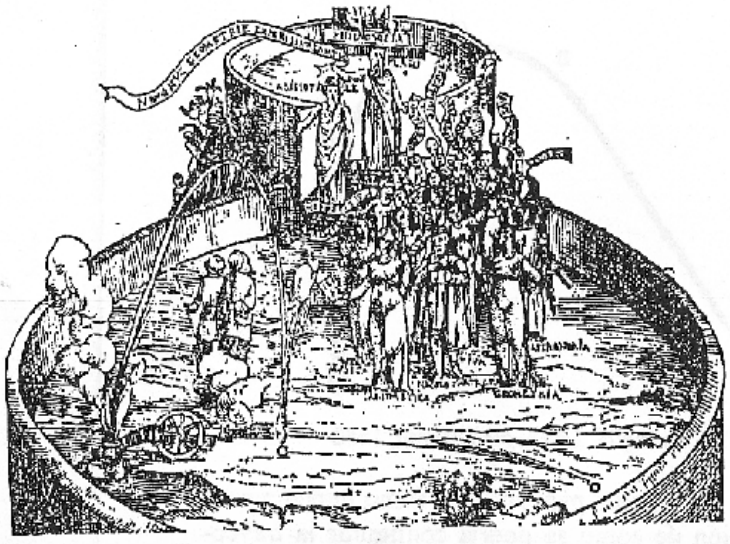

Figura 13 Tartaglia. *La Nueva Ciencia*, 1558

Esta falta de conocimiento o de consistencia en el discurso visual no sorprende. En un grabado que ilustra el intento de los moros por reconquistar la ciudad de Ceuta —primera mitad del siglo XV—, las trayectorias de los disparos efectuados por los tres cañones de la izquierda son muy semejantes, no así la del cañon situado en el extremo derecho. La diferencia no obedece a una mera cuestión de perspectiva y claramente se ve una trayectoria circular después del fin de una recta (fig. 14).

Figura 14 Grabado de Ceuta (s. XV). Oficina Portuguesa de Comercio. Londres.

Si retomamos el desarrollo de las ideas del bresciano, encontramos que nueve años más tarde la situación sería otra, pues en los *Quesiti et inventioni diverse* (1546) demuestra, ahora sí, que la trayectoria de una bala disparada horizontal-

mente no posee ningún segmento rectilíneo. Según lo revela en los *Quesiti*, (¿habría que creerle?), no lo planteó así en *La Nueva Ciencia* en un afán por ser comprensible para el vulgo.

El siguiente punto que a Tartaglia le importa tocar en el Libro II de su primer tratado de balística es el alcance del disparo. Por razones obvias éste consiste en la distancia hori-

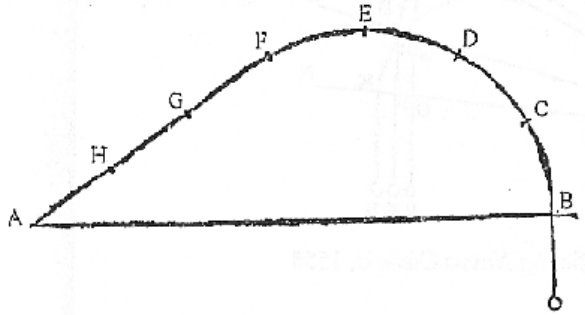

Figura 15 Tartaglia. *La Nueva Ciencia*, 1558

zontal que existe entre el punto A de partida y el punto B donde se 'agota' el movimiento violento y donde por ende su velocidad es mínima (Suposición III) (fig. 15). El punto B es, precisamente, donde inicia el movimiento natural, es decir, el movimiento vertical de caída del proyectil. El alcance máximo, el llamado "efecto más lejano" (Suposición IV) [para un disparo hecho con un ángulo dado sobre la horizontal] se mide por la distancia entre el punto de partida y el punto de inicio de la caída vertical, proyectado este último sobre un plano escogido arbitrariamente, tal y como se observa en la fig. 16. En dicho caso, y tomando como línea de referencia la que va de *a* a *c*, pasando por *d*, se dirá que en *d* ocurre el efecto más lejano para la trayectoria .aedb., y que en g se producirá el correspondiente efecto más lejano de la trayectoria .afgb.

Ahora, hilando los contenidos de las Proposiciones IV, V y VI, Tartaglia deduce que

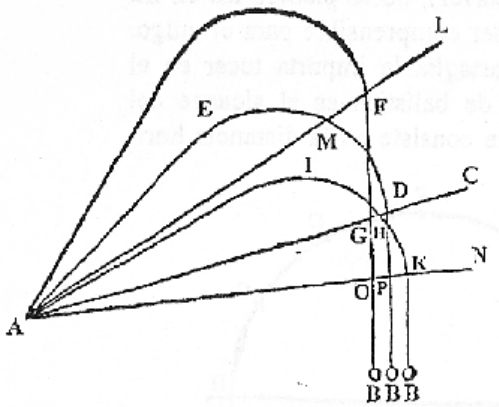

Figura 16 Tartaglia. *La Nueva Ciencia*, 1558

...todos los movimientos violentos de cuerpos igualmente graves que tengan iguales elevaciones...son similares entre ellos, y como consecuencia son proporcionales y similares las distancias entre ellos (Proposición VII, Libro II).

Con ello concluye que las relaciones entre las distancias recorridas no dependen mas que de las proporciones entre las velocidades iniciales.

Los resultados anteriores lo llevan a culminar el Libro II concluyendo que el alcance mayor corresponde a una trayectoria que inicia con un ángulo de 45° sobre la horizontal, y que el alcance de este disparo es diez veces la parte recta del tiro horizontal. Para los artilleros este resultado era un tanto maravilloso y a la vez sorpresivo, pues discrepaba de lo que por largo tiempo habían tenido como cierto, a saber, que los disparos efectuados con una inclinación sobre la horizontal inferior a 45° alcanzarían distancias mayores que el efectuado a 45°, a la mitad entre el tiro horizontal y el vertical. Blondel, en su libro de artillería, concede a Tartaglia el mérito de ser el primero en anunciar tan útil resultado.

Con todo el peso que esta revelación pudiera tener, queda la sensación de que Tartaglia tenía más que ofrecer, tal y como lo había mencionado en la epístola donde presume haber elaborado una teoría que permitía calcular el alcance de los disparos de cañón en función de los ángulos que formaran con la dirección horizontal. Dicha teoría nunca fue publicada y lo que nos resta suponer es que ésta era la materia de los capítulos IV y V de *La Nueva Ciencia* que, aunque mencionados, no fueron impresos.

En cierto sentido, y a pesar de sus deficiencias, *La Nueva Ciencia* alcanzó un éxito considerable. Para 1583 el texto en el italiano de Tartaglia había alcanzado siete ediciones y había sido traducido a todas las lenguas importantes. Pero su autor no se engañaba con respecto a la fortaleza de sus tesis y siguió ocupándose del problema del movimiento de un proyectil, en gran medida forzado por los problemas conceptuales que emanaban de recurrir a una curva que se conectaba con las rectas correspondientes al principio y al final del movimiento. Como ya se ha dicho, éste sería uno de los temas de los *Quesiti*.

Con la historia como testigo parecería que Tartaglia se había adelantado a su tiempo al atacar el problema de la trayectoria de un proyectil. Ni sus adversarios como matemático ni sus sucesores directos o indirectos —G. B. Benedetti, Cardano, Baldi, miembros de una supuesta 'escuela italiana'—, ni quienes trabajaban en otras tierras —Domingo de Soto—, se preocuparon por la cuestión de la forma geométrica trazada en el aire por un cuerpo en movimiento. Pareciera ser que el bagaje matemático y las prácticas experimentales de la época no habían alcanzado el grado de desarrollo que permitiera plantear seriamente la pregunta. No se puede culpar a quienes en lugar de ocuparse de esta cuestión —que no pasaría de ser una inquietud intelectual, apremiante sólo para los artilleros y la milicia en general— se concentraron en discutir las nociones de ímpetu en boga a mediados del siglo XVI.

Queda la sensación de que, no habiendo valorado las ideas más avanzadas que sobre el tema presentó Tartaglia en los *Quesiti*, los filósofos naturales, los artilleros y los artistas por igual habrían aceptado por un tiempo —quedaría por investigar las razones particulares que dieron lugar a dicha situación— la cualidad tripartita de la trayectoria de un proyectil y, conformes con ella, dejaron pasar casi cincuenta años para someterla una vez más al escrutinio de la razón y de la evidencia. El estudio físico-matemático del movimiento tendría su propio "renacimiento" en la misma Italia, en el marco de una mecánica de corte matemático inspirada en la tradición arquimediana que Tartaglia ayudara a introducir en Europa con la traducción al italiano de los *Elementos* de Euclides (1543) y *de Cuerpos en el agua* de Arquímedes (1551). La figura central de esta renovación de la mecánica fue Galileo, quien retomaría en el *De Motu* (c. 1590) algunas de las preocupaciones que sobre el movimiento habían quedado inconclusas en el pensamiento del bresciano, para luego llevarlas a su culminación en los *Discursos y demostraciones sobre dos nuevas ciencias*, publicados en 1638 (Galileo, *Two New Sciences*; Damerow, *Preclassical Mechanics*, 126-268).

Las trampas de la mecánica

Según Clavio, (1573-1612), la Mecánica es la disciplina en la que la matemática entra en contacto con la materia (*Opera Mathematica*, Vol. 1, 4). Considerada entre las disciplinas matemáticas, se le tiene sobre todo como la ciencia de las máquinas, es decir, su oficio es, en primera instancia, el estudio geométrico de las propiedades de los instrumentos construidos por el hombre. El éxito alcanzado por esta empresa rebasó el ámbito de sus propósitos, alcanzando uno más amplio que se relacionaba con la posibilidad de establecer vínculos más estrechos entre el saber matemático y el conocimiento del mundo físico.

Durante esta etapa del Renacimiento en el que las artes plásticas y las humanidades ya habían alcanzado el esplendor, tocaba ahora a las ciencias que se ocupaban del mundo natural acelerar el paso y reclamar un nuevo imperio, regido por una nueva forma de entender el mundo y sus ordenamientos y el lenguaje en que éstos se expresaban. En este proceso se pueden identificar, *grosso modo*, dos vertientes: una que ligada al aristotelismo concierne a la posibilidad de matematizar los fenómenos contingentes propios de la materia, es decir, la mutabilidad contingente e irreducible de la materia, misma que por su naturaleza desalentaba cualquier esfuerzo por establecer un vínculo sistemático y repetible entre los procesos físicos y los cálculos matemáticos. La otra vertiente se sustentaba sobre una clase muy amplia de aplicaciones a la mecánica, la óptica, la cartografía, etc., en las cuales ocurría una concordancia entre 'teoría' y 'práctica' y entre 'demostraciones' y 'experiencia' que contribuía a fortalecer el optimismo en el poder del razonamiento matemático.

Quienes optaban por la segunda opción en el siglo XVI fueron los pioneros en sembrar esa seguridad íntima que desembocó en la estrategia galileana de conocer y describir los fenómenos naturales a través del lenguaje matemático, en particular del geométrico. Para ello, la tarea del nuevo filósofo natural era descubrir o individualizar tanto los entes físicos susceptibles de ser cuantificados como la estructura matemática que se adecuaba a los fenómenos.

La primera opción suponía en la práctica la existencia de un abismo entre las "razones y argumentos naturales" y las "razones y argumentos Mathematicos" (Tartaglia, *Quesiti*, f. 78r.). De esta oposición surgen esfuerzos como el de Federico Commandino (1509-1575)[13] para distinguir entre cantidades medibles —cuantificables— y cantidades no medibles:

13. Entre otras cosas, la importancia de Commandino reside en haberse ocupado de traducir y anotar algunas de las principales obras matemáticas de la antigüedad clásica, formando parte, en el terreno matemático, del filón humanístico que dio pie a que A. Chastel calificara a la ciudad de Urbino —sede de la época más productiva

> Aquellas cosas que se encuentran en un cuerpo natural, y que de él no se pueden separar, son de dos tipos: algunas que ni en la práctica ni con el pensamiento se pueden separar del cuerpo, como es lo caliente, lo frío, lo seco, cosas que el cuerpo retiene en sí por ser lo natural. Otras, que de hecho no se pueden separar, sí al menos se puede fingir que están separadas, pues están en los cuerpos no como parte de sus naturalezas sino como accidentes, como lo curvo, lo recto, el estar doblado. Y así el estudio del Mathematico se concentra en la cantidad o en la forma, separándolas de la materia con el pensamiento, y de ellas ofrece definiciones sin que para ello toque a la materia (Baldi, *Di Erone Alessandrino*, Prolegómenos).

Para entender esta propuesta se puede tomar el problema de la balanza, ya bastante estudiada desde los tiempos de Arquímedes, y en particular la cuestión de la sensibilidad de dicho instrumento. Tartaglia, partícipe al igual que Commandino de esta renovación en el pensamiento matemático, distingue entre balanza real y balanza ideal. Esta última proviene de la geometrización de la balanza real (los brazos pasan a ser líneas y el eje de rotación se convierte en un punto geométrico) y es considerada por el "Mathematico" según los "principios y demostraciones de la ciencia". Las balanzas reales pueden ser pequeñas, como las utilizadas por banqueros, joyeros y orfebres, o grandes, como las que se requieren para pesar especies, azúcar, canela y cosas similares, y vienen a ser consideradas "como entes naturales, manejables por la fuerza y la autoridad del sentido de la vista". Por su parte, las balanzas ideales apoyarían el discurso de los aristotélicos. Frente a esta disyuntiva planteada por la *questione* aristotélica, Tartaglia busca mediar considerando a las ideales como casos límite de las reales:

de Commandino— como el principal polo del "humanismo matemático" en Italia (Chastel, *I centri del Rinacimento*, 41 y 46-50). Su versión de los *Elementos* de Euclides, de las *Cónicas* de Apolonio y de textos de Arquímedes se consideran bastiones de las ciencias matemáticas del Renacimiento.

"Y porque las partes o miembros de las *bilancette* que utilizan banqueros y joyeros se aproximan más... a las partes o miembros de sus idealizaciones, que como lo hacen las partes o miembros de las... balanzas mayores que usan quienes se ocupan de las especies... ya que los brazos de las *bilancette* son muy delgados... y se asemejan a las líneas... los de las balanzas mayores son gruesos y corpulentos... y ésta es la principal razón de que las balanzas pequeñas o *librette* se muestren ante los sentidos con más precisión que las mayores, cosa totalmente contraria a lo que propone la *questione* aristotélica.

Casi 60 años después la misma *questione* es retomada por Giovanni Battista Benedetti (1530-1590), quien al hablar de materia la despoja de su contingencia (Benedetti, *Diversarum Speculationum*, 153). Aparentemente lo que hace es borrar la distinción entre el caso matemático y el caso material, reduciendo la contingencia a la fricción, la cual es presentada como una 'resistencia' medible que Benedetti supone es igual para ambas balanzas.

Posteriormente la mecánica precisaría más sus nociones y lo que en cierto contexto se enmarcaba como contingencia pasó a ser definida, según el caso, como fricción o como momento de inercia. Esta postura geometrizante frente a los fenómenos naturales paradójicamente impidió durante cierto tiempo entender plenamente la manera como ocurrían los fenómenos, siendo el principal obstáculo para ello el no identificar —por culpa de una especie de reduccionismo exagerado— plenamente los factores que modulaban los procesos mecánicos. En particular esto es muy cierto en el caso de una mecánica que a mediados del siglo XVI no alcanzaba a identificar satisfactoriamente las propiedades inerciales de la materia y los modos de actuar de la fricción. No sorprende que al referirse a esta etapa de la evolución de la mecánica algunos historiadores hablen de estar frente a una mecánica matemática o de un punto de vista cinemático antes que de uno dinámico. Sobre

esto el propio Benedetti hablaba de erigir una filosofía matemática de la naturaleza (Koyré, *Estudios de Historia*, 125)

Un ejemplo que ilustra los impedimentos epistemológicos a los que conducía esta visión es la falta de comprensión plena de la importancia del baricentro, al cual considera como punto geométrico dotado de ciertas propiedades estáticas de equilibrio y se olvida de tomarlo también como un punto dotado de masa. Igualmente ilustrativo resulta el caso del trompo en rotación, del cual se dice que no posee un movimiento natural —porque si lo fuera seguiría girando eternamente— por ser el de rotación un movimiento curvo y porque las partículas que componen al trompo están obligadas a seguir la curva en contra de su tendencia natural a seguir su movimiento en línea recta. Según Benedetti, esto explicaría porqué entre mayor es el diámetro del trompo mayor es el ímpetu de las partículas que lo integran, ya que al aumentar el diámetro de la circunferencia disminuye su curvatura y las partículas se aproximan más a seguir la trayectoria rectilínea. Por consiguiente, esta línea de pensamiento conduce a que un hecho geométrico —la curvatura— oculte un aspecto físico —la masa— y a que se afirme que las propiedades mecánicas de las partículas están determinadas exclusivamente por la curvatura de sus trayectorias. Esta posición prefiguraba el cosmos reducido a geometría que se imponía a fines del siglo XVII.

En tanto que ciencia en construcción, la mecánica requería aún muchas aclaraciones antes de llegar a la situación en que la encuentra Galileo, y muchas de ellas se centran en discusiones sobre la capacidad de las matemáticas para describir los fenómenos del mundo material. En esta etapa el universo de dicho dicurso es muy amplio y salpicado de múltiples inconsistencias, ambigüedades y propuestas ingeniosas. Como ejemplo de esto último está la obra de Guidobaldo del Monte (1545-1607), quien en busca de la seguridad que ofrecen las matemáticas, pero consciente de las dificultades propias de

tratar con la materia o con máquinas en movimiento —si no se mueve ¿de qué sirven?, se preguntaría uno—, lo cual conlleva el problema de la contingencia, opta por ocuparse de cuestiones de estática, es decir, de máquinas en equilibrio, con lo que de paso muestra su visión de que el movimiento de sistemas mecánicos se debe entender como ruptura del equilibrio de las partes que los integran.

Bajo la restricción de ocuparse únicamente del caso estático Guidobaldo es capaz de afirmar que es muy cierto que la práctica y la teoría van siempre de la mano. Cuando se trata de la materia en movimiento la situación cambia y coincide con Galileo en que "cuando se comienza a conocer la materia, por su contingencia se comienzan a alterar las proposiciones abstractas del geómetra. De las cosas así perturbadas no es posible enseñar ciencia cierta y por ello de estas consideraciones queda absuelto el matemático." (Carta de Galileo a Guidobaldo del Monte, Nov. 1602).

La mecánica del *Cinquecento* se puede calificar como una ciencia de las máquinas. Durante este periodo el interés por el estudio o análisis teórico del funcionamiento de las máquinas y de los efectos que éstas producen domina sobre otros temas de investigación en el campo de la mecánica. La razón es simple, y descansa en la facilidad con que se puede utilizar la geometría para realizar estos estudios y a la posibilidad de iniciar el análisis a partir de la situación en que los componentes de la máquina están en equilibrio. Cabe aclarar que las máquinas de las que se está hablando en este caso son las sencillas —y no algunas más complicadas que las utilizadas desde hacía siglo y medio, principalmente en el ramo de la construcción— como la balanza, la palanca, la polea, el borriquete y algunos elementos auxiliares como el tornillo, la cuña y, sobre todo, el plano inclinado. Gran parte de los artefactos en uso en la época podían ser reducidos a montajes de los elementos que se han mencionado y, en ocasiones, dichos artefactos partici-

paban en la discusión de los problemas que según una amplia mayoría de los historiadores de la ciencia dominaban —y que por consiguiente determinarían— la atmósfera científica de la física del siglo, siendo éstos, como ya se dijo, la caída de los cuerpos pesados y el lanzamiento de proyectiles.

Sin embargo no se debe perder de vista que es en el terreno de las máquinas donde se logra una teoría físico-matemática que explica y concuerda con la práctica. Estos resultados eran tenidos en tan alta estima que no resultaba extraño que se generaran visiones maquinistas del funcionamiento del mundo y hasta del reino animal. Para citar un ejemplo basta leer a B. Baldi, quien en las primeras páginas de su obra sobre Herón se refiere a los animales, "...cuya alma dota de movimiento a los miembros, a la manera como ocurre en las Máquinas Semovientes", en las que "el fierro, el leño y la cuerda [poseen] en cierto modo [la misma función] como la que en los animales desempeñan los huesos y los nervios". Baldi, inspirándose en dos textos aristotélicos, el *De Mundo* y el *De incessu animalium*, señala que estos animales se mueven en un mundo mecánico en el que "Dios, estando en el cielo, mueve las partes del universo, como lo hace el Maestro con los autómatas..." (Baldi, *Erone Alessandrino*, ff. 6r, 7r)

Retomando el asunto de la utilidad de las máquinas para analizar el problema del movimiento, encontramos que en el *De Motu* Galileo recurre a la balanza para mostrar que el ascenso y descenso de cuerpos en movimiento no se debe a una gravedad[14] o ligereza propias, y en particular pone de manifiesto la falsedad de la afirmación aristotélica de que móviles del mismo género caen con velocidades proporcionales a sus pesos. De manera semejante, Guidobaldo aproxima el movimiento del péndulo al de un móvil que se desplaza sobre un plano

14. Propiedad que hace —en el esquema aristotélico— que la tendencia de un cuerpo que se desplaza con movimiento natural —el que a su sustancia le corresponde— sea la de moverse hacia abajo, es decir, hacia el centro de la tierra.

inclinado curvo. En este caso era posible notar que la velocidad de descenso a lo largo del plano inclinado era independiente del peso del móvil, y que conforme se aumentaba la inclinación del plano más se aproximaba la situación al caso de la caída libre, dando la pauta para que se estudiaran los procesos naturales como casos límites del funcionamiento de máquinas simples.

Los esfuerzos encaminados a la construcción de bases teóricas —matematización en este caso— para el entendimiento de los principios que gobernaban el funcionamiento de las máquinas tuvieron múltiples repercusiones en lo que se refiere a la resolución de problemas teóricos que se venían arrastrando desde el siglo XIV, en particular los relacionados con el lanzamiento de proyectiles. Entre ellos cabe mencionar las discusiones sobre la noción de momento estático, (Galluzzi, *Momento*), la aceptación de que la fricción es un factor eliminable en lo que se refiere a consideraciones teóricas, la aparición de nociones que llevarían al concepto de trabajo mecánico, la creciente certeza de que era imposible construir máquinas que incrementaran la cantidad de 'trabajo' disponible —esbozo de lo que sería la ley de conservación de la energía mecánica— y, en lo que concierne al trabajo de Tartaglia, el análisis de las trayectorias de proyectiles puestos en movimiento por una potencia.

J. Rafael Martínez E.
J. César Guevara Bravo