

DE LAS CUALIDADES A LAS MAGNITUDES:  
MEDICIÓN CIENTÍFICA COMO INTEGRACIÓN COGNITIVA  
EN EL SURGIMIENTO DE LA ASTRONOMÍA MODERNA

**GODFREY GUILLAUMIN\***

**Resumen:** El recurso cognitivo por el cual la ciencia ha obtenido información del mundo empírico ha sido, desde su origen, la medición. Ésta está sujeta a un proceso continuo de regeneración y transformación histórica. Los principales análisis metateóricos que se han realizado sobre la medición son en su mayoría sobre sus aspectos formales. En este artículo desarrollo un bosquejo de un enfoque histórico y cognitivo de la medición científica con el fin de mostrar sus diversos aspectos cognitivos, metodológicos y epistemológicos, mismos que han sido sistemáticamente descuidados por la gran mayoría de los análisis en filosofía de la ciencia.

PALABRAS CLAVE: CIENCIA MODERNA, INTEGRACIÓN COGNITIVA, INSTRUMENTOS, KEPLER, MEDICIÓN CIENTÍFICA

**Abstract:** *Measurement has been the main cognitive resource through which science has obtained empirical information about the world. Scientific measurement is not a fixed process but an historical and dynamical one; nevertheless, almost all philosophical analysis have studied it from a formal point of view. My aim in this paper is to outline a cognitive and historical notion of scientific measurement that allows us to appreciate its diverse epistemic, methodological, and cognitive features.*

KEY WORDS: MODERN SCIENCE, COGNITIVE INTEGRATION, INSTRUMENTS, KEPLER, SCIENTIFIC MEASUREMENT

---

\* Departamento de Filosofía, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, guillaumin.godfrey@gmail.com

*Thanks to measurement, modern science  
has actually established itself.*

(BERKA, 1982)

## INTRODUCCIÓN

**L**ord Kelvin (1824-1907) sostuvo:

I often say that when you can measure what you are speaking about, and express it in numbers, you know something about it; but when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meagre and unsatisfactory kind; it may be the beginning of knowledge, but you have scarcely, in your thoughts, advanced to the stage of *science*, whatever the matter may be. (Thomson, 1891: 73)

Los estudios históricos respaldan las palabras de Kelvin al documentar la importancia de la medición en la ciencia.<sup>1</sup> Por ejemplo, en un libro reciente, Jimena Canales afirma:

Measurement practices and measurement-based science were often listed among the determining causes behind the great divide marking off modernity from other eras [ya que] the success of modern science was guaranteed by rapidly advancing measurement techniques. (2010: 207 y 206)

John Heilbron (1979 y 1993) ha estudiado cómo la medición permitió desarrollar las áreas de los llamados fluidos imponderables, como la electricidad y el magnetismo durante los siglos XVIII y XIX. Otros trabajos, de enfoque más cronológico que analítico, como el de Joseph Keithley (1999), que estudia la historia de la medición en la electricidad, y el de Clifford

---

<sup>1</sup> Véase Bridgman, 1927 y 1936; Campbell, 1957; Canales, 2010; Crease, 2011; Chang, 2007; Chapman, 1983; Hacking, 1983; Heilbron, 1979 y 1993; y Keithley, 1999.

Pickover (2008), que estudia la historia de los descubrimientos de las leyes de la naturaleza, muestran cómo la medición fue fundamental en el descubrimiento de leyes.

Además de historiadores de la ciencia, también algunos filósofos han estudiado la medición, principalmente desde un punto de vista lógico-formal, centrándose en dilucidar la naturaleza matemática, formal y axiomática del conocimiento que proporciona la medición. Es posible rastrear esta tradición en los trabajos de Hermann Helmholtz, *Counting and Measuring* (1887) y el de Otto Hölder, *Die Axiome der Quantität und die Lehre vom Mass* (1901); el *Principles of Mathematics* de Bertrand Russell (1903) y los de Norman Campbell, *Physics: The Elements* (1920) y *An Account of the Principles of Measurement and Calculation* (1928).<sup>2</sup>

Ahora bien, a pesar de la importancia de la medición para el desarrollo y crecimiento del conocimiento científico, son notablemente escasos los estudios histórico-filosóficos que pretendan entender los aspectos epistémicos, metodológicos y cognitivos de la medición. Canales tiene un diagnóstico similar de esta situación: “Despite the fact that measurement is perhaps the most original feature of modernity [y consecuentemente de la ciencia moderna también], *we have neglected to understand just how it works*” (2010: 220. Énfasis mío). Una excepción es el trabajo de Hasok Chang (2007), quien analiza diversos aspectos histórico-epistemo-lógicos de la medición de la temperatura y el largo proceso de construcción (tanto *material* como *conceptual*) de termómetros. Chang estudia los diferentes problemas epistémicos, cognitivos y técnicos que conllevó la creación del termómetro a través de los siglos XVIII y XIX; y analiza las dificultades conceptuales, metodológicas, epistémicas y tecnológicas, que se superaron durante la creación de los primeros termómetros, en particular con la creación de una escala térmica, el ajuste de los conceptos de *temperatura* y *calor*, el desarrollo de estándares de precisión en los instrumentos, etcétera.

El objetivo del presente artículo es ilustrar una concepción histórico-filosófica (o dinámico-conceptual) de la *medición científica* que enfatice la interrelación de sus aspectos epistémicos, metodológicos y cognitivos.

---

<sup>2</sup> Un estudio detallado de esta tradición es el de José Diez, 1997.

Los *elementos epistémicos* de la medición científica quedan establecidos por la interacción entre elementos prácticos y teóricos. La gama de los elementos prácticos es amplia, va desde cómo construir correctamente instrumentos de medición, cómo operarlos, cómo mejorarlos, cómo hacerlos más exactos y precisos, etcétera. Los criterios de justificación de tal conocimiento práctico se desarrollan de forma paralela al desarrollo histórico del uso y construcción de instrumentos. Los elementos teóricos de la medición tienen que ver con los criterios de justificación de las interpretaciones que se hagan de los datos que los instrumentos ofrecen, y en general con la justificación en que se apoye el conocimiento derivado de los instrumentos; también con la justificación de la teoría mediante la cual se construyen y operan los instrumentos de medición. Estos elementos epistémicos quedarán ejemplificados en los casos de Tycho y Kepler analizados más adelante.

Los *aspectos metodológicos* de la medición tienen que ver con el desarrollo, estabilización y establecimiento de reglas regulativas y constitutivas de operación de instrumentos de medición. Veremos que hay fuertes interconexiones entre aspectos epistémicos y metodológicos de la medición, sobre todo en los casos de instrumentos de alta precisión, ya que los datos exactos son muy sensibles a la operación y construcción del instrumento, como quedará claro en el caso de Kepler.

Finalmente, los *aspectos cognitivos* de la medición tienen que ver con las diferentes capacidades y operaciones intelectuales que se desarrollan, estabilizan y establecen como efecto del uso de mediciones. Podría decir que las mediciones generan formas de pensar, concebir y entender parcelas enteras del mundo físico, y sin ellas tales parcelas serían literalmente incognoscibles. Domenico Meli (2006) ha mostrado cómo, desde el punto de vista cognitivo, algunos objetos, instrumentos o experimentos funcionan como extensiones de la mente humana para *concebir* nuevas ideas. En el contexto de la medición científica (pero no exclusivamente), pensamos partes del mundo empírico *con y a través de* instrumentos; en otras palabras, sin tales instrumentos no podríamos *ver*, concebir, pensar, entender, intervenir, detectar, imaginar, etcétera, partes enteras del mundo empírico. Sin instrumentos ni Kepler, ni nadie, hubiera podido establecer que la órbita de los planetas es elíptica. Un objetivo de este

artículo es mostrar que esos aspectos de la medición (el epistémico, el metodológico y el cognitivo) están estrechamente interrelacionados.<sup>3</sup>

Como estudio de caso para ilustrar esa concepción de medición científica analizo la astronomía de Kepler. Muestro que el cambio de la astronomía antigua a la moderna dependió epistémica, metodológica, conceptual y cognitivamente del desarrollo de nuevos sistemas (cognitivos) de mediciones, y que sin ellos no había forma de transformar y avanzar el conocimiento astronómico.

## HACIA UNA IDEA *INTEGRATIVA* DE MEDICIÓN

*Medición* es una palabra ambigua, ya que refiere tanto al *proceso* de medición como al *producto* del mismo. Si bien esa distinción es analítica, no lo es en la práctica, *i. e.*, no puede haber *resultados* de mediciones sin algún acto o *proceso* de medir y viceversa. Pero, hay algo más de fondo en las relaciones entre el *proceso* de medir y su *resultado*: ambos aspectos dependen entre sí tanto epistémica, metodológica y cognitivamente. Ello quiere decir que tanto el grado de precisión y exactitud, como la interpretación de los *resultados* métricos alcanzados, caen dentro de los límites cognitivos propios de los *procesos* de medición que se utilizaron. Si este punto de partida es correcto, tal como intentaré mostrar, entonces una forma de estudiar el contenido epistémico y cognitivo de la medición científica es entender el proceso de realizar mediciones, el cual, en realidad, es complejo.

Dos autores serán particularmente importantes para formular en términos generales el planteamiento que quiero desarrollar: Ian Hacking (1996) y Karel Berka (1982). Hacking afirma: “[l]o que es tan importante en la ciencia [moderna] es que es una colaboración entre diferentes

---

<sup>3</sup> Es evidente que el desarrollo cabal y detallado de este planteamiento excede los límites del presente artículo, por ello simplemente planteo un panorama general del mismo. Sin embargo, el proyecto completo se puede consultar en mi libro *De las cualidades a las magnitudes. El rol de la medición integrativa en el desarrollo de la ciencia moderna* (en preparación).

tipos de gente: aquellos que especulan, los calculistas y los experimentadores” (1996: 277). No se trata, sin embargo, solamente de afirmar que la ciencia es una empresa en la cual *colaboran* diferentes departamentos, sino algo más fundamental: lo característico del método científico es “[p]oner estas dos habilidades [la especulación y la experimentación] en contacto por medio del uso de una tercera habilidad humana, la que he llamado articulación y cálculo” (Hacking, 1996: 277). Son tres habilidades que, si bien son diferentes y relativamente autónomas entre sí, en ocasiones se llegan a *integrar* para generar *un solo resultado*. La diferencia fundamental entre mi planteamiento y el de Hacking es de énfasis, pues no considero simplemente que la *articulación y cálculo* sea un puente entre la *especulación* y la *experimentación*, sino más bien que los tres elementos entran en relaciones recíprocas de ajuste mutuo y que sólo de esa manera, después de largos periodos de tiempo, se logran, entre otras cosas, mediciones precisas y exactas. Ello es un proceso dinámico.

Berka tiene una idea más afín con el proceso dinámico al afirmar que “measurement encompasses different aspects and components of an empirical and theoretical nature, which are *mutually conditioned* in a very complicated way” (1982: 14, énfasis mío). La medición comprende la interrelación de una parte práctica y una teórica, como mencioné antes. En el aspecto práctico estaría, por ejemplo, la preparación y ejecución de experimentos; la elección de operaciones adecuadas de medición; la construcción y uso de instrumentos de medida; la elaboración y evaluación de los resultados de una medición, etcétera. En el aspecto teórico, sostiene Berka, los problemas relevantes son varios, tienen que ver con la conceptualización de los objetos de medida y sus relaciones; una demarcación de los conceptos básicos de la teoría de medición y de las condiciones de conmesurabilidad; la elucidación de la relación entre los aspectos empíricos y matemáticos de la medición; la constitución de una teoría general de la medición científica (que de cuenta del mayor número de aspectos de la medición en el mayor número de disciplinas). Berka sostiene que no todos esos aspectos están involucrados con el mismo grado, ni en cada caso específico o en todo análisis teórico de la medición.

De las concepciones de Hacking y Berka sobre la medición, quiero subrayar y colocar en el centro de mi análisis un aspecto que ellos no desarrollan aunque sí mencionan, me refiero a la idea de *integración*

*dinámica*. Según el diccionario de la Real Academia de la Lengua Española, una de las acepciones de “integrar” es: “Aunar, fusionar dos o más conceptos, corrientes, etc., divergentes entre sí, en una sola que las sintetice” (RAE). Ahora bien, en realidad, integrar supone un *proceso*, en el sentido de que los elementos de la fusión se transforman mutuamente en el tiempo para integrarse. La integración de elementos no es usualmente un fenómeno instantáneo, sino que lleva tiempo y esto es lo que quiero subrayar. En el caso de la medición científica hay tres clases de elementos que se integran: conceptos, matemáticas e instrumentos, como lo analizaré. La idea de medición como proceso de integración es principalmente un proceso *dinámico* mediante el cual cada una de esas tres clases de elementos se ajusta recíprocamente a través de largos periodos de tiempo.

Esta concepción de *integración dinámica* tiene varias consecuencias metodológicas, epistémicas y cognitivas interesantes. Por ejemplo, cognitivamente el desarrollo de ciertos aspectos matemáticos requiere de instrumentos y conceptos, y viceversa: algunos instrumentos de medición serían inconcebibles sin consideraciones matemáticas y conceptuales. O bien, pensar o concebir ciertos conceptos sólo se logra mediante la manipulación de instrumentos, *i. e.*, en ocasiones pensamos a través de estos. Una consecuencia epistémica central es la detección de errores. La medición es uno de los recursos más eficientes para detectar una gama enorme de diferentes tipos de errores: de cálculo, de uso de instrumentos, de conceptos mal formulados, de razones o proporciones incorrectamente concebidas, etcétera. Estos elementos epistémicos incorporados en la medición permiten contar con elementos de corrección, tal como se verá en el caso de Kepler.<sup>4</sup>

### **Componentes de la medición integrativa**

Analicemos con más detalle cada uno de los componentes de la medición, sin perder de vista que la noción de *medición integrativa* es un con-

---

<sup>4</sup> En una serie de interesantes estudios, Giora Hon (1989a, 1989b y 1995) analiza, desde el punto de vista epistémico, la idea de error en las mediciones de la astronomía antigua y muestra su importante papel cognitivo para el avance del conocimiento.

cepto histórico. *Histórico* en el sentido de dar cuenta del proceso mediante el cual la idea de medición antigua se transforma en una idea moderna de medición.<sup>5</sup> Empecemos con el componente conceptual, el cual tiene que ver con la pregunta de ¿qué se quiere medir y cómo se concibe o describe eso que se desea medir? A este componente Hacking lo llama *especulación*, el cual entiende como la *representación intelectual de algo de interés*, que usualmente se realiza a través de la reestructuración de ideas, que llevan a un entendimiento *cualitativo* de alguna característica general del mundo. Hay diferentes formas de concebir intelectualmente aquello que se desea medir, pero no todas son susceptibles de asignar números.

Berka plantea este punto en términos de la conceptualización de los objetos de medida y de sus relaciones. Por ejemplo, el concepto *distancia Tierra-Luna* puede definirse de diferentes formas: puede ser *la distancia desde el centro de la Tierra al centro de la Luna*, o bien, *la distancia desde la superficie de la Tierra a la superficie de la Luna*, o bien, *la distancia media entre el centro de la Tierra y el centro de la Luna*, entre otros. Nótese que para algunas definiciones son necesarios, a su vez, los conceptos de *centro de la Tierra* o *centro de la Luna* o *distancia media*, etcétera. Del conjunto de definiciones que realicemos del concepto *distancia Tierra-Luna*, algunas serán susceptibles de asignar números, pero otras no, lo cual dependerá de si tenemos o no datos (usualmente provistos por instrumentos) con los cuales darle contenido a nuestra definición y formas desarrolladas y correctas de calcular utilizando tales datos. Cuando no hay ni datos ni desarrollos matemáticos para calcular, entonces el concepto *distancia Tierra-Luna* es meramente cualitativo.<sup>6</sup> En este caso es

---

<sup>5</sup> El hecho de que mi estudio de caso sea la astronomía de Kepler responde precisamente a esta consideración: mi análisis se centra en el surgimiento de la idea moderna de medición científica. Cabe señalar que la idea de medición científica se sigue transformando durante los siglos XVIII, XIX y XX, pero ese periodo no lo analizo aquí. Provisionalmente puedo decir que durante esos siglos la idea de medición integrativa se puede aplicar con los ajustes pertinentes en cada caso especial.

<sup>6</sup> Hacia el siglo III a. C., Aristarco de Samos compuso un tratado titulado *Sobre los tamaños y las distancias del Sol y la Luna*, donde desarrollaba, entre otras cosas, un concepto específico de *distancia Tierra-Luna* y, notablemente, un método matemático correcto para

claro que el problema reside en cómo obtener los datos que se requieren para darle contenido empírico al concepto.

Sin embargo, no en todos los casos las dificultades conceptuales fueron las mismas. Para otros conceptos, como la *rapidez del movimiento* no había en la antigua Grecia ni matemáticas adecuadas para analizarlo ni los instrumentos adecuados para obtener los datos, por lo que solamente había *especulaciones*, en el sentido de Hacking. Aquí la tarea intelectual era mayor que en el caso de Aristarco, porque había que pensar cómo analizar el movimiento matemáticamente y qué instrumentos desarrollar. Por ello, una de las tareas cruciales de este aspecto conceptual es la asignación de números a magnitudes; en otras palabras, transformar conceptos cualitativos en cuantitativos a través del desarrollo conceptual de lo que se quiere medir y del desarrollo de matemáticas adecuadas, ya que sólo mediante esa transformación es posible asignar números a magnitudes físicas, lo cual permite calcular otras magnitudes derivadas de las primeras.<sup>7</sup> Por ejemplo, el tema del movimiento fue fundamental durante el siglo XVII, y modificar conceptualmente lo que se entendía por *movimiento* fue una de las tareas fundamentales para su medición, tanto en el caso del movimiento planetario como en el de los graves.

La transformación conceptual de *cualidades* a *magnitudes* típicamente se lleva a cabo mediante procesos de *abstracción* e *idealización*. Si bien la literatura sobre abstracción e idealización es enorme, es suficiente con la caracterización que realizan Robert Nola y Gürol Irzick (2011: 302 y ss.) al afirmar que hacemos abstracciones de un objeto o evento cuando seleccionamos alguna de sus propiedades y excluimos otras en relación con alguna teoría. Ya que la selección de las propiedades depende de la teoría que aceptemos, podemos abstraer propiedades diferentes

---

calcular la distancia Tierra-Luna. Sin embargo, era imposible obtener los datos relevantes para darle contenido a su modelo con los instrumentos astronómicos que tenía. Por ello, el concepto *distancia Tierra-Luna* en Aristarco sigue siendo cualitativo a pesar de contar con un método matemático correcto. *Cfr.*, Heath, 2010.

<sup>7</sup> En un reciente e interesante trabajo, David Sherry (2011) analiza el cambio conceptual que sufrió el concepto cualitativo de *calor* al concepto métrico de *temperatura* durante el siglo XVII y hasta mediados del siglo XVIII. Entre otras cosas, se muestra que la conversión conceptual de cualidades a magnitudes lleva largos periodos de tiempo.

si lo hacemos desde teorías diferentes. En el caso de la idealización no solamente ignoramos unas propiedades y elegimos otras, sino que la propiedad seleccionada la concebimos en *estado puro*, sin *imperfecciones* que usualmente están presentes. Realizar exitosamente mediciones científicas requiere abstracciones adecuadas e idealizaciones convenientes. Lo *adecuado* y *conveniente* dependerá, entre otras cosas, del grado de precisión a que lleven al momento de ejecutar procesos de medición, esto lo analizaré en el caso de Kepler.

Para el estudio del movimiento de los graves, Galileo eliminó intelectualmente el medio a través del cual los cuerpos se mueven y realizó una serie de consideraciones ulteriores idealizadas donde el medio no tenía ningún efecto físico (1981: 151). En cambio, para Aristóteles, el medio era un factor determinante en la explicación del movimiento, entre más denso fuera el medio, mayor resistencia ejercía sobre el objeto en movimiento. Este es un caso interesante que muestra diferentes formulaciones conceptuales de lo que es el movimiento de los graves partiendo de abstracciones e idealizaciones diferentes (en este caso respecto al medio). Ahora bien, la diferencia no es trivial, porque la estrategia de Galileo, a diferencia de la aristotélica, permite una aplicación matemática al fenómeno del movimiento mucho más rica y compleja de la que permitía la de Aristóteles.<sup>8</sup> A la luz de las consideraciones generales realizadas sobre Aristarco y Galileo, se observa que el desarrollo de instrumentos adecuados, precisos y confiables es *uno* (subrayo que no el único) de los componentes cruciales para transformar la noción antigua de medición en una noción moderna; una noción que *integra* conceptos, instrumentos y matemáticas.

El uso y desarrollo de instrumentos permite no sólo la obtención de datos que están más allá de los límites naturales de la percepción humana, sino que también permite pensar, concebir y descubrir fenómenos nuevos. Jim Bennett (2011) ha distinguido tres clases de instrumentos a principios del siglo XVII: los matemáticos (como los sextantes, cuadrantes, astrolabios, entre otros); los filosóficos (como la bomba de vacío y el termoscopio) y los ópticos (como el telescopio y el microscopio). El uso

<sup>8</sup> Si se desea abundar en este tema, véanse Annas, 1975; Boyer, 1945; Koyré, 1994; y Lloyd, 1989.

de instrumentos fue algo común desde la antigüedad, principalmente en levantamientos topográficos, y permiten apoyar o controlar habilidades cognitivas como calcular, detectar relaciones, establecer proporciones, comparar magnitudes, etcétera. Sin embargo, Meli (2006) ha mostrado que fue a finales del siglo XVI cuando debido a ciertos usos específicos de los instrumentos fue posible pensar y concebir los problemas de la mecánica de una forma diferente:

The development of quantitative experiments in the study of motion and mechanics brought together in *new ways the concern for a fit* between theoretical predictions and precision measurements found largely in the older sciences of astronomy and music. (Meli, 2006: 11, énfasis mío)<sup>9</sup>

Hacia finales del siglo XVI no solamente hay mayor precisión en la construcción de algunos instrumentos matemáticos, como se verá, sino que ello conlleva a la búsqueda de un ajuste mejor entre los datos que proporcionan los nuevos instrumentos con los cálculos teóricos. Meli analiza diferentes funciones cognitivas que tuvieron los instrumentos en la transformación de la mecánica a principios del siglo XVII, principalmente porque permitieron concebir los problemas de la mecánica. Sin embargo, los nuevos instrumentos en astronomía siguieron otros desa-

---

<sup>9</sup> Jürgen Renn ha mostrado correctamente que a pesar del detallado y bien informado estudio histórico que realiza Meli, éste falla en analizar sistemáticamente la relación entre el conocimiento práctico y el teórico, lo cual es crucial cuando se trata de concebir y explicar fenómenos naturales mediante instrumentos y sus interacciones (2008: 643). Como se verá en el análisis del caso de Kepler, la relación entre el conocimiento práctico sobre cómo y por qué usar un instrumento de medición, desarrollado por el mismo Kepler, lo llevó a ofrecer elementos teóricos de juicio para evaluar las observaciones y las conclusiones que derivó sobre el movimiento planetario. **Un punto medular de la idea de medición integrativa es que mediante la interacción, en varios planos, entre los elementos conceptuales, instrumentales y matemáticos se generan diferentes criterios epistémicos de evaluación tanto del conocimiento práctico como del teórico.** En otras palabras, entender *cómo* realizar correctamente mediciones y *por qué* el conocimiento generado por ellas está justificado, dependió directamente de la modificación, transformación y acoplamiento de los tres componentes mencionados .

rollos, permitiendo algo que no se había logrado alcanzar desde la Antigüedad:

[...] a more perfect example, than perhaps ever was given, of legitimate connection between theory and experiment; of experiments suggested by theory, and of theory submitted without prejudice to the test and decision of experiments. (Small, 1804: 2)

Small entiende la idea de *experimento* en el sentido del uso de instrumentos en astronomía y enfatiza la nueva interrelación que permitieron los cálculos teóricos. Fue, tal como veremos, un cambio cualitativo de gran calado e inédito en la astronomía, la nueva relación entre teoría (o conceptos) y datos observacionales, que permitieron los instrumentos astronómicos.

Los instrumentos, por lo tanto, fueron decisivos a principios del siglo XVII en permitir *concebir intelectualmente* aspectos del mundo físico que no habían sido considerados, como la aceleración de la caída libre de los cuerpos, la presión atmosférica, el vacío, etcétera. Ese fue su función cognitiva. Sin embargo, en algunas áreas como la astronomía, los nuevos instrumentos también exhibieron *funciones epistémicas* fundamentales como los únicos medios para comparar sistemáticamente y con gran exactitud (por primera vez en la historia de la astronomía) los cálculos matemáticos derivados de los modelos astronómicos con los datos provistos por los instrumentos. Este fue un paso epistémico fundamental, porque dicha comparación permite evaluar lo correcto o incorrecto, lo exacto o inexacto, el grado de error o de acierto, entre las teorías y datos del mundo físico, a mayor escala que en la astronomía antigua, tal como se verá. Sin este *salto* de escala en la relación entre teoría y mundo físico, la epistemología asociada con la investigación astronómica (pero que indudablemente sirve de ejemplo para otras áreas empíricas) no hubiera podido desarrollarse.<sup>10</sup>

<sup>10</sup> Existen riesgos claros de ciertas afirmaciones contrafactuales en estudios históricos. Sin embargo, después de analizar el asunto, no veo ninguna otra posibilidad material de evaluación teórica, en esta etapa del desarrollo de la astronomía, que no sea mediante el uso de instrumentos de observación y de entender su funcionamiento. Análisis con cierto

Las relaciones entre teoría e instrumentos requieren de concepciones matemáticas adecuadas que permitan principalmente dos cosas: por una parte, representar o concebir matemáticamente conceptos cuantitativos (los cuales eran cualitativos en su origen) y, por otra parte, calcular. Este es el tercer componente de la medición integrativa y se trata de *articular* y *calcular*. A pesar de que la astronomía antigua de Hiparco y Aristarco combinó la observación, los diagramas, las mediciones numéricas y una geometría métrica (una geometría ligada con mediciones numéricas), la astronomía durante el siglo XVII elaboró nuevas combinaciones de elementos más abstractos, nuevos planteamientos matemáticos que permitieron articular los nuevos datos proporcionados por los nuevos instrumentos de observación.<sup>11</sup> *Articular* y *calcular* significa principalmente tener (o desarrollar) modelos matemáticos y técnicas adecuadas de cálculo para los datos proporcionados por los instrumentos de medición y compatibles con los conceptos utilizados. Hacking identifica una función de puente de la articulación. *Conectar* una afirmación con el mundo significa que sea posible deducir consecuencias de dicha afirmación y que puedan probarse. Hacking reconoce que esta idea de articulación la desarrolló Kuhn:

[...] la articulación de Kuhn debe denotar dos tipos de cosas, la articulación de la teoría y la articulación del experimento. Voy a llamar arbitrariamente a la más teórica de esas dos actividades ‘cálculo’. No quiero decir con ello mera computación, sino *la modificación matemática de una especulación, de tal manera que se armonice más con el mundo*. (Hacking, 1996: 243, énfasis mío)

---

detalle este punto en el caso de Kepler. *Cfr.*, Small, 1804: cap. VIII; Donahue, 1994; y Gingerich, 1997.

<sup>11</sup> Kepler desarrolló nuevos procedimientos de análisis matemático para estudiar el movimiento irregular y no circular de los planetas. La matemática asociada con la medición hacia finales del siglo XVI era principalmente aritmética, geometría y teoría de las proporciones, todo ello de origen griego; sin embargo, ese tipo de matemática era insuficiente para analizar el movimiento irregular (acelerado y desacelerado) de los planetas, así como su trayectoria no circular (elíptica).

Esta idea de *modificación matemática de una especulación* es central y requerirá un análisis detallado en la siguiente sección.

En la literatura sobre medición hay por lo menos un acuerdo básico: *una condición necesaria de la medición científica es la asignación de números (o numerales para ser precisos) a una magnitud*, por lo que al determinar parámetros métricos de conceptos cualitativos se requiere una *transformación conceptual* de doble sentido: por una parte, los conceptos cualitativos se han de transformar, mediante idealizaciones y abstracciones, en conceptos métricos y, por otra parte, las matemáticas disponibles en ocasiones son conceptualmente insuficientes al punto que deben modificarse o crearse otras nuevas. En tales ocasiones, “se necesitaba una *matemática nueva* para responder y, a veces, incluso para simplemente plantear las preguntas” (Hacking, 1996: 243, énfasis mío). La articulación supone muchas veces la transformación conceptual tanto de las especulaciones como de la matemática.

Mi punto es que, durante el siglo XVII, las áreas que transitaron de cualidades a magnitudes, o aquellas como la astronomía que escalaron a una mejor y mayor articulación entre los cálculos teóricos y los nuevos datos observacionales, pasaron necesariamente por una *integración dinámica* de las transformaciones de las especulaciones, los instrumentos y la matemática.<sup>12</sup> En otras palabras, esos tres recursos se transformaron y de manera paralela se integraron dinámicamente hasta lograr disciplinas modernas, con leyes de la naturaleza y predicciones exitosas de fenómenos inesperados. Concebir así el proceso de medición tiene consecuencias epistémicas y cognitivas realmente importantes para elaborar la imagen de la ciencia moderna.

---

<sup>12</sup> John Roche, a este respecto, afirma: “Many qualitative phenomena were analysed, observed, or experimented upon in Antiquity, often without any kind of quantification. These include pneumatics, the concept of a vacuum, colourous, the tides, freezing, and electrical and magnetic attraction. Qualitative beliefs and concepts, together with qualitative experimental discoveries have frequently been necessary preconditions for quantitative results” (1998: 30). Esto que Roche llama “qualitative experimental discoveries” es muy similar a lo que me he referido con el título de “articulación de los experimentos e instrumentos”.

Siguiendo ese planteamiento, cabe señalar que *no hay una “modificación matemática” realmente fértil y productiva sin “modificaciones de los instrumentos”* y hay por lo menos dos razones de por qué ello es así. En primer lugar, los instrumentos de medición funcionan como proveedores de datos, mismos que usualmente están más allá de nuestra percepción natural. Pero para que sean *confiables* se requiere transformarlos y refinarlos, de lo contrario sus datos tendrían desviaciones importantes a la hora de hacer cálculos con base en ellos. En segundo lugar, cognitivamente *pensamos con instrumentos*, lo cual significa que ciertas ideas son concebidas a través de los instrumentos que utilizamos y que sin ellos difícilmente podríamos concebir esa parte del mundo. En ese sentido, los instrumentos en general, pero sobre todo los de medición, son una extensión material de nuestra cognición y de nuestra mente.<sup>13</sup>

Con base en tales consideraciones, es posible sostener tentativamente que *llevar a cabo mediciones con el fin de investigar el mundo empírico requiere integrar la modificación matemática e instrumental de especulaciones. Dicha integración puede tomar décadas y requiere necesariamente de la transformación, creación o refinamiento de conceptos empíricos, conceptos (o sistemas) matemáticos e instrumentos (o experimentos)*. Para lograr la integración se requiere que estos tres elementos se acoplen mutuamente. Debido a que la idea de integración está en el centro de lo que es realizar mediciones relevantes y correctas, considero adecuado llamar a esta teoría de realizar mediciones *teoría integrativa de la medición*.

## **INSTRUMENTOS, GEOMETRÍA Y MEDICIONES EN LA ASTRONOMÍA DE KEPLER**

Veremos ahora cómo la transformación de la astronomía antigua en moderna, hacia principios del siglo XVII, pasó un proceso de medición integrativa. Empecemos por analizar la transformación de los instrumentos astronómicos, para después analizar la transformación concep-

---

<sup>13</sup> Domenico Meli (2006) muestra cómo cognitivamente hablando, algunos objetos, instrumentos o experimentos utilizados de formas específicas funcionaron como extensiones de la mente humana para *concebir* nuevas ideas y en ocasiones para *modificar experimentalmente* especulaciones.

tual y la matemática. Desde siempre (y prácticamente en todas las culturas) la astronomía ha utilizado instrumentos para establecer ciertos parámetros, con lo cual la novedad en las mediciones de la astronomía del siglo XVII no fue utilizar instrumentos. La novedad, más bien, tuvo que ver con dos cuestiones: la primera consistió en incrementar sistemáticamente la precisión de los instrumentos existentes a un nivel jamás visto; y colateralmente se inventaron nuevos instrumentos. La segunda se basó en integrar esos instrumentos inéditos con conceptos y matemáticas completamente nuevos. Veámoslo en detalle.

A principios del siglo XVII, los términos *instrumentos* y *experimentos* no significaban lo mismo que en el uso actual. Hay una diferencia importante que ha desaparecido con el tiempo, pero que es crucial entender históricamente porque de ella depende en gran parte la manera en que se han transformado las prácticas de medición y, colateralmente, la de conocimiento empírico. Bennett sostiene que “from the seventeenth century instruments were conventionally classified into mathematical, optical and natural philosophical types” (1993: 105).<sup>14</sup> Los instrumentos matemáticos

[...] such as the dioptra and the astrolabe —and yes, even Galileo’s proportional compass— were part of a long tradition, certified by usage and custom in the restricted realm of the mathematical subjects. The dioptra was based on the well known principles of Euclidean and Ptolemaic optics; the astrolabe embodied the technique of mathematical projection of a sphere on a plane; and the proportional compass was based on the theory of proportions going back to Eudoxus. (van Helden, 1994: 9)

Hiparco (190-120 a. C.) mejoró la dioptra, creó el astrolabio y él mismo atribuye a Eratóstenes (276-194 a. C.) la creación de la esfera armilar (Evans, 1998). La astronomía posicional griega utilizaba algunos de esos

---

<sup>14</sup> Los principales instrumentos desarrollados y/o utilizados durante el siglo XVII en la filosofía natural y astronomía fueron: la bomba de vacío, el astrolabio, el barómetro, las máquinas calculadoras, la brújula, la cruz geométrica, el microscopio, el compás de proporción, el cuadrante, la regla de cálculo, el telescopio, el termoscopio y el reloj de péndulo. Véase también Bennett, 2011.

*instrumentos matemáticos* e incorporaba la geometría y la trigonometría en sus modelos del cosmos; y contaba con registros de observaciones celestes, recopilados por más de 500 años por los babilonios y egipcios. Sin embargo,

[...] from the sources we now have in translation, it appears that the very accurate parameters of the motions of the planets, the sun, and the moon current the Mesopotamians after about 700 B.C. were the result not of accurate measurements but rather of very mediocre measurements continued over a long period of time. We must go to late antiquity, the period from Hipparchus to Ptolemy (ca. 150 B.C.-ca. A.D. 150), to find the first attempts at accurate and convenient measurement to solve specific astronomical problems. Even in the case of Ptolemy, however, it is obvious that he relied heavily on Mesopotamian sources. (van Helden, 1983: 53)

Aunque el *Almagesto* fue considerado por más de 1 500 años como el modelo astronómico más completo, útil y una verdadera síntesis del conocimiento astronómico de la época, hay que recordar que

[...] although Ptolemy's stated observations are not particularly good and in one case err by more than a degree, they do match his tables in an uncanny way. In fact, this situation prevails throughout the entire *Almagest*, which leads to the suspicion that something is going on that does not meet the eye. (Gingerich, 1997: 17)

El *Almagesto* no fue escrito como un libro de investigación, en nuestro sentido, sino más bien como un libro de texto que compilaba el saber astronómico de la época modelado por la geometría euclidiana. Gingerich explica la adecuada correspondencia, cuando existe, entre los modelos de Ptolomeo con los datos usados de la siguiente forma:

I am inclined to think that [...] he may no longer have felt it necessary to find perfect observations, for he could simply have used his theory to judge how much observational error an observation contained, and he could the correct it accordingly. (Gingerich, 1997: 17)

Se ha escrito mucho sobre si Ptolomeo falseó los datos, pero ese no es el punto aquí,<sup>15</sup> sino solamente enfatizar que no estaba comprometido (como tampoco tenía necesidad) con desarrollar un programa sistemático de mediciones precisas y detalladas de diferentes parámetros celestes. En resumen, en la astronomía antigua había mediciones integradas por instrumentos, geometría y conceptos, pero cualitativamente esos recursos habían alcanzado su límite cognitivo puesto que llegaron a su máximo desarrollo. Uno de los tres debía de alcanzar otro nivel de desarrollo para poder realizar otro tipo de mediciones: en el caso de la astronomía fueron los instrumentos.

La astronomía de Copérnico y la de Ptolomeo eran relativamente la misma en cuanto a la precisión (tosca) de sus mediciones, a la matemática utilizada para su elaboración y a los instrumentos de observación.<sup>16</sup> Se puede afirmar que “Copernican astronomy was neither simpler nor more accurate than Ptolemaic astronomy” (Barker y Goldstein, 1988: 302). El elemento revolucionario de Copérnico (1473-1543) fue colocar a la Tierra en movimiento y el Sol inmóvil, no en el centro, al igual que lo había sugerido Aristarco de Samos (310-230 a. C.), pero “in most respects his *De revolutionibus* (1543) follows Ptolemy’s *Almagest* so closely that he can equally well be regarded as the last great practitioner of ancient astronomy” (Thoren, 2003: 3). Copérnico trabajó con datos astronómicos heredados y las observaciones que realizó las llevó a cabo con los estándares e instrumentos de su época; no desarrolló nuevos instrumentos de medición, ni nuevas matemáticas para analizar los datos y tampoco nuevas técnicas de medición.

En cuanto a la precisión de mediciones astronómicas desde la antigüedad y hasta la época de Copérnico, van Helden sostiene que debemos trazar una distinción entre *precisión* y *conveniencia*. La precisión en astronomía posicional se refiere a dos cosas: a lo exacto de las predicciones de la teoría astronómica con las observaciones; o bien a la capacidad de

---

<sup>15</sup> En Guillaumin, 2005: 160 y ss., analizo con detalle la controversia reciente que se ha suscitado respecto al uso aparentemente engañoso que Ptolomeo hace de los datos.

<sup>16</sup> Compárese la descripción de instrumentos que hace Copérnico (1987: 77 y ss.) con la de Ptolomeo (1998: 61 y ss.) y se apreciarán importantes similitudes en cuanto a exactitud.

detección de distancias angulares. La precisión es propiamente un elemento cognitivo de la medición, puesto que principalmente proporciona datos sobre magnitudes. La conveniencia, por su parte, tiene que ver con otros fines prácticos de las mediciones, más que con su precisión. Un ejemplo de un instrumento astronómico impreciso pero conveniente, según John North (1974), es el astrolabio, pues a pesar de su imprecisión era indudablemente útil en la práctica para juzgar el tiempo. Se podría decir de la astronomía antigua incluyendo la de Copérnico, que muchos de sus datos eran convenientes más que precisos.<sup>17</sup>

En cuanto a distancias angulares, la precisión de las mediciones de Copérnico ha sido estimada entre  $1/8^\circ$  y  $1/10^\circ$  ( $6'$ ), lo cual era casi diez veces mejor a la precisión que podían alcanzar los astrolabios medievales. Una consecuencia observacional del sistema heliocéntrico era que debía haber algún paralaje estelar. Paralaje es el desplazamiento angular de la posición aparente de un cuerpo celeste cuando es observado desde dos lugares diferentes. Detectar un paralaje, por muy pequeño que fuera, hubiera sido una prueba observacional directa del desplazamiento de la Tierra alrededor del Sol, sin embargo, el nivel de los instrumentos de medición en tiempos de Copérnico era muy inferior al requerido para tal medición.<sup>18</sup> Sin el desarrollo de métodos e instrumentos de medición nuevos, la teoría de Copérnico se hubiera mantenido como una mera hipótesis matemática.

### **Medición como *integración cognitiva* en la astronomía de finales del siglo XVI. Tycho Brahe y Johannes Kepler**

Copérnico realizó transformaciones conceptuales de gran calado en la astronomía, sin embargo, lo que usualmente se olvida en las historias de la astronomía es que sin la transformación de los *instrumentos* y de la *matemática*, su modelo no iba a ningún lado. Fue Tycho Brahe (1546-1601) quien desarrolló sistemáticamente un programa, sin precedentes

<sup>17</sup> Para ver con detalle en qué sentido los datos de Ptolomeo y Copérnico son convenientes más que precisos véanse Newton, 1977; Evans, 1998; y Gingerich, 1997.

<sup>18</sup> Véase especialmente el capítulo 2 del libro 2 de la obra de Copérnico (1987), *Sobre las revoluciones*, donde explica el uso de los instrumentos que utilizó.

en la historia de la astronomía, para realizar las mediciones astronómicas más precisas, y fue la mente matemática de Johannes Kepler (1571-1630) la que *integró* finalmente las nuevas medidas del cosmos a través de transformaciones matemáticas. A inicios de 1570, Tycho reconocía la necesidad de construir

[...] a new astronomy based entirely on logic and mathematics, *without recourse to any hypothesis*. [He] agreed on the need for new and accurate observations *before attempting to explain* the celestial motions, and it is obvious that Tycho was aware of the need for good instruments to obtain those observations. (Hellman, 1974: 402, énfasis mío)

Desde 1576, y por más de 20 años, había recopilado una gran cantidad de datos obtenidos con instrumentos que él mismo había mandado a construir,<sup>19</sup> y tan precisos que rechazaba todas las observaciones astronómicas anteriores al siglo XVI, incluyendo las de Copérnico (Blair, 1990). Estimaciones han mostrado que el rango de precisión de los instrumentos de Tycho era entre 30" y 50", o alrededor de 10 y 20 veces más que la alcanzada por Copérnico (Chapman, 1983). Pero obtener datos precisos no dependía solamente del instrumento.

The accuracy of the observations depended on the instruments and the care with which they were used. Although Tycho's were without magnification, error

---

<sup>19</sup> Los instrumentos que Tycho mandó a construir y utilizó en su observatorio de la isla de Hven fueron: el Cuadrante acimutal metálico (1576) fue uno de los primeros instrumentos construidos en Hven. Tycho lo utilizó para observar el cometa de 1577 y tiene una precisión estimada de 48.8 segundos de arco. El Globo de Cálculo (1580) que utilizaba para registrar las posiciones de estrellas, que para 1595 eran mil. Igualmente servía para localizar las coordenadas acimutales y convertirlas en coordenadas celestes convencionales. Una esfera armilar de 1.6 mts. de diámetro (1581). Un sextante triangular (1582) de 1.6 mts. de radio. Un gran círculo armilar (1585) de tres metros de diámetro y cuya precisión estimada era de 38.6 segundos de arco. Un cuadrante móvil de madera (1586) de 1.6 mts. de radio y cuya precisión estimada era de 32.3 segundos de arco. Un cuadrante metálico móvil (1588), cuya precisión estimada era de 36.3 segundos de arco.

was minimized by their huge size and by the graduations carefully marked on them to facilitate angular measurements on the celestial sphere, altitudes, and azimuths. *Tycho checked instruments against each other and corrected for instrumental errors.* [...] He observed regularly and achieved an accuracy within a fraction of a minute of arc, an accuracy unsurpassed from the time of Hipparchus to the invention of the telescope. (Hellman, 1974: 405, énfasis mío)

Realizar mediciones precisas dependía también de este tipo de consideraciones metodológicas. En sus instrumentos, Tycho realizó dos principales avances técnicos: usó escalas diagonales en los brazos de lectura de los instrumentos, lo cual le permitía medir fracciones de grado sin incrementar el tamaño de los instrumentos; mejoró las partes de observación de los instrumentos mediante hendiduras en la alidada de los sextantes o cuadrantes con lo cual decrecían los errores de alineación. Sin embargo, uno de los principales desarrollos metodológicos fue que mejoró la recopilación de datos repitiendo las observaciones y obteniendo más datos por cada elemento observado (Thoren, 1973; y Wesley, 1978). “Tycho had an unprecedented concern for accuracy and a unique ability to detect and eliminate flaws in either observational procedure or mechanical design” (Thoren, 2003: 12). Tycho había transformado el *arte* de realizar buenas observaciones astronómicas, el cual dominaban desde los antiguos astrónomos hasta Copérnico, en una *ciencia* astronómica de máxima precisión. Después de Tycho, las observaciones astronómicas adquirieron nuevos estándares de precisión, metodológicos y cognitivos, lo cual es un indicio de que traspasó un *umbral cognitivo* en la astronomía observacional que nunca había sido superado.<sup>20</sup>

A pesar de la precisión alcanzada por las observaciones de Tycho, faltaba entender correctamente algunos de sus elementos ópticos, por ejem-

---

<sup>20</sup> Para tener una idea de este umbral cognitivo, piénsese en lo siguiente: El diámetro angular de la Luna en promedio es de aproximadamente 30 minutos de arco (medio grado). La precisión estimada promedio de los instrumentos de Tycho es del orden de los 30 segundos de arco; mientras que la de Copérnico era de 6 minutos. La precisión alcanzada por Tycho está fuera del rango no sólo de la alcanzada a simple vista, sino de los instrumentos astronómicos anteriores a él y de consideraciones metodológicas para eliminar errores de observación.

plo, los efectos y causas de la refracción. Tycho consideraba seriamente la refracción e incluso sostenía que Copérnico había errado su latitud en más de dos minutos de arco debido a pasar por alto los efectos de la refracción (Thoren, 2007: 195).<sup>21</sup> Sin embargo, el propio Tycho no entendía teóricamente la refracción,

[...] it is needless to say that the accuracy cannot be so great as Tycho fondly hoped, as the errors of observation would be increased by neglect of refraction and by his ignorance of the existence of aberration and nutation. (Dreyer, 1890: 351)

Entender teóricamente los efectos que causa la refracción en las mediciones astronómicas es el paso que no dio Tycho, pero sí Kepler. Por otra parte, si bien la acumulación de datos de un orden de precisión sin precedentes fue un logro sobresaliente en sí mismo, faltaba estimar las consecuencias cognitivas, metodológicas y epistémicas que ello conllevó. Específicamente, faltaba encontrar las relaciones y proporciones correctas *ocultas* entre tales datos *en el marco de una teoría helioestática del cosmos*, para lo cual era insuficiente el hecho de seguir añadiendo datos. Se requería un análisis conceptual y matemático de dichas relaciones y proporciones. Kepler hará ese análisis respecto de diferentes fenómenos astronómicos y físicos, uno de ellos será la refracción, el otro el movimiento de Marte.

Kepler se reunió con Tycho a inicios de 1600 y lentamente empezó a obtener datos que Tycho había acumulado. Uno de los primeros desarrollos conceptuales de Kepler a partir de los datos de Tycho fue sobre la refracción. En las mediciones que Tycho había realizado reconocía que el Sol aparecía aparentemente desplazado hacia arriba conforme se aproximaba al horizonte. Pensó que este fenómeno se debía a la refracción de la luz cerca del horizonte y dedicó una serie de mediciones siste-

---

<sup>21</sup> Tycho reconocía los serios efectos que tenía la refracción y tenía consecuencias para tres parámetros astronómicos de primera importancia: 1) afectaba establecer correctamente la latitud de su observatorio, 2) introducía un radical cambio en el valor que Tycho y todos antes de él habían utilizado para determinar la oblicuidad de la eclíptica, y 3) a establecer el paralaje solar (Thoren, 2007: 226).

máticas de las posiciones del Sol, la Luna y las estrellas fijas. Comparando esas mediciones con predicciones realizadas concluyó que no se detectaba refracción por encima de los  $45^\circ$  para los casos del Sol y la Luna, ni sobre los  $20^\circ$  para las estrellas fijas y los planetas. Los datos de sus mediciones los trasladó a tres diferentes tablas de refracción, una para el Sol, otra para la Luna y la tercera para las estrellas fijas y los planetas (Helden, 1983: 57-58). Los datos obtenidos en las tres tablas eran precisos, pero Tycho no los integró conceptual ni matemáticamente.

Kepler intentó remediar la situación de tener tres tablas diferentes de refracción y en su *Paralipomena ad Vitellionem. Astronomia pars optica* (1604) quiso integrar esos datos. Partió de ciertos principios ópticos y argumentó que la refracción se debía a diferentes densidades del éter y de la atmósfera. Buscó una relación matemática basada en dichos principios que fuera conmensurable con todas las mediciones realizadas de las tres tablas de Tycho. Kepler fue capaz de encontrar su fórmula o ley de refracción, aunque desde nuestro punto de vista con algunos errores, la cual daba buenos resultados de cálculo para latitudes mayores a  $10^\circ$ . Con lo cual Kepler fue capaz de construir una sola tabla de refracción para todos los objetos celestes, incluso más precisa que las de Tycho. El análisis de Kepler integró los datos de las mediciones de Tycho mediante reflexiones matemáticas y consideraciones teóricas para elaborar una ley de refracción.<sup>22</sup> Tycho tenía los datos precisos, pero no las consideraciones matemáticas ni conceptuales que permitían encontrar una proporción matemática para la refracción.

Pero había otro problema con la refracción y, en general, con las observaciones astronómicas que Kepler enfrentó y solucionó. Los astrónomos medían con instrumentos las distancias aparentes entre las estrellas fijas, los planetas y los bordes del Sol y la Luna, y expresaban esas mediciones en arcos de ángulos *visuales* (*anguli visorii*). El punto es que la visión humana no sólo interviene en las mediciones, sino que es un componente de ellas, por lo que “this whole enterprise in astronomy rests upon optical reasons” (Kepler, 2000: 321). Cabe señalar que esta consideración de Kepler respecto de la importancia del estudio de la óptica,

---

<sup>22</sup> Un estudio detallado de las consideraciones metodológicas que Kepler empleó en la construcción de su ley de refracción es Buchdahl, 1972.

tanto en sentido del estudio de la naturaleza de la luz como del funcionamiento de la visión humana, para el desarrollo de la astronomía, no ha sido adecuadamente evaluada (Hon y Zik, 2009).

Antes de toda consideración debemos entender cómo Kepler concebía la empresa astronómica. En el prefacio de su *Paralipomena ad Vitellionem. Astronomia pars optica* (que puede traducirse como *Aspectos suplementarios sobre Witelo. La parte óptica de la astronomía*),<sup>23</sup> simplemente conocida como *Óptica*, Kepler explica que para él la astronomía tiene como objetivo el estudio del *movimiento* de los cuerpos celestes. Éste comprende dos partes: la primera es la investigación de las *formas* de los movimientos de cuerpos celestes; la segunda, que se deriva de la primera, investiga las *posiciones* de los cuerpos celestes en cada momento dado y tiene como fin práctico principal la predicción. La primera parte se constituye mediante la geometría y la segunda con la aritmética. La primera parte se elabora mediante tres componentes: el primero lo llama *mecánico* y tiene que ver con el uso de instrumentos para las observaciones astronómicas; el segundo lo llama *histórico*, y comprende los voluminosos registros de esas observaciones; el tercero lo llama el componente *óptico*, y es la parte de la astronomía que involucra los principios ópticos que comprenden tanto la naturaleza de la luz como el funcionamiento de la visión humana.

Kepler reconoce que Tycho había avanzado enormemente los aspectos *mecánico* e *histórico*, tanto por la construcción de instrumentos como por los “24 books of the most meticulous observations of this sort, embracing the past 40 years or so” (Kepler, 2000: 13). Pero el aspecto *óptico* no sólo estaba descuidado en su relación con la astronomía, sino también en sí mismo completamente mal entendido. La *Óptica* de Kepler

---

<sup>23</sup> Para William H. Donahue (1994) y David C. Lindberg (1996), este libro de Kepler es el desarrollo teórico culminante de la tradición perspectivista en óptica, que inicia con los griegos y pasa por los árabes como Alhazen (965-1040 d. C.) y por autores medievales como Witelo (1230-1300 d. C.) de los siglos XIII y XIV. Pero al mismo tiempo, inaugura el enfoque moderno de la óptica, el cual consiste en entender claramente tres fenómenos: cómo trabajan los ojos, cómo trabaja la refracción y un nuevo nivel de entendimiento de cómo los lentes forman imágenes.

puede ser considerada como una reforma teórica del conocimiento óptico y el complemento que la astronomía requería para lograr mayor confiabilidad en los datos generados por sus mediciones.

La principal motivación de Kepler para desarrollar detalladamente un análisis de la óptica y corregir buena parte del conocimiento óptico que heredó, estuvo ligada a garantizar las mediciones astronómicas de parámetros fundamentales. La empresa astronómica depende completamente del razonamiento óptico y la única forma de garantizar un vínculo confiable entre una construcción mental y la realidad física de los cuerpos celestes era entender teóricamente tanto la naturaleza de la luz como el funcionamiento del ojo humano. Kepler afirmaba a este respecto que,

[...] supposing the place of the celestial body to be known with complete precision, throws the demonstration into difficulty: the nature of light, beset by the inconstancy of optical causes, does not always allow such precision of instruments. (Kepler, 2000: 6)

Uno de los métodos de medición astronómica más usados desde la antigüedad era lo que Kepler llama *the theorem*. Éste consistía en

[...] to use a compass to measure the magnitudes of solar eclipses, the ratios of the diameters of the sun and moon, and the inclinations to the vertical of the circle drawn through the centers of the luminaries. [Sin embargo, Kepler afirmaba que los astrónomos suponían (incorrectamente) que usaban dicho método] avoiding the inadequacy of the eyes, and avoiding the error which generally occurs in a bare estimation. (Kepler, 2007: 57)

Este supuesto fue uno de los mayores errores cometidos por los astrónomos y había contaminado gran cantidad de registros astronómicos. Debido a esta lamentable situación metodológica, que impedía la realización de mediciones astronómicas ultra precisas, Kepler afirma:

It is indeed well worth while here to see how much detriment would result from the ignorance of the proof of this theorem [method]. For since it escaped a number of authors, the result was that in believing in the theorem without restrictions

they fell into a large error. For however many eclipses were observed in this way, they all had come out much greater in the sky than it appeared in the ray: all showed a much greater lunar diameter in the sky than in the ray. [...] *It is my hope in these pages to remove these considerable difficulties.* (Kepler, 2000: 57, énfasis mío)

La reforma de Kepler en la óptica y la astronomía, usualmente consideradas ahora como dos áreas diferentes, tiene un mismo pilar principal: su preocupación por los aspectos teórico-metodológicos de la medición astronómica de alta precisión. De tal manera que en realidad, desde el punto de vista de Kepler, se debían reformar la astronomía y la óptica al mismo tiempo.

Tal reforma era desde los cimientos. Por ejemplo, una de las actividades más cotidianas y  *sencillas*  de la astronomía era identificar la posición de los planetas, y sin embargo había dificultades importantes

[...] because of the eccentric, the planets appear either slow or fast. The cause is partly physical, partly optical. The physical part of the cause does not give the sense of vision a reason for error, but also represents to the vision that which in fact occurs, [an account] of which is in the *Commentaries on the motions of Mars* [obra conocida posteriormente como *Astronomia Nova*]. (Kepler, 2000: 321)

Por otra parte, Kepler advertía a los astrónomos que ellos no debían confiar en su sentido de la vista cuando realizaran mediciones del diámetro aparente de la Luna llena y del Sol (Kepler, 2000: 298). A diferencia de Tycho Brahe, Kepler estaba convencido de que las grandes variaciones en la capacidad visual de cada observador individual hacían imposible establecer las tablas astronómicas correctas. Se requería desarrollar instrumentos muy precisos de observación para lo cual se debía primero entender cómo se comportaba la luz. Kepler decía que:

[...] it cannot [...] be argued from this accident of the sense of sight to what happens outside of consideration of the sense of sight, nor can tables be established for the sake of the sense of sight, which represent neither the object itself nor the defects of all senses of sight. For the astronomer should not present anything

other than those things that in actual fact occur. The sense of vision, however, we leave to the physicians to remedy. (2000: 298)

Incluso los instrumentos tradicionalmente utilizados para estas observaciones eran insuficientes. Se daba cuenta de que utilizando una cámara estenopeica de manera usual para observar y hacer mediciones del diámetro aparente del Sol, la imagen proyectada simplemente no mostraba el diámetro verdadero tanto del Sol o de la Luna, con lo cual el astrónomo era fácilmente engañado. Se requería, antes de usar la cámara estenopeica o de rediseñarla (cosa que finalmente hizo), entender mejor las causas ópticas de esas proyecciones, para luego “to teach how to enter into a most certain procedure for measuring the quantities of eclipses” (Kepler, 2000: 298).<sup>24</sup> Uno de los métodos que Kepler empleó para investigar la variación de la distancia de la Tierra al Sol fue medir el diámetro aparente del Sol a lo largo de un año, a pesar de que este método arrojó resultados no conclusivos, le proporcionó la oportunidad de completar las mediciones astronómicas con la teoría óptica.

## CONSIDERACIONES FINALES

La transformación de la astronomía antigua en moderna requirió de la modificación por etapas de tres ámbitos diferentes: conceptuales,

---

<sup>24</sup> En el último capítulo de su *Óptica*, el capítulo 11, Kepler ofrece los detalles de construcción de un instrumento de observación hecho por él, el cual incorporaba las consideraciones teóricas sobre la óptica que acababa de reformar en los capítulos anteriores. Llamó a tal instrumento “instrumento de eclíptica” y consistía en la combinación de una cámara estenopeica (la cual medía con gran precisión el diámetro aparente del Sol y la Luna) con un cuadrante, tradicionalmente utilizado para establecer las posiciones de cuerpos astronómicos. Entre otras ventajas, dicho instrumento al medir el diámetro del Sol proyectaba la imagen en una pantalla con los debidos ajustes derivados de sus principios teóricos ópticos y evitaba las distorsiones naturales del ojo humano que eran diferentes en cada observador (Kepler, 2000: 297). Para un estudio detallado de los problemas, tanto teóricos como materiales, que Kepler tuvo que superar en la construcción del “instrumento de eclíptica”, véase Hon y Zik, 2009.

instrumentales y matemáticos. Copérnico modificó conceptualmente la astronomía antigua al colocar al Sol inmóvil y la Tierra en movimiento. Tycho proveyó los instrumentos de alta precisión junto con un cúmulo de diversos datos astronómicos inéditamente precisos, pero no reformó conceptualmente la astronomía. Kepler encontró diversas relaciones y proporciones matemáticas, aquí sólo analicé la refracción, pero hizo lo propio con las órbitas planetarias. Las mediciones en la astronomía moderna tuvieron que ver con el proceso de establecer valores (con la exactitud deseable) de alguna magnitud y en encontrar las proporciones correctas entre diferentes parámetros hallados; como vimos, dicho proceso integró aspectos conceptuales, matemáticos e instrumentales.

El estudio de caso muestra que la medición es un proceso cognitivo de gran complejidad, que va mucho más lejos de la mera aplicación de operaciones. Se observó, en términos muy generales, que la medición en astronomía se conformó en un *sistema* constituido por nuevos conceptos, instrumentos de alta precisión y de análisis matemáticos. Un aspecto epistemológicamente interesante de este enfoque tripartito es mostrar que los errores de la medición pueden provenir de tres fuentes diferentes: la matemática, los instrumentos y los conceptos. Esos tres elementos de la medición, concebida como un sistema cognitivo-integrativo, entran en relaciones iterativas, tal como lo vimos y lo menciona Hasok Chang:

In epistemic iteration we start by adopting an existing system of knowledge, with some respect for it but without any firm assurance that it is correct; on the basis of that initially affirmed system we launch inquiries that result in the refinement and even correction of the original system. It is this self-correcting progress that justifies (retrospectively) successful courses of development in science. (2007: 6)<sup>25</sup>

---

<sup>25</sup> Esta conclusión de Chang es muy similar a la tesis de la auto-corrección de la inducción de Charles Peirce. Esta tesis sostiene que el progreso de la ciencia depende de sus métodos auto-correctivos, específicamente sostiene que las cuatro inferencias que utiliza la ciencia (la abducción, la deducción y la inferencia cualitativa y cuantitativa) son inferencias auto-correctivas. Para estudios de la tesis de auto-corrección de Peirce véase Lenz, 1964;

En este estudio las correcciones fueron primero respecto a la posición del Sol y de la Tierra; después al grado de precisión de las observaciones y finalmente a las proporciones entre los datos obtenidos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Annas, Julia (1975), "Aristotle, number and time", *The Philosophical Quarterly*, vol. 25, núm. 99, abril, pp. 97-113.
- Bakalis, Nikolaos (2011), *Philosophical Historical Dimensions of Peirce's Self-Corrective Thesis: Is Scientific Method Self-Corrective?*, Berlín, Alemania, Suedwestdeutscher Verlag fuer Hochschulschriften.
- Barker, Peter y Bernard R. Goldstein (1988), "The role of comets in the Copernican revolution", *Studies in History and Philosophy of Science. Part A*, vol. 19, núm. 3, septiembre, pp. 299-319.
- Bennett, Jim (2011), "Early modern mathematical instruments", *Isis*, vol. 102, núm. 4, diciembre, pp. 697-705.
- Bennett, Jim (1993), "A viol of water or a wedge of glass", en David Gooding, Trevor Pinch y Simon Schaffer (eds.), *The Uses of Experiment: Studies in the Natural Sciences*, Cambridge, Reino Unido, Cambridge University Press, pp. 105-114.
- Berka, Karel (1982), *Measurement: Its Concepts, Theories and Problems*, Dordrecht, Holanda, Springer.
- Blair, Ann (1990), "Tycho Brahe's critique of Copernicus and the copernican system", *Journal of the History of Ideas*, vol. 51, núm. 3, julio, pp. 355-377.
- Boyer, Carl B. (1945), "Quantitative science without measurement: The physics of Aristotle and Archimedes", *The Scientific Monthly*, vol. 60, núm. 5, mayo, pp. 358-364.
- Bridgman, Percy Williams (1938), "Operational analysis", *Philosophy of Science*, vol. 5, núm. 2, pp. 114-131.
- Bridgman, Percy Williams (1936), *The Nature of Physical Theory*, Nueva York, Estados Unidos, Dover Publications Inc.
- Bridgman, Percy Williams (1927), *The Logic of Modern Physics*, Nueva York, Estados Unidos, Macmillan.
- Buchdahl, Gerd (1972), "Methodological aspects of Kepler's theory of refraction", *Studies in History and Philosophy of Science. Part A*, vol. 3, núm. 3, noviembre, pp. 265-298.

---

Laudan, 1974; y Bakalis, 2011. El proceso científico de realizar mediciones es un caso específico de procesos auto-correctivos y, como vimos, es dinámico, integrativo y autorreferente.

- Campbell, Norman Robert (1957), *Foundations of Science: The Philosophy of Theory and Experiment*, Nueva York, Estados Unidos, Dover Publications Inc.
- Canales, Jimena (2010), *A Tenth of a Second: A History*, Chicago, Estados Unidos, University of Chicago Press.
- Chang, Hasok (2007), *Inventing Temperature: Measurement and Scientific Progress*, Nueva York, Estados Unidos, Oxford University Press.
- Chapman, Allan (1983), "The accuracy of angular measuring instruments used in astronomy between 1500 and 1850", *Journal for the History of Astronomy*, vol. 14, núm. 2, pp. 133-137.
- Cooper, Gordon y Stephen Humphry (2010), "The ontological distinction between units and entities", *Synthese*. DOI 10.1007/s11229-010-9832-1. [<http://www.springerlink.com/content/x21234718n670152/>]: consultado en enero de 2012.
- Copérnico, Nicolás (1987 [c. 1543]), *Sobre las revoluciones*, Madrid, España, Tecnos.
- Crease, Robert P. (2011), *World in the Balance: The Historic Quest for an Absolute System of Measurement*, Nueva York, Estados Unidos, W. W. Norton & Company.
- Diez, José (1997), "A hundred years of numbers. An historical introduction to measurement theory 1887-1990", *Studies in History and Philosophy of Science*, vol. 28, núm. 1, pp. 167-185.
- Donahue, William H. (1994), "Kepler's invention of the second planetary law", *The British Journal for the History of Science*, vol. 27, núm. 1, marzo, pp. 89-102.
- Dreyer, John Louis Emil (1890), *Tycho Brahe: A Picture of Scientific Life and Work in the Sixteenth Century*, Edimburgo, Reino Unido, Adam & Charles Black.
- Ellis, Brian (1968), *Basic Concepts of Measurement*, Cambridge, Reino Unido, Cambridge University Press.
- Evans, James (1998), *The History and Practice of Ancient Astronomy*, Nueva York, Estados Unidos, Oxford University Press.
- Galilei, Galileo (1981 [c. 1638]), *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*, Madrid, España, Editora Nacional.
- Gingerich, Owen (1997), *The Eye of Heaven: Ptolemy, Copernicus, Kepler*, Nueva York, Estados Unidos, Springer.
- Guillaumin, Godfrey (2005), *El surgimiento de la noción de evidencia*, México, México, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hacking, Ian (1996), *Representar e intervenir*, traducción de Sergio Martínez, México, México, Universidad Nacional Autónoma de México/Paidós.
- Hacking, Ian (1992), "Self-vindication of the laboratory sciences", en Andrew Pickering, *Science as Practice and Culture*, Chicago, Estados Unidos, pp. 29-63.
- Hacking, Ian (1981), "Do we see through a microscope?", *Pacific Philosophical Quarterly*, vol. 63, núm. 3, pp. 305-322.

- Hackmann, Willem (1989), "Scientific instruments: Models of brass and aids to discovery", en David Gooding, Trevor Pinch y Simon Schaffer (eds.), *The Uses of Experiment: Studies in the Natural Sciences*, Cambridge, Reino Unido, Cambridge University Press, pp. 31-65.
- Heath, Thomas L. (2010), *Aristarchus of Samos. The Ancient Copernicus; A History of Greek Astronomy to Aristarchus, Together with Aristarchus's Treatise on the Sizes and ... A New Greek Text with translation and notes*, Nueva York, Estados Unidos, Nabu Press.
- Heilbron, John (1993), *Weighing Imponderables and Other Quantitative Science Around 1800*, Berkeley, Estados Unidos, University of California Press.
- Heilbron, John (1979), *Electricity in the 17th and 18th Centuries: A Study of Early Modern Physics*, California, Estados Unidos, University of California Press.
- Helden, Albert van (1994), "Telescopes and authority from Galileo to Cassini", *Osiris*, vol. 9, núm. 2, pp. 9-29.
- Helden, Albert van (1983), "The birth of the modern scientific instrument, 1550-1700", en John Burke (ed.), *The Uses of Science in the Age of Newton*, California, Estados Unidos, University of California Press, pp. 49-84.
- Hellman, Doris (1974), "Brahe, Tycho", en Charles Coulston Gillispie (ed.), *Dictionary of Scientific Biography*, vol. 2, Nueva York, Estados Unidos, Charles Scribner's Sons, pp. 401-416.
- Hon, Giora (1995), "Going wrong: To make a mistake, to fall into an error", *The Review of Metaphysics*, vol. 49, núm. 1, pp. 3-20.
- Hon, Giora (1989a), "Is there a concept of experimental error in Greek astronomy?", *The British Journal for the History of Science*, vol. 22, núm. 2, pp. 129-150.
- Hon, Giora (1989b), "Towards a typology of experimental errors: An epistemological view", *Studies in History and Philosophy of Science. Part A*, vol. 20, núm. 4, pp. 469-504.
- Hon, Giora y Yaakov Zik (2009), "Kepler's optical part of astronomy (1604): Introducing the ecliptic instrument", *Perspectives on Science*, vol. 17, núm. 3, pp. 307-345.
- Keithley, Joseph F. (1999), *The Story of Electrical and Magnetic Measurements: From 500 BC to the 1940s.*, Nueva York, Estados Unidos, Wiley-IEEE Press.
- Kepler, Johannes (2000 [c. 1604]), *Optics*, Nuevo México, Estados Unidos, Green Lion Press.
- Koyré, Alexander (1994), "Del mundo del 'aproximadamente' al universo de la precisión", en Alexander Koyré, *Pensar la ciencia*, Barcelona, España, Paidós, pp. 117-145.
- Laudan, Larry (1974), "Peirce and the trivialization of the self-corrective thesis", en Ronald N. Giere y Richard S. Westfall (eds.), *Foundations of Scientific Method: The Nineteenth Century*, Bloomington, Estados Unidos, Indiana University Press, 275-306.
- Lenz, John W. (1964), "Induction as self-corrective", en Edward C. Moore y Richard S. Robin (eds.), *Studies in the Philosophy of Sanders Peirce*, Amherst, Estados Unidos, University of Massachusetts Press, pp. 151-162.

- Lindberg, David C. (1996), *Theories of Vision from Al-Kindi to Kepler*, Chicago, Estados Unidos, University of Chicago Press.
- Lloyd, Geoffrey Ernest Richard (1989), "Measurement and mystification", en Geoffrey Ernest Richard Lloyd, *The Revolutions of Wisdom: Studies in the Claims and Practice of Ancient Greek Science*, California, Estados Unidos, University of California Press, pp. 215-284.
- Meli, Domenico Bertoloni (2006), *Thinking with Objects: The Transformation of Mechanics in the Seventeenth Century*, Baltimore, Estados Unidos, The Johns Hopkins University Press.
- Newton, Robert R. (1977), *The Crime of Claudius Ptolemy*, Baltimore, Estados Unidos, The Johns Hopkins University Press.
- Nola, Robert y Gürol Irzik (2011), *Philosophy, Science, Education and Culture*, Dordrecht, Holanda, Springer.
- North, John (1974), "The astrolabe", *Scientific American*, vol. 230, núm. 1, enero, pp. 96-106.
- Pickover, Clifford (2008), *Archimedes to Hawking: Laws of Science and the Great Minds Behind Them*, Oxford, Estados Unidos, Oxford University Press.
- Ptolomeo (1998), *Ptolemy's Almagest*, traducción de Gerald J. Toomer, Princeton, Estados Unidos, Princeton University Press.
- Renn, Jürgen (2008), "Review: *Thinking with Objects: The Transformation of Mechanics in the Seventeenth Century* by Domenico Bertoloni Meli", *Renaissance Quarterly*, vol. 61, pp. 642-643.
- Roche, John James (1998), *The Mathematics of Measurement*, Nueva York, Estados Unidos, Springer.
- Sherry, David (2011), "Thermoscopes, thermometers, and the foundations of measurement", *Studies in History and Philosophy of Science. Part A*, vol. 42, núm. 4, diciembre, pp. 509-524.
- Small, Robert (1804), *An Account of the Astronomical Discoveries of Kepler*, Londres, Reino Unido, Mawman.
- Thomson, William Lord Kelvin (1891 [c. 1883]), "Electrical units of measurement (3 May 1883)", *Popular Lectures*, vol. 1, pp. 73-76.
- Thoren, Victor (2007), *The Lord of Uraniborg: A Biography of Tycho Brahe*, Cambridge, Reino Unido, Cambridge University Press.
- Thoren, Victor (2003), "Tycho Brahe", en René Taton y Curtis Wilson (eds.), *Planetary Astronomy from the Renaissance to the Rise of Astrophysics. Part A, Tycho Brahe to Newton*, Cambridge, Reino Unido, Cambridge University Press, pp. 3-21.
- Thoren, Victor (1973), "New light on Tycho's instruments", *Journal for the History of Astronomy*, vol. 4, núm. 1, pp. 25-45.
- Toulmin, Stephen (1953), *The Philosophy of Science. An Introduction*, Londres, Reino Unido, Hutchinson University Press.

Wesley, Walter (1978), "The accuracy of Tycho Brahe's instruments", *Journal for the History of Astronomy*, vol. 9, pp. 42-53.

Whitehead, Alfred North y Bertrand Russell (2011), *Principia Mathematica*, vol. 1, Ciudad, Estados Unidos, Rough Draft Printing.

**Godfrey Guillaumin:** Doctor en filosofía, con especialidad en historia y filosofía de la ciencia, por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en 1997. Realizó una estancia posdoctoral en el Center for Philosophy of Science de la Universidad de Pittsburgh mediante una beca Fulbright-García Robles. Actualmente es profesor investigador del departamento de filosofía de la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa (UAM-I). Miembro del SNI. Sus áreas de especialidad son la epistemología histórica; la historia de la filosofía de la ciencia; la metafilosofía y la historia de la ciencia. Ha publicado una serie de artículos especializados y diversas antologías, además de los libros: *El surgimiento de la noción de evidencia* (México, UNAM, 2005); *Raíces metodológicas de la teoría de la evolución de Charles Darwin* (México, UAM/Anthropos, 2009) e *Historia y estructura de La estructura. Introducción al pensamiento histórico de Thomas Kuhn* (UAM, en prensa).

D. R. © Godfrey Guillaumin, México D.F., julio-diciembre, 2012.