



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**LA TRADICIÓN DE INVESTIGACIÓN  
DE LA MECÁNICA GALILEANA**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**F Í S I C O**

**P R E S E N T A:**

**CARLOS AGUILAR GUTIÉRREZ**

**DIRECTOR DE TESIS:  
JOSÉ ERNESTO MARQUINA FÁBREGA  
2009**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Hoja de Datos del Jurado

<p><b>1. Datos del alumno</b> Aguilar Gutiérrez Carlos 57 01 72 30 Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ciencias Física 9500427-1</p>
<p><b>2. Datos del tutor</b> Dr. José Ernesto Marquina Fábrega</p>
<p><b>3. Datos del sinodal 1</b> Dr. Marco Antonio Martínez Negrete</p>
<p><b>4. Datos del sinodal 2</b> Dr. Roberto Alejandro Ruelas Mayorga</p>
<p><b>5. Datos del sinodal 3</b> Dra. Susana Biro Mc Nichol</p>
<p><b>6. Datos del sinodal 4</b> Dra. Gisela Tamhara Mateos González</p>
<p><b>7. Datos del trabajo escrito</b> La Tradición de Investigación de la Mecánica Galileana 83 p. 2009</p>

## INDICE

<b>Capítulo 1: Introducción.....</b>	<b>3</b>
1. El Problema del Cambio Científico .....	3
2. El Modelo de Kuhn .....	4
3. El Modelo de Laudan .....	6
4. Galileo y las Tradiciones de Investigación.....	9
<b>Capítulo 2: La Axiología de la Mecánica Galileana.....</b>	<b>11</b>
1. Introducción.....	11
2. El Movimiento.....	13
3. La Matemática.....	18
4. El Mundo.....	22
5. La Experimentación.....	28
<b>Capítulo 3: La Metodología en la Mecánica Galileana.....</b>	<b>31</b>
1. Introducción.....	31
2. Las Matemáticas.....	33
3. La Experimentación.....	38
4. La comunicación de las Ideas.....	47
<b>Capítulo 4: La Teoría de Galileo en los Discorsi.....</b>	<b>50</b>
1. Introducción.....	50
2. La Estructura del Discorsi.....	51
2.1. La primera jornada.....	51
2.2. La Segunda Jornada.....	57
2.3. La Tercera Jornada.....	58
2.4. La Cuarta Jornada.....	65
<b>Capítulo 5: La Tradición de Investigación de la Mecánica Galileana.....</b>	<b>71</b>
1. Introducción.....	71
2. La Relación Teoría – Metas.....	72
3. La Relación Metas – Metodología.....	75
4. La Relación Teoría – Metodología.....	78
5. Conclusiones.....	80
<b>Bibliografía.....</b>	<b>82</b>

# Capítulo 1

## Introducción

### 1. El problema del cambio científico.

A lo largo del tiempo, ha habido diversos cambios en las concepciones y prácticas científicas de la humanidad. Para caracterizar estos cambios, han existido diversos intentos de aproximación; los modelos teóricos resultantes de estas distintas corrientes han tenido aciertos, así como debilidades.

Dichos modelos han evolucionado con el paso del tiempo, y es de esta manera que en la primera mitad del s. XX se desarrolló el Positivismo Lógico, que fue la ideología dominante en el panorama de la filosofía de la ciencia durante el periodo citado.

Es alrededor de la década de 1960 cuando surge un debate acerca de los límites del positivismo lógico como un marco teórico adecuado para describir el fenómeno de la práctica científica. Es dentro de este debate, que nacen diversas propuestas cuyo objetivo es el de subsanar las fallas con las que contaba el sistema del positivismo lógico. Es así que podemos mencionar las propuestas de Lakatos, Kuhn, Popper, Feyerabend y Laudan como parte de este brote de nuevas ideas y aproximaciones a la ciencia.

Algunos de los problemas a los que se les trató de dar solución con estas nuevas propuestas, giran principalmente alrededor de la concepción de que el progreso de la ciencia es acumulativo; del mismo modo tratan con el problema de la poca contrastación que tenían estos modelos con la realidad histórica de la ciencia. Por otra parte, estaba también el problema de justificar que la ciencia es una empresa racional *a priori*.

Ante esta agenda por resolver, en 1962 aparece "The Structure of Scientific Revolutions" de Thomas S. Kuhn, quien propone un acercamiento al problema del cambio científico totalmente diferente al del positivismo lógico, rompiendo así con la tradición dominante.

De la misma forma que la propuesta de Kuhn, ciertas propuestas, como las de Lakatos, Feyerabend, Shapere, Stegmüller y Laudan, establecen ciertas tesis generales, a través de las cuales rechazan las concepciones principales del positivismo lógico.

Algunas de las ideas generales que estas concepciones comparten, pueden resumirse, según Ana Rosa Pérez Ransanz, en lo siguiente:

- i) La historia de la ciencia es la principal fuente de información para construir y poner a prueba los modelos sobre la ciencia.
- ii) Las teorías científicas se construyen y evalúan, siempre, dentro de marcos conceptuales más amplios.
- iii) El desarrollo de la ciencia no es lineal ni acumulativo
- iv) La ciencia es una empresa cuya racionalidad es imposible determinar a priori.

Para centrar el marco de la discusión se expondrán brevemente dos de los modelos sobre cambio científico más citados, el modelo de Kuhn y el modelo de Feyerabend, para después pasar a analizar con mayor detenimiento el modelo que se usará en el presente trabajo para analizar el caso específico que nos concierne.

## **2. El Modelo de Kuhn**

El modelo de T. Kuhn es el primero de una serie de modelos que toman como referencia de contrastación a la historia de la ciencia; este modelo establece que el desarrollo científico consiste de una serie de etapas sucesivas. La primera de estas etapas, la etapa “pre-paradigmática” se caracteriza por un disenso entre

varias escuelas las cuales luchan entre si por el dominio en un cierto campo de investigación.

El desacuerdo entre estas escuelas comprende, la caracterización de los objetos de estudio, los problemas que hay que resolver y su orden de importancia, los métodos y los procedimientos más adecuados.

Cuando se unifica el campo de investigación y se establece un conjunto de supuestos básicos, llamados “paradigma”, los científicos abandonan todos los demás puntos de vista y se sigue la dirección marcada por el enfoque dominante; creando el primer consenso alrededor de éste.

Con el consenso en torno a un paradigma comienza la etapa de “ciencia normal” la cual se caracteriza por su enfoque en la resolución de problemas (enigmas), a través de lo cual el paradigma se vuelve más preciso y mejor articulado. En esta etapa no se buscan novedades, sino que se busca mejorar el alcance y el potencial explicativo del paradigma dominante. En estas condiciones de ciencia normal el progreso está bien definido, ya que todos los resultados obtenidos, van en la misma dirección que marca la visión dominante.

La etapa de crisis comienza cuando el surgimiento de ciertas “anomalías”, es decir, problemas que se resisten a ser resueltos utilizando las herramientas y los procedimientos que ofrece el paradigma, hacen dudar de la validez de este, y hacen pensar que sólo a través de un cambio en los supuestos básicos se encontrarán soluciones satisfactorias a estas anomalías.

A partir de este momento comienza una proliferación de teorías alternativas las cuales pueden tener una posición ya sea de rechazo o de modificación hacia la teoría establecida, es importante destacar que los científicos nunca abandonan un paradigma a menos que cuenten con un paradigma alternativo que permita resolver las anomalías. La crisis encuentra su fin de una de las siguientes maneras:

- a.) El paradigma en crisis logra finalmente resolver los problemas que lo condujeron a ésta.
- b.) Ninguno de los enfoques logra resolver, efectivamente, las anomalías surgidas, en cuyo caso se archivan en espera de una futura solución.

- c.) Uno de los paradigmas alternativos logra, finalmente, resolver las anomalías y comienza, de nuevo, la lucha por lograr un nuevo consenso.

### 3. El modelo de Laudan

De entre las concepciones de la ciencia, destaca la propuesta de Laudan, la cual propone que la racionalidad y la progresividad de una teoría están más íntimamente ligadas a su efectividad para resolver problemas, de lo que están a su confirmación o a su falsación.

Partiendo de lo anterior podemos justificar el hecho de que para Laudan, el eje central alrededor del cual debe girar el análisis de la estructura científica, es la capacidad de la ciencia para resolver problemas, ya que las teorías son, usualmente, intentos por resolver problemas empíricos específicos acerca del mundo natural, es decir, las teorías son importantes en la medida en que dan (o no) respuestas *satisfactorias* a cuestiones que han sido calificadas como importantes dentro de un cierto marco conceptual.

Se tiene que destacar también que, dentro de un determinado marco conceptual, no todas las soluciones a problemas (o teorías) tienen la misma importancia; en este sentido Laudan dice lo siguiente: “Al evaluar los méritos de una teoría, es más importante preguntarse si ésta constituye una solución adecuada a un problema significativo, que preguntarse si esta teoría es *cierta, está corroborada o bien confirmada* o es de otra manera justificable dentro del marco de la epistemología contemporánea”<sup>1</sup>. Para Laudan el modelo de falsación de las teorías como medio de evaluación de éstas no es válido, ya que en la mayoría de los casos no ofrece una contrastación acertada con la historia de la ciencia.

En oposición al modelo clásico jerárquico, y como alternativa al modelo de Kuhn, basado en la idea de paradigma, Laudan propone como unidad principal de análisis la Tradición de Investigación, la cual incorpora en su estructura no sólo teorías, sino que se basa en un marco de referencia más amplio, el cual

---

<sup>1</sup> Laudan, (1977), *Progress and its Problems. Toward a Theory of Scientific Growth*, University of California Press, Berkeley, Los Angeles, London. Pp. 14

comprende, una axiología, una metodología y un conjunto de teorías las cuales forman una red, llamada Red Triádica, en la cual los elementos están conectados e interaccionan de acuerdo a ciertas reglas.

Para el análisis de las Tradiciones de Investigación, los problemas son clasificados en dos diferentes tipos: problemas empíricos y problemas conceptuales.

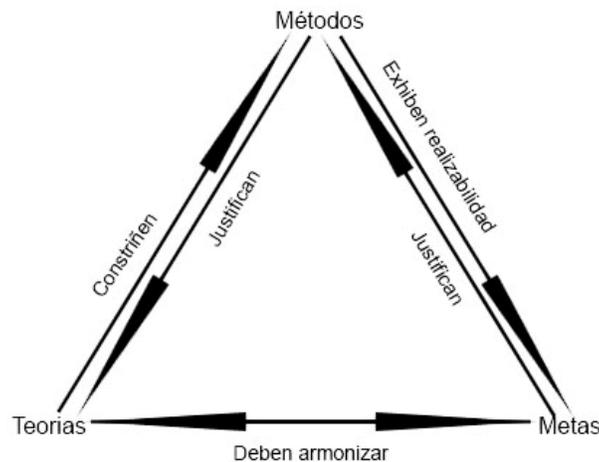
Los problemas empíricos son los más familiares y arquetípicos, estos problemas de primer orden, son cuestiones substantivas acerca de objetos que constituyen el dominio de una determinada ciencia; es decir, cualquier fenómeno del mundo natural, que nos parezca extraño o que necesite solución constituye un problema empírico. Los problemas empíricos a su vez se clasifican en tres niveles: problemas sin resolver, problemas resueltos y problemas anómalos.

Los problemas conceptuales son problemas de más alto orden que los problemas empíricos, y tratan sobre cuestiones acerca de los fundamentos de las estructuras conceptuales (es decir, de las teorías) que fueron ideadas para resolver los problemas de primer orden, estos problemas son propios de las teorías y su existencia depende de la teoría que lo exhiba. Una teoría puede exhibir problemas conceptuales internos, debidos a inconsistencias internas, o problemas conceptuales externos causados por conflictos con otras teorías.

En contraposición al modelo clásico jerárquico, el cual postula un proceso unidireccional de justificación, Laudan propone lo que él llama un modelo reticulado de Justificación. Dicho modelo encuentra su justificación en el argumento de que, de hecho, nuestras creencias influyen drásticamente nuestros puntos de vista acerca de cuales métodos pueden ser viables, y de qué tipo de métodos pueden promover cierto tipo de metas. De esta manera, el modelo de retícula nos muestra que podemos utilizar nuestros conocimientos acerca de los métodos de los que disponemos como una herramienta para valorar la viabilidad de las metas cognitivas propuestas.

La mayor diferencia que existe entre el modelo clásico jerárquico y el modelo reticulado, es que éste último insiste en que existe un complejo proceso de mutuo ajuste y de mutua justificación entre los tres niveles de compromiso científico.

Desde este punto de vista, ninguno de los tres niveles es considerado privilegiado, y los tres se encuentran en constante interacción a través de una serie de constricciones, las cuales pueden ser ilustradas de la siguiente manera.



En consecuencia con lo anterior, es posible observar que más de un conjunto de valores puede cumplir con las constricciones impuestas por los otros dos niveles de compromiso científico. Laudan nos dice que esto lejos de ser un inconveniente, son buenas noticias, ya que si un único conjunto de valores cumpliera con estas constricciones, y si estos principios se tomaran para definir una mínima forma de racionalidad, entonces nunca habría argumentos legítimos para disentir acerca de los estándares. Lo anterior sólo nos llevaría a la conclusión de que las ocasiones en que los científicos han estado en desacuerdo acerca de los estándares establecidos reflejan altos índices de irracionalidad.

Sin embargo el argumento anterior hace surgir la duda de que, si más de un conjunto de valores puede encajar en las constricciones dadas, entonces incluso valores mutuamente incompatibles podrían ser elegidos; aun más, podría cuestionarse si el análisis reticular provee un método para decidir cual, de entre todos los posibles candidatos, es el conjunto de valores correctos. Laudan responde a lo anterior diciendo que no existe un conjunto "correcto" de valores, ya que es legítimo contar con una amplia variedad de razones y de propósitos.

Laudan nos explica más adelante, que al igual que las teorías y la metodología cambian en el tiempo, también cambian los valores cognitivos; de esta manera

cabe preguntarnos si conviene seguir hablando de progreso científico, ya que si el progreso sólo puede ser referido en relación a un cierto conjunto de metas, y como éstas mismas pueden cambiar, entonces lo que en cierto momento pudiera ser considerado progresivo, en otro simplemente ya no lo sería. Sin embargo, no tenemos por qué referir el progreso exclusivamente al conjunto de metas de aquellos agentes que realizaron una cierta acción, es decir, a las metas de los científicos que en principio aceptaron o rechazaron una teoría.

Desde el punto de vista de este análisis, podemos, en lugar de circunscribirnos a las metas específicas que dieron origen a una teoría, evaluar el progreso de un cambio de métodos, de teorías o de metas, en función de nuestros propios puntos de vista acerca de las metas cognitivas de la ciencia. De esta manera, los grandes científicos del pasado no necesitan haber compartido nuestras metas, para asegurar si sus decisiones teóricas aumentaron nuestras aspiraciones cognitivas.

Alternativamente al cambio abrupto y simultáneo que Kuhn propone en su análisis sobre el progreso de la ciencia; donde un paradigma, entendido como un marco conceptual, una metodología y un conjunto de metas determinados, cambia por otro paradigma cuyos tres niveles son distintos a los originales; Laudan propone cambios más sutiles, en los cuales no están involucrados los tres niveles de compromiso científico simultáneamente. Para arribar a una Tradición de Investigación T2 partiendo de una Tradición T1, se tienen que operar cambios en cada uno de los tres niveles individualmente, este cambio gradual es lo que Laudan llama "Cambio Unitradicional".

#### **4. Galileo y las tradiciones de investigación.**

Con lo que se ha revisado hasta ahora sobre el modelo de las Tradiciones de Investigación, nos encontramos en la posición de emprender el estudio de un caso histórico específico y analizarlo a la luz de las herramientas que el análisis laudiano nos ofrece. Para este propósito, se ha seleccionado el caso de Galileo Galilei en cuanto a sus estudios de mecánica se refiere.

La importancia de la extensa obra de Galileo es bien conocida en el ámbito científico; sus aportaciones, tanto astronómicas, como físicas, permitieron el desarrollo de la ciencia de su época y marcó una importante diferencia en la manera de hacer ciencia. Sin embargo su obra es tan extensa y rica en contenido, que para un mejor entendimiento de ésta, hace falta acotar el campo de análisis, para de esta forma centrar, de manera más precisa, la discusión de los distintos elementos que se utilizarán para la creación de la Tradición de Investigación de la mecánica galileana.

Para la fundamentación de esta Tradición de Investigación, se examinarán detenida e individualmente, cada uno de los tres niveles de compromiso científico (metodológico, axiológico y ontológico) que formarán la red triádica que servirá de base a ésta. Asimismo, en el capítulo final se examinarán en conjunto estos tres elementos, con el objetivo de explorar las relaciones a través de las cuales éstos interaccionan.

## Capítulo 2

### La Axiología de la Mecánica Galileana

#### 1. Introducción

El pensamiento del Galileo mecánico, encuentra su gestación durante su juventud, en el periodo que pasa en Pisa, donde también comienza a darse cuenta de que la física de Aristóteles no le satisface, ya que a partir de la lectura de autores como Benedetti y Arquímedes, comienza a adquirir conciencia de las inconsistencias y faltas de esta física; así mismo, comienza a hacerse de una idea propia acerca de cuestiones que en su tiempo eran fuente de discusiones, tal como lo era la naturaleza del movimiento. Habiendo leído a algunos de los filósofos que crearon la llamada física del “ímpetus”, Galileo comienza a realizar sus propias disertaciones acerca del movimiento, siendo los “De Motu”<sup>1</sup> el fruto de estos primeros años.

Las concepciones de Galileo acerca del movimiento irán evolucionando con el tiempo, de modo que en 1604 podemos decir, que se encuentra ya, en posesión de la ley de la caída de los cuerpos, pero no será sino hasta 1638 con la publicación del “Discorsi”, que se dará a conocer la versión mejor terminada de la cinemática galileana. Este último trabajo de Galileo, no sólo contiene el conjunto de sus avances en cuanto al movimiento se refiere, sino que además nos da cuenta de otros temas que le interesan a Galileo y que nos dan una panorámica del pensamiento maduro de Galileo. Dichos temas son desarrollados por Galileo sólo de manera secundaria en la primera jornada del Discorsi, sin embargo, son de mucha importancia para comprender cabalmente el pensamiento del Galileo mecánico.

Dentro de la axiología galileana podríamos decir, en una primera aproximación, que la aspiración principal de Galileo es la consolidación de un nuevo sistema de pensamiento, que sustituya al sistema aristotélico (por lo menos en lo que a

---

<sup>1</sup> Los trabajos a los que se hace referencia, son un conjunto de escritos realizados por Galileo hacia 1590, que tratan sobre el tema del movimiento acelerado, dichos escritos no fueron publicados en su tiempo y muestran la mentalidad del joven Galileo en cuanto al movimiento se refiere.

filosofía natural se refiere). Esta es la lucha que acompañará a Galileo durante su vida, tanto como astrónomo, como físico<sup>2</sup>, sin embargo la lucha de Galileo se distinguirá de la de otros por su particular forma de acercarse a la naturaleza; entre las armas con que dispone Galileo, (regresando la discusión al terreno de la física) se encuentra la claridad de un pensamiento físico-matemático, que ha encontrado un equilibrio entre el racionalismo y el empirismo, permitiéndole superar a sus antecesores y reemplazar la física del ímpetus (de la cual el mismo fue partidario en su juventud), con un análisis en el que la abstracción que permiten los cuerpos geométricos; a través de los cuales se puede trabajar sin problema con casos ideales, permitirá a Galileo formular leyes matemáticas que permitan describir los “accidentes” del movimiento.

Sin embargo, para comprender esta meta primaria de Galileo, debemos comprender las metas concretas a las que Galileo aspira para cumplir la meta mayor.

Existen tres elementos que a mi parecer son primordiales dentro del discurso de la cinemática Galileana<sup>3</sup>, ya que alrededor de estos giran las ideas contenidas en el corpus de los *Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno a due nuove scienze*, su más célebre y mejor terminada obra sobre la mecánica. El primer aspecto que se discutirá se relaciona con la descripción misma del fenómeno del movimiento, la cual se encuentra condensada en sus leyes cinemáticas.

El siguiente elemento que deseo analizar, será la noción que Galileo tiene de las matemáticas y el papel que estas juegan en el desarrollo de sus teorías, ya que como se expondrá más adelante, la transformación del espacio físico en un espacio matemático-abstracto, será para Galileo no sólo una herramienta que le sirva a éste para alcanzar sus metas, sino que la matematización de la física constituye en sí misma una característica que tiene una doble función, tanto de meta, como de elemento metodológico a la vez.

El tercero de los elementos, gira en torno a la concepción que Galileo tiene del mundo, la cual se expresa en las nociones que éste tiene de temas como la

---

<sup>2</sup> Algunos autores como Koyré resaltan que el antiaristotelismo de Galileo puede apreciarse desde la época de los *De Motu* donde Galileo hace fuertes críticas a la dinámica aristotélica.

<sup>3</sup> El orden en que mencionamos estas metas secundarias, no constituye una jerarquía entre ellas.

constitución de la materia, la luz, la naturaleza del movimiento en el vacío y la existencia de éste. Estos elementos se enlazan entre sí, de modo que forman una unidad, la cual le permitirá a Galileo establecer las bases del nuevo sistema que habrá de sustituir al aristotelismo.

## **2. El Movimiento**

Con lo que se expondrá en los apartados siguientes, podremos darnos cuenta de los múltiples fenómenos naturales que le interesaban a Galileo, sin embargo, la parte más importante de su obra, así como la mejor desarrollada, es la concerniente a la descripción del movimiento, la cual encuentra su más refinada exposición en las jornadas tres y cuatro de los Discorsi. Las concepciones físicas de Galileo fueron madurando a lo largo de los años, él puede ver la importancia que tiene en su época el problema del movimiento.

Han existido diversas teorías tratando de explicar el movimiento, desde los tiempos de los antiguos griegos hasta los seguidores de la física del *ímpetus*, pasando por los nominalistas parisienses. Cada una representaba un adelanto en cuanto a la descripción del movimiento, sin embargo, ninguna había sido del todo satisfactoria.

Galileo se enfrentará al problema del movimiento de una manera innovadora, superando la física del *ímpetus* de Benedetti (su más cercano antecesor), renunciará a encontrar las causas del movimiento para dar preferencia a la descripción de éste y logrará resolver los dos problemas fundamentales del movimiento, la caída libre y el lanzamiento de los proyectiles; en resumen, la meta de Galileo es atacar el sistema aristotélico en su parte más débil: su teoría del movimiento.

Para una mejor apreciación de los adelantos que supuso la teoría de Galileo, debemos revisar las concepciones anteriores, comenzando por Aristóteles.

Ya se han discutido más arriba algunas ideas de la tradición aristotélica, como la negación del vacío, pero conviene recordar algunos de sus fundamentos para comprenderla mejor.

Dos de los conceptos fundamentales sobre los que se basa la teoría aristotélica son: a) la creencia en la existencia de “naturalezas” bien definidas, y b) la creencia

en la existencia de un Cosmos, es decir, la creencia en la existencia de principios de orden en virtud de los cuales, el conjunto de los entes reales forma un todo bien ordenado.

La creencia en un orden cósmico implica, asimismo, la creencia en una distribución determinada de las cosas en el universo, es decir, cada cosa tiene un lugar que le es “natural” en el cual se perfecciona y se realiza su ser, es por esta razón que todos los objetos tienden a él.

Otro de los aspectos importantes de la física aristotélica es la imposibilidad de la existencia del vacío en la naturaleza. Para Aristóteles el universo está lleno, es decir, es un *plenum*, no admite el vacío y ante la menor posibilidad de formarse, la naturaleza siempre lo impedirá, éste es en esencia el principio del *horror vacui*.

En la teoría de Aristóteles, se consideran dos tipos distintos de movimiento; el movimiento natural, que como ya se explicó, es aquél que efectúa el móvil que tiende libremente a regresar a su lugar natural; en tanto que el movimiento violento es el que tiene lugar cuando una acción externa saca al objeto de éste. Bajo esta consideración, la caída libre es un movimiento natural, en tanto que el lanzamiento de un proyectil es considerado un movimiento violento. En ambos casos el medio circundante (el aire por ejemplo) se comporta como un retardante del movimiento, ya que ofrece resistencia, pero adicionalmente en el caso del movimiento violento también se comporta como motor de éste.

Para Aristóteles el movimiento es concebido no como un estado, sino como un proceso pasajero y necesariamente finito. El reposo, en cambio, es considerado un estado<sup>4</sup> en el cual el objeto se encuentra en su lugar natural, y que por consiguiente, puede tener una persistencia infinita, sin embargo, este reposo inmutable del ser plenamente realizado es muy diferente, en la tradición aristotélica, de la inmovilidad pesante e impotente de un ser incapaz de moverse; el primero es acto, el segundo no es sino privación.

Todo lo dicho anteriormente nos da una idea de la física que predominó durante tanto tiempo, la cual, sin embargo, tiene un serio problema; la física aristotélica es

---

<sup>4</sup> En este sentido en la teoría aristotélica, movimiento y reposo no comparten el mismo estatus ontológico, esta cuestión que cambiará drásticamente cuando llegue la teoría galileana.

esencialmente no matemática, y no es posible matematizarla sin falsear su espíritu. No será sino hasta Galileo, que se fundará una física que encierre dentro de su espíritu a las matemáticas.

Como reacción a las deficiencias de la física aristotélica, se desarrolló en Europa una corriente alternativa, que pretendía dar una mejor explicación al fenómeno del movimiento; dicha corriente, iniciada por Juan Filopón, se basaba en el concepto de *ímpetus*, que si bien no era un concepto nuevo, obtuvo la atención de los nominalistas franceses y en especial de Jean Buridan.

Dicha teoría se contrapone a la idea de Aristóteles de tomar el medio como motor del movimiento y propone la existencia de un *ímpetus* que se encuentra en el móvil y es la causa de su movimiento, como lo demuestra este pasaje de la obra de Buridan:

“[...] cualquier otro proyectil, se halla impreso algo que constituye la fuerza motriz del proyectil en cuestión. Evidentemente, tal suposición es mucho mejor que caer de nuevo en la afirmación de que el aire quiere continuar moviendo el proyectil ya que lo cierto es que parece resistirse a ello [...]. [El ente propulsor] imprime un cierto *ímpetus* o fuerza motriz al cuerpo en movimiento, impulso que actúa según la dirección en que ha sido lanzado el proyectil, [...]”<sup>5</sup>

La teoría del *ímpetus* en su forma inicial implica, dentro de la noción misma de *ímpetus*, la acción de la divinidad; cuestión que fue expresada más tarde por Buridan en un pasaje de sus Cuestiones:

“Puesto que la Biblia no afirma que inteligencias [angélicas] adecuadas muevan los cuerpos celestes, también podría decirse que no parece necesario en modo alguno introducir inteligencias de tal tipo. [Con igual bondad] podría responderse que Dios, al crear al mundo, asignó el movimiento que mejor le pudo a cada uno de los orbes celestes, y que al moverlos les imprimió un *ímpetus* para no tener que ocuparse más de ellos [...]”<sup>6</sup>

Esta teoría del *ímpetus* fue retomada y desarrollada más tarde por el discípulo de Buridan, Nicolás de Oresme. De esta manera, hacia el final del siglo XIV, una

---

<sup>5</sup> Buridan, Jean. (1509). “Quaestiones Super Octo Libros Physicorum”. (Cit. por Marquina y Álvarez en “Galileo y la ciencia medieval”, 1992)

<sup>6</sup> *Ibid.*

versión de la teoría del *ímpetus* similar a la de Buridan, había reemplazado la respectiva explicación aristotélica del lanzamiento en la mayoría de las obras científicas medievales. Es esta versión refinada de la teoría del *ímpetus* la que le llega a Galileo a través de su maestro Bonamico en la Universidad de Pisa. No obstante lo anterior, el antecedente más directo del pensamiento de Galileo no es Buridan, sino Benedetti, el cual nos detendremos a examinar.

Para Benedetti, como para los seguidores de la física parisiense, la explicación aristotélica del movimiento carece de valor alguno, de la misma manera que los nominalistas, él piensa que la teoría de que el aire funge como motor en el fenómeno del lanzamiento, no tiene fundamentos; para él, el movimiento, ya sea natural o violento, se continua explicando como una fuerza inmanente al móvil, como él mismo lo expresa:

“Todo cuerpo grave, ya se mueva natural o violentamente, recibe en sí un ímpetus, una impresión de movimiento, de forma que, separado de la virtud motriz, continua moviéndose por sí mismo durante cierto tiempo.”<sup>7</sup>

El concepto de *ímpetus* en esta teoría parece tomar el significado de una especie de cualidad, potencia o virtud que se imprime al móvil, o mejor dicho, que lo impregna<sup>8</sup>; esta cualidad parece depender del tiempo que el objeto pasa en contacto con el motor, por ejemplo, una piedra que sea lanzada por una honda, alcanzará una mayor distancia que una lanzada por la mano, ya que la piedra en la honda, sufre revoluciones que le imprimen más *ímpetus*.

Como seguidor de la física parisiense, Benedetti se ocupó de continuar desarrollando la teoría del ímpetus, en la que introdujo elementos de la matemática y la hidrostática arquimediana, así como los conceptos de peso relativo y peso absoluto. Quizás uno de los conceptos más importantes que introdujo, fue la existencia del movimiento en el vacío, pese a todo esto, Benedetti tampoco logra romper del todo con la tradición aristotélica.

Sin duda, una de las posturas que diferenciaban a Benedetti de otros pensadores, es su inclinación por las matemáticas, inclinación que dejaría honda

---

<sup>7</sup> G.B. Benedetti. *Diversarum speculationum mathematicarum et physicarum liber*. Citado por Koyré en “Estudios Galileanos

<sup>8</sup> Cfr. Koyré, Alexandre. (2001), “Estudios Galileanos”. 8va edición, Siglo Veintiuno Editores

huella en Galileo, quien tomaría este concepto y lo perfeccionaría hasta niveles insospechados por sus antecesores. Esta postura de Benedetti es expresada (heroicamente en palabras de Koyré), en el siguiente fragmento:

“Ciertamente, es tal la grandeza y la autoridad de Aristóteles que resulta difícil y peligroso escribir algo en contra de lo que él enseñó; [...]. No obstante, llevado por el afán de verdad, por el amor de la cual, si él viviera, se sentiría asimismo atraído... no vacilo en decir, en aras del interés común, en qué me fuerza a separarme de él el fundamento inquebrantable de la filosofía matemática.”<sup>9</sup>

Como mencionamos antes, Galileo es seguidor de la física de Benedetti, una física del Ímpetus, que apenas comenzaba a adquirir tintes de física-matemática, sin embargo, no es tan sólo a la lectura de Benedetti a quien Galileo debe los orígenes de su pensamiento, no olvidemos, que sus inclinaciones matemáticas le son heredadas por la instrucción de Ricci y más tarde son enriquecidas por las lecturas que Galileo hace de la obras de Arquímedes.

Son estos elementos los que a la larga le darán a Galileo las herramientas necesarias para superar las deficiencias de la física de Aristóteles y de la física del ímpetus.

La primer obra de Galileo referente al movimiento se conoce con el nombre de *De Motu Antiquiora*, y en esta Galileo desarrolla esencialmente una física del ímpetus siguiendo las ideas de Benedetti. En esta obra ya se puede percibir en Galileo el afán matematizador, así como su resuelto antiaristotelismo. Los *De Motu* contienen fuerte críticas al pensamiento aristotélico; según Galileo, Aristóteles no comprendió nunca nada de física.

Es en los *Discorsi* donde Galileo alcanza la cúspide de su pensamiento matemático, en ellos se encuentra claramente establecida su actitud arquimediana, basada en la transformación del espacio real, en un espacio geométrico abstracto, un espacio que le permite a Galileo suponer entidades que no se ven afectadas por las fuerzas externas del medio, y que por lo tanto pueden moverse libremente en el vacío. Después de haber rechazado la física de

---

<sup>9</sup> *Ibid.*

Aristóteles, después de haber intentado, sin éxito, construir una física del sentido común, Galileo desarrollará una física arquimediana.

### **3. La Matemática**

El interés de Galileo por las matemáticas comienza muy temprano en su vida, cuando en 1583, a los 19 años, consigue que un amigo de su familia llamado Ostilio Ricci le de lecciones de matemáticas, aun cuando Galileo estaba matriculado en la Universidad de Pisa en la carrera de medicina; disciplina que, al parecer, no satisfacía el interés del joven Galileo ya que nunca consiguió terminar sus estudios en esa materia.

Ricci era discípulo del algebrista Nicolò Tartaglia<sup>10</sup>, y de éste heredó un enfoque de las matemáticas mucho más práctico que abstracto, enfoque que en su momento llegó a heredar a su discípulo Galileo, quien comenzó a ver a las matemáticas no como un conjunto de conocimientos abstractos sino como un instrumento que le podía ser útil para describir la naturaleza.

Con el paso del tiempo, Galileo continúa sus estudios sobre matemáticas a la par que desarrolla sus estudios sobre mecánica, materia que al igual que muchos de sus contemporáneos, consideraba de suma importancia para la ciencia de su época.

En 1589, a la edad de 25 años, Galileo logra entrar como profesor a la universidad de Pisa, donde imparte la cátedra de matemáticas. Es así como Galileo puede continuar con sus estudios con cierto desahogo, ya que el sueldo como profesor le permite poder dedicar cierto tiempo a sus deberes no académicos y a desarrollar su pensamiento científico.

Al terminar su contrato por tres años como profesor en Pisa, Galileo logra conseguir la cátedra de matemáticas en la Universidad de Padua<sup>11</sup>, donde pasará dieciocho años en los que logrará algunos de sus más grandes logros científicos, tanto en el campo de la mecánica, como en el de la astronomía, siendo este periodo el más fértil en cuanto a este último tema se refiere.

---

<sup>10</sup> Nicolò Tartaglia, celebre algebrista italiano, proveniente de la Republica de Venecia. A él se le atribuye, entre otras cosas, el descubrimiento de la formula resolutoria de las ecuaciones de tercer grado.

<sup>11</sup> En realidad Galileo se encuentra en una situación precaria en esa época, ya que tras la muerte de su padre recaen sobre él diversas obligaciones familiares. Incluso fue él mismo quien tuvo que colaborar con la dote para las bodas de sus hermanas. Esto lo obliga a buscar un mejor puesto que el que tiene en Pisa.

Este periodo en Padua tendrá, asimismo, grandes avances en el campo de la mecánica. Lo que aquí quiero resaltar, es que durante este periodo se da la maduración de la mentalidad matemática de Galileo, el cual la utiliza ya en los estudios que realiza como una herramienta activa en su trabajo de investigación, fruto de las cuales, es sin duda la deducción, en 1604, de la ley de la caída de los cuerpos.

No es posible entender la mentalidad matemática de Galileo sin remitirnos a la figura de Arquímedes. A lo largo de la obra de Galileo podemos notar que a éste nunca le interesó la matemática pura, la abstracta. En efecto, la influencia que Galileo tuvo del gran matemático griego, se dejó sentir desde este periodo de su juventud; proveniente del mismo Ostilio Ricci, quien veía en Arquímedes la realización más perfecta de la mentalidad matemático – experimental<sup>12</sup>, de donde se desprende una mentalidad completamente enfocada a la matemática aplicada. Esta actitud, a la que podemos llamar arquimediana, se fue acentuando con las lecturas que Galileo hacía de los trabajos del matemático griego, dejando en él, cada con vez con mayor fuerza, la clara convicción de que la matematización de la física, que hasta ese entonces no incorporaba a las matemáticas de manera completa, era la mejor forma en que se podría acercarse a la naturaleza; Alexandre Koyré llega incluso a caracterizar este afán matematizador como un neoplatonismo<sup>13</sup>, que se erige en contra del aristotelismo; sin embargo, como hace notar Geymonat<sup>14</sup>, el platonismo de Galileo sólo puede entenderse como un matematicismo, el cual difiere en gran medida del neoplatonismo de la Academia Florentina, el cual estaba caracterizado por ser una mezcla de mística, aritmología y magia.

El gran cambio que se da en la mente de Galileo al rechazar la física aristotélica, la cual tenía una naturaleza puramente fenomenológica, y reemplazarla con una física arquimediana, es decir, lo que hoy podríamos llamar una física-matemática,

---

<sup>12</sup> Cfr. Geymonat, L. (1957) “Galileo”. Ed. Nexus

<sup>13</sup> Koyré, Alexandre. (2001), “Estudios Galileanos”. 8va edición, Siglo Veintiuno Editores. Koyré es uno de los más importantes defensores del “platonismo galileano”, en una parte de su libro anota lo siguiente en relación con la introducción de razonamientos matemáticos en el trabajo de Galileo: *Esto vendrá más tarde, cuando Galileo haya comprendido que su matematicismo es platonismo.*

<sup>14</sup> Cfr. Geymonat, L. (1957) “Galileo”. Ed. Nexus

es justamente el cambio conceptual de un espacio físico e intuitivo por naturaleza, a un espacio geométrico, a su vez abstracto, pero sobre todo ideal.

Aquello que se encuentra detrás cuando nos referimos a lo ideal dentro de la concepción del espacio geométrico de Galileo es, como lo hace notar Koyré, la alteración de una actitud intelectual, que nos puede resultar muy natural<sup>15</sup>, y la sustituye por otra, que no lo era en absoluto, lo cual supone un gran avance en el pensamiento científico, ya que permite concebir lo que en física hoy en día llamamos “casos ideales”. En efecto, los objetos con los que trata Galileo en su teoría ya no son más objetos reales y concretos, sino que son abstracciones geométricas que permiten deshacerse de los “accidentes”<sup>16</sup> producidos por el medio ambiente.

¿Pero, por que la matematización de la física constituye, desde mi punto de vista, una meta que Galileo se esfuerza por alcanzar?

A mi parecer, la introducción de elementos matemáticos dentro de las teorías de Galileo cuenta con dos aspectos a los que podemos considerar como metas dentro del discurso Galileano.

En primer lugar, quiero resaltar que Galileo busca la matematización de la física desde sus más tempranos trabajos, donde inicia tratando de aplicar conceptos matemáticos a la dinámica de Aristóteles; esfuerzo que fracasa debido a la naturaleza confusa y poco clara de ésta última, después se lanza al intento de racionalizar la física del ímpetus de Benedetti, esfuerzo que tampoco le es fructífero; sin embargo, a través de los “fracasos” que estos esfuerzos suponen, podemos ver las intenciones de Galileo. Él sabe que sólo a través de la racionalización del espacio, es decir de la geometrización de éste, se podrá dar solución a los problemas del movimiento, es en este sentido donde podemos decir que la primer meta de Galileo en cuanto a las matemáticas se refiere, es la instauración de una nueva mentalidad en torno al desarrollo de las ideas científicas, mentalidad que ha de acoger a las matemáticas como su herramienta más eficaz, mentalidad que a pesar de no ser inaugurada por Galileo, si encuentra

---

<sup>15</sup> Que se da, fundamentalmente debido al tratamiento preponderantemente fenomenológico que se encuentra implícito dentro de la física aristotélica

<sup>16</sup> En el sentido de “perturbación”

en él uno de sus máximos exponentes quien a través de este esfuerzo sentará las bases para que años más tarde otros grandes intelectos, como el de Newton, puedan resolver en su totalidad el problema no solamente del movimiento, sino de la cosmología en general.

El argumento anterior presupone asimismo la otra cara de esta doble meta de las matemáticas. Galileo sabe que no basta con la sola intención de instaurar una mentalidad matematicista para su uso personal. En una época en la que no se acostumbraba combinar el estudio de las matemáticas con el de la física (o cualquier otra ciencia), Galileo debe, de esta manera, validar esta nueva forma de hacer ciencia, debe de establecer la validez de las matemáticas como una descripción del mundo natural, a la vez que debe demostrar que las predicciones hechas a través de modelos matemáticos concuerdan con la realidad.

Podemos ver la importancia que tenían para Galileo las demostraciones matemáticas, expresado en boca de Sagredo refiriéndose a Galileo mismo:

*“[...] quien sobre esta materia había hecho muchas especulaciones, y todas, según es su costumbre, geoméricamente demostradas; de tal modo que, no sin razón, podría ésta llamarse una nueva ciencia [...]”*<sup>17</sup>

Más adelante expone el por qué de la importancia de las demostraciones matemáticas, y contrapone esta idea directamente con la tradición aristotélica:

*“[...] Porque si bien algunas de sus conclusiones ya habían sido observadas antes por otros, y en primer lugar por Aristóteles, sin embargo no son éstas las más hermosas, ni han sido (y esto es lo que más importa) demostradas apodóticamente desde sus fundamentos primarios e indubitables. Y por qué, como digo, quiero convencerte con demostraciones y no persuadirte con razonamientos verosímiles [...]”*<sup>18</sup>

En este punto concuerdo con Koyré cuando dice que el proceso del cual salió la física clásica consiste en un esfuerzo por racionalizar, por geometrizar el espacio y matematizar las leyes de la naturaleza<sup>19</sup>; aunque, a diferencia de Koyré, no me es posible desestimar el papel de la experimentación en el pensamiento galileano, ya

---

<sup>17</sup> Galilei, Galileo. (2003), “Diálogos Acerca de Dos Nuevas Ciencias”. Pp. 33. Ed. Losada. Argentina.

<sup>18</sup> *Ibid* pp.33

<sup>19</sup> Cfr. Koyré, Alexandre. (2001), “Estudios Galileanos”. 8va edición, Siglo Veintiuno Editores

que ésta jugará un papel preponderante en la consolidación de esta segunda meta. En efecto, es sólo a través de la experimentación (la cual se analiza con más cuidado en el apartado de metodología) que esta intención, llegará a buen fin.

#### **4. El Mundo**

Uno de los textos más interesantes dentro de la obra galileana es sin duda, la primera jornada de los Discorsi, ya que si bien las obras de Galileo de mayor importancia teórica son aquellas dedicadas al estudio del movimiento, esta primera jornada nos da una enriquecedora visión del pensamiento del científico italiano, justamente en temas que no están del todo relacionados con la cinemática (aunque se verá más adelante que dentro de esta discusión, Galileo también incluye una sección acerca de la naturaleza del movimiento en el vacío).

Entre las discusiones que se dan en esta primera jornada podemos encontrar temas a los que en general se le presta poca atención dentro del estudio histórico de Galileo, tales como su claro atomismo (claro tanto en convicciones como en ideas), la isocronía del péndulo, los métodos infinitesimales, la naturaleza de la propagación de la luz y la naturaleza del movimiento en el vacío, donde expone su célebre principio de la uniformidad de la caída de los cuerpos.

Todos estos temas en conjunto, forman lo que a mi parecer es la visión que Galileo tiene del mundo natural; visión que claramente se contrapone a la correspondiente visión aristotélica. En estas breves discusiones (breves en cuanto a que Galileo sólo les dedica una jornada a todas estas) Galileo expone todo aquello para lo que quizás no tiene tantos argumentos, ya sean teóricos o experimentales, como aquéllos que tiene para sustentar su teoría del movimiento; pero que él considera importantes, debido a que constituyen un marco conceptual en el que se insertará su cinemática; podríamos decir que la nueva ciencia del movimiento requiere de una nueva visión del mundo.

Cuando nos referimos aquí a la visión de Galileo del “mundo”, nos referimos al conjunto de concepciones que Galileo tiene con respecto a ciertos fenómenos naturales<sup>20</sup>, que en su tiempo se consideraban de suma importancia y ocupaban

---

<sup>20</sup> Aquí nos referimos exclusivamente a los fenómenos físicos o terrestres, no se habla aquí de sus concepciones cosmológicas, las cuales fueron cultivadas de manera igualmente genial en otras de sus obras, que no viene a la utilidad de este estudio examinar ahora.

la atención de grandes pensadores. Concepciones que si bien ya habían sido en su mayoría cultivadas por Aristóteles, eran en ese momento trastocadas por el cambio ideológico que se gestaba, y que indudablemente encontraría en Galileo un momento clave.

Una de las primeras discusiones que se dan dentro de la primera jornada de los Discorsi es relativa a la constitución de la materia; y efectivamente, podría parecer curioso que Galileo se ocupe de este tema, ya que no existe una declaración implícita al inicio de la jornada que nos lo indique, sin embargo, la intención de Galileo parece ser, desde el principio, la de llevarnos hacia esta discusión, a la que dedica gran parte de la primera jornada, lo cual nos indica la importancia que este tema tenía para el científico.

Esta primera discusión<sup>21</sup> se caracteriza por tener una orientación mucho más teórica que experimental. Los razonamientos sobre los que Galileo fundamenta las conclusiones obtenidas en esta disertación, son en su mayoría de carácter estrictamente geométrico, son pocos los experimentos que se exponen a favor de estas ideas, como es el ejemplo de los experimentos que expone para demostrar la fuerza de cohesión que tiene el *horror vacui*.

Este carácter teórico que menciono y que a su vez comparten la mayoría de las discusiones de la primera jornada (dejando un poco de lado el hecho de que pudieran llegar a ser falsos algunos de estos argumentos<sup>22</sup>) le da a éstas una belleza notable, entre otras cosas debido a que los argumentos geométricos desarrollados son de una complejidad excepcional para la época en que fueron creados.

Volviendo al tema de la materia, las características hasta ahora discutidas que posee esta discusión, nos da la clara impresión de que el propósito de Galileo es el de establecer un marco conceptual que le permita en un futuro<sup>23</sup> fundamentar las proposiciones de su teoría del movimiento. Dicho de otra manera, Galileo sabe

---

<sup>21</sup> Las características de esta discusión se exponen con mayor detalle en el capítulo correspondiente a la teoría Galileana.

<sup>22</sup> Como un ejemplo de esta situación, aquí podríamos citar la teoría de Galileo sobre la isocronía del péndulo, aseveración que solo es válida para valores infinitesimales de la amplitud, pero que Galileo aseguraba era válida para cualquier amplitud.

<sup>23</sup> Es decir en las dos últimas jornadas del Discorsi donde se expone por completo la teoría del movimiento.

que el marco conceptual que ofrece la tradición aristotélica, la cual se basa en el concepto de naturalezas bien definidas, y en el concepto de un “cosmos” en el cual debe reinar un orden natural para los objetos que poseen estas naturalezas, no es compatible (ni suficiente) con la nueva ciencia que se ha comenzado a gestar<sup>24</sup>, el sabe que exponer las leyes cuantitativas del movimiento no es suficiente si no se cambia también las concepciones de la naturaleza sobre las que reposa las bases ideológicas del movimiento.

De esta manera, la materia, ya no es para Galileo un continuo indivisible, sino que está formada de pequeñas partículas, que en la mente físico-matemática de nuestro científico, toman la forma de puntos inextensos e infinitos, concepción que sería imposible de concebir en el mundo de Aristóteles, pero que son completamente admisibles dentro del marco de la geometría. Recordemos que en la tradición aristotélica está muy arraigada la idea de la finitud del universo, idea que a su vez se extendía a los objetos naturales (terrestres); por lo cual era difícil concebir un conjunto infinito de entes “reales”, idea que solo podía concebirse en el campo abstracto de las matemáticas, las cuales según Aristóteles, no podían (ni debían) mezclarse con la física, es decir, con las explicaciones acerca del mundo natural.

En efecto, el atomismo de Galileo ya no es más una suposición metafísica, sino que adquiere el rango de verdadera hipótesis científica a través del desarrollo teórico que Galileo hace de ella. De esta manera, Galileo se encuentra en la posición de exponer abiertamente su visión a este respecto:

*“[...] no repugna el que se extienda v.g. una pequeña bolita de oro en un espacio grandísimo, sin admitir espacios extensos vacíos, siempre que admitamos que el oro esta compuesto de infinitos indivisibles.”<sup>25</sup>*

¿Pero cuales son las herramientas que le permiten a Galileo la libertad de proferir semejante aseveración, que tan en contra está de la tradición aristotélica?

Sin duda las matemáticas, y más específicamente, la geometría jugó, especialmente aquí, un papel muy importante en el desarrollo de su concepción de

---

<sup>24</sup> Galileo lo sabe desde las primeras lecturas que hizo de la obra de Benedetti

<sup>25</sup> Galilei, Galileo. (2003), “Diálogos Acerca de Dos Nuevas Ciencias”. Pp. 54. Ed. Losada. Argentina.

la materia. Para poder llegar a la conclusión atomista, Galileo desarrolla una de las discusiones más sorprendentes de toda su obra mecánica; sorprendente en cuanto a la modernidad que esta supone y a la maestría con que la ejecuta.

Galileo desarrolla durante ésta discusión, un argumento geométrico basado en el método de exhausción, el cual le permite demostrar que una línea en general se puede subdividir hasta el infinito, lo cual implica que esta línea está formada por un conjunto infinito de puntos “inextensos”, sin embargo, Galileo va mas allá y nos introduce algunas de las características (hoy bien conocidas y desarrolladas) de los conjuntos infinitos; efectivamente, nos dice que estos conjuntos son entre sí inconmensurables, es decir, que no existe una regla de comparación entre ellos. Con todo esto, Galileo logra formar un argumento infinitesimal<sup>26</sup>, el cual le abrirá las puertas para dar el salto conceptual de las matemáticas a la realidad.

El paso que Galileo hace del concepto matemático de infinitésimos geométricos a átomos indivisibles no es claro del todo, quizás por que el paso del mundo geométrico, en la cual son completamente válidas las abstracciones, a la intuición de la realidad física, no es para nada trivial, Galileo lo sabe y quiere convencer al lector de que su argumento matemático es válido en la vida real y no deja espacio a una más profunda reflexión de esto, lo que para Galileo debería ser evidente, como lo ilustra el siguiente texto:

*“[...] Ahora bien, todo lo dicho de las simples líneas, es extensivo a las superficies y a los cuerpos sólidos, considerándolos compuestos de infinitos átomos no extensos.”<sup>27</sup>*

Ahora bien, el razonamiento infinitesimal no se detiene aquí, ya que como se expondrá en el capítulo relacionado con la teoría de Galileo, éste también lo aplica a su teoría del movimiento, elevando su nivel de abstracción, ya que si bien, el concepto de un conjunto infinito de objetos inextensos era difícil de aprehender para su época, el concepto de una velocidad “puntual”, es decir de una velocidad infinitesimal, es una concepción que incluso a muchas mentes ilustres de su

---

<sup>26</sup> Palabra que Galileo no utiliza.

<sup>27</sup> Galilei, Galileo. (2003), “Diálogos Acerca de Dos Nuevas Ciencias”. Ed. Losada. Argentina. El subrayado es mío.

tiempo (Descartes entre ellas), no les fue posible comprender ni mucho menos aceptar.

La otra gran discusión que podemos encontrar en la primera jornada de los Discorsi y que es un antecedente directo para la teoría que expondrá en las jornadas tres y cuatro, es la relativa a la naturaleza del movimiento en el vacío, en ésta, Galileo no se detiene a analizar el comportamiento cuantitativo del movimiento, eso lo hará en la jornada tercera. En esta disertación su objetivo tiene más que ver con discutir uno de los pilares sobre los que se basa la teoría aristotélica del movimiento: la existencia del vacío y la imposibilidad de movimiento en éste.

Recordemos que dentro del marco de la teoría aristotélica, la existencia del vacío es imposible, la naturaleza no lo permite<sup>28</sup>. Por otro lado recordemos que en la física aristotélica todo cuerpo tiene una tendencia a encontrarse en su lugar natural, así como una tendencia a regresar a éste cuando es alejado de él. Este movimiento que el cuerpo realiza para regresar a su lugar natural es el llamado movimiento natural<sup>29</sup> (a diferencia del movimiento violento, que es aquél que lo sacó de él), dicho movimiento debe de efectuarse por la vía más corta y rápida, lo cual implica que todo movimiento natural se efectúa en línea recta y lo hace tan rápidamente como el medio se lo permita, por lo tanto, si el cuerpo no encuentra resistencia alguna del medio circundante, como ocurriría en el vacío, su movimiento sería instantáneo, es decir, tendría una velocidad infinita, noción que es inconcebible dentro de la teoría aristotélica, por lo que el movimiento en el vacío es imposible<sup>30</sup>.

Durante la discusión acerca de la materia, a Galileo le es imposible deshacerse del todo de la hipótesis del *horror vacui*, hipótesis que si bien no le satisface, aun no se encuentra en posesión de un argumento que pueda contrarrestarlo. En la discusión acerca del movimiento en el vacío, en cambio, Galileo desafía por completo aquella hipótesis para dar paso a una de sus más célebres conclusiones:

---

<sup>28</sup> Este es el concepto del *Horror Vacui*, el cual se discutirá mas adelante

<sup>29</sup> Un ejemplo de movimiento natural es la caída de los cuerpos, ya que el lugar natural de los cuerpos “graves” es el centro del universo (que en esta tradición corresponde al centro de la Tierra).

<sup>30</sup> Cfr. Koyré, Alexandre. (2001), “Estudios Galileanos”. 8va edición, Siglo Veintiuno Editores

si nos encontrásemos en el vacío, dos cuerpos de diferente peso que sean dejados caer desde una misma altura desarrollarán la misma velocidad y caerán al mismo tiempo, o en palabras del mismo Galileo:

*“[...] Después de ver esto, soy de opinión que si se suprimiese totalmente la resistencia del medio, todas las materias descenderían con la misma velocidad.”*

*“[...] y en particular esto de que la diferencia de gravedad, aunque sea enorme, no influye para nada en la diversificación de las velocidades de los móviles, de modo que, por lo que de ella depende, todos se moverían con igual celeridad [...]”<sup>31</sup>*

Podemos comparar las posturas galileana y aristotélica, y veremos que no solo son contrarias, sino que son expresamente incompatibles entre sí. Para Galileo, el vacío es totalmente aceptable, por lo tanto, la diferencia en velocidad que observamos en condiciones naturales entre dos móviles de diferente peso, se debe exclusivamente a la resistencia del aire a través del cual se mueven; para Aristóteles, en cambio, el vacío es inaceptable en la naturaleza; en su teoría el medio no sólo disminuye la velocidad de los móviles, sino que también juega el papel de motor del movimiento, por lo tanto, sin un medio el movimiento natural sería, asimismo, imposible.

Se puede observar a través del texto que Galileo sabe la importancia de su aseveración, el paso hacia la aceptación del vacío le permitirá, mas adelante, poder realizar un estudio sobre el movimiento que no dependa del medio que rodea a un determinado móvil, consideración de suma importancia que permitirá la geometrización del espacio. Simplicio nos da una muestra de la importancia que tiene tal aseveración para la teoría aristotélica:

*“Simplicio: Seria afirmación es ésta, Salviati. Sin embargo, yo no creeré nunca que en el mismo vacío, si por ventura en él fuera posible el movimiento, se moverían con igual velocidad un trozo de plomo y un copo de lana.”<sup>32</sup>*

Junto con estas dos grandes discusiones, encontramos también dos discusiones menores, a las cuales Galileo dedica poco tiempo; siendo la menor de éstas, la discusión acerca de la velocidad de la luz, donde expone su parecer acerca del

---

<sup>31</sup> Galilei, Galileo. (2003), “Diálogos Acerca de Dos Nuevas Ciencias”. Pp. 120. Ed. Losada. Argentina.

<sup>32</sup> *Ibid* pp. 108

movimiento de ésta. En opinión de Galileo (y en oposición a Aristóteles), la velocidad de la luz debería ser una cantidad finita, y aún más, una cantidad medible y para tal empresa propone un experimento. Quizá la intención de Galileo al expresar esto sea la de establecer que no pueden existir movimientos instantáneos, noción que le será útil cuando exponga la teoría acerca del movimiento en el vacío que previamente discutí; sin embargo, ésta es sólo una suposición mía, ya que no existe una relación implícita entre estos dos temas.

La otra discusión menor que podemos encontrar en la primera jornada de los Discorsi, tiene que ver con los descubrimientos que Galileo hizo referentes a la isocronía del péndulo.

### **5. La experimentación**

A pesar de lo dicho anteriormente, no podemos, ni debemos, menospreciar el papel que la experimentación activa tuvo en el desarrollo de su teoría del movimiento, favoreciendo su pensamiento matemático. En efecto, Galileo tiene un profundo pensamiento matemático que le permite llegar a superar las dificultades de sus predecesores, sin embargo, también existe en Galileo un fuerte sentido de la experimentación, y es la conjugación de estos dos elementos la que le permite realizar la que quizá sea su meta más clara, la de dar una explicación del movimiento precisa y acorde con los hechos de la naturaleza.

Para cumplir con esta meta, Galileo renuncia a la idea de encontrar la razón por la cual caen los cuerpos, él sabe que la naturaleza de la pesantez no está a su alcance, es decir, renuncia a la idea de construir una dinámica, y decididamente se lanza a la búsqueda de una cinemática que le permita describir de forma completa (y sobretodo matemática) el fenómeno del movimiento.

Para muchos de sus contemporáneos, esta manera de actuar no es la correcta, así lo expresa Descartes:

*“Todo lo que dice [Galileo] sobre la velocidad de los cuerpos que descienden en el vacío, etc., está edificado sin fundamento, porque hubiera debido previamente determinar qué es la pesantez [...]”*<sup>33</sup>

---

<sup>33</sup> Descartes R. *Oeuvres*. Ed. Adam-Tannery. Tomo II

Sabemos que para el año de 1604 Galileo, a través de una intensa actividad tanto teórica como experimental, desarrolla la ley de la caída de los cuerpos, y es en una carta a Paolo Sarpi que podemos ver claramente la intención de Galileo con respecto a ésta:

*“Reflexionando sobre los problemas del movimiento, para los cuales, y a fin de demostrar los accidentes por mí observados, me faltaba un principio totalmente indudable que pudiera poner como axioma, he llegado a una suposición que tiene mucho de natural y evidente; y, supuesta esta, demuestro luego todo el resto, [...]. Y el principio es el siguiente: Que el móvil natural va aumentando de velocidad en la misma proporción en que se aleja de su punto de partida [...].”<sup>34</sup>*

Siguiendo la línea de pensamiento de Koyré, se puede ver en este fragmento que Galileo ya ha llegado a una fórmula descriptiva del movimiento de caída; sin embargo lo que él busca es un principio, fundamental y evidente que le permita deducir (o demostrar) los accidentes del movimiento de la caída.

Como dije antes, Galileo no busca establecer que es la gravedad, lo que busca es la esencia del movimiento de la caída; en palabras modernas, puedo decir que lo que él busca es una ley (también una definición) que pueda aplicarse no sólo al movimiento de caída como caso particular, sino al movimiento acelerado como fenómeno general, es decir, Galileo busca la ley fundamental del movimiento. A este respecto, podemos encontrar en el texto del Discorsi un pasaje sumamente ilustrativo de la ideología de Galileo:

*“Salviati: No me parece ocasión oportuna para entrar, al presente, en investigaciones sobre la causa de la aceleración del movimiento natural, en torno a la cual han sido diversas las opiniones emitidas por los filósofos [...]. Sería interesante, aunque de poca utilidad, ir examinando y resolviendo todas estas fantasías y otras más. Por ahora, a nuestro Autor le basta con que comprendamos que él quiere investigar y demostrar algunas propiedades [...].”<sup>35</sup>*

En resumen, la meta principal de Galileo de crear un sistema que sustituya al sistema aristotélico, encuentra sus bases en tres grandes frentes que forman los

---

<sup>34</sup> Galileo a Paolo Sarpi en Venecia, Padua, 16 de octubre de 1604. Citado por Koyré

<sup>35</sup> Galilei, Galileo. (2003), “Diálogos Acerca de Dos Nuevas Ciencias”. Pp. 228. Ed. Losada. Argentina.

pilares del discurso galileano; por un lado tenemos el doble deber del Galileo matemático, cuyo propósito no sólo es la matematización de la física, sino también tiene que validar esa idea como un recurso válido para la descripción de la naturaleza. A la par, tenemos a un Galileo preocupado por crear una imagen del mundo acorde con la nueva cinemática (y con la nueva ciencia) que se comienza a gestar, para rematar con un Galileo que tiene un objetivo claro: encontrar la ley fundamental del movimiento, ley que él sabía que era de primordial importancia para terminar de tajo con el ya decadente sistema aristotélico.

## Capítulo 3

### La Metodología de la mecánica Galileana

#### 1. Introducción

Sin duda, uno de los legados más importantes de la obra galileana, radica en el cambio en las concepciones metodológicas de la ciencia que él impulsó. Tan importantes son los cambios que se dieron a partir de la obra del físico toscano, que muchos de éstos han forjado la visión que se tiene de la ciencia moderna. Muchos han llegado incluso a darle a Galileo el título de “Padre de la ciencia moderna”, o asimismo “Padre del método científico”.

La obra metodológica de Galileo es rica en elementos innovadores para su época, los cuales le dieron las herramientas necesarias para superar tanto a sus antecesores, como a sus contemporáneos y dar el paso necesario para construir una teoría del movimiento consistente con los hechos (a pesar de que a veces el mismo Galileo cae en la abstracción desmedida).

En Galileo se logra un equilibrio metodológico que conjuga la visión teórica del racionalismo con los esfuerzos experimentales del empirismo, formando una unidad que le permite trabajar con un espacio ya no físico, sino geométrico, pero que a su vez le permite nunca dejar de lado la contrastación experimental de la teoría.

Una característica que marcó el pensamiento de Galileo, es su enorme confianza en el poder de la razón humana para explicar la naturaleza, y a este respecto podemos citar a Whitehead: “la fe en las posibilidades de la ciencia, engendrada con anterioridad al desarrollo de la teoría científica moderna, es un derivado inconsciente de la teología medieval.”<sup>1</sup>

Basta con citar un pasaje de “*Il Saggiatore*” de Galileo para poder darnos una mejor idea de su visión iluminista de la ciencia<sup>2</sup>:

---

<sup>1</sup> A. N. Whitehead, *Science and the modern world*, MacMillan, New York, 1925, p.19 (Cit. por Marquina y Álvarez en “Galileo y la ciencia medieval”, 1992)

<sup>2</sup> El término “ciencia” era poco utilizado en esa época, en cambio, se utilizaba la palabra filosofía para designar el tipo de estudios que realizaban personas como Galileo o Newton.

*“La filosofía está escrita en ese grandioso libro que está continuamente abierto ante nuestros ojos (lo llamo universo). Pero no se puede descifrar si antes no se comprende el lenguaje y se conoce los caracteres en que está escrito. Está escrito en lenguaje matemático, siendo sus caracteres triángulos, círculos y figuras geométricas. Sin estos medios es humanamente imposible comprender una palabra; sin ellos, deambulamos vanamente por un oscuro laberinto.”*<sup>3</sup>

Como he dicho, el aspecto metodológico de Galileo comprende varios elementos, sin embargo, a mi parecer, dichos elementos se pueden clasificar en tres grandes categorías globales, las cuales nos permitirán analizar mejor los componentes y será más fácil establecer relaciones entre los diversos elementos que forman los marcos teórico y axiológico. La primera categoría en la que me detendré, tiene que ver con la importancia que Galileo introdujo de las matemáticas en el quehacer científico, importancia que no radica tanto en la primacía del concepto, como en el uso tan preciso que hizo de ellas. La segunda categoría engloba los elementos experimentales que Galileo utiliza en la creación de su ciencia; dicha categoría comprende no sólo los experimentos reales sino la introducción de experimentos pensados en el desarrollo de su teoría. Por último, expondré la categoría en la que se engloban los métodos que Galileo utiliza para dar a conocer sus ideas. En cuanto a esta última categoría; a pesar de que podría parecer ocioso hablar de este tema dentro del marco de su teoría del movimiento<sup>4</sup>, a mi me parece importante el giro discursivo que Galileo realiza al cambiar el dialogo simple, que invita a reflexionar sobre cierto tema de manera cualitativa, (recurso que no sólo se observa en el *Dialogo*<sup>5</sup>, sino también en la primera jornada de los *Discorsi*), a la rigurosa demostración matemática (o experimental), como se verá en las jornadas segunda y tercera del *Discorsi*, donde se expone el cuerpo de su teoría del movimiento. Esta multiplicidad metodológica, guarda una estrecha

---

<sup>3</sup> Galileo Galilei, *Il Saggiatore*. (Cit. por Marquina y Álvarez en “Galileo y la ciencia medieval”, 1992)

<sup>4</sup> Al respecto de la comunicación de las ideas científicas; a veces tiende a valorarse más el legado del “*Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo*” como obra de divulgación científica, cuestión que discutiremos en el último apartado.

<sup>5</sup> Aquí nos referimos a la obra “*Dialogo sobre los dos máximos sistemas del mundo*” (*Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*) que es considerada la otra gran obra maestra del pensamiento Galileano, y en la que se dedica a construir una defensa a favor del sistema copernicano.

relación con la axiología que sustenta el discurso galileano, como se verá más adelante.

## **2. Las matemáticas.**

En el apartado concerniente a la axiología galileana, se insistió en la importancia que tienen las matemáticas dentro del discurso galileano, como una meta a la que Galileo aspira; asimismo, aquí se hará hincapié en la importancia de éstas como un elemento metodológico primordial dentro de la teoría galileana.

La geometrización del espacio es, sin duda, uno de los elementos más importantes sobre los que se basa la metodología galileana, esta geometrización le permite a Galileo reemplazar el espacio físico por un espacio geométrico, abstracto, lo que conlleva irremediablemente a reemplazar los cuerpos materiales por cuerpos geométricos e ideales; en este sentido Galileo se sitúa conscientemente fuera de la realidad (o más bien valdría decir, lejos de la realidad cotidiana). En este espacio geométrico, él es libre de trabajar con cuerpos absolutamente esféricos, planos absolutamente lisos, esferas absolutamente duras, cuerpos que no pueden ser encontrados en la realidad cotidiana; sin embargo, son estos elementos “ficticios” los que permiten indagar de manera certera en la naturaleza y descubrir principios que serían imposibles de concebir utilizando la experiencia cotidiana, como es el caso del principio de inercia, que sólo es posible observar en condiciones ideales. Es ésta la física de Galileo, una física - matemática arquimediana basada en la hipótesis matemática, lo que en palabras de Koyré representa que: “Lo real encarna lo matemático.”<sup>6</sup>

Como se vio con anterioridad, Galileo primero tratará de llevar hasta sus últimas consecuencias la teoría del ímpetus de Benedetti<sup>7</sup>, pero habiendo fracasado en esto, Galileo decide seguir el camino de la física arquimediana. En Galileo, el razonamiento matemático coexiste con el pensamiento experimental, Galileo mismo nos da cuenta de la importancia de aquél en palabras de su personaje Salviati.

---

<sup>6</sup> Koyré, Alexandre. (2001), “Estudios Galileanos”. Pp. 147. 8va edición, Siglo Veintiuno Editores

<sup>7</sup> La noción de ímpetus, tal como la maneja Benedetti, es oscura y ciertamente no es posible traducirla a términos matemáticos, razón por la cual, Galileo fracasa en construir una física – matemática basada en la idea de una fuerza impresa que se agota en el móvil.

*“Salviati: [...] Y porque, como digo, quiero convencerte con demostraciones y no persuadirte con razonamientos verosímiles, [...]”<sup>8</sup>*

Para Galileo, solo se puede llegar a un verdadero convencimiento mediante demostraciones<sup>9</sup>, sin duda rigurosas de los hechos, lo demás son para él “persuasiones” que no ahondan en la naturaleza de éstos.

El método matemático de Galileo es la geometría, con ésta, desarrolla su teoría del movimiento a lo largo de las jornadas tres y cuatro del Discorsi. La geometría de Galileo no es una geometría del todo abstracta, lejos de la realidad, sino que es representación de ésta, no es la geometría de los agrónomos o artesanos, la cual es puramente técnica; tampoco es, sin embargo, la geometría de los neoplatónicos que poco tenía que ver con el mundo real. La geometría de Galileo nace de la necesidad de racionalizar el espacio, de conferirle ciertas propiedades que permitan representar no sólo las relaciones espaciales (tales como la distancia), sino que le permita, asimismo, acceder a una representación geométrica del tiempo, cuestión que para la época no era ni evidente ni inmediata.

Bajo este argumento nos explica Koyré el error cometido en la primera formulación de la ley de la caída de los cuerpos que Galileo le comparte a Paolo Sarpi, donde Galileo expresa que “el móvil natural va aumentando de velocidad en la misma proporción en la que se aleja de su punto de partida”<sup>10</sup>; es decir, la velocidad de un móvil en caída libre es proporcional a la distancia recorrida por éste. La formulación matemática de dicho principio nos llevaría, irremediablemente, a una ley exponencial, formulación que no estaba al alcance de Galileo (ni de Descartes<sup>11</sup>). Con el desarrollo de sus investigaciones, Galileo cae en la cuenta de su error y logra formular correctamente la ley de la caída.

Quizá dicho error pudiera parecer un insignificante tropiezo comparado con los grandes aciertos que al final supone la teoría de Galileo, sin embargo, como se mencionó antes, dicho error tiene su raíz en la primacía que tenían las relaciones

---

<sup>8</sup> Galilei, Galileo. (2003), “Diálogos Acerca de Dos Nuevas Ciencias”. Pp. 33. Ed. Losada. Argentina.

<sup>9</sup> En realidad dichas demostraciones pueden ser tanto matemáticas como experimentales como lo demostrará más adelante

<sup>10</sup> **Cfr.** Koyré, Alexandre. (2001), “Estudios Galileanos”. Pp. 76. 8va edición, Siglo Veintiuno Editores

<sup>11</sup> Descartes llegó al mismo error que Galileo al estudiar el fenómeno por petición de Beeckman, pero fue una interpretación errónea de los resultados de Descartes, los que llevaron a Beeckman a la formulación correcta de la ley de la caída, misma ley a la que Galileo había llegado por sí solo.

espaciales sobre las concepciones temporales de los fenómenos; pues recordemos que la física que se hacía hasta ese entonces, incluso (aunque en menor grado) la de Benedetti, era una física basada en la experiencia cotidiana, en la cual un determinado fenómeno se da en un determinado lugar<sup>12</sup>.

Entonces, podemos ver que al reformular la ley de la caída, y sustituir la proporcionalidad respecto a la distancia con una proporcionalidad con respecto al tiempo<sup>13</sup>, Galileo no sólo logra llegar al postulado correcto de la ley, sino que logra romper con la idea aristotélica de “orden cósmico”; pues en un espacio geométrico, ya no existen direcciones privilegiadas, ni lugares naturales a los que los cuerpos deban de regresar, este nuevo espacio geométrico no es sólo racional, sino también homogéneo.

Al postular el enunciado correcto de la caída, Galileo logra disolver el cosmos aristotélico, pues en efecto, el fenómeno del movimiento se da en el tiempo, y sólo de forma derivada en el espacio, ciertamente, lo que obliga al pensamiento a atribuir al tiempo un valor y un papel eminente en la caída es el hecho de que la noción de tiempo está implícita en la de movimiento, noción que no hubiese sido fácil de encontrar sin la geometrización del espacio.

Galileo sabe la importancia de este punto, sabe que el paso del espacio al tiempo no es evidente y así lo expresa al poner en labios de sus personajes el siguiente dialogo:

*“Sagredo: Por lo que ahora viene a mi mente, me parece que tal vez con mayor claridad se lo hubiera podido definir, sin cambiar la idea, diciendo: Movimiento naturalmente acelerado es aquél en que la velocidad va creciendo a medida que crece el espacio que se va recorriendo; [...].*

*Salviati: Mucho me consuela el haber tenido un tan grande compañero en el error; y más te diré: tu razonamiento tiene tanto de verosímil y de probable, que nuestro*

---

<sup>12</sup> Recordemos también que esta concepción es herencia de la física Aristotélica, en la cual existen “lugares naturales” para las cosas, direcciones privilegiadas; es decir, los fenómenos se explican en relación al “Cosmos” aristotélico.

<sup>13</sup> Recordemos que la enunciación correcta de la ley de la caída establece que la velocidad de un cuerpo que cae, es proporcional al tiempo de la caída.

*mismo autor no me negó, cuando yo se lo propuse, que también había estado durante algún tiempo en la misma equivocación.”<sup>14</sup>*

Galileo se apega a lo que dijo, y quiere convencer al lector con demostraciones y así lo hace después:

*“Salviati: [...]. Si las velocidades están en la misma proporción que los espacios recorridos o a recorrerse, tales espacios son recorridos en tiempos iguales; por consiguiente, si las velocidades con las que el cuerpo en descenso recorrió el espacio de cuatro codos, fueron dobles de las velocidades con que recorrió los dos primeros codos (así como un espacio es doble del otro espacio), también en este caso los tiempos de tales recorridos son iguales. Pero el que un mismo móvil recorra los cuatro y los dos codos en el mismo tiempo, no puede tener lugar fuera del movimiento instantáneo. Sin embargo, nosotros vemos que el grave en descenso efectúa su movimiento en el tiempo, y que recorre los dos codos en menos tiempo que los cuatro; por consiguiente, es falso que su velocidad crezca como el espacio [...].”<sup>15</sup>*

Galileo va más allá en su afán matematizador y en la primera jornada de los Discorsi, durante la discusión acerca del atomismo introduce argumentos matemáticos infinitesimales para justificar su posición atomista. Esta geometría infinitesimal no es desarrollada por Galileo más allá de lo que él necesita<sup>16</sup>, pero esto le basta no sólo para apoyar su argumento atomista, en el cual, pasa de la consideración matemática a la material de manera poco clara (quizás a falta de mejores argumentos experimentales, argumentos que no llegarán sino hasta el siglo XVIII) pues extrae la conclusión de la existencia de los átomos directamente de un argumento infinitesimal; sino que también le sirve para explicar el paso de un móvil en caída libre por un número infinito de grados de velocidad, argumento que era totalmente innovador (y contraintuitivo) para su época.

---

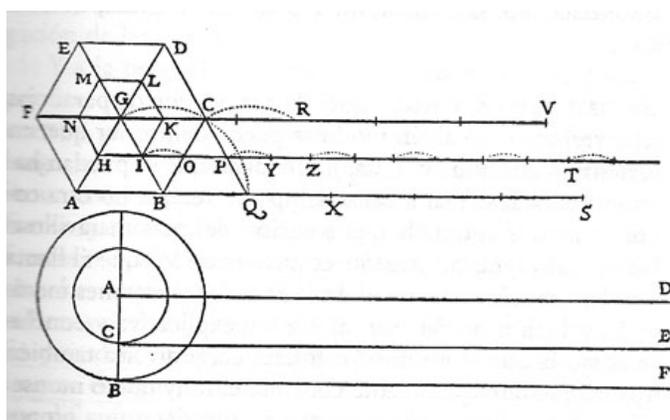
<sup>14</sup> Galilei, Galileo. (2003), “Diálogos Acerca de Dos Nuevas Ciencias”. Pp. 229 Ed. Losada. Argentina.

<sup>15</sup> *Ibid.* pp. 230

<sup>16</sup> Tendrán que llegar Newton y Leibniz para desarrollar hasta sus últimas consecuencias esta geometría que se convertirá en el Cálculo infinitesimal.

Un ejemplo de su geometría infinitesimal se encuentra en el siguiente fragmento, el cual acompañamos de la imagen en la que se basa la demostración<sup>17</sup>:

*“Salviati: Recurriré a la consideración de los polígonos, antes mentados, cuyo comportamiento es inteligible y queda ya comprendido. Y diré que, así como en los polígonos de cien mil lados, a la línea recorrida y conmensurada por el perímetro del mayor, es decir por sus cien mil lados desplegados consecutivamente, es igual la conmensurada por los cien mil lados del menor, pero con la intercalación de cien mil espacios vacíos interpuestos; así también diré, que en los círculos (que son polígonos de infinitos lados) la línea recorrida por los infinitos lados del círculo grande, dispuestos consecutivamente, es igual en longitud a la recorrida por los infinitos lados del menor, pero en este último caso, con la interposición de otros tantos espacios vacíos entre esos lados; y así como los lados no son finitos en número, sino infinitos, así también los vacíos interpuestos no son finitos, sino infinitos: es decir, aquéllos son infinitos puntos plenos todos; y éstos son infinitos puntos, en parte plenos y en parte vacíos. Y aquí quiero que notéis, que al resolver y dividir una línea en partes finitas en número y por consiguiente posibles de ser numeradas, no es posible disponerlas en una longitud mayor que la ocupada por ellas cuando formaban un todo continuo y estaban unidas sin la interposición de otros tantos espacios vacíos. Pero si nos la imaginamos resuelta en partes no finitas en número, es decir, en sus infinitos indivisibles, la podemos concebir prolongada indefinidamente sin la interposición de espacios extensos vacíos, pero sí con la de infinitos indivisibles vacíos.”*<sup>18</sup>



<sup>17</sup> La demostración completa es demasiado extensa, como para ponerla aquí, por eso hemos aislado el fragmento que nos parece más importante.

<sup>18</sup> Galilei, Galileo. (2003), “Diálogos Acerca de Dos Nuevas Ciencias”. Pp. 53. Ed. Losada. Argentina.

En las jornadas segunda y tercera de los *Discorsi*, Galileo hace un uso mucho más extenso de las demostraciones geométricas, cada proposición, cada teorema, viene acompañado de su correspondiente demostración, dichas demostraciones hacen de la teoría de Galileo un todo coherente que logra resolver el problema del movimiento.

### 3. La experimentación.

Si bien la matematización (entendida ésta como geometrización) le permite a Galileo superar varias de las concepciones teóricas de sus predecesores, no podemos, en ningún momento, desestimar la importancia de su trabajo experimental. Esta actitud experimental le permitirá, asimismo, superar los errores de la física de Descartes, al desembarazarse de las consideraciones causales que le impidieron a éste alcanzar el principio correcto de la ley de caída.

Descartes expresará su parecer en cuanto al método de Galileo en una carta a Mersenne en 1638:

*“Encuentro que, en general, filosofa mucho mejor que el vulgo, por cuanto omite lo más que puede los errores de la Escuela, y trata de examinar las materias físicas mediante razones matemáticas. En esto coincido enteramente con él, **y sostengo que no existe otro medio para llegar a la verdad.** Pero me parece que falla mucho por cuanto hace de continuo digresiones y no se detiene a explicar cabalmente una materia; lo que demuestra que no las ha examinado por orden, y que, **sin haber considerado las primeras causas de la naturaleza, sólo ha buscado las razones de algunos efectos particulares, y de este modo, ha obrado sin fundamento.**”<sup>19</sup>*

En esta carta podemos observar claramente la posición de Descartes en cuanto a la metodología, no sólo la concerniente a Galileo, sino la suya. Por un lado apoya el uso que Galileo hace de las matemáticas para “examinar las materias físicas”, rasgo que resulta perfectamente coherente con el racionalismo de Descartes. Por otro lado, desacredita su proceder, le reprocha que no busque las

---

<sup>19</sup> Descartes, *Carta a Mersenne*, 11 de octubre de 1638. (Cit. por Koyré en *Estudios Galileanos*. Pp.135). El subrayado es mío.

“primeras causas de la naturaleza”, sin embargo, Galileo sabe que el concepto de pesantez se le escapa<sup>20</sup>, su proceder es, en este sentido, más sensato.

La actitud experimental de Galileo tampoco parece concordar con el uso de la experiencia en las tradiciones aristotélicas, lo que el empirismo aristotélico necesita, son “experiencias” que puedan servir de base y fundamento a la teoría. Al contrario, lo que la metodología galileana ofrece son experimentos contruidos a partir de una teoría, y cuyo papel es confirmar o invalidar la aplicación a la realidad de leyes deducidas de principios cuyo fundamento está en otra parte<sup>21</sup>.

De esta manera, la experimentación en Galileo se convierte en un elemento de suma importancia, que junto con las matemáticas son la base sobre la que se construye la cinemática.

La importancia que Galileo le da a la contrastación experimental, es decisiva en la construcción de la teoría, ya que sin experimento no sería posible validar los argumentos obtenidos de la teoría. Galileo nos lo muestra de la siguiente forma:

*“Salviati: [...] y conforme a la costumbre y a las conveniencias de las ciencias, que aplican las demostraciones matemáticas a conclusiones que conciernen a la naturaleza [...]; los autores exigen, pues, de la concordancia con la experiencia la confirmación de sus principios, que son el fundamento de toda la construcción ulterior [...].”<sup>22</sup>*

Podemos distinguir en Galileo tres clases de experimentos. En primer lugar tenemos los experimentos “reales”, es decir, aquellos que en efecto sabemos que Galileo realizó; los experimentos “imaginados”, es decir, los que pudieran ser realizables, pero que muy probablemente Galileo no realizó; y finalmente, los experimentos “pensados”, que son experimentos irrealizables ya sea por razones técnicas, lógicas o físicas.

Analicemos primero los experimentos reales. Estos experimentos comprenden aquellas experiencias de las que se tiene algún dato que indique que fueron

---

<sup>20</sup> A pesar de que Galileo está consciente de que no puede explicar la génesis de la pesantez de los objetos, podemos observar que su obra se encuentra impregnada de una pesantez implícita; para Galileo todos los cuerpos son cuerpos graves. Es esta característica, la que le impedirá a Galileo, en última instancia, desarrollar el concepto de inercia lineal.

<sup>21</sup> Koyré, Alexandre. (2001), “Estudios Galileanos”. Pp. 70. 8va edición, Siglo Veintiuno Editores.

<sup>22</sup> Galilei, Galileo. (2003), “Diálogos Acerca de Dos Nuevas Ciencias”. Pp.221. Ed. Losada. Argentina

realizadas por Galileo. Con respecto a éstos, durante largo tiempo ha existido una polémica en cuanto a la veracidad de la existencia de estos experimentos. Algunos investigadores como Alexandre Koyré apoyan la teoría de que Galileo no realizó los experimentos tal como se describen en el Discorsi, sino que la mayoría de las conclusiones son obtenidas puramente de sus consideraciones matemáticas, como podemos observar en el comentario: “Los ‘experimentos’ a los que apela –o apelará mas tarde- Galileo, incluso los que realmente ejecuta, no son ni serán nunca otra cosa que experimentos mentales. Los únicos, por lo demás, que podían hacerse con los objetos de su física. Pues los objetos de la física galileana, los cuerpos de su dinámica, no son cuerpos ‘reales’.”<sup>23</sup>

La posición de Koyré es muy clara en este punto, sin embargo, investigaciones realizadas posteriormente por historiadores como Stillman Drake, James MacLachlan o Thomas Settle<sup>24</sup>, han reivindicado la veracidad de estos experimentos, reivindicando, asimismo, la idea del Galileo teórico – experimental. Para entender mejor la importancia de las contribuciones de estos últimos, así como el aspecto experimental de Galileo, repasaremos uno de los experimentos más ilustrativos de la actitud Galileana:

*“Salviati: [...] Acerca de los experimentos, tampoco el autor ha dejado de hacer lo posible; y a fin de asegurarnos de que la aceleración de los graves naturalmente en descenso se efectúa en la proporción antes dicha, muchas veces me he hallado yo en su compañía, para efectuar las pruebas del modo siguiente:*

*En un cabrio o si se quiere en un tablón de madera de unos doce codos de longitud, y de ancho, en un sentido, medio codo, y en el otro tres dedos, en esa menor anchura se había excavado un canalito, poco mas ancho de un dedo; habiéndolo excavado muy derecho, y después de haberlo revestido, para que estuviera bien pulido y liso, con un pergamino tan pulido y lustrado como fue posible, hacíamos descender por el una bola de bronce, durísima, bien redonda y pulida; una vez colocado dicho tablón inclinado, por haber elevado sobre la horizontal uno de sus extremos, una braza o dos a capricho, se dejaba descender por dicho canalito la bola, anotando, del modo que después diré, el*

---

<sup>23</sup> Koyré, Alexandre. (2001), “Estudios Galileanos”. Pp. 71-72. 8va edición, Siglo Veintiuno Editores.

<sup>24</sup> Settle, Thomas. “An Experiment in the History of Science”. Science, 1961, 133:19-23. Este es un trabajo donde repite algunos de los experimentos descritos por Galileo, para contrarrestar la visión que Koyré proponía de un Galileo que no realizó sus experimentos.

*tiempo que empleaba en recorrerlo todo, repitiendo el experimento muchas veces, para medir con toda exactitud el tiempo, en el cual jamás se encontraba una diferencia ni siquiera de la décima parte de una pulsación. Efectuada y establecida con toda precisión esta operación, hacíamos descender la misma bola solamente por la cuarta parte de la longitud de ese canal; y medido el tiempo de su caída, nos encontrábamos con que era siempre exactísimamente la mitad de la anterior. Y haciendo luego experimentos con otras partes, [...], por medio de experiencias más de cien veces repetidas, nos encontrábamos siempre con que los espacios recorridos eran entre sí como los cuadrados de los tiempos, y esto en todas las inclinaciones del plano, o sea del canal por el cual se hacia descender la bola [...].”<sup>25</sup>*

En la descripción de este experimento podemos observar algunas de las características que aun en nuestros días conserva la experimentación científica. En éste, Galileo nos narra minuciosamente la preparación y la constitución del equipo experimental; también nos describe el proceso que sigue para obtener sus datos, proceso que nos explica, realizó más de cien veces realizando conjuntamente, variaciones controladas del fenómeno. Podemos observar la importancia que Galileo confería a la exactitud experimental, ya que sus experimentos son muestra de un gran rigor científico, rigor del que carecía, hasta ese momento, la experimentación científica.

Más adelante, Galileo nos explica con gran detalle, el proceso mediante el cual hace las mediciones del tiempo:

*“Para la medida del tiempo, teníamos un gran cubo de agua puesto en alto, el que por una finísima espita que tenia soldada en el fondo derramaba un hilillo de agua que íbamos recogiendo en un vasito, durante todo el tiempo que la bola descendía por el canal o por alguna de sus partes. Las pequeñas cantidades de agua, recogidas de este modo, eran pesadas de tiempo en tiempo con una sensibilísima balanza, de modo que las diferencias y las proporciones de sus pesos, nos daban las diferencias y las proporciones de los tiempos [...].”<sup>26</sup>*

Para Koyré, la meticulosidad y la exactitud que se describe en estos pasajes, es muestra evidente de que estos experimentos no pudieron ser realizados con los recursos con los que contaba Galileo.

---

<sup>25</sup> Galilei, Galileo. (2003), “Diálogos Acerca de Dos Nuevas Ciencias”. Pp.241. Ed. Losada. Argentina.

<sup>26</sup> *Ibid.* pp. 241

Otro de los experimentos que a juicio de Koyré nunca fueron realizados, es el siguiente:

*“Salviati: [...] En realidad, se observa, entre el aire y el agua, un gran desacuerdo, cosa que he constatado a través de otra experiencia. Se trata de lo siguiente: si lleno de agua un globo de cristal en el que se ha hecho un agujero tan pequeño como el grosor de una paja, y si, una vez lleno, lo vuelco con el agujero hacia abajo, el agua, a pesar de su peso y prontitud para descender en el aire, y el aire, igualmente dispuesto a elevarse en el agua dada su extrema ligereza, no se ponen de acuerdo, la una para caer, saliendo por el orificio, y el otro para subir, entrando por el mismo, por el contrario, permanecen, más bien, los dos hostiles y desconfiados. Si presento, por el contrario, a aquel orificio un vaso con vino tinto, que es en una medida casi insensible más ligero que el agua, lo vemos inmediatamente elevarse lentamente a través del agua en forma de trazos rojizos, mientras que el agua, con la misma lentitud, descenderá por el vino sin mezclarse hasta que el globo esté completamente lleno de vino, por lo que el agua caerá toda al fondo del vaso colocado debajo [...].”<sup>27</sup>*

Para Koyré el experimento descrito es, evidentemente, un experimento pensado (de los que hablaremos más adelante), ya que el resultado que se describe en el mismo, pareciera ser erróneo; Koyré argumenta que si dicho experimento se repitiera tal como es descrito, el resultado observado sería claramente distinto; cuando se dé el intercambio de los fluidos a través del orificio, lo que aparecerá no será un movimiento independiente de cada uno, sino una mezcla. Este inconveniente es rectificado por Koyré exponiendo una versión modificada del experimento. La única explicación plausible para Koyré de este error tendría que deberse a que Galileo nunca hizo el experimento en la realidad, sino que más bien lo reconstruyó en su mente y se lo expone al lector como una demostración que sirve a sus propósitos.

Los asertos hechos por Koyré en cuanto a este experimento, son fuertemente discutidos por Maclachlan en su trabajo “A test of an Imaginary Experiment of Galileo´s”<sup>28</sup>; trabajo en el cual se repite el citado experimento de Galileo, tratando de recrear con la mayor exactitud posible las condiciones que son descritas en él.

---

<sup>27</sup> Galilei, Galileo. (2003), “Diálogos Acerca de Dos Nuevas Ciencias”. Pp.115. Ed. Losada. Argentina.

<sup>28</sup> Maclachlan, J. “A test of an imaginary experiment of Galileo´s”. Isis, Septiembre 1973, Vol. 64, No. 223

El resultado al que llega Maclachlan es completamente coherente con el descrito por Galileo en el texto del Discorsi, probando así, que dicho experimento bien pudo ser realizado por Galileo con los recursos con los que contaba.

De esta misma manera, los trabajos de Stillman Drake se enfocan en reivindicar la veracidad de los experimentos de Galileo. En su trabajo “Galileo’s experimental confirmation of horizontal inertia: unpublished manuscripts”<sup>29</sup>; Drake expone, mediante el análisis de manuscritos inéditos encontrados en la Biblioteca Nacional de Florencia, el verdadero carácter experimental de Galileo. Dichos manuscritos están formados por un conjunto de notas del científico italiano donde se hace la descripción de determinados experimentos y contienen los datos numéricos obtenidos de estos, así como varios diagramas concernientes a estos. Estos manuscritos datan del año de 1608 y son, para Drake, prueba fehaciente de que Galileo en efecto realizó la mayoría de los experimentos que describe.

Si bien tenemos pruebas de que Galileo realizaba la mayoría de los experimentos que describe en el Discorsi, también se describen a lo largo del libro, algunos experimentos, que denominaremos “imaginados”. Dichos experimentos son descritos por Galileo con la misma minuciosidad que los experimentos reales, pero existen argumentos que nos indican que no fueron realizados por él; la mayoría de las veces por carencias de orden técnico.

Podemos mostrar dos experimentos de este tipo que resultan un excelente ejemplo del carácter experimental de Galileo. A continuación citamos el primero de estos ejemplos:

*“Salviati: [...] Suspéndanse de dos hilos de igual longitud que sea de 4 a 5 brazas, dos bolas de plomo iguales, y sujetos en alto los dos hilos, desvíense ambas bolas de la posición vertical; pero una aléjase 80 grados o mas, y la otra 4 o 5; de modo que, puestas en libertad, una descienda, y pasando mas allá de la vertical, describa grandes arcos de 160, 150, 140 grados, etcétera, disminuyéndolos poco a poco; pero la otra, partiendo libremente, recorra pequeños arcos de 10, 8, 6, etc. grados, disminuyéndolos también ella poco a poco. En primer lugar, digo que en tanto tiempo recorrerá la primera sus 180 grados, como la otra recorrerá los 10 suyos. De donde resulta evidente que la velocidad*

---

<sup>29</sup> Drake, Stillman. “Galileo’s experimental confirmation of horizontal inertia: unpublished manuscripts”. Isis, Septiembre 1973, Vol. 64, No. 223

de la primera bola será 16 y 18 veces mayor que la velocidad de la segunda; de modo que si la velocidad mayor debiera recibir de parte del aire más impedimento que la menor, menos frecuentes deberían ser las oscilaciones en los grandes arcos [...], que en los muy pequeños [...]; pero esto repugna a la experiencia; por que si dos compañeros se ponen a contar las oscilaciones, uno las grandes y otro las pequeñas, verán que enumeran no sólo decenas, sino también centenares, sin discordar en una sola, ni siquiera en un solo punto [...].”<sup>30</sup>

La isocronía de las oscilaciones que aquí pretende Galileo, es por decir lo menos, impresionante. Si tomamos en cuenta que el periodo de oscilación de un péndulo depende del seno del ángulo<sup>31</sup>, nos daremos cuenta de que tal exactitud es exagerada. Para Taylor, la explicación de esta singularidad estriba en el hecho de que tal demostración experimental fue buscada después de tener su teoría, y en realidad, lo único que trataba era de apoyar su idea de que la resistencia del aire no debía afectar el movimiento de los proyectiles de una manera sensible.

Otro experimento que se describe en los Discorsi y que utilizaremos para ejemplificar nuestro punto es el célebre experimento que Galileo propone para medir la velocidad de la luz.

*“Salviati: La inconsecuencia de estas y otras observaciones semejantes, me hizo pensar una vez en el modo de poder comprobar sin error, si la iluminación o sea la propagación de la luz, es verdaderamente instantánea [...]. El experimento que se me ocurrió, fue el siguiente. Sean dos individuos, cada uno de los cuales pone una luz dentro de una linterna u otro receptáculo, de modo que, con la interposición de la mano puedan ir tapándola y cubriéndola a la vista del compañero. Colóquense uno frente a otro a pocos codos de distancia y vayan adiestrándose en descubrir y ocultar su luz a la vista del compañero, de modo que, cuando uno vea la luz del otro, descubra inmediatamente la suya. Esta correspondencia, después de algunas respuestas intercambiadas de uno y otro lado, quedará tan ajustada, que al acto de descubrir del uno, corresponderá inmediatamente, sin error sensible, el*

<sup>30</sup> Galilei, Galileo. (2003), “Diálogos Acerca de Dos Nuevas Ciencias”. Pp. 121. Ed. Losada. Argentina.

<sup>31</sup> La expresión para las oscilaciones de un péndulo restringido a oscilaciones pequeñas esta dada por:

$$T \approx 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \text{ De la misma forma, la expresión para oscilaciones mayores es: } T = 4 \sqrt{\frac{l}{g}} K\left(\text{Sen} \frac{\varphi_0}{2}\right).$$

*acto de descubrir del otro. Una vez conseguido el ajuste en pequeñísimas distancias, pónganse los compañeros, con sus luces, a dos o tres millas de distancia, y volviendo a repetir de noche el experimento, observen atentamente si las respuestas a sus actos recíprocos de descubrir y ocultar la luz, se verifican por el mismo tenor de las que se hacían desde más cerca; si se verifican así, podremos concluir con bastante seguridad, que la propagación de la luz es instantánea; porque si necesitare tiempo, en una distancia de tres millas, que suponen seis, para ir una y venir la otra, la demora deberá ser fácilmente observable. [...].”<sup>32</sup>*

Desde el principio podemos observar las dificultades que supone la realización de un experimento como el arriba descrito, dificultades que no sabemos si Galileo haya tenido en cuenta y por consiguiente si alguna vez trató de realizarlo, a fin de cuentas, dificultades que no hubiesen ser podido bien salvadas por él. Más adelante, al ser cuestionado por Simplicio acerca de la validez de este experimento, Salviati le responde:

*“Salviati: Ciertamente no he realizado el experimento sino en pequeñas distancias, o sea de menos de una milla, y no he podido tener la seguridad de si es instantánea la aparición de la luz opuesta; pero si no es instantánea, por lo menos es velocísima [...].”<sup>33</sup>*

Por que catalogamos este experimento como imaginario y no lo hemos postulado como un experimento pensado? La razón radica en la respuesta misma que Galileo nos da. Como veremos más adelante, una de las características más importantes de los experimentos pensados de Galileo, es que dichos experimentos son formulados expresamente para demostrar algún punto de la teoría, lo cual conlleva que dichos experimentos sean propensos de obtener conclusiones específicas de ellos, cuestión que no pasa en el experimento enunciado arriba, en el cual Salviati admite haber realizado el experimento en condiciones restringidas (no ideales), y habiendo obtenido un resultado para dichas condiciones, lo rechaza para sostener su hipótesis inicial, es decir, descarta

---

<sup>32</sup> Galilei, Galileo. (2003), “Diálogos Acerca de Dos Nuevas Ciencias”. Pp. 74. Ed. Losada. Argentina.

<sup>33</sup> *Ibid* pp. 75

por completo la conclusión obtenida del experimento alegando que en otras condiciones éste comprobaría su hipótesis inicial.

Para ejemplificar lo anterior, y al mismo tiempo, para cerrar con la discusión de los experimentos pensados, citaremos uno de los más célebres experimentos pensados que se exponen en el Discorsi.

*“Salviati: Sin ninguna otra experiencia, con sólo una breve y concluyente demostración, podríamos claramente probar no ser verdad que un móvil más pesado, se mueva con más velocidad que otro menos pesado, siendo los móviles de la misma materia y tales como quiere Aristóteles [...].*

*Salviati: Por consiguiente, si tuviésemos dos móviles de velocidades naturales diferentes, sería de esperar que, uniendo el más tardo con el más veloz, éste sería en parte retardado por el más tardo, y el más tardo en parte acelerado por el más veloz [...].*

*Salviati: Pero si esto es así, y es también verdad que una piedra grande se mueve, supongamos, con ocho grados de velocidad, y una menor con cuatro, al unir las dos, el sistema compuesto tendrá que moverse con velocidad menor de ocho grados; sin embargo las dos piedras unidas, hacen una piedra mayor que la primera, que se movía con ocho grados de velocidad; luego esta más grande se mueve con menos velocidad que la menor: lo que está contra de tu suposición.”<sup>34</sup>*

En dicho experimento se cumple, como se puede observar, la característica mencionada con anterioridad. Este experimento es una construcción mental formulada específicamente para anular la hipótesis aristotélica de que dos cuerpos de diferente peso caerán con velocidades distintas, asimismo, podemos observar que Galileo extrae una conclusión precisa a través de un razonamiento lógico; claramente podemos ver que realizar un experimento de esta naturaleza sería fútil, por lo tanto, la riqueza de este experimento se encuentra en la solución lógica de éste.

Galileo no sería el último en utilizar experimentos pensados para exponer algún concepto de una teoría determinada, dichos experimentos también podemos encontrarlos en Newton, Einstein y Heisenberg.

---

<sup>34</sup> Galilei, Galileo. (2003), “Diálogos Acerca de Dos Nuevas Ciencias”. Pp. 97. Ed. Losada. Argentina.

Podemos ver que la experimentación en Galileo, va de la mano con la matemática, creando una unidad que se retroalimenta internamente, donde un aspecto permite verificar, y en todo caso modificar el otro; no nos confundamos, una inconsistencia en alguno de los aspectos no hará que se cambie de método, al contrario, lo que podría modificarse son las hipótesis que se utilizan en estos métodos.

#### **4. La comunicación de las ideas**

En el “Dialogo sobre los dos máximos sistemas del mundo”, Galileo apela a una técnica singular para extender su defensa del copernicanismo, crea a tres personajes llamados Salviati, Simplicio y Sagredo, a los cuales pone a discutir acerca, justamente, de los sistemas del mundo (al más puro estilo de los “Diálogos” de Platón).

En el Discorsi, Galileo utiliza el mismo recurso que en el Diálogo, pero sólo parcialmente, ya que en esta obra su intención ya no es tanto convencer al público acerca de una idea polémica, más bien en el Discorsi, Galileo quiere exponer una teoría bien estructurada, la cual requiere ya no del convencimiento cualitativo, sino de la certeza cuantitativa, es por eso que en esta obra se acude al recurso de hacer leer a Salviati un escrito de un supuesto “académico”, que en realidad no es otro que el mismo Galileo.

La primera jornada discurre apegada al discurso entre los tres personajes, es a partir de la segunda jornada que Galileo nos muestra la que será su herramienta cotidiana en las jornadas tres y cuatro (que como se dijo antes, contienen los fundamentos de la teoría del movimiento): la demostración; en efecto, la segunda jornada tiene una estructura de proposiciones consecutivas, las cuales se van demostrando una a una, como se menciona en el capítulo de teoría, utilizando los principios de las palancas.

Es en las jornadas tres y cuatro que esta modalidad alcanza su mejor terminada forma<sup>35</sup>. En éstas, Galileo recurre a muchos elementos que nos son naturales en el trabajo científico hoy en día: proposiciones, teoremas, demostraciones

---

<sup>35</sup> Un análisis completo de la estructura de los Discorsi se encontrará en el capítulo dedicado al elemento teórico de Galileo

matemáticas, demostraciones experimentales, corolarios, etc. Los cuales son llevados a cabo (en especial las demostraciones matemáticas), con toda la rigurosidad que requiere el caso.

Este cambio en el discurso, se explica por la diferencia en la finalidad de ambas obras; en tanto que el *Dialogo* es considerada una obra destinada a defender o a “divulgar” el sistema copernicano, el *Discorsi* es una obra con un carácter completamente académico.

En la primera jornada, Galileo defiende la libertad de hacer digresiones<sup>36</sup> y discutir diversos temas, lo cual le abre la puerta a las discusiones de las que ya se ha hablado.

*“Sagredo: Pero, dado que nos reunimos por propia voluntad, sin estar obligados a ningún método rígido y conciso, si las digresiones pueden dar origen al conocimiento de nuevas verdades, ¿En qué nos perjudica el hacer digresiones ahora, para no perder conocimientos que nos brinda esta ocasión? [...] Además, ¿Quién sabe si no podemos así frecuentemente descubrir curiosidades más hermosas que las soluciones primeramente buscadas? [...]”*<sup>37</sup>

Galileo sabe que para sustentar su teoría, sus preceptos básicos deben estar demostrados más allá de toda duda:

*“Salviati: [...] que si no hubiera modo de dilucidarlo y ponerlo más claro que la luz del sol, sería preferible no mencionarlo ni decir de ello una sola palabra. Pero ya que la he dejado escapar de mis labios, conviene que yo no olvide ningún experimento o razón que pueda corroborarla.”*<sup>38</sup>

A este respecto Galileo nos explica la importancia de las demostraciones matemáticas, lo cual pone de relieve lo que se explicó con anterioridad acerca de la valía de éstas para Galileo.

*“Simplicio: Quedo completamente convencido. Y tened por cierto que si yo hubiera de volver a comenzar mis estudios, seguiría el consejo de Platón, y comenzaría*

---

<sup>36</sup> Cuestión con la que, como ya vimos, Descartes estaba en desacuerdo.

<sup>37</sup> Galilei, Galileo. (2003), “Diálogos Acerca de Dos Nuevas Ciencias”. Ed. Losada. Argentina.

<sup>38</sup> *Ibid* pp. 120

*por las matemáticas, que proceden muy escrupulosamente, según veo, y no admiten como cierto nada que no esté concluyentemente demostrado.”<sup>39</sup>*

En resumen, Galileo comprende perfectamente la finalidad de sus obras, y en todo momento les da a éstas el lenguaje que cada una necesita, dependiendo de la circunstancia. En el caso específico del *Discorsi*, Galileo lleva hasta un nivel excepcional, el lenguaje matemático, el cual le sirve no sólo para demostrar, sino también para construir su teoría del movimiento.

---

<sup>39</sup> *Ibid* pp. 128

## Capítulo 4

### La teoría de Galileo en los Discorsi

#### 1. Introducción

Galileo comienza sus estudios de mecánica desde su periodo en Pisa, adquiriendo prontamente influencias de pensadores como Arquímedes y Benedetti, los cuales habrían de marcar la forma en la que el joven Galileo atacaría los distintos problemas de la mecánica, que en su tiempo se consideraban fundamentales, a saber: el problema del movimiento de los cuerpos y el problema de la estructura de la materia.

Las extensas investigaciones sobre mecánica que Galileo realizó durante toda una vida de trabajo, vieron cristalizados sus frutos en la publicación del libro que lleva por título “*Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno a due nuove scienze*” (Discursos y demostraciones matemáticas en torno a dos nuevas ciencias), publicado en 1638 y donde Galileo presenta sus conclusiones acerca de lo que él llama las dos nuevas ciencias: lo que hoy se conoce como ciencia de materiales y la cinemática.

Para cuando Galileo comienza la redacción de su nuevo libro, en 1633, se encuentra en Siena cumpliendo la condena, impuesta por el Santo Oficio, debida a la confrontación que Galileo tuvo con ésta última. Es ahí donde Galileo nos dice: “...compuse un tratado sobre un tema nuevo, lleno de especulaciones curiosas y útiles”.<sup>1</sup>

En este libro (el cual, a partir de este momento llamaremos simplemente *Discorsi*), llaman la atención dos características muy similares a aquellas usadas en su anterior trabajo, el “*Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*” (Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo). La primera de ellas trata de que, de la misma manera que hace en el *Diálogo*, Galileo presenta el texto del *Discorsi* a modo de conversación entre tres personajes (Salviati, Sagredo y Simplicio); la segunda de las similitudes se encuentra en el hecho de que el *Discorsi* también

---

<sup>1</sup> Geymonat L. “Galileo Galilei”. Ed. Península pp.185.

está dividido en jornadas, en las cuales expone por separado los distintos temas que quiere tocar.

Para comprender de mejor manera el aspecto teórico que se presenta en la tradición de investigación del Galileo mecánico, se tiene que examinar a fondo la estructura y el contenido de esta obra tan importante que sentó las bases de lo que hoy se considera la ciencia moderna.

## 2. La estructura del *Discorsi*

Como se mencionó anteriormente el *Discorsi* está dividido en cuatro jornadas, de las cuales las primeras dos cubren el tema de la ciencia de materiales y las dos últimas el tema de la cinemática.

### 2.1 La primera jornada

La jornada primera se titula “En torno a la coherencia de las partes en los cuerpos sólidos”; ésta se encontraba escrita por completo en italiano y se exponía en la forma de un diálogo entre los tres mismos personajes que usara antes en el Diálogo: Salviati, que representa el pensamiento del propio Galileo; Sagredo, que es quien plantea muchos de los cuestionamientos; y Simplicio quien en la mayor parte intenta confrontar a Salviati y conserva una postura más bien conservadora (aristotélica) acerca de los temas de los que se hablan. Son, en cierta medida, las objeciones de Simplicio (i.e. de la física aristotélica), las que Salviati (i.e. Galileo) tiene que vencer para demostrar que sus afirmaciones son correctas.

Al principio de esta jornada, Galileo pareciera enfocarse más en cuestiones de aplicación, que en cuestiones teóricas; como el mismo nos lo dice al principio del texto:

*“Salviati: Extenso campo de investigación ofrece a los entendimientos estudiosos la constante actividad de vuestro famoso arsenal, venecianos,.....”*<sup>2</sup>

Sin embargo, lo que Galileo hace a lo largo de esta jornada, es exponernos (quizá a modo de introducción) muchas de las concepciones fundamentales que él tiene acerca de cuatro temas en concreto: la materia, que incluye el problema del

---

<sup>2</sup> Galilei G. “Diálogos Acerca de Dos Nuevas Ciencias”. Ed. Losada. Argentina. pp. 27. En esta traducción de la obra, se interpreta la palabra en italiano *discorsi* como diálogos, no hay que confundir esta obra con los “Diálogos sobre los dos máximos sistemas del mundo” obra también de Galileo.

continuo y del infinito; la luz, donde aborda la cuestión de su propagación; el movimiento en el vacío, donde examina el problema de la velocidad de cuerpos de diferente peso en caída libre; y finalmente el péndulo, donde aborda sus leyes y algunos problemas relacionados con la isocronía. Es así como esta primera jornada nos proporciona una excelente panorámica de la concepción que Galileo tiene del mundo y de su abierta oposición a la escuela aristotélica.

Al inicio de esta primera jornada, Galileo comienza por desarrollar una teoría acerca de la cohesión de los cuerpos<sup>3</sup>. Esto lo hace, planteando a través de Sagredo, la cuestión de por que la resistencia de los materiales no aumenta proporcionalmente al aumentar su tamaño, lo cual más adelante abre la puerta a una discusión acerca de la resistencia de los estos:

*“Sagredo: Entonces, Salviati, explícame estas dificultades y aclárame estas dudas, si encuentras el modo, porque sospecho que este problema de la resistencia es un campo lleno de hermosas y sutiles ideas, y, si te place que esto sea el tópico de hoy, a mí, y creo que también a Simplicio, nos será muy grato.”*<sup>4</sup>

Para desarrollar su punto, Galileo expone que hay cuerpos (como la madera) que al igual que las cuerdas, están constituidos por filamentos, los cuales le confieren al cuerpo su resistencia; pero así también existen cuerpos para los cuales la explicación de una estructura a base de filamentos internos no es suficiente para demostrar su resistencia, tal sería el caso de un cilindro de metal o de piedra, como nos lo dice el mismo Galileo:

*“Salviati: ...Pero en el cilindro de piedra o de metal, la coherencia (que parece todavía mayor) de sus partes depende de un gluten distinto de los filamentos o fibras; y sin embargo, sometidos a fuerte tensión también ellos se quiebran.”*<sup>5</sup>

Todo el diálogo anterior nos hace ver que la verdadera discusión a la que Galileo quiere llegar, es sobre la causa de la cohesión que entre sí tienen las partes de las que están formadas los cuerpos, es decir, de su estructura interna. En relación a

---

<sup>3</sup> En esta primera parte, Galileo no centra su discusión en la idea de “cuerpo” como conjunto de materia en general, sino que él habla de “materiales” dándole a su discusión un enfoque más práctico.

<sup>4</sup> Galilei, Galileo. (2003), “Diálogos Acerca de Dos Nuevas Ciencias”. Pp. 33. Ed. Losada. Argentina.

<sup>5</sup> *Ibid* pp.34

esto, es el propio Galileo quien nos dice de antemano las conclusiones a las que ha llegado para aquellos sólidos que no están constituidos de filamentos internos: *“Salviati: [...] la coherencia de sus partes parece consistir en otras causas, que a mi juicio se reducen a dos temas; uno de ellos es la tan pregonada repugnancia que la naturaleza tiene a admitir el vacío<sup>6</sup>; por el otro, es necesario (no siendo suficiente el del vacío) introducir algún gluten, sustancia viscosa o cola que una tenazmente las partículas de que estos cuerpos se componen...”*<sup>7</sup>

Para Galileo, el horror que la naturaleza tiene a admitir el vacío, parece explicar, sólo en parte, la cohesión de los sólidos, ya que para él (como explica más adelante), la fuerza que puede ejercer este “*Horror Vacui*”, a pesar de ser considerable (y así nos lo plantea en las siguientes páginas con diversas demostraciones acerca de lo poderosa que puede llegar a ser la fuerza ejercida por esta repugnancia al vacío) no es suficiente para mantener unidas las partes de un cuerpo, es más, a lo largo de las siguientes páginas, pone en boca de Sagredo diversas objeciones a esta afirmación. Según Galileo también debe de existir una sustancia dentro del mismo cuerpo que será la encargada de aportar la mayor parte de la fuerza de cohesión en el cuerpo.

Más adelante en la misma jornada, Galileo comienza a establecer su postura atomista, a través de diferentes argumentos geométricos (como es costumbre en Galileo), hasta que por fin pone su postura en boca de Salviati y la confirma Simplicio:

*“Salviati: [...] Y de este modo ni repugna el que se extienda v.g. una pequeña bolita de oro en un espacio grandísimo, sin admitir espacios extensos vacíos, siempre que admitamos que el oro está compuesto de infinitos indivisibles.”*

*“Simplicio: Paréceme que sigues por el camino de aquellos vacíos, que cierto antiguo filósofo propugnaba.”*<sup>8</sup>

---

<sup>6</sup> Es interesante notar que en este punto, Galileo no puede deshacerse del *horror vacui* aristotélico a pesar de que a él mismo no le satisface, ya que él sabe que aun no se encuentra en posesión de una teoría mejor que le permita subsanar esto. Más adelante se verá en su discusión acerca del movimiento en el vacío, que Galileo desecha la hipótesis del *horror vacui*.

<sup>7</sup> Galilei, Galileo. (2003), “Diálogos Acerca de Dos Nuevas Ciencias”. Pp. 38. Ed. Losada. Argentina.

<sup>8</sup> *Ibid* pp.54.

El antiguo filósofo al que Simplicio hace referencia en la cita anterior no es otro que el mismo Demócrito, cuyo atomismo, Galileo retoma pero ya no como explicación metafísica, sino que la transforma en una hipótesis racional, de la cual se sirve para dar explicación práctica al fenómeno que está tratando. De esta manera Galileo hace suyo el atomismo, elevando su carácter de suposición metafísica a hipótesis científica.

Esta posición atomista, se hace cada vez más evidente a lo largo del texto, donde la refuerza mediante diferentes argumentos, los cuales le van permitiendo a Galileo aseverar, sin duda alguna, la naturaleza atomista de la materia:

*“Salviati: ...Pero haciendo uso del método que yo propongo, para separar y resolver toda la infinitud de un solo golpe, me parece que ellos deberían conformarse y admitir que el continuo está compuesto de átomos absolutamente indivisibles, máxime siendo éste, quizás de entre todos, el camino más apto para salir de intrincadísimos laberintos, tales como el ya mencionado de la cohesión de las partes de los sólidos y el comprender el problema de la rarefacción y de la condensación , sin incurrir, por causa de la primera en el inconveniente de tener que admitir espacios vacíos, y por causa de la segunda, la penetrabilidad de los cuerpos: dos inconvenientes que, a mi parecer, pueden evitarse perfectamente con sólo admitir la mencionada composición por medio de indivisibles.”<sup>9</sup>*

Esta cita (aunque larga) nos muestra perfectamente la verdadera mentalidad de Galileo con respecto a la estructura interna de los cuerpos y su posición con relación a la tesis aristotélica del vacío.

Galileo, quiere defender su hipótesis atomista, para esto se aleja un poco del tema concreto que quería exponer (la resistencia de los materiales) y comienza una disertación acerca del continuo, introduciendo en ésta, las nociones que él tiene acerca de los conjuntos infinitos, caracterizándolos, y demostrando asimismo que no se pueden aplicar cuestiones como la igualdad, o la comparación entre dos conjuntos infinitos; como lo demuestra la siguiente aseveración de Salviati:

*“Salviati: [...] que los atributos de igual, mayor y menor, no tienen lugar en los infinitos, sino solo en las cantidades limitadas. Por ello cuando Simplicio me*

---

<sup>9</sup> *Ibid* pp.80

*propone varias líneas desiguales, y me pregunta como puede ser que no haya en las mayores más puntos que en la menores, yo le respondo que no hay más, ni menos, ni tantos, sino infinitos en cada una..”<sup>10</sup>*

Galileo hace extensa su caracterización de los infinitos, y establece en su teoría que las partes que forman a los cuerpos son de hecho infinitas e “inextensas”, y es así como Galileo se acerca a la noción de infinitésimo geométrico. Dicha concepción de los infinitésimos geométricos, es retomada después, en la jornada tercera, donde Galileo utiliza una concepción primitiva de desplazamientos infinitesimales, para explicar los aumentos de velocidad que sufre un móvil que se mueve con aceleración uniforme.

Más adelante, Galileo expone sus planteamientos en torno a la velocidad de la luz, en donde confronta el pensamiento aristotélico, el cual establece que la propagación de la luz es instantánea; es así como pone esta objeción en boca de Simplicio:

*“Simplicio: La experiencia cotidiana nos muestra que la propagación de la luz es instantánea; pues cuando a lo lejos dispara un cañón, el resplandor del fogonazo llega a nuestros ojos sin interposición de tiempo, más el estampido lo oímos sólo después de un notable intervalo de tiempo.”<sup>11</sup>*

Sin embargo a Galileo no le parece correcto este razonamiento, el cree que la luz se propaga con una velocidad definida (es decir finita), e incluso, nos describe un experimento con el cual pretende medir esta velocidad. En este punto, Galileo no puede concluir, con certeza experimental, su aseveración acerca de la finitud de la velocidad de la luz, ya que él mismo acepta que su experimento no le ha dado un resultado concluyente debido a las limitaciones técnicas que dicha empresa supone, aun así él se mantiene firme en su aseveración.

En las siguientes páginas, Galileo comienza una discusión en la cual nos expone algunos de sus planteamientos acerca del movimiento; dicha discusión gira en torno a dos cuestiones fundamentales: la posibilidad del movimiento en el vacío, y el hecho que los cuerpos de diferente peso caen con la misma velocidad. Aquí

---

<sup>10</sup> *Ibid* pp.62

<sup>11</sup> *Ibid* pp.73

Galileo ataca directamente la física Aristotélica, y de entrada pone en boca de Simplicio los planteamientos clásicos que él se dispone a debatir:

*“Simplicio: No se puede dudar que un mismo móvil en un mismo medio tiene establecida por naturaleza una determinada velocidad, que no se puede acrecer sino confiriéndole nuevo impulso, ni disminuir sino con algún impedimento que la retarde.”*<sup>12</sup>

Y más adelante nos dice:

*“Simplicio: [...] Yo no creeré nunca que en el mismo vacío, si por ventura en él fuera posible el movimiento, se moverían con igual velocidad un trozo de plomo y un copo de lana.”*<sup>13</sup>

Es en oposición a las afirmaciones anteriores, que Galileo (a través de Salviati) desarrolla el concepto de que en el vacío, todos los cuerpos caen con la misma velocidad, y de que en condiciones naturales, la diferencia de velocidad entre dos cuerpos de diferente peso se debe únicamente a accidentes exteriores y en particular a la resistencia del medio en el cual se efectúa el movimiento.

El último tema que Galileo toca en esta primera jornada, gira alrededor de la isocronía del péndulo, la cual comienza con Sagredo planteando la siguiente cuestión:

*“Sagredo: ... Otra [cuestión] es acerca de las oscilaciones de los péndulos, y tiene dos puntos: primero, si todas las oscilaciones, tanto las grandes, como las medianas, como las pequeñas se efectúan verdadera y exactamente en tiempos iguales; segundo, cuales son las proporciones de los tiempos en móviles suspendidos de hilos desiguales, de los tiempos, digo, de sus oscilaciones.”*<sup>14</sup>

En esta última parte, Galileo nos explica que el periodo de un péndulo está determinado por la longitud de la cuerda que lo sostiene, y no del peso que sostiene; de este modo, dos péndulos con diferente peso, pero igual longitud tendrán el mismo periodo. Aun más, Galileo nos dice que cada péndulo tiene una oscilación que le es “natural”:

---

<sup>12</sup> *Ibid* pp.97

<sup>13</sup> *Ibid* pp.108

<sup>14</sup> *Ibid* pp.130

*“Salviati: En primer lugar es necesario advertir que cada péndulo tiene el tiempo de sus oscilaciones de tal modo determinado y prefijado, que resultaría imposible hacerlo mover con un periodo que no fuera su único periodo natural.”<sup>15</sup>*

Esta discusión le da pie a Galileo para concluir esta jornada con algunos argumentos acerca de diversos fenómenos acústicos, donde especial interés tienen sus explicaciones sobre la resonancia y los intervalos musicales.

## **2.2 La Segunda jornada**

Desde el fin de la primera jornada, Galileo admite haberse desviado del tema principal que deseaba desarrollar en ésta<sup>16</sup>, y nos adelanta que el tema de la resistencia de los cuerpos se desarrollará en extenso en la jornada segunda.

La segunda jornada tiene por título “En torno a la resistencia de los sólidos a la fractura” y como su nombre lo indica, su contenido tiene que ver con la resistencia que presentan los materiales ante esfuerzos externos.

A diferencia de la jornada primera, en ésta, Galileo no se aparta del tema que le atañe y ataca el problema de la resistencia desde un punto de vista cuantitativo, renunciando a seguir disertando sobre la causa de la cohesión dentro de los materiales (sus puntos de vista a este respecto ya los ha dejado claros en la primera jornada) y limitándose a describirla, reduciéndola a combinaciones de palancas, sus proporciones y sus estados de equilibrio. Se podría decir que Galileo deja en manos de la estática<sup>17</sup> el desarrollo de esta segunda jornada.

Quizá, el aspecto teórico más importante que vale la pena señalar de esta segunda jornada, reside en el hecho de que, desde el principio de ésta, Galileo refuerza sus influencias arquimedianas y las contrapone a la escuela aristotélica, como se puede apreciar en este diálogo entre Salviati y Simplicio (acerca de las palancas):

*“Simplicio: Aristóteles, antes que ningún otro, lo demostró en su Mecánica.*

---

<sup>15</sup> *Ibid* pp.136

<sup>16</sup> A mi parecer, es intención implícita de Galileo utilizar esta jornada a modo de introducción, para exponernos los temas que anteriormente se explicaron, y que fundamentan la visión galileana del nuevo sistema.

<sup>17</sup> Disciplina que es anterior a Galileo y que era conocida desde Aristóteles y Arquímedes

*Salviati: Admito que le concedamos la primacía en el tiempo, pero en cuanto al rigor de la demostración pareceme que Arquímedes se le antepone en mucho [...]”<sup>18</sup>*

La jornada segunda termina de manera abrupta con un estudio acerca de la resistencia de los cilindros, sin conclusiones o comentarios finales por parte de Galileo, sólo una demostración sobre la proporción de las resistencias entre una caña y un cilindro cierra la jornada. A partir de la siguiente jornada se inicia la discusión propia acerca del movimiento. Es en estas dos jornadas que Galileo expondrá su famosa cinemática.

### **2.3 La tercera jornada**

La tercera jornada lleva como título “En torno de los movimientos locales”. A partir de aquí, Galileo comienza el estudio de la cinemática, comenzando con el estudio de las leyes del movimiento uniforme y el movimiento uniformemente acelerado.

Esta jornada tercera (al igual que la cuarta) difiere en mucho de las jornadas primera y segunda, no sólo por el contenido que en ésta se trata, sino también por la estructura de ésta; ya que el recurso de diálogo entre los tres personajes anteriores, se ve un tanto desplazado por el recurso de hacer leer a Salviati un texto escrito por aquél al que ellos llaman el “académico” y que no es otro que el mismo Galileo; tanto Sagredo como Simplicio interrumpen tan sólo ocasionalmente la exposición de Salviati para hacer (o pedir) alguna aclaración. Adicionalmente, hay que mencionar que a partir de aquí, y debido a la estructura (en forma de texto) que les da Galileo, la exposición de las últimas dos jornadas se basa en elementos como definiciones, axiomas, teoremas, proposiciones, escolios y por supuesto demostraciones.

La primera definición que Galileo nos presenta es su definición del movimiento uniforme, al final de la cual nos hace la advertencia de que su definición difiere de la antigua, en cuanto que la suya contempla tiempos “cualesquiera” iguales. Dicha definición se presenta a continuación:

---

<sup>18</sup> *Ibid* pp.158

*“Definición: Entiendo por movimiento uniforme aquel cuyos espacios, recorridos por un móvil en cualesquiera tiempos iguales, son entre sí iguales.”*<sup>19</sup>

Ésta es la única definición que Galileo nos da en esta sección del movimiento uniforme, ya que al parecer no hace falta ninguna otra y en este punto se encuentra listo para plantearnos los cuatro axiomas y los seis teoremas que conforman el apartado de movimiento uniforme. En esta sección, a pesar de su pequeño tamaño y aparente sencillez, Galileo nos expone las bases necesarias para poder comprender el apartado en el que más adelante se encargará del movimiento acelerado, asimismo esta sección le sirve para exponer el método que utilizará de aquí en adelante.

A partir de esta sección podemos percibir la diferencia radical con las dos jornadas anteriores, en las cuales no era necesaria una base axiomática.

Después de los cuatro axiomas<sup>20</sup>, Galileo nos presenta los seis primeros teoremas concernientes al movimiento local, los cuales analizaremos a continuación.

*“Teorema I: Si un móvil, que marcha con movimiento uniforme y con velocidad constante, recorre dos espacios, los tiempos de los trayectos son entre sí como los espacios recorridos”*<sup>21</sup>.

Es decir: Sea  $v = \text{cte}$  la velocidad del móvil, y sean  $d_1$  y  $d_2$  las distancias recorridas por el móvil en los tiempos  $t_1$  y  $t_2$  respectivamente. De lo anterior obtenemos las relaciones:

$$d_1 = (v) (t_1) \quad \text{y} \quad d_2 = (v) (t_2) \quad \rightarrow \quad d_1/d_2 = (v) (t_1) / (v) (t_2)$$

y por lo tanto:  $d_1/d_2 = t_1/t_2$

*“Teorema II: Si un móvil recorre dos espacios en tiempos iguales, esos espacios serán entre sí como las velocidades. Y si los espacios son como las velocidades, los tiempos serán iguales.”*<sup>22</sup>

---

<sup>19</sup> *Ibid* pp.214

<sup>20</sup> Dichos axiomas no se mencionan para dar paso a la explicación de los teoremas de movimiento, los cuales consideramos de mayor importancia.

<sup>21</sup> *Ibid* pp.215-220

<sup>22</sup> *Ibid* pp. 217

Tomemos dos espacios  $d_1$  y  $d_2$ , las velocidades con las que el móvil recorre estos espacios serán, respectivamente,  $v_1$  y  $v_2$ , y el tiempo en el que los recorre serán  $t_1 = t_2 = t$ . De lo anterior podemos obtener las relaciones:

$$d_1 = (v_1) (t) , \quad d_2 = (v_2) (t_2)$$

$$\rightarrow d_1/d_2 = (v_1) (t) / (v_2) (t) \quad \text{por lo tanto} \quad d_1/d_2 = (v_1) / (v_2)$$

*“Teorema III: Los tiempos de dos móviles que recorren un mismo espacio con velocidades desiguales, están en razón inversa con las velocidades.”<sup>23</sup>*

Sean dos móviles que recorren la distancia  $d$ ; el primero lo recorre en un tiempo  $t_1$  con una velocidad  $v_1$ , mientras que el segundo lo recorre en un tiempo  $t_2$  con una velocidad  $v_2$ , por lo tanto:

$$d = (v_1) (t_1) \text{ y } d = (v_2) (t_2) \text{ de donde obtenemos:}$$

$$(v_1) (t_1) = (v_2) (t_2) \rightarrow t_1/t_2 = v_2/v_1$$

*“Teorema IV: Si dos móviles marchan con movimiento uniforme, pero con velocidades desiguales, los espacios recorridos por los mismos en tiempos desiguales tendrán una razón compuesta de la razón de las velocidades y de la razón de los tiempos.”<sup>24</sup>*

Tenemos dos móviles, el primero recorre una distancia  $d_1$ , en un tiempo  $t_1$ , a una velocidad  $v_1$ , por lo tanto podemos escribir, para este primer móvil,  $d_1=(v_1)(t_1)$ . El segundo móvil recorre una distancia  $d_2$ , en un tiempo  $t_2$ , a una velocidad  $v_2$ , y podemos escribir para este,  $d_2=(v_2)(t_2)$ . De estas dos expresiones obtenemos:

$$d_1/d_2 = (v_1/v_2) (t_1/t_2)$$

*“Teorema V: Si dos móviles marchan con movimiento uniforme, pero son desiguales las velocidades y desiguales los espacios recorridos, la razón de los tiempos será igual a la razón de los espacios por la razón inversa de las velocidades.”<sup>25</sup>*

De la misma manera que en el teorema anterior podemos escribir para cada uno de los móviles:  $d_1= (v_1) (t_1)$  y  $d_2 = (v_2) (t_2)$  de donde obtenemos:

$$t_1 = d_1/v_1 , \quad t_2 = d_2/v_2$$

$$\rightarrow t_1/t_2 = (d_1/d_2) (v_2/v_1)$$

---

<sup>23</sup> *Ibid* pp. 217

<sup>24</sup> *Ibid* pp. 218

<sup>25</sup> *Ibid* pp. 219

*“Teorema VI: Si dos móviles marchan con movimiento uniforme, la razón de sus velocidades será igual a la razón compuesta de la razón de los espacios recorridos y de la razón de los tiempos tomados inversamente.”<sup>26</sup>*

De nuevo establecemos para cada uno de los móviles:

$$d_1 = (v_1) (t_1) , d_2 = (v_2) (t_2)$$

$$v_1 = d_1/t_1 , v_2 = d_2/t_2$$

$$\rightarrow v_1/v_2 = (d_1/d_2) (t_2/t_1)$$

Una vez que Galileo nos ha expuesto por completo su teoría sobre el movimiento uniforme, pasa a introducirnos lo que será su siguiente tema a tratar: el movimiento naturalmente acelerado. Al iniciar esta sección, Galileo nos explica su posición en cuanto a la caída de los graves; para él, el descenso de los graves no se trata de cualquier tipo de movimiento acelerado, se trata, en efecto, de un movimiento uniformemente acelerado, de esta manera, Galileo quiere establecer la correlación entre la naturaleza y su teoría del movimiento, es así como él nos da la siguiente definición.

*“Llamo movimiento igualmente o uniformemente acelerado aquél que, partiendo del reposo, va adquiriendo incrementos iguales de velocidad durante intervalos iguales de tiempo.”<sup>27</sup>*

Las siguientes páginas, son de suma importancia para entender el pensamiento teórico del Galileo mecánico en cuanto al movimiento de los graves, y es por eso que nos detendremos a revisarlas con más detalle mas adelante, por ahora continuaremos con la exposición de la estructura teórica que nos presenta el Discorsi.

A la discusión sobre la definición de movimiento uniformemente acelerado, le sigue una aseveración que es de fundamental importancia para los teoremas que más adelante desarrollará Galileo. Dicha proposición tiene que ver con la relación entre la velocidad que desarrolla un móvil que desciende por distintos planos inclinados y la que desarrolla en caída libre.

---

<sup>26</sup> *Ibid* pp. 220

<sup>27</sup> *Ibid* pp. 223

*“Acepto que las velocidades de un mismo móvil, adquiridas sobre diversos planos inclinados, son iguales, cuando las alturas de esos mismos planos son iguales.”*<sup>28</sup>

Más adelante, en el escolio, nos reafirma esta proposición, y aquí podemos apreciar mejor cual es la importancia para Galileo de los planos inclinados.

*“En los planos inclinados, los grados de aceleración aumentan en la misma razón que en la caída vertical, es decir, en proporción al incremento del tiempo, o si se prefiere a la sucesión natural de los números.”*<sup>29</sup>

Una vez aclarado lo anterior, Galileo nos presenta veintidós teoremas en los cuales expone algunas de las consideraciones más importantes acerca del estudio del movimiento acelerado, de los cuales, sólo los primeros dos hacen referencia explícita al movimiento en caída libre, mientras que los restantes se adentran en el estudio del movimiento acelerado a lo largo de planos inclinados<sup>30</sup>. A continuación comentaremos los que a nuestro parecer son los más importantes e ilustran mejor el espíritu teórico de Galileo:

*“Teorema I: El tiempo, en que un móvil recorre un espacio con movimiento uniformemente acelerado a partir del reposo, es igual al tiempo en que el mismo móvil recorrería ese mismo espacio con movimiento uniforme, cuya velocidad fuera subdupla de la mayor y última velocidad del anterior movimiento uniformemente acelerado.”*<sup>31</sup>

Para entender con claridad lo que quiere decir el teorema anterior, tomemos un móvil que parte del reposo; después de un tiempo  $t_a$  alcanzará una velocidad final  $v_f$  y recorrerá una distancia  $d_a$ . Por otro lado, consideremos un móvil que se mueve con movimiento uniforme y que recorre una distancia  $d_u$  en un tiempo  $t_u$  a una velocidad constante  $v_u$ . Para este movimiento uniforme se cumple que:

$$v_u = d_u / t_u$$

De acuerdo a este teorema, la relación que existe entre las velocidades de estos dos movimientos, si tomamos el mismo intervalo de tiempo, y la misma distancia

---

<sup>28</sup> *Ibid* pp.231

<sup>29</sup> *Ibid* pp.243

<sup>30</sup> Uno de los logros de Galileo, es asimismo, demostrar que el movimiento acelerado que se da en un plano inclinado es, de hecho, un movimiento uniformemente acelerado, el mismo tipo de movimiento que se da en la caída libre.

<sup>31</sup> *Ibid* pp.235

recorrida, tendría que ser:  $v_u = v_f / 2$ ; de este modo podemos sustituir  $v_u$  en la expresión correspondiente al movimiento uniforme y tendríamos:

$$v_f / 2 = d / t$$

(Considerando que:  $d_u = d_a = d$  y  $t_u = t_a = t$ )

De donde podemos obtener la expresión:

$$d = (v_f / 2) t$$

Si ahora dividimos la distancia  $d$  en dos intervalos,  $d_0$  y  $d_1$ , los cuales serán recorridos en tiempos  $t_1$  y  $t_2$  respectivamente, podemos escribir para el primero de ellos:

$$d_0 = (1/2) (v_0) (t_0) = 1/2 v_0 (t - t_1)$$

$$\rightarrow d_1 = d - d_0 = 1/2 [(v - v_0) t + v_0 t_1]$$

Asimismo sabemos que:

$$v_f / t = v_0 / t_0 = (v - v_0) / (t - t_0) = (v - v_0) / t_1$$

$$\rightarrow (v - v_0) t = (v) (t_1)$$

Sustituyendo en la expresión para  $d_1$  obtenemos:

$$d_1 = [(v + v_0) / 2] [t_1]$$

Si hacemos  $v = v_0 + (a) (t_1)$  siendo  $a$  la aceleración

$$\rightarrow d_1 = (v_0) (t_1) + (1/2) (a) (t_1)^2$$

Expresión que podemos reconocer como la descripción actual del movimiento uniformemente acelerado.

*“Teorema II. Si un móvil con movimiento uniformemente acelerado desciende desde el reposo, los espacios recorridos por él en tiempos cualesquiera, están entre sí como la razón al cuadrado de los mismos tiempos, es decir como los cuadrados de esos tiempos.”<sup>32</sup>*

Para entender mejor el teorema anterior, tomemos las distancias  $d_1$  y  $d_2$ , las cuales han sido recorridas en los tiempos  $t_1$  y  $t_2$  partiendo desde el reposo, sean asimismo, las velocidades  $v_1$  y  $v_2$  las velocidades finales respectivas, de este modo tendremos las siguientes expresiones:

$$d_1 = (1/2) (v_1) (t_1) \quad ; \quad d_2 = (1/2) (v_2) (t_2)$$

$$\rightarrow d_1 / d_2 = (v_1) (t_1) / (v_2) (t_2) = (v_1 / v_2) (t_1 / t_2)$$

---

<sup>32</sup> *Ibid* pp.236

Pero, por definición, sabemos que:  $v_1 / v_2 = t_1 / t_2$  y tenemos entonces:

$$d_1 / d_2 = (t_1 / t_2)^2$$

$$\text{Asimismo: } d_1 / d_2 = (v_1 / v_2)^2$$

Lo cual nos deja ver, en lenguaje algebraico actual, lo que Galileo nos demuestra en este teorema utilizando consideraciones geométricas.

Después del segundo teorema, se nos presenta un corolario de suma importancia, ya que se sugiere que el resultado expuesto en éste, era conocido por Galileo con anterioridad al establecimiento de la ley del movimiento acelerado, y no al contrario como él mismo lo expone en su libro. Dicho corolario establece que:

*“Corolario: Si en tiempos iguales, tomados sucesivamente desde el primer instante o comienzo del movimiento, [...], se recorrieran los espacios, [...], estos espacios estarán entre sí, como los números impares a partir de la unidad; [...]”<sup>33</sup>*

En efecto, en una carta fechada el día 16 de octubre de 1604, Galileo le escribe a Paolo Sarpi el siguiente texto:

*“Reflexionando sobre los problemas del movimiento, para los cuales, y a fin de demostrar los accidentes por mí observados, me faltaba un principio totalmente indudable que pudiera poner como axioma, he llegado a una suposición que tiene mucho de natural y evidente; y, supuesta ésta, demuestro luego todo el resto, en especial que los espacios atravesados por el movimiento natural están en proporción doble del tiempo y que, por consiguiente, los espacios atravesados en tiempos iguales son como los números impares desde la unidad[...].”<sup>34</sup>*

A partir de aquí, los teoremas restantes se refieren al movimiento uniformemente acelerado sobre planos inclinados, en esta última sección, Galileo acompaña sus teoremas no sólo de demostraciones, sino también hace uso de corolarios, lemas, problemas y dos escolios.

En el teorema III, Galileo nos da la relación que existe entre los tiempos de descenso de un móvil que se mueve a través de un plano inclinado y de uno

---

<sup>33</sup> *Ibid* pp.238

<sup>34</sup> Koyré, Alexandre. (2001), “Estudios Galileanos”. Pp. 76. 8va edición, Siglo Veintiuno Editores.

vertical; dándonos, de esta manera, la relación entre el tema principal del que hasta ahora se había ocupado y el tema del movimiento sobre planos inclinados.

*“Teorema III: Si sobre un plano inclinado y sobre otro vertical, que tengan la misma altura, marcha un mismo móvil, a partir del reposo, los tiempos de los descensos serán entre sí, como las longitudes del plano inclinado y del vertical.”*<sup>35</sup>

Lo que Galileo nos dice aquí, traducido al lenguaje algebraico, es que si tomamos un plano inclinado con altura  $h$  y longitud  $l$ , y otro plano vertical de altura  $h$ , entonces la relación que guardan los tiempos de descenso ( $t$  y  $t'$  respectivamente) sobre los dos planos será:

$$h / l = t / t'$$

Del teorema anterior, Galileo deduce que los tiempos de descenso sobre planos inclinados en diferente ángulo, pero que tengan la misma altura, son entre sí, como las longitudes de los mismos planos.

Los teoremas siguientes se adentran en el estudio de diversas consideraciones geométricas que Galileo hace acerca del movimiento acelerado sobre planos inclinados. Uno de los resultados importantes que obtiene, nos lo presenta en el corolario II del teorema VI, donde nos dice que si desde un mismo punto, descienden un plano inclinado y una vertical, y sobre estos se efectúa un movimiento de descenso en un mismo tiempo  $t$ , entonces, los extremos de estos se sitúan en un semicírculo, cuyo diámetro será la longitud de la vertical.

#### **2.4 La cuarta jornada**

La cuarta jornada lleva por título “En la cual continúa el discurso sobre los movimientos locales” y en ella, Galileo expone su teoría acerca del movimiento de los proyectiles, la cual junto con su teoría del movimiento acelerado, es una de sus más grandes aportaciones a la física moderna, ya que si bien las aportaciones teóricas que hace en la primera jornada son de suma importancia para el marco teórico sobre el cual Galileo fundamenta su visión del mundo; la cinemática galileana toma con completa rigurosidad matemática el problema del movimiento y lo resuelve de manera completa a través de la creación de leyes matemáticas que describen las características de éste; de tal modo que sus postulados podrán ser

---

<sup>35</sup> Galilei, Galileo. (2003), “Diálogos Acerca de Dos Nuevas Ciencias”. Pp. 249. Ed. Losada. Argentina.

utilizados por otras grandes mentes en la resolución de los nuevos problemas de la física.

Como se mencionó en **2.3** la estructura de esta jornada se basa en la lectura, por parte de Salviati, de un texto del Académico en el que se discuten las propiedades del movimiento de los proyectiles. Siguiendo con el esquema propuesto en la jornada tercera, en esta jornada se presentan los resultados de las investigaciones de Galileo en la forma de un conjunto de Teoremas, proposiciones, definiciones y problemas.

En esta discusión correspondiente al movimiento de los proyectiles, Galileo comienza estableciendo que dicho movimiento puede verse como un movimiento compuesto de otros 2; uno uniforme y uno naturalmente acelerado como puede verse en la siguiente cita:

*“[...] cuando el móvil se mueve con un movimiento compuesto de otros dos movimientos, a saber, uno uniforme y otro naturalmente acelerado. Tal parece ser el movimiento que llamo de los proyectiles [...].”<sup>36</sup>*

A partir de este punto, el análisis que Galileo emprende para caracterizar este tipo de movimiento, gira en torno al caso específico de un móvil que teniendo una trayectoria horizontal, alcanza el borde de la superficie por la cual se movía y cae bajo la acción de la gravedad describiendo una línea curva, de acuerdo a como lo plantea el mismo Galileo:

*“Me imagino un móvil lanzado sobre un plano horizontal, libre de todo impedimento. [...] al continuar su marcha, después de llegar al borde del plano, añadirá, a su primer movimiento uniforme e indestructible, aquella propensión hacia abajo que tiene por su propia gravedad, y ahí surgirá un movimiento compuesto del uniforme horizontal y del naturalmente acelerado hacia abajo, al que llamo proyección.”<sup>37</sup>*

Una vez que le ha dado forma al caso particular en el cual habrá de enfocar su estudio, Galileo establece en su primer teorema la propiedad geométrica más

---

<sup>36</sup> *Ibid* pp. 331

<sup>37</sup> *Ibid* pp. 332

importante de la línea curva generada, es decir, el hecho de que ésta es siempre una semiparábola.

*“Teorema I: Mientras un proyectil marcha con movimiento compuesto de horizontal uniforme y de naturalmente acelerado hacia abajo, describe, en su marcha, una semiparábola.”<sup>38</sup>*

Es así como desde los primeros momentos de esta última jornada quedan establecidas las dos propiedades más importantes que sirven de base al estudio del tiro parabólico a saber: en primer lugar se establece de manera axiomática el hecho de que el movimiento de los proyectiles es un movimiento compuesto; y en segundo lugar, se establece por medio del teorema I que este movimiento compuesto no sigue una línea curva arbitraria, sino que ésta se trata de una trayectoria semiparabólica siempre.

Con estos dos elementos, Galileo se encuentra ya en posición de expresar las particularidades de dicho movimiento, sus características y la forma de encontrar las velocidades correspondientes en cada punto de la trayectoria, cuestiones que aborda a profundidad en las siguientes trece proposiciones.

Antes de desarrollar la demostración correspondiente al teorema I, Galileo hace una pausa en su exposición para explicar y demostrar algunas propiedades geométricas importantes de la parábola que le serán de utilidad más adelante. Una vez que ha cumplido esto, se enfoca en desarrollar la demostración del teorema mencionado, para lo cual utiliza, al igual que en el resto de su obra, métodos geométricos, lo cual nos muestra claramente la relación que para Galileo existe entre el fenómeno del movimiento y su representación geométrica, ya que para Galileo es completamente válido utilizar ésta última como recurso para obtener conclusiones que puedan ser aplicadas a la realidad.

Una vez que se ha demostrado el teorema, los tres interlocutores discuten acerca de diversas cuestiones que tienen que ver con la validez de este teorema en el mundo real, específicamente, existe una larga discusión acerca de los factores que inciden en el movimiento de un móvil y afectan su trayectoria, como puede ser la resistencia del aire, o la curvatura de la tierra.

---

<sup>38</sup> *Ibid* pp. 332

Ante estos problemas, Salviati defiende la posición del académico alegando que, en el caso de la curvatura de la tierra:

*“Puede aquietar a cualquiera la sola autoridad de Arquímedes, que en sus Mecánicas y en la primera cuadratura de la parábola toma como principio verdadero, que la barra de la balanza o romana es una línea recta por igual en cada uno de sus puntos distante del centro común de los graves [...]; licencia que disculpan algunos, porque en nuestros experimentos los instrumentos de que disponemos y las distancias que nosotros usamos son tan pequeñas en comparación de nuestra gran lejanía del centro del globo terrestre, que bien podemos tomar un minuto de arco de un círculo máximo, como si fuese una línea recta [...].”<sup>39</sup>*

En cuanto a la cuestión de la resistencia del aire, Galileo nos dice:

*“En cuanto a la perturbación procedente de la resistencia del medio, ésta es la más considerable, y, por su múltiple variedad, incapaz de ser comprendida bajo reglas firmes y expresada en principios científicos [...]. De estos accidentes de gravedad, de velocidad, y también de forma<sup>40</sup>, por ser variables de infinitos modos, no se puede hacer ciencia segura. Por ello, para poder tratar científicamente tal materia, es necesario prescindir de ellos, y una vez halladas y demostradas las conclusiones, con prescindencia de los impedimentos, servirnos de ellas, en los casos particulares, con las limitaciones que nos vaya enseñando la experiencia.”<sup>41</sup>*

En estos dos pasajes podemos observar como Galileo ya incorpora en su pensamiento dos principios de aproximación a la naturaleza, que hoy día nos son ya familiares; en primer lugar acepta que un segmento de arco lo suficientemente pequeño puede aproximarse por una recta; de este modo Galileo puede validar su afirmación de que el movimiento de un objeto moviéndose a través de un plano horizontal (real) es, en efecto, un movimiento rectilíneo. En segundo lugar Galileo concede que el efecto del medio sobre un movimiento real es una variable que no

---

<sup>39</sup> *Ibid* pp. 339

<sup>40</sup> Aquí Galileo se refiere a las formas en que un objeto es afectado por la resistencia del medio; recordemos que la fuerza con que el medio se opone a un objeto en movimiento es proporcional a la velocidad de éste, así como también depende de la forma que éste tenga.

<sup>41</sup> *Ibid* pp. 340

está en posición de controlar, sin embargo, para resolver esto recurre a la abstracción de un movimiento sin medio, el cual es factible de estudiar y después aplicar al mundo real con las adecuadas correcciones.

Una vez que ha quedado aclarado lo anterior, Galileo comienza el análisis del caso en que un movimiento está compuesto de otros dos movimientos rectilíneos y uniformes como lo establece el teorema II:

*“Teorema II: Si un móvil se mueve con un doble movimiento uniforme, horizontal y vertical, el cuadrado, del impulso o momentum, (velocidad) de esta traslación compuesta de uno y otro movimiento, será igual a la suma de los cuadrados de los momenta (velocidades) de los primeros movimientos.”<sup>42</sup>*

En el teorema III, se plantea la cuestión de calcular el impulso o momento de velocidad sobre la línea en que se efectúa el movimiento de descenso, dentro del marco de la discusión de este teorema, Galileo define los términos de amplitud y altura que utilizará en sus razonamientos, así como una herramienta geométrica que le ayudará a especificar el impulso concreto del movimiento horizontal con el que cuenta un determinado tiro parabólico, dicha herramienta la denomina como “sumidad”.

A partir del problema I – Proposición IV, Galileo se ocupa de analizar el caso del movimiento compuesto por otros dos movimientos, uno horizontal, rectilíneo y uniforme, y otro vertical naturalmente acelerado. El problema I establece:

*“Problema I – Proposición IV: Como se haya de determinar el impulso en cada uno de los puntos de una parábola dada, descrita por un proyectil.”<sup>43</sup>*

A lo que más adelante da solución:

*“Veamos ahora lo que acontece al componer el movimiento horizontal uniforme con un movimiento perpendicular a la horizontal, que, comenzando en el reposo, vaya naturalmente acelerándose. Es ya sabido que la diagonal, que es la línea del movimiento compuesto de estos dos, no es una línea recta, sino semiparabólica, como se ha demostrado; en la cual va creciendo siempre el impulso, merced al continuo acrecentamiento de la velocidad del movimiento vertical. Por tal motivo,*

---

<sup>42</sup> *Ibid* pp. 345

<sup>43</sup> *Ibid* pp. 350

*para determinar cual es el impulso en un determinado punto de esa diagonal parabólica, en primer termino, es necesario determinar la cantidad del impulso uniforme horizontal; y después investigar cual es el impulso del móvil en caída en el punto elegido [...]. Por lo demás, sólo resta, después, que el impulso compuesto de estos dos sea [...] igual, en su cuadrado, a los de ambos componentes.”<sup>44</sup>*

Las proposiciones y los problemas que le siguen a lo dicho con anterioridad, establecen las relaciones que existen entre las alturas, los impulsos y las amplitudes de las semiparábolas del movimiento compuesto. En la proposición VI Galileo se plantea el problema de hallar la amplitud de la semiparábola, dadas la sumidad y la altura. Más adelante en el Teorema X y en su respectivo corolario se plantean dos importantes resultados:

*“Proposición X – Teorema: El impulso o momentum de, cualquier semiparábola es igual al momentum de un cuerpo, que cae naturalmente en vertical por una longitud igual a la compuesta de la sumidad más la altura, de la semiparábola.”<sup>45</sup>*

*“Corolario: De aquí se deduce que son iguales los impulsos de todas las semiparábolas, cuyas alturas, sumadas con las sumidades, sean iguales.”<sup>46</sup>*

Con este conjunto de proposiciones, Galileo es capaz de dar solución a los problemas que suscitaba la descripción del movimiento, y abre la puerta al nacimiento de la dinámica. Como podemos observar el elemento teórico de la mecánica Galileana, se apoya fuertemente en recursos matemáticos, pero también en una clara visión de la relación entre las matemáticas y el mundo natural, visión que le permitirá abstraer las características importantes del fenómeno del movimiento, analizarlas a través de recursos matemáticos y volver a aplicarlas en el mundo natural.

---

<sup>44</sup> *Ibid* pp. 356

<sup>45</sup> *Ibid* pp. 367

<sup>46</sup> *Ibid* pp. 368

## Capítulo 5

### La Tradición de Investigación de la Mecánica Galileana

#### 1. Introducción

Después de examinar con detenimiento los tres niveles pertenecientes al discurso de la mecánica galileana, nos encontramos con un Galileo que al alcanzar la madurez de su pensamiento encuentra el equilibrio entre la abstracción del espacio geométrico y la contrastación práctica de la experimentación. La importancia del legado de Galileo se hace patente cuando tomamos en cuenta que, en gran medida, su cinemática sirvió de base para que años más tarde, un intelecto como el de Newton resolviera de forma completa no sólo el problema del movimiento al establecer una dinámica coherente, sino asimismo solucionara el problema cosmológico que existía en el núcleo de la llamada revolución científica.

Si bien, como se dijo antes, en el núcleo de esta revolución se encuentra la polémica de la cosmología al ponerse en duda no sólo la utilidad, sino también la validez del sistema ptolemaico – aristotélico, los efectos de ésta no sólo se hicieron evidentes en el campo de la astronomía, sino que durante este periodo se dio un gran cambio en diversos aspectos de la ciencia. La concepción que hasta ese momento se tenía sobre cómo hacer ciencia (o filosofía natural), se vio radicalmente afectada por pensadores como Bacon, Descartes, Newton y el mismo Galileo, quienes no sólo se dedicaron a estudiar la naturaleza, sino que asimismo se preocuparon por crear reglas sobre cómo validar el conocimiento científico. Recordemos pues, *El Discurso del Método* de Descartes, las reglas para filosofar contenidas en los *Principia* de Newton, el *Novum Organum* de Bacon y el *Saggiatore* de Galileo, todos estos trabajos revolucionaron de esta manera la metodología científica.

Estos cambios de los que hablo, pueden apreciarse en el trabajo de Galileo. La creación de su cinemática, supone no sólo un cambio en las concepciones de la naturaleza sino, igualmente, necesita de una nueva forma de acercarse a ésta.

A continuación analizaré todos estos elementos del trabajo de Galileo a la luz del modelo de las Tradiciones de Investigación propuesto por Laudan.

## 2. La relación Teoría – Metas

De acuerdo con el modelo reticulado de justificación que Laudan propone en su teoría, la relación existente entre los niveles teórico y metodológico se define de la siguiente manera:

Teorías ← Armonizan → Metas

De este modo, se tiene que entre estos dos elementos, debería existir una relación de mutua armonía, lo cual también quiere decir que ambos elementos no se contradicen entre sí; más aun, debe de existir una cierta afinidad entre ellos.

La interrogante específica que me ocupa, es saber si dicha relación está presente entre los elementos teóricos y axiológicos del discurso de la mecánica galileana. Recordemos que el elemento axiológico presente en el Galileo mecánico, es diverso en cuanto a que es posible reconocer dentro de su aspiración principal (i.e. derrocar la supremacía del sistema aristotélico en filosofía natural), metas concretas a través de las cuales pretende resolver su meta principal. Asimismo, el elemento teórico contiene por lo menos dos vertientes importantes, en las cuales se configura la solución que Galileo pretende dar a los problemas que ataca y que eventualmente logra resolver.

Desde el periodo correspondiente a la creación de los *De Motu*, Galileo se muestra abiertamente anti – aristotélico, él mismo aseguraba que Aristóteles no comprendió nunca nada de física tal como lo demuestran sus fuertes críticas a dicho sistema contenidas en el trabajo arriba mencionado; para él, la respuesta propuesta por Aristóteles al problema del movimiento es insuficiente y deficiente; más aun, la física aristotélica no es matematizable, sus fundamentos no son factibles de establecer mediante relaciones matemáticas, sin embargo, esta física junto con todo el sistema de pensamiento aristotélico (es decir, su cosmología, su filosofía y su física) había sido el sistema dominante durante largo tiempo; en este sentido, el gran problema a resolver en la física terrestre de su tiempo es el problema del movimiento; cuestión que Galileo atacará más adelante.

Esta convicción en contra del sistema aristotélico, llevará a Galileo a negarlo temprano en su vida<sup>1</sup>, los *De Motu* son justamente eso, la negación de la física

---

<sup>1</sup> Los *De Motu* fueron escritos alrededor de 1590, es decir cuando Galileo contaba con 26 años de edad

aristotélica y la aceptación de una física basada en el concepto de fuerza impresa, una que despojaba al medio de su papel de motor en el fenómeno del movimiento y que le confería éste a un nuevo concepto llamado *ímpetus*.

El intento por encontrar una solución al problema del movimiento mediante el concepto de *ímpetus* también falla después de un tiempo; Galileo tropieza con el mismo inconveniente que años atrás le hiciera renegar del aristotelismo; la física del *ímpetus* tal como fue desarrollada por Benedetti es un paso hacia la comprensión del fenómeno del movimiento, sin embargo sus fundamentos no permiten una matematización completa, ya que el concepto de una fuerza impresa que se agota en el móvil es oscuro y su definición no permite una matematización adecuada.

Galileo sabe que parte importante de la respuesta está en la capacidad de matematizar el fenómeno del movimiento<sup>2</sup>, sin embargo, este modo de pensar no es trivial en su tiempo. El intento mejor terminado en ese momento para dar explicación al movimiento (la teoría del *ímpetus*) no recurre de manera completa a las matemáticas en su formulación, ésta seguía siendo una explicación de “causas”. Es decir, como se mencionó en el capítulo sobre la axiología, la meta no sólo es crear una teoría racional (matemática) sobre el movimiento, sino conjuntamente se tiene que demostrar que las matemáticas son un discurso válido para describir la naturaleza.

Al analizar el aspecto teórico de la mecánica galileana como se hizo en el correspondiente capítulo, nos encontramos con que Galileo no sólo desarrolló una teoría matemática válida para la descripción del fenómeno del movimiento dando leyes fundamentales para el movimiento rectilíneo, acelerado y tiro parabólico, sino que de la misma forma nos da un marco en el cual insertar esta teoría, ya que no es posible implantarla dentro de los límites que impone el marco aristotélico. Es en este contexto que es posible apreciar la relación entre la primera y la tercer jornadas. Es en la jornada primera donde Galileo expone las teorías que constituyen los fundamentos de la nueva física terrestre que él quiere defender,

---

<sup>2</sup> Otros como Beeckman y en especial Descartes son del mismo parecer ya que ellos también atacaron el problema del movimiento desde un punto de vista matemático

entre los que se encuentran el atomismo, la finitud de la velocidad de la luz y la isocronía del péndulo, pero muy especialmente los planteamientos sobre el movimiento en el vacío y lo infinitesimal, los cuales le servirán como soporte teórico para justificar más adelante en la tercera jornada, los correspondientes planteamientos de velocidad instantánea, así como el paso del caso específico de la caída libre al movimiento acelerado en general.

A la luz de lo discutido hasta ahora es posible ver que existe una estrecha relación entre las metas a las que Galileo aspira y la teoría que desarrolla. La meta de resolver el problema del movimiento se modifica bajo la necesidad de introducir un lenguaje matemático en las formulaciones teóricas, de este modo la introducción de un lenguaje matemático en la formulación de su teoría se convierte asimismo en una meta para Galileo.

En este punto se observa que la relación entre la teoría y las metas no sólo es de armonía sino que en cierto caso, incluso tenemos que la meta de resolver el problema del movimiento promueve la búsqueda de una teoría adecuada, lo cual promueve a su vez, que la matematización se convierta en un nuevo valor dentro de la axiología galileana.

La teoría de la cinemática que desarrolla Galileo es una teoría matemática que describe, a través de leyes fundamentales, el fenómeno del movimiento. Este elemento teórico es acorde con la meta de la matematización. Puedo agregar además que, efectivamente, con esta teoría se da solución al problema del movimiento, pero sólo parcialmente ya que la teoría cinemática de Galileo da la descripción matemática del fenómeno del movimiento, pero no de sus causas, cuestión que podría parecer un fracaso en cuanto a la meta de resolver el problema del movimiento; sin embargo Galileo no lo ve de esa forma, ya que como él mismo lo dice en el *Discorsi*, su meta no es encontrar la causa de la pesantez, sino dar la descripción del fenómeno. En este sentido no hay falla, por lo menos para Galileo, en su proceder, ya que es completamente válido comenzar el estudio del movimiento sin haberse adentrado en la causa de éste. Por lo tanto considero que la relación de armonía entre los dos elementos se conserva.

### 3. La relación Metas – Métodos

En cuanto a la relación existente entre los niveles metodológico y axiológico, Laudan propone una relación de ajuste mutuo en la que los métodos utilizados exhiben la posibilidad de realizar ciertas metas, es decir las promueven, en tanto que la elección de ciertas metas justifica la elección de los métodos a utilizar, lo cual podría esquematizarse de la siguiente manera:

Métodos --- Muestran Realizabilidad → Metas

En tanto que:

Metas --- Justifican → Métodos

¿Se cumple esta relación en el caso de la física galileana? Observemos pues la metodología de Galileo y veamos si estas relaciones se cumplen. Recordemos que el pensamiento metodológico de Galileo es matemático – experimental, lo cual me remite a la importancia que él le daba a la experimentación como método de contrastación de la teoría. La experimentación juega un importante papel al igual que las matemáticas, a lo largo de las jornadas tres y cuatro de los *Discorsi*, Galileo recurre tanto a demostraciones matemáticas como a demostraciones experimentales para demostrar sus teoremas. De la misma manera, en la jornada primera recurre al uso de experimentos ya sea pensados o reales, para justificar varias de las afirmaciones que hace; por ejemplo, cuando habla de la caída uniforme de cuerpos con diferente peso, Galileo recurre a un experimento pensado en el que describe una situación a través de la cual llega a una contradicción con la que prueba su argumento a favor de que distintos cuerpos con peso desigual sufrirán la misma aceleración y por lo tanto caerán al mismo tiempo; algunos otros casos en los que Galileo recurre a la experimentación se encuentran en su disertación acerca de la velocidad de la luz.

Hoy en día, la mayoría de los estudiosos de Galileo concuerdan en que, en efecto, éste nunca hizo un experimento tal como arrojar pesos desde la torre inclinada de Pisa, sin embargo, los estudios históricos que se han llevado a cabo por historiadores como Settle o Drake muestran, al contrario de lo que aseguraba Koyré, que Galileo era un experimentador activo; sus experimentos sobre planos inclinados lo llevaron a poseer la evidencia experimental necesaria para

desarrollar su cinemática, actitud por demás coherente con lo que el mismo Galileo nos dice en el *Discorsi*:

*“Salviati: [...] y conforme a la costumbre y a las conveniencias de las ciencias, que aplican las demostraciones matemáticas a conclusiones que conciernen a la naturaleza [...]; los autores exigen, pues, de la concordancia con la experiencia la confirmación de sus principios, que son el fundamento de toda la construcción ulterior [...].”*<sup>3</sup>

En esta cita, podemos observar que para Galileo el hecho de que la teoría concuerde con la experiencia es el fundamento de “toda la construcción ulterior”. ¿Pero cual es la meta de la teoría sino resolver los problemas que el mismo científico se ha propuesto? De acuerdo con lo establecido en el apartado anterior, existe una relación de armonía entre la teoría desarrollada por Galileo y las metas que él se ha propuesto, por lo tanto es posible observar mediante esta aproximación que los métodos van mostrando a través de la construcción de la teoría las posibilidades que éstos mismos tienen en pos de cumplir las metas establecidas.

Podemos contrastar este caso con los intentos previos de Galileo por resolver el problema del movimiento, específicamente su intento por desarrollar la teoría del *ímpetus* de Benedetti. En este caso se tenían las mismas metas, Galileo quería desarrollar una teoría analítica para dar solución al problema del movimiento; sin embargo al atacar el problema a través de los elementos teóricos que supone la teoría del *ímpetus*, éste se dio cuenta de que sus conceptos fundamentales no le permitirían cumplir con la meta de la matematización, por lo tanto no podrían existir enunciados matemáticos que pudieran ser contrastados con la realidad mediante la ejecución de experimentos; consecuentemente, esto supone que dichos elementos teóricos fueran rechazados a favor de otros que no sólo armonizaran con la metas, sino que su adopción auxiliara en la realización de éstas a través de los métodos escogidos.

Existe todavía, una dimensión más a través de la que se cumple la relación entre los métodos y los valores de la cinemática galileana. Esta se cumple también de

---

<sup>3</sup> Galilei, Galileo. (2003), “Diálogos Acerca de Dos Nuevas Ciencias”. Pp.221. Ed. Losada. Argentina.

una manera directa; es decir, la naturaleza misma de los métodos seleccionados por Galileo muestra las posibilidades que éstos tienen para cumplir las metas designadas. Tomemos en cuenta el siguiente caso: en la jornada primera de los *Discorsi*, Galileo hace la afirmación de que la velocidad de la luz tiene que ser finita por mas rápida que ésta sea (lo cual corresponde a una hipótesis), para demostrar tal afirmación, sugiere un experimento con el cual se podría medir dicha velocidad<sup>4</sup>. Ahora bien, si supongo que dentro del marco de este razonamiento la meta de Galileo fuera demostrar la finitud de la velocidad de la luz, y quisiera crear un triángulo justificatorio en torno a este tema, podríamos ver al instante que saltan fuertes dificultades; en primer lugar Galileo carece de un marco teórico adecuado para justificar su aseveración sobre la velocidad de la luz, lo cual deja ésta en un nivel de hipótesis; en segundo lugar es posible observar que en este caso, los métodos elegidos por Galileo muestran de hecho la no factibilidad de cumplir las metas, ya que el experimento que expone es claramente deficiente para tal fin. El mismo Galileo lo acepta de una manera velada al hacer decir a su personaje Salviati:

*“Salviati: Ciertamente no he realizado el experimento sino en pequeñas distancias, o sea de menos de una milla, y no he podido tener la seguridad de si es instantánea la aparición de la luz opuesta; pero si no es instantánea, por lo menos es velocísima [...]”*<sup>5</sup>

Lo anterior muestra que la afirmación forma parte de la tradición galileana sólo en función de que está insertada dentro de la visión que Galileo tiene del mundo natural, y que por lo tanto, los métodos elegidos por él en sus investigaciones, en efecto muestran la factibilidad de sus metas, es decir, Galileo está seguro de que puede atacar el problema del movimiento con las herramientas matemáticas y experimentales de que dispone. Asimismo, el ejemplo que di nos abre la puerta de la otra de las relaciones que se deben cumplir entre las metas y los métodos de la tradición galileana. Si bien el hecho de que los métodos utilizados para medir la velocidad de la luz muestran la imposibilidad de cumplir dicha meta, también es

---

<sup>4</sup> La exposición de este experimento se encuentra en la sección dedicada al estudio de la metodología (Cáp. 3)

<sup>5</sup> Galilei, Galileo. (2003), “Diálogos Acerca de Dos Nuevas Ciencias”. Pp. 75. Ed. Losada. Argentina.

cierto que ésta justificaría un cambio en los métodos ocupados<sup>6</sup>; de la misma manera las metas de resolver el problema del movimiento, matematizar la física (por lo menos la suya) y desarrollar un marco conceptual sobre la naturaleza, es decir, crear una nueva concepción del mundo natural; justifican el uso de la metodología escogida. Esto es especialmente evidente en el caso de la relación entre la matematización como meta y la matematización como elemento metodológico, donde no sólo se justifica el uso de las matemáticas<sup>7</sup> sino que la meta engendra el método.

#### **4. La relación Teoría – Metodología.**

La relación existente entre los niveles teórico y metodológico se traduce en una dependencia de ajuste mutuo, que puede ser representada de la siguiente manera:

Teorías ---- Restringen → Métodos  
En tanto que  
Métodos ---- Justifican → Teorías

De lo cual se puede observar que las teorías desarrolladas dentro de una cierta TI, establecen criterios que delimitan (y a la vez esbozan) las características de las metodologías que se utilizarán para promover las metas acordes con éstas. De la misma manera, podemos observar que a través de la elección de un determinado conjunto de metodologías es posible establecer criterios que permitan justificar la forma y contenido de una determinada teoría.

La relación de justificación entre los niveles teórico y metodológico de la TI galileana puede verse más claramente si analizamos los dos componentes que a mi parecer forman el conjunto de la metodología de Galileo: el aspecto empírico, y el aspecto matemático. Dichos componentes, que fueron analizados en profundidad en el capítulo concerniente a la metodología, poseen una estrecha relación de validación mutua, en la que los resultados obtenidos de experimentos particulares son luego analizados a través de las matemáticas; pero también es

---

<sup>6</sup> Cambio que no estaba al alcance de Galileo, ni teórica, ni técnicamente

<sup>7</sup> Ya se ha explicado en el capítulo 3 que la matemática que predominaban en su metodología era la geometría

cierto que, a su vez, el análisis matemático de las hipótesis le da a Galileo criterios que le permiten delinear las características de los experimentos que serán realizados.

De esta manera los resultados obtenidos, los cuales se verán plasmados en las leyes de la cinemática y que forman el corpus de su teoría, están plenamente justificados para Galileo dada la importancia que él le da al proceso de contrastación entre los resultados matemáticos y los experimentales como lo podemos observar en el siguiente fragmento:

*“[...] si es que aconteciere que la definición que vamos a dar de nuestro movimiento acelerado, **estuviera de acuerdo con la esencia del movimiento naturalmente acelerado.** [...]. Nuestro aserto se funda principalmente en el hecho de que aquello, que los experimentos naturales ofrecen a nuestros sentidos, **parece corresponder completamente y estar de acuerdo con las propiedades demostradas luego por nosotros.**”<sup>8</sup>*

En lo concerniente a las restricciones que las teorías imponen sobre los métodos, podemos observar que estas también encuentran su génesis en la relación existente entre los dos grandes componentes del nivel teórico, es decir, el elemento conformado por la estructura del mundo, y el elemento formado por el conjunto de proposiciones matemáticas concernientes al fenómeno del movimiento.

De acuerdo a lo que se analizó en secciones anteriores, Galileo sabía que los preceptos sobre los que se basa su teoría del movimiento no eran compatibles con aquellos que dictaba el sistema aristotélico (por ejemplo la posibilidad del movimiento en el vacío), por tal razón en la primera jornada del *Discorsi* se da a la tarea de crear un marco conceptual en el cual pueda introducir su cinemática, de esta manera su teoría del movimiento debe de ser coherente con los postulados de su marco conceptual. Es así como las restricciones que la teoría del movimiento impone sobre la metodología de Galileo son a su vez, restricciones que el marco conceptual galileano impone sobre la metodología.

---

<sup>8</sup> Galilei, Galileo. (2003), “Diálogos Acerca de Dos Nuevas Ciencias”. Pp. 221. Ed. Losada. Argentina.

Para ejemplificar lo dicho anteriormente, tomemos en cuenta que en diversas ocasiones el marco conceptual plantea cuestiones que están fuera de los límites metodológicos de Galileo los cuales se transforman en dificultades dentro del marco de la teoría del movimiento, es en estos casos donde la metodología se ve restringida. Por ejemplo, si algún aspecto de su teoría sobrepasa su capacidad experimental, Galileo recurre al experimento pensado; si en cambio algún aspecto sobrepasa su capacidad matemática (como es el caso de la resistencia del medio), Galileo recurre a la simplificación, como podemos verlo en lo siguiente:

*“En cuanto a la perturbación procedente de la resistencia del medio, ésta es la más considerable, y, por su múltiple variedad, incapaz de ser comprendida bajo reglas firmes y expresada en medios científicos; [...]. Por ello, para poder tratar científicamente tal materia, **es necesario prescindir de ellos**, y una vez halladas y demostradas las conclusiones, con prescindencia de los impedimentos, servírnos de ellas, en los casos particulares, con las limitaciones que nos vaya enseñando la experiencia.”<sup>9</sup>*

## 5. Conclusiones

La aplicación de una red triádica al caso del discurso de la mecánica galileana, requiere que se analicen con cuidado las relaciones existentes entre los componentes de cada uno de los niveles de esta red, ya que no es posible englobar en una unidad homogénea los componentes de, por ejemplo, el nivel metodológico, ya que como se vio, la relación de validación que existe entre estos dos sirve para arrojar luz sobre las relaciones de este nivel con los otros dos. De igual manera, podríamos dar argumentos similares para los niveles teórico y axiológico.

Si observamos el resultado de la red triádica que acabamos de construir tenemos que se deben cumplir las siguientes relaciones:

**Teorías** → Restringen → **Métodos** → Exhiben realizabilidad → **Metas** → armonizan → **Teorías**

En tanto que:

**Teorías** → Armonizan → **Metas** → Justifican → **Métodos** → Justifican → **Teorías**

---

<sup>9</sup> *Ibid* pp. 340

En cuanto a la primer cadena podemos observar que la teoría Galileana (conjunto de su marco conceptual y su teoría del movimiento) restringe su metodología (formada por el aspecto matemático y por el empírico) al implantar límites a ésta para favorecer una adecuada representación y demostración del fenómeno del movimiento, en tanto que la metodología exhibe y promueve la realización de la meta principal de Galileo -que consiste en desarrollar un sistema alternativo que suplante al aristotelismo- ofreciendo herramientas que permiten una mejor aproximación a los fenómenos de la naturaleza. Finalmente esta meta global de Galileo<sup>10</sup> armoniza adecuadamente con su teoría al ofrecer el marco conceptual requerido donde se insertará la también requerida solución matemática al problema del movimiento.

La segunda cadena puede ser analizada de igual manera, ya que ha quedado establecido con anterioridad que la teoría de Galileo armoniza con la meta que se ha planteando; asimismo esta meta justifica constantemente la metodología utilizada, ya que para desarrollar una teoría matemática que de cuenta del fenómeno de la naturaleza, es necesario para Galileo desarrollar un fuerte vínculo entre matemática y experimento; vínculo, que como ya vimos, es un vínculo dinámico. Finalmente, es posible observar que esta metodología justifica plenamente la forma y el contenido del elemento teórico al proveer resultados consistentes con su metodología, que posteriormente formarán parte del corpus tanto del marco conceptual galileano como de su teoría del movimiento, cerrando el círculo de la triada.

Para finalizar, sólo basta decir que la obra de Galileo, tan basta como es, ha sido tomada como base para desarrollar diversos modelos sobre como funciona la ciencia. Quizás ese aspecto haga parecer que un análisis de esta naturaleza es circular; sin embargo vale la pena mencionar que un modelo de análisis tal como el descrito por L. Laudan es rico en ramificaciones y en consecuencia puede ofrecer nueva luz sobre temas que pudieran parecer superados.

---

<sup>10</sup> Conformada por la matematización, la creación de un marco conceptual y el desarrollo de una solución al problema del movimiento.

## BIBLIOGRAFIA

1. LAUDAN, Larry, *Progress and its Problems. Towards a Theory of Scientific Growth*. University of California Press. 1977.
2. LAUDAN, Larry, *Science and Values. The Aims of Science and their Role in Scientific Debate*. University of California press. 1984.
3. GALILEI, Galileo, *Diálogos Acerca de Dos Nuevas Ciencias*. Ed. Losada. Argentina. 2003.
4. KOYRÉ, Alexandre, *Estudios Galileanos*. 8va edición, Siglo Veintiuno Editores. México 2001.
5. FEYERABEND, Paul, *Contra el Método. Esquema de una teoría anarquista del conocimiento*. Ed. Tecnos. Madrid. 1975.
6. KUHN, Thomas, *La Estructura de las Revoluciones Científicas*. Fondo de Cultura Economica. México. 1971
7. LAKATOS, Imre and MUSGRAVE, A. *Criticism and the Growth of Knowledge*. Cambridge University Press. 1970.
8. PEREZ RANZANS, Ana Rosa, *Modelos de Cambio Científico*. En Moulines, C.U. *La Ciencia: Estructura y Desarrollo*, Enciclopedia Iberoamericana de Filosofía, vol. 4. Ed. Trotta. Madrid. 1993
9. POPPER, Karl, *Objective Knowledge*. Oxford University Press. 1979.
10. ALVAREZ, José Luis, MARQUINA, José Ernesto, *Galileo y la ciencia medieval*. Contactos, Vol.9, p.7-22, 1993.
11. FISCHER, Klaus, *Galileo Galilei*. Herder, Barcelona, 1986.
12. GALILEI, Galileo, *Carta a la señora Cristina de Lorena*. Alianza Editorial, Madrid, 1987.
13. GALILEI, Galileo. *Discourse on the tides (Letter to Cardinal Orsini)*. University of California Press, California, 1988.
14. GALILEI, Galileo, *El Ensayador*. Aguilar, Argentina, 1981.
15. GALILEI, Galileo, KEPLER, Johannes, *La gaceta sideral / Conversación con el mensajero sideral*. Alianza Editorial, 1ª ed. 1984, 1ª ed. revisada, Madrid, 2007.
16. GEYMONTAT, Ludovico, *Galileo Galilei*. Nexos, España, 1986.

17. GONZALES, Moisés, *Carta a Cristina de Lorena*. Alianza Editorial, Madrid, 1987.
18. KOESTLER, Arthur, *Los Sonámbulos*. Qed-CONACULTA, 1ª ed. 1959, 1ª ed. en Qed México; DF, 2007.
19. KOYRÉ, Alexandre, *Estudios de Historia del pensamiento científico*. Siglo XXI, México, 1985.
20. KUHN, Thomas S, *La revolución copernicana*. Ariel, España, 1978
21. MARQUINA, José Ernesto, *La Tradición de Investigación Newtoniana*. Universidad Autónoma Metropolitana. Colección La Lección de los Clásicos, Biblioteca de Signos. México. 2006.
22. SETTLE, Thomas. *An Experiment in the History of Science*. Science, 1961, 133:19-23.
23. MACLACHLAN, J. *A test of an imaginary experiment of Galileo's*. Isis, Septiembre 1973, Vol. 64, No. 223.
24. DRAKE, Stillman. *Galileo's experimental confirmation of horizontal inertia: unpublished manuscripts*. Isis, Septiembre 1973, Vol. 64, No. 223