

SOBRE EL CONCEPTO DE LEYES DE LA NATURALEZA EN ISAAC NEWTON^{1, 2, 3}

ON THE CONCEPT OF LAWS OF NATURE IN ISAAC NEWTON

Sergio Orozco-Echeverri^{4, 5}

RESUMEN

El propósito de este artículo es, de un lado, esclarecer los usos por parte de Newton del concepto de Ley Natural (LN), a la luz de los problemas y tradiciones disponibles para él –principalmente, del cartesianismo, las filosofías experimentales inglesas y las tradiciones mágicas y alquímicas– y, de otro lado, señalar las transformaciones que realiza sobre este concepto de raíz cartesiana en sus dos principales obras –los Principia y la Opticks. Como conclusión de lo anterior, mostraré que este concepto de LN permite afirmar como una “cuestión de hecho” la existencia de las entidades postuladas en las LN, aunque se desconozcan sus propiedades o cualidades o incluso su causa. Aspectos importantes de este concepto de LN se identifican tradicionalmente como legado de la revolución científica y, por tanto, su aplicación retrospectiva a Galileo, Kepler o Boyle, entre otros, constituye una clara indicación del anacronismo que resulta de la carencia de estudios históricos sobre el concepto de LN; su esclarecimiento permite, de otro lado, arrojar luces sobre la expansión y desarrollo del newtonianismo en el siglo XVIII.

Palabras clave: Isaac Newton, Leyes naturales, Filosofía natural, Filosofía de la ciencia, Siglo XVII.

ABSTRACT

The purpose of this article is double, to clarify the uses by Newton's concept of Natural Law (LN), in the light of the problems and traditions available to him, mainly Cartesian, the English experimental philosophies and alchemical - magic and traditions and, on the other hand, point out the transformations performed on this concept of Cartesian rooted in its two major Works -the Principia and Opticks. In conclusion, I will show that this concept of LN can say as a "matter of fact" the existence of the entities postulated in LN,

1 Recibido: 18 de enero de 2016. Aceptado: 24 de febrero de 2016.

2 Este artículo se debe citar así: Orozco-Echeverri, Sergio. “Sobre el concepto de leyes de la naturaleza en Isaac Newton”. *Rev. Colomb. Filos. Cienc.* 16.32 (2016): 155-184.

3 Agradezco las discusiones con John Henry y Silvia Manzo a propósito de las leyes de la naturaleza en la revolución científica que han servido para depurar y matizar las tesis aquí expuestas. Este escrito recoge los resultados de mi trabajo de investigación en el grupo Conocimiento, Filosofía, Ciencia, Historia y Sociedad, adscrito al Instituto de Filosofía de la Universidad de Antioquia.

4 Profesor asistente, Instituto de Filosofía, Universidad de Antioquia. Correo electrónico: sergio.orozco@udea.edu.co

5 Medellín (Colombia).

although their properties or qualities or even cause is not yet known. Important aspects of this concept of LN are traditionally identified as a legacy of the scientific revolution and therefore retrospective to Galileo, Kepler and Boyle, among others, this application is a clear indication of anachronism resulting from the lack of historical studies above LN concept; additionally, its clarification allows shed light on the expansion and development of Newtonianism in the eighteenth century.

Keywords: Isaac Newton, Natural laws, Natural philosophy, Philosophy of science, Seventeenth Century.

Nada es más difícil que resolver la disputa acerca de quién es el más ilustre, el más digno de admiración, en algún ámbito de la grandeza humana (...) En estas disputas hay más que un asunto de opinión, o de gusto o de época: hay también un asunto de cantidad, una cuestión de cuánto, sin que por esto haya posibilidad alguna de juzgar la cosa en una balanza. Este elemento de dificultad está bien ilustrado por una excepción. Entre los indagadores acerca de lo que nuestra ignorancia denomina leyes de la naturaleza, se da una preeminencia indisputada a Isaac Newton, tanto por el clamor popular como por el sufragio deliberado de sus pares. El derecho a esta supremacía es casi demostrable.

Augustus De Morgan, *Review of sir David Brewster's Life of Newton*

1. INTRODUCCIÓN

Con estas palabras comienza Augustus De Morgan (1806-1871) su reseña de la famosa biografía de Newton escrita por sir David Brewster (1781-1868), la primera que contó con pleno acceso a los manuscritos de la colección de Portsmouth y en la que se le presenta como el más grande entre los filósofos naturales de todos los tiempos. A pesar del aparente tono hagiográfico, De Morgan dedicó sus esfuerzos a defender, contra Brewster y otros, la idea de una historia de la ciencia sin héroes, imparcial, apoyada en la evidencia textual, concediéndole un lugar a las “figuras menores”, pues solo así podría esclarecer cómo se realizaron los grandes descubrimientos. En efecto, la imagen de Newton que presenta De Morgan enfatiza, como ha señalado Higgitt, “que era la mente del hombre, y no su carácter, lo que era digno de admiración” (123). En su matizada interpretación de Newton, no duda en considerarlo un gran filósofo natural y, por esto, no parece llamar la atención que en la cita se resalte su supremacía en relación con “lo que nuestra ignorancia denomina *leyes de la naturaleza*”. La privilegiada posición de Newton entre los mortales por su descubrimiento de las leyes naturales aparece explícitamente desde la oda de Halley a la primera edición de los *Principia* de 1687 (12) y es también el centro del famoso epitafio de Alexander Pope: “La naturaleza y sus leyes yacían ocultas en la noche; Dios dijo ‘que sea Newton’ y todo fue luz”.

Resulta paradójico que el nombre de Newton esté históricamente ligado a las leyes de la naturaleza y que, a pesar de la considerable extensión de la industria Newton, no se haya esclarecido en qué sentidos utilizó el término y con qué propósitos, de dónde lo tomó, cómo lo transformó y qué implicaciones tienen estas transformaciones en relación con aspectos de su pensamiento tales como la teología, la filosofía natural, las matemáticas y los estudios bíblicos. El propósito de este artículo es avanzar en estas preguntas. Mostraré que los escasos tratamientos que se han hecho del concepto de ley natural en Newton se han enfocado en su sentido teológico y han obviado la complejidad de su uso en el contexto de las matemáticas y la filosofía natural, donde adquiere su complejidad propia y en el que se da su recepción del concepto cartesiano. Pero antes, es necesario mencionar de paso el problema de las leyes naturales en la historiografía de la revolución científica, en la cual se enmarca este trabajo.

Los abundantes estudios y la vitalidad de las discusiones en filosofía de la ciencia sobre el concepto de leyes de la naturaleza contrastan con la escasa atención que ha recibido por parte de los historiadores de la ciencia. En efecto, a pesar de la diversidad de estudios sobre la revolución científica de los siglos XVI y XVII en torno a los cuales se renovó y consolidó la historia de la ciencia como disciplina, el concepto ha recibido una atención considerablemente escasa en relación con otros conceptos claves de la época⁶. No obstante, no se trata de un terreno enteramente inexplorado.

El punto de partida de las investigaciones es el hecho que, durante el siglo XVII, el concepto de leyes de la naturaleza comenzó a aparecer de manera frecuente y creciente en la filosofía natural, en contraste con la escasa o nula aparición antes de la fecha en este campo. Las leyes de la naturaleza comienzan a hacer parte del discurso de los filósofos naturales en la medida en que se construyen las prácticas de la ciencia moderna, se desarrollan investigaciones de fenómenos naturales y se discute sobre asuntos metodológicos y metafísicos de la exploración del mundo natural. Su importancia puede apreciarse, por ejemplo, en el lugar que ocupan las “lois de la nature” de Descartes, que encabezan su filosofía natural como principios de la explicación o los “axiomata sive leges motus” con que comienzan los Principia de Newton y en los que reposa en buena medida la argumentación geométrica de las tesis de la obra. De hecho, la imagen de la ciencia moderna que se consolida en los siglos XVIII y XIX reinterpreta el surgimiento de la ciencia moderna en el XVII en términos de leyes, si bien sus autores usualmente no recurrieron al concepto

⁶ Entre los panoramas y diagnósticos recientes de esta situación es útil consultar a Henry (2004), Manzo (en prensa), Daston y Stolleis, y Watkins.

para denominar sus descubrimientos como, por ejemplo, las leyes del movimiento planetario de Kepler, la ley de la caída de los cuerpos de Galileo o la ley de los gases de Boyle.

Los problemas historiográficos se ubican en el intento por esclarecer el origen, los límites y alcances del concepto de ley. Si este no es de carácter filosófico-natural, ¿de dónde proviene?, ¿qué implicaciones tiene su extrapolación de campos donde ocurre con frecuencia, como las matemáticas o la teología, a la filosofía natural?, ¿qué se quiere significar con este recurso? En el caso particular de Newton, las leyes desempeñan un papel central en su filosofía natural al constituirse en el punto de partida (las leyes del movimiento) y principal logro argumentativo (la ley de gravitación universal) que permite explicar la diversidad de los fenómenos del movimiento. Por esta razón, el concepto de leyes de la naturaleza se enmarca en la concepción de una filosofía natural matemática y es subsidiario de los complejos desarrollos de esta idea de Newton.

La mayoría de los análisis que se han hecho de este concepto en Newton se refieren a su sentido teológico-metafísico o se realizan mediante análisis terminológicos⁷. Los primeros pierden de vista la riqueza del contenido conceptual que este adquiere en manos del Newton matemático y filósofo natural. En efecto Newton, como crítico del cartesianismo, reformula el concepto de ley al fundar la geometría en la mecánica y, en consecuencia, modifica de manera novedosa los linderos entre la filosofía natural y las matemáticas de su contexto; esta modificación tiene, como mostraré, profundas consecuencias en el concepto de ley y, en particular, en lo tocante a la causalidad. De manera explícita o implícita, los tratamientos de la teología de Newton, en cuanto teología voluntarista, se han ocupado de la significación de este concepto y han contribuido a esclarecer uno de sus usos más importantes. De hecho, uno de las principales tesis acerca del surgimiento del concepto de ley natural lo atribuye a los usos en las tradiciones de la teología voluntarista y, por tanto, se incluyen y señalan análisis de Newton (Oackley). Los segundos análisis, que utilizan mapas terminológicos para detectar distintos usos en la obra de Newton, también pierden de vista el entramado conceptual al que este pertenece y, por tanto, la especificidad que adquiere en el autor. A pesar de señalar diferentes orígenes del concepto en Newton, se desconocen las modificaciones específicas de esas tradiciones –y de otras a las que recurre el autor– para construir su filosofía natural y, en consecuencia, reformular el concepto de

7 Los análisis teológicos se pueden encontrar, por ejemplo, en Harrison (2008), Henry (2004), Force y Popki, Funkenstein y Orozco-Echeverri (2013); los terminológicos son principalmente Ruby, Roux y en menor medida Steinle.

ley natural. Manzo ha señalado que estos análisis terminológicos, por la complejidad de los mapas que construyen y por la polisemia de las “leyes de la naturaleza” en el periodo, corren el riesgo de no esclarecer ni su sentido ni sus usos. El caso de Newton, como mostraré, es particularmente sensible al respecto pues, al desconocer el entramado conceptual del que hace parte el concepto de ley, se acaba en una lectura esquemática donde este se clasifica por usos aparentes, obviando los temas metafísicos y conceptuales de los que resultan en efecto sus sentidos.

“leyes de la naturaleza” en el periodo, corren el riesgo de no esclarecer ni su sentido ni sus usos. El caso de Newton, como mostraré, es particularmente sensible al respecto pues, al desconocer el entramado conceptual del que hace parte el concepto de ley, se acaba en una lectura esquemática donde este se clasifica por usos aparentes, obviando los temas metafísicos y conceptuales de los que resultan en efecto sus sentidos.

Debido a que el sentido teológico del término se ha explorado en los estudios sobre Newton, no me ocuparé de él. El lector podrá apreciar, no obstante, que su análisis en el contexto de las matemáticas y la filosofía natural encuadra con una interpretación voluntarista de la teología de Newton⁸.

2. UNA FILOSOFÍA NATURAL CON PRINCIPIOS MATEMÁTICOS: LA FUNDACIÓN DE LA GEOMETRÍA EN LA MECÁNICA

La búsqueda de la certeza en el proyecto filosófico natural de Newton, como lo han mostrado Guicciardini y Shapiro, tiene como trasfondo una respuesta al carácter probabilista o falibilista del conocimiento que se afirma o se desprende de los movimientos dominantes en la época, sea de corte cartesiano, sea de inspiración baconiana (Guicciardini 19-29; Shapiro 12-40). Ante el carácter conjetural e hipotético de las explicaciones de los fenómenos naturales que encuentra, por ejemplo, en los *Principia Philosophiæ* de Descartes y sus seguidores y en la *Micrographia* de Hooke, desde la década de 1670, Newton esboza un proyecto de filosofía natural cuya certeza provendría del recurso a las demostraciones geométricas.

En sus *Lectiones Opticæ* de 1670-1672, Newton presenta la indisoluble relación entre las propiedades de los colores y las propiedades de la refracción como

8 En mi artículo “De la existencia a la providencia” (2013), me ocupo de la teología voluntarista de Newton en relación con su filosofía natural, a partir del argumento del diseño. Allí pueden encontrarse referencias sobre este sentido teológico y bíblico del concepto de ley. Es útil consultar también la polémica de Henry (2009) y Harrison (2004) al respecto, así como Force y Popkin.

objeto prioritario de investigación en óptica. Para él, aunque la naturaleza del color no sea parte de las matemáticas (“*naturam colorum ... qui nihil ad Mathesin attinere censeantur*”), será inútil si no se considera dependiente de la investigación sobre la refracción, en cuanto matemática, y viceversa: “quién desee conocer propiamente una debe necesariamente conocer la otra” (86). Ahora bien, para Newton la generación de los colores (*generatio colorum*) implica la geometría y, de este modo, puede entenderse como una extensión de las matemáticas “al igual que la astronomía, la geografía, la navegación, la óptica y la mecánica se consideran auténticamente ciencias matemáticas” (86). Esta implicación de la geometría en la ciencia de los colores no se da, sin embargo, por su dependencia de las leyes de la refracción. Se debe más bien a que la ciencia de los colores, como ciencia, pertenece a las matemáticas. En este punto, Newton explica cómo entiende la relación entre el estudio de los colores, como parte de la filosofía natural (“*eorum cognitio tantâ firmatur evidentiâ*”) y las matemáticas:

Pues, aunque los colores pertenezcan a la física, la ciencia de ellos debe sin embargo considerarse matemática, en tanto que se tratan mediante razonamiento matemático. En efecto, debido a que una ciencia exacta de ellos parece ser una de las cosas más difíciles que desea la filosofía, espero mostrar con mi ejemplo qué tan valiosas son las matemáticas en la filosofía natural. Por tanto, insto a los geómetras a investigar la naturaleza de manera más rigurosa y a aquellos dedicados a la ciencia natural a cultivar primero geometría. Así los primeros no derrocharán enteramente su tiempo en especulaciones sin valor para la vida humana ni los segundos, mientras trabajan asiduamente con un método absurdo, no fallarán perpetuamente en alcanzar su objetivo. Pero en verdad con la ayuda de los geómetras que filosofan (*Geometris philosophantibus*) y de los filósofos que ejercitan la geometría (*Philosophis exercentibus Geometriam*), en vez de las conjeturas y probabilidades que se ventilan por todo lado, alcanzaremos finalmente una ciencia natural soportada por la mayor evidencia (86, 88).

Newton señala que si bien el fenómeno de los colores pertenece a la filosofía natural (*physica*), su estudio es matemático. En las tradiciones que le anteceden, la óptica geométrica, entendida como estudio de la refracción, era diferente del estudio de los colores que los filósofos naturales de principios del siglo XVII desarrollaron en el contexto del mecanicismo, tal como lo muestra Shapiro (8-12). En Descartes, Newton había encontrado la reducción del fenómeno de la refracción de la luz a principios mecanicistas que le habían permitido derivar la ley de refracción; sin embargo, la explicación reposaba en última instancia en el supuesto según el cual la luz se consideraba una presión transmitida a través de un medio elástico, lo cual no estaba suficien-

temente probado por experimentos (Newton *Lectioes*). En el pasaje citado, Newton enfatiza la necesidad de tratar el fenómeno de los colores de manera geométrica, es decir, mediante razonamiento matemático. Sin embargo, este tratamiento no equivale a la reducción de la filosofía natural a las matemáticas, como sucede por ejemplo en los Principia de Descartes mediante la identificación de la naturaleza del cuerpo con la extensión en sentido geométrico (I, 53; II, 1, 4). Lo que afirma, más bien, es que la “generación de los colores” implica (*complectitur*) la geometría.

El tipo de relación que Newton establece entre la teoría de los colores, como parte de la filosofía natural, y las matemáticas que se presenta en las *Lectioes*, aparece de manera recurrente a lo largo de su vida en textos como el *Praefatio* a la primera edición de los Principia y el *Scholium Generale* a la segunda, además de resonar en las famosas *Questiones* de la *Optice* latina y, posteriormente, en las formulaciones de la versión inglesa de 1716/1717. En estos textos se puede apreciar que no solo la generación de los colores, sino en general la filosofía natural, tiene principios matemáticos y, en consecuencia, sus proposiciones pueden aspirar a la certeza de sus demostraciones. En sus formulaciones posteriores, Newton es explícito en ubicar su proyecto históricamente en el marco de las tradiciones que le anteceden, rechazándolas, reformulándolas o presentándose como continuador. Este trasfondo es fundamental para arrojar luz sobre la difícil cuestión que se plantea en la afirmación según la cual la filosofía natural se puede tratar matemáticamente.

En *Praefatio* a los *Principia*, Newton presenta su filosofía natural matemática en el marco de tres tradiciones precedentes: (i) la investigación de la naturaleza de los antiguos según Pappus, que daba la mayor importancia (*maximi fecerint*) a la mecánica, y (ii) la de los modernos que, habiendo rechazado las “formas substanciales y las cualidades ocultas”, se propusieron reducir los fenómenos de la naturaleza “a leyes matemáticas” (*phenomena naturæ ad leges mathematicas revocare aggressi sint*). Newton había comenzado a leer las *Collectio Mathematica* de Pappus en un intento por criticar la Géométrie de Descartes, en sus estudios tempranos de la década de 1670. Sin embargo, Pappus se convertiría durante el desarrollo de su anticartesianismo en la principal fuente para la recuperación de los métodos de análisis y síntesis que, según Newton, habían constituido la práctica de la auténtica geometría en la Antigüedad. La relación con Pappus y la tradición que representa son de tal importancia, que Newton se introduce como continuador de esta y, a partir de su comprensión del análisis y la síntesis, crítica el análisis algebraico y los infinitesimales, no solo como errores sino como corrupciones de la forma

correcta de proceder en matemática⁹. Como ha mostrado Guicciardini (296), la aplicación de la mecánica a la naturaleza que Newton identifica en la Antigüedad a partir de Pappus puede en efecto encontrarse al comienzo del libro 8 de las *Collectio Mathematica* en que se afirma:

Puesto que la consideración mecánica (*mechanica contemplatio*), Hermodoro hijo mío, conduce a los más importantes asuntos de nuestra vida, se afirma correctamente por parte de los filósofos que es digna de la más alta estima, y que todos los matemáticos la cultivan con no indiferente atención (*omnes mathematici non mediocri studio in eam incumbunt*), y de hecho es la primera en el tratamiento de la fisiología, que versa sobre la materia de los elementos del mundo (...) En realidad una parte de la mecánica es racional, mientras que la otra necesita del trabajo manual, al sentir de Herón el mecánico (305).

El pasaje contiene elementos en los que Newton se apoya para establecer la relación entre filosofía natural y matemáticas en su *Præfatio*. De un lado, y más allá de lo que afirman Guicciardini (297) y Cohen (381), el pasaje no solo establece una distinción entre dos tipos de mecánica a la que Newton apelará, sino que también señala la estima (*existimata*) que los filósofos tienen por la mecánica. Esta consideración de la mecánica por los filósofos se opone a la tradición que diferenciaba las artes liberales de las mecánicas, a la que ya había hecho frente casi un siglo atrás Francis Bacon en su proyecto de la *Instauratio magna*¹⁰. Pero, más allá de esta estima y sus implicaciones para la distinción enraizada en la escolástica, Pappus reporta que los matemáticos se ocupan de la mecánica y que esta hace parte de las investigaciones filosófico-naturales, tales como la fisiología (*physiologia*).

En cuanto a su alusión a los modernos, que Newton cita con aprobación, no es del todo claro a quiénes se refiere, pues la caracterización en términos de aquellos que se han propuesto reducir “los fenómenos de la naturaleza a leyes matemáticas” puede en principio referirse tanto a Descartes y sus seguidores, cuyas leyes del movimiento y métodos Newton critica, como al círculo más inmediato de su predecesor en la cátedra lucasiana Isaac Barrow y el erudito arquitecto y matemático Christopher Wren, y que se retrotraería incluso hasta la férrea posición de Hobbes en defensa de la geometría de compás y escuadra

9 Sobre este tema de tensión entre el intento de Newton por recuperar los métodos geométricos de la Antigüedad y con ellos resolver los problemas de la filosofía natural, en contraste con su práctica efectiva que utiliza métodos algebraicos, véase Pycior, Guicciardini y Mancosu.

10 Bacon reconoce aspectos de valor en la tradición de las artes mecánicas y la eleva en una crítica a la distinción señalada, por ejemplo, en su *Novum Organum*. Al respecto, véase Rossi, Pérez-Ramos y Manzo (2006). Es de notar que, para Newton, el alta estima de la mecánica por parte de la filosofía es la recuperación de un tema de la Antigüedad.

en contra del análisis de Wallis. Sea como fuere, Newton reconoce su obra en el contexto de una tradición floreciente (o renaciente, según se considere) en la que los desarrollos de las matemáticas se han orientado a explicar el mundo natural y, en consecuencia, han modificado la comprensión de la filosofía natural. De hecho, Newton señala como logro de los modernos el rechazo (*missis*) a las “formas substanciales y a las cualidades ocultas”, es decir, a las explicaciones típicas de las ya desprestigiadas en los ámbitos fuera de las universidades filosofías aristotélico-escolásticas, a las que se habían opuesto desde el siglo XVI tanto las tradiciones de la magia natural como el mecanicismo floreciente a principios del siglo XVII. En efecto, es común a la filosofía natural de Descartes y a la obra de Barrow la crítica a la escolástica.

De las tres tradiciones que Newton menciona al comienzo del *Præfatio*, se sigue la caracterización de la tarea que emprende en los *Principia*, como una ubicación de su proyecto en relación con los precedentes. La afirmación, *in extenso*, dice:

Puesto que los antiguos (según *Pappus*) consideraron la *mecánica* de la mayor importancia para la investigación de la naturaleza y la ciencia y los modernos, rechazando las formas substanciales y las cualidades ocultas, se han propuesto reducir los fenómenos de la naturaleza a leyes matemáticas, se ha considerado en este tratado cultivar las matemáticas en tanto se relacionan con la *filosofía* (15).

Además de las vinculaciones a las tradiciones mencionadas, el pasaje introduce un matiz importante del proyecto: los *Principia* no son un tratado de matemáticas sino en la medida en que estas se relacionan con la filosofía natural. Ahora bien, esta relación, según Newton, es posible debido a que la geometría se funda en la mecánica. En consecuencia, el tratamiento de las matemáticas en cuanto se relacionan con la filosofía (natural) será la mecánica racional, un término que como señala Cohen, recogió el objeto de los *Principia* en sus usos inmediatamente posteriores (381). El argumento que Newton construye reúne su crítica a la tradición cartesiana mediante el establecimiento de una nueva relación entre exactitud (*accuratio*) y mecánica.

Newton parte de la distinción trazada por Pappus entre una mecánica que se ocupa de la naturaleza y otra de los objetos producidos por el hombre. Esta distinción, según él, se ha asimilado de manera equívoca por parte de sus contemporáneos pues se ha identificado la mecánica exclusivamente con las artes manuales, a las que se les atribuye imperfección y carencia de exactitud por el proceder del artesano, y se contrasta con la geometría que se relaciona precisamente con la exactitud:

Los antiguos establecieron dos mecánicas: la *racional*, que procede por demostraciones exactas (*accurate*) y la *práctica*. A la práctica pertenecen todas las artes manuales de las que propiamente toma nombre la mecánica. Pero como los artesanos suelen proceder con escasa exactitud, ocurre que la *mecánica* entera se distingue de la *geometría* de tal modo que lo que se hace con exactitud se asimila a la *geometría* y lo que se hace con poca exactitud a la *mecánica* (15).

Sin embargo, para Newton esta identificación de la mecánica con las artes manuales y su consecuente caracterización de inexacta (*minus accurata*) no debe extenderse a la mecánica en general (o universal) pues, a su parecer, la exactitud no depende del arte si no del artesano (*errores non sunt artis, sed artificum*) y, en consecuencia, el más perfecto artesano sería el más perfecto mecánico (*si quis accuratissime operari posset, hic foret mechanicus omnium perfectissimus*). Por esta razón, considera que los trazados de las líneas en que se apoya la geometría pertenecen (*pertinent*) a la mecánica. Es decir, la generación de los elementos sobre los que versa la geometría son parte de la mecánica. Ahora bien, debido a que la geometría “no enseña a trazar estas líneas, sino que lo postula”:

Postula que el aprendiz procure trazarlas exactamente (*accurate describere*) antes de alcanzar el límite de la *geometría*; después enseña cómo se resuelven los problemas mediante estas operaciones, puesto que trazar rectas y círculos es cuestión *problemática* pero no geométrica. Desde la *mecánica* se postula su solución, mientras en *geometría* se enseña el uso de las soluciones (15).

En resumen, mientras que la geometría postula el trazo de las líneas, la mecánica efectivamente las traza. De ahí que la inexactitud se deba no a una oposición entre la mecánica y la geometría, sino a la habilidad del mecánico. Ahora bien, la geometría lo que efectivamente enseña es “cómo se resuelven problemas mediante estas operaciones”, es decir, mediante los trazos que postula pero que realiza la mecánica. Por las razones anteriores, Newton concluye que la geometría se funda en la práctica de la mecánica (*Fundatus igitur geometria in praxis mechanica*) y, en consecuencia, la concibe como “aquella parte de la Mecánica universal que propone y demuestra con exactitud el arte de medir (*artem mensurandi accurate proponit ac demonstrat*)”¹¹.

Una vez ha mostrado que la exactitud de la geometría puede provenir precisamente de la exactitud de la mecánica en que se funda, Newton retoma la división que encuentra en Pappus entre mecánica racional y mecánica de las

11 Sobre las implicaciones de esta reformulación de la geometría fundada en la mecánica en el contexto inmediato de Newton y, particularmente, como una respuesta a la *Géométrie* de Descartes, es indispensable consultar los trabajos de Guicciardini.

artes manuales, para construir su concepto de mecánica racional, el objeto de los *Principia*. Como la geometría se asocia con la magnitud y la mecánica con el movimiento, la mecánica racional para Newton es “la ciencia, propuesta y demostrada exactamente, de los movimientos que resultan de cualesquiera fuerzas y de las fuerzas que se requieren para cualesquiera movimientos” (16). Ahora bien, el propósito de Newton es avanzar en esta mecánica que, según él, los antiguos cultivaron en relación con las fuerzas manuales (la base de las artes manuales); pero su avance se debe sobre todo a que él no se ocupa “de las artes, sino de la filosofía”, es decir, no se ocupa de las fuerzas y los movimientos resultantes de las operaciones del hombre, sino de las fuerzas y movimientos que operan en la naturaleza. El cambio en la causa eficiente del movimiento del que se ocupa la mecánica racional de los *Principia* implica que esta puede aspirar a la exactitud (*accuratio*), porque el mundo es la obra del mecánico más perfecto (*mechanicus omnium perfectissimus*), es decir, Dios. En otras palabras, las demostraciones geométricas, en cuanto mediciones, son exactas.

3. ANÁLISIS Y SÍNTESIS: DE LAS MATEMÁTICAS A LA FILOSOFÍA NATURAL

Además de la fundación de la geometría en la mecánica como rasgo peculiar de la filosofía natural matemática de Newton, la forma en que este asimila los métodos de análisis y síntesis de la geometría y los extiende a la filosofía natural son condición para entender la extensión del concepto de leyes de la naturaleza y, en particular, lo que quiere significar cuando las denomina “axiomata sive leges motus” (axiomas o leyes del movimiento) al comienzo de los *Principia*. Los estudios sobre este tema son amplios y sus conclusiones polémicas. Para los propósitos de mi argumento, me restringiré a una caracterización esquemática¹².

La certeza de la demostración matemática se identificaba con la fuerza deductiva de la síntesis, cuya máxima exposición se encontraba en los *Elementos* de Euclides. Entre los modernos, la demostración sintética fascinó a Hobbes quien, imitando a Euclides, estructuró su obra a la manera deductiva de unos *Elementos de filosofía*; la *Ética demostrada según el orden geométrico* de Spinoza es también buena muestra de esto. La fuerza demostrativa de la síntesis consistiría en que a partir de principios autoevidentes y solo extrayendo las conclusiones que por necesidad se siguen de estos se lograrían derivar todas

¹² El lector interesado puede remitirse a Guicciardini, Cohen, Guerlac, Domski, Ducheyne y, recientemente, el análisis de Molina.

las proposiciones necesarias para la construcción de la filosofía (en muchos casos no solo natural sino también, como en el caso de Hobbes, “civil”, es decir, moral y política)¹³. Las actitudes en torno a la síntesis durante el siglo XVII son variadas, y oscilan entre la veneración, como en el caso de Hobbes, hasta el recelo, como en Descartes, quien ante el reclamo de Mersenne sobre el método de las *Meditationes*, afirma que la síntesis “no otorga, como la otra (el análisis), una plena satisfacción a los espíritus de quienes desean aprender, porque no enseña el método por el que la cosa ha sido inventada” (IX, 122). Incluso, no siempre es adecuado para la geometría (IX, 123).

Además de la síntesis, que se caracteriza en las *Collectio Mathematica* de Pappus y se ejemplifica en los Elementos y en otros fragmentos recuperados en el Renacimiento, durante el siglo XVII se extendió la idea según la cual los antiguos contaban con un método de descubrimiento que se denominaba análisis¹⁴. Las posiciones sobre el análisis son aún más divergentes; para Descartes, este método de los antiguos que se perdió o que intencionalmente ocultaron “muestra la verdadera vía por la cual una cosa ha sido metódicamente inventada, y hace ver cómo los efectos dependen de las causas” (IX, 121). Por esta razón, lo considera la auténtica forma de demostración y no simplemente de persuasión, como la síntesis. La posición de Newton se apoya principalmente en las enigmáticas afirmaciones de Pappus, al comienzo del libro VII de las *Collectio Mathematica*, cuya ambigüedad sirvió para construir toda suerte de interpretaciones sobre el presunto análisis de los antiguos. Para Newton, la síntesis (*compositio*) que se aprecia en Euclides y otros es la auténtica forma de demostración, mientras que el análisis (*resolutio*) es un método de investigación, es decir, una forma de buscar soluciones a los problemas que luego deberán probarse sintéticamente (y en cuya exposición, al menos en principio, el análisis debe desaparecer completamente):

Lo que Pappus describe aquí es lo mismo que hacemos cuando, asumiendo lo desconocido como conocido y, de ahí, por medio de una argumentación adecuada (*argumentationem debitam*) unimos (*colligendo*) lo conocido con lo desconocido, reducimos un problema a una ecuación; y luego, con la ayuda de la ecuación, en secuencia inversa unimos (*colligimus*) lo verdaderamente conocido (*vere cognitum*) con lo que es verdaderamente desconocido (*vere incognitum*). Tampoco nuestra álgebra parece diferir de su análisis, excepto en la mera forma de su expresión (*Mathematical Papers* VII, 248-250).

13 Este recurso al método geométrico en la investigación de temas “civiles” puede apreciarse, por ejemplo, en el *De Cive*. Sobre la recepción hobbesiana del análisis y la síntesis, puede consultarse Pycior y Jessep.

14 La literatura sobre el análisis, sus caracterizaciones y su importancia en las matemáticas del siglo XVII es bastante amplia. Véase, por ejemplo, Guicciardini, Mancosu, Mahoney y Pycior.

Como se puede apreciar en la cita de su no publicada *Geometriae Libri Duo*, el análisis y la síntesis son en realidad procedimientos de un mismo método que avanza en dos direcciones con propósitos diferentes. El análisis daría por cierto lo buscado y pretendería encontrar, mediante un razonamiento riguroso, la conexión con un principio conocido o demostrado a partir del cual, siguiendo el camino inverso, se podría mostrar cómo lo desconocido que se asumió como dado y punto de partida se sigue de un principio conocido o demostrado. La interpretación de análisis y síntesis como procesos inversos le permite a Newton extenderlos a la filosofía natural.

Debido a la relación que Newton avizora entre filosofía natural y matemáticas, la máxima validez en filosofía natural depende de la implementación del método de análisis y síntesis y, en particular de su primera parte, que fundaría la filosofía natural en el mundo y no en hipótesis o conjeturas. Al extrapolar los términos de la comparación, Newton muestra la forma en que reinterpretaría elementos de las filosofías experimentales dominantes en su momento para su proyecto de explicación del mundo natural. Así se aprecia, por ejemplo, en uno de los párrafos concluyentes de la *Opticks*:

Como en matemáticas, en filosofía natural la investigación de las cosas difíciles por el método de análisis debe (*ought*) siempre preceder al método de composición. Este análisis consiste en hacer experimentos y observaciones y en trazar conclusiones generales a partir de ellos por inducción y sin admitir objeciones en contra de las conclusiones, excepto las que se tomen de experimentos o de otras ciertas verdades. Pues las hipótesis no han de considerarse en la filosofía experimental. Y aunque argumentar a partir de los experimentos y las observaciones por inducción no sea demostración de las conclusiones generales, no obstante es la mejor forma de argumentar que admite la naturaleza de las cosas, y debe considerarse tanto más fuerte cuanto más general sea la inducción. Y si no ocurre excepción alguna de los fenómenos, las conclusiones pueden decirse (*may be pronounced*) generales. Por esta vía del análisis (*way of analysis*) podemos proceder de los compuestos a los ingredientes, y de los movimientos a las fuerzas que los producen; y en general, de los efectos a sus causas, y de las causas particulares a las más generales, hasta que el argumento termine en la más general. Este es el método de análisis; y la síntesis consiste en asumir la causas descubiertas y establecidas como principios (*the Causes discover'd and establish'd as Principles*) y por medio de ellas explicar (*explaining*) los fenómenos que proceden de ellas, y probar (*proving*) las explicaciones (404-405).

Este famoso pasaje señala cómo Newton interpreta el análisis como inducción y la síntesis como demostración. Muchos de los elementos aquí contenidos constituyen una reafirmación de las *Regulae philosophandi* que incluyó en

los *Principia*, como elementos que le permitían inferir la universalidad de la fuerza gravitacional y su respectiva ley. A pesar de la diversidad y complejidad de los elementos del pasaje, me interesa resaltar la forma en que Newton asume –no sin problemas, como ha mostrado Guicciardini (315-328)– las tradiciones experimentales en términos del análisis. Para Newton, la investigación filosófico-natural es analítica en la medida en que constituya una investigación experimental que relacione los efectos con las causas –i.e., que conozca las causas por los efectos–, en un movimiento que va desde la experiencia a sus componentes de manera causal. En sentido estricto, no se trata de un movimiento de lo particular a lo general, en el uso corriente y lógico que entendemos hoy la inducción, es decir, en el sentido de proposiciones cada vez más generales como en el ejemplo clásico del cisne blanco. Más bien, se trata de un proceso mediante el cual se indagan sistemáticamente las propiedades y las causas de los fenómenos. Ahora bien, esta investigación no se apoya en un único experimento, debido a las limitaciones de nuestra experiencia, que hace que no percibamos las sustancias de las cosas sino únicamente sus manifestaciones en relación con nuestros sentidos. En efecto, como trata el asunto en un borrador al *Scholium Generale*, se puede apreciar que el carácter no necesariamente repetitivo, pero sí sistemático y riguroso de los experimentos, exigido en el análisis es la consecuencia de nuestras limitaciones cognitivas, de un lado, y exhibe el compromiso de Newton con el experimentalismo y la desconfianza en la razón deductiva como forma de conocer el mundo, de otro lado:

No conocemos la sustancia de las cosas. No tenemos idea de ellas. Obtenemos sus propiedades solas de los fenómenos y de las propiedades [inferimos] qué sean las sustancias. Que los cuerpos no se penetran unos a otros lo obtenemos de los fenómenos solos; que las sustancias de clases diferentes no se penetran cada una no aparece más que por los fenómenos. Y no podríamos afirmar impulsivamente que no puede inferirse de los fenómenos (...) No vemos más que las formas y los colores de los cuerpos, no oímos más que sonidos, no tocamos más que superficies externas, olemos olores y gustamos sabores; pero no conocemos ni las sustancias ni las esencias mismas por ningún sentido, por ningún acto de reflexión y, por tanto, no tenemos más idea de ellas que la que un ciego tiene de los colores (en Orozco 112)¹⁵.

El carácter inferencial del conocimiento causal implica que este repose en la extensión de la inducción, es decir, en la medida en que por medio de experimentos se haya mostrado la correlación entre el fenómeno o la propiedad y su

¹⁵ Realicé un estudio más detallado de los rasgos empiristas del análisis y la síntesis en Newton en el artículo de 2009 (99-125).

causa; en términos de Newton, que se haya “deducido de los fenómenos”. En otras palabras, según la limitación de los sentidos que constituye el punto de partida de Newton, nuestro conocimiento es siempre inferencial y esta inferencia se apoya en los experimentos. El análisis es, en consecuencia, la forma mediante la cual podemos investigar y unir (*colligere*) las propiedades y sus causas de manera experimental, pero la demostración reposa enteramente en el proceder sintético.

4. EXPERIMENTACIÓN, EXPLICACIÓN Y CUALIDADES OCULTAS

Otro de los aspectos más importantes de esta concepción del análisis es que en el compromiso de Newton con el experimentalismo se puede apreciar su relación con la que Henry ha denominado una tradición de las “cualidades ocultas”. Esta surge de los elementos característicos de la transformación que se dio en la apropiación del mecanicismo cartesiano en Inglaterra, en el polémico contexto político y religioso del siglo XVII. Para Henry, no se trata de elementos aislados presentes en algunas obras, sino de una tradición consolidada a lo largo del siglo que llegaría hasta Newton a través de autores como Walter Warner (1563-1643), Walter Charleton (1618-1707), Hale (1609-1676), Henry Power (1623-1668), Francis Glisson (1597-1677) y los más conocidos, Robert Hooke (1635-1703) y Robert Boyle (1627-1691). En esta tradición, y a partir de las consecuencias de la pasividad de la materia en los universos en los que todo sucede por la colisión de partículas puestas en movimiento por Dios en el origen de los tiempos (por ejemplo, Descartes y Hobbes), los filósofos naturales ingleses comenzaron a postular principios (*foci*) de actividad en la materia denominados “principios activos”. Estos serían responsables de la diversidad de los fenómenos y evitarían las implicaciones de un mundo enteramente material que se identificaba con el ateísmo (como el mundo de Hobbes). Estos principios activos no podrían explicarse enteramente como materia en movimiento y, en consecuencia, invitarían a nuevas entidades. Ahora bien, tampoco implicaban la introducción de entidades supernaturales –lo cual le concedería argumentos a los “entusiastas”¹⁶, sino que se trataba de entidades naturales, distintas de la materia, pero responsables de su actividad, cuyas acciones podían descubrirse mediante la experiencia.

En esta tradición, en general, había una primacía de lo que podía determinarse por la observación y la experimentación sobre las explicaciones causales, las

¹⁶ Sobre los entusiastas y su importancia en el contexto de la segunda mitad del siglo XVII en Inglaterra, véase Jacob y Snobelen.

cuales se consideraban distorsionadoras o peligrosas para los fines que perseguía la filosofía natural, por cuanto rebasaban el límite de aquello que podría mostrarse como indiscutible. Uno de los ejemplos más interesantes a los que recurre Henry es el de Joseph Glanvill, quien en sus investigaciones sobre la relación entre las heridas y los ungüentos –un tema por demás clásico de las tradiciones de iatroquímica y de la tradición de la magia natural–¹⁷ señala:

Queda por fuera de mi camino indagar si la solución del *Anima mundi* [de Henry More] es una mejor explicación que cualquiera de las soluciones *mecánicas*. La primera es más desesperada, la última más ingenua, que la satisfacción sólida. Es suficiente para mí que de *facto* haya tal relación entre el ungüento magnético y el cuerpo vulnerado y no necesito estar atento a la causa (*and I need not to be solicitous of the Cause*) (citado en Henry 1986 359).

Esto puede apreciarse también en las investigaciones de Robert Boyle sobre “*el resorte del aire*” (spring of the air) en las que afirma que su propósito no ha sido “asignar la causa adecuada al resorte del aire, sino únicamente manifestar que el aire tiene este resorte y relatar algunos de sus efectos” (166). El límite del discurso está claro: no se trata de establecer una teoría acerca del resorte del aire, sino hacerlo manifiesto como característica del aire y mostrar sus efectos. Aunque las causas puedan permanecer ocultas, sus efectos son manifiestos. De ahí que las “cualidades ocultas” no hagan referencia, en esta tradición, a las formas sustanciales que los modernos atribuyen a la escolástica como una explicación circular sino más bien a las potencias o principios de actividad en los cuerpos, responsables de los fenómenos de la naturaleza, que pueden establecerse y afirmarse a partir de los experimentos aun cuando sus causas permanezcan desconocidas. Así las cosas, como señala Henry (1986), el pronunciamiento de Newton en la *Opticks* en defensa de la gravedad como una cualidad manifiesta, aun cuando su causa sea desconocida, no es un recurso argumentativo *ad hoc* sino, por el contrario, el recurso a una tradición bien establecida en la filosofía natural inglesa. Más adelante analizaré ese pronunciamiento.

A partir de los elementos anteriores –la fundación de la geometría en la mecánica, el análisis y la síntesis en la filosofía natural y la tradición de las cualidades ocultas–, es posible entender la perspectiva general de la filosofía natural newtoniana en la que se formulan las leyes de la naturaleza. En efecto, en el planteamiento de Newton en el *Prefatio* a los *Principia* y que exhibe el núcleo de su proyecto, se pueden reconocer los elementos anteriores:

¹⁷ Sobre la importancia de la magia natural en relación con el surgimiento de la ciencia moderna y, en particular, con esta tradición, véase Henry (2008).

“Pues toda la dificultad de la filosofía parece consistir en que, a partir de los fenómenos del movimiento, investiguemos (*investiguemus*) las fuerzas de la naturaleza y después desde estas fuerzas demostremos (*demonstremus*) el resto de los fenómenos” (16).

5. LEYES DE LA NATURALEZA: MATEMÁTICAS, REGULARIDAD Y CAUSALIDAD

Las apariciones tempranas del concepto de ley en Newton se enmarcan en el contexto de la tradición cartesiana. De un lado, él utiliza el concepto en el sentido de las tradiciones matemáticas de las que lo toma el mismo Descartes. De otro, se encuentra el concepto mediado por la filosofía natural cartesiana en el que las leyes no solo enuncian regularidades, sino que constituyen explicaciones causales de los fenómenos en cuestión. Aunque no es posible separar enteramente estas dos tradiciones en Newton –pues mucho de su saber e interés por las tradiciones matemáticas proviene de su lectura de Descartes–, sí lo es identificar al menos una dualidad interesante. Como han señalado Guicciardini, Henry y antes Westfall, mientras Newton desarrolla desde su juventud en la década de 1670 una crítica profunda a las matemáticas cartesianas y, a su distinción de mecánica y geometría a propósito de la clasificación de las curvas en la *Géométrie* o del análisis algebraico, mantiene un vocabulario filosófico-natural cercano al cartesiano hasta su famosa correspondencia con Hooke y, al menos, hasta 1684 cuando continúa explicando el movimiento celeste en términos de vórtices y no de atracción¹⁸.

En los textos de óptica y matemáticas, Newton utiliza el concepto de ley como lo hereda de las tradiciones matemáticas, es decir, como una regularidad en los fenómenos que se puede formular en términos generales, abstractos y cuantitativos (Ruby; Roux 547). De este modo, se puede afirmar que Newton tiene acceso a las tradiciones de las que Descartes toma su concepto de ley natural y lo modifica. En este sentido, por ejemplo, utiliza de manera relativamente consistente la palabra ley en relación con la refracción en la polémica sobre la luz de los colores que se deriva a partir de la publicación de su “An hypothesis explaining the properties of light”. En una carta a Henry Oldenburgh del 6 de julio de 1672, en el contexto de la polémica, Newton aclara que su teoría de los colores de la luz no es el resultado de la confrontación entre teorías, sino que se deriva “*directa y positivamente de los Experimentos*” (19r). Para aclarar esto, muestra que ha examinado la ley de refracción por medio de experimentos

18 Véanse Henry (1986), Hall y Hall, Herivel, Cohen, Westfall y Guicciardini.

antes de considerar “la naturaleza de los colores” e incluso antes de entenderla como una “ley”. Al explicar qué tipo de preguntas ha tenido en cuenta para realizar la investigación experimental en que se apoyan sus conclusiones, es posible reconocer el uso propio del término ley de las tradiciones matemáticas:

2. ¿Cuál es la ley (*law*), según la cual, cada rayo se refracta más o menos? Si esta es tal que el mismo rayo se refracta siempre según las mismas proporciones (*ratio*) de los senos de incidencia y refracción y si diversos rayos [se refractan] según diversas proporciones; o si la refracción de cada rayo es mayor o menor sin ningún tipo de regla (*rule*); esto es, si cada rayo tiene cierto grado de refrangibilidad según el cual se realiza su refracción o si se refracta sin tal regularidad (*regularity*) (19v).

Este mismo uso aparece en diversos lugares de la *Opticks* (21, 28) y en general en sus manuscritos de óptica y matemáticas tempranos, incluidas las *Lectiones Opticae* en las que se empieza a plantear la relación de la filosofía natural con las matemáticas en el contexto de la óptica de los colores.

De otro lado, aunque la influencia del concepto cartesiano de ley natural en Newton parece estar por fuera de toda duda razonable, es de notar sin embargo que al menos desde el manuscrito que los Hall intitularon “Laws of motion”, puede apreciarse el esfuerzo de Newton por desarrollar una filosofía natural en tono cartesiano utilizando las herramientas conceptuales de sus *Principia Philosophiae*. En efecto, los conceptos, su sintaxis y su formulación son típicos de la manera cartesiana de plantear los problemas en filosofía natural, en la que las “lois de la nature” constituyen el referente argumentativo fundacional y los principios más generales en el orden deductivo. El rasgo característico de esta filosofía natural y de su recurso a las leyes naturales es, como ha argumentado Henry, el carácter causal que Descartes confiere a las leyes como recursos explicativos, a diferencia del concepto matemático: “Una ley de la naturaleza en este sentido no es simplemente la afirmación de una regularidad observada sino una afirmación formalizada de una regularidad fundamental que se puede mostrar para explicar un rango amplio de fenómenos naturales” (2004 79-80). Dada la complejidad del problema de las leyes naturales en la filosofía cartesiana, es importante que el lector se remita a los estudios al respecto. Para los propósitos de mi argumento, los elementos que resalta esta definición son suficientes.

Teniendo en mente dicha utilización de la ley en Descartes, se pueden apreciar sus características en el tratamiento que hace Newton del lugar, el movimiento, la velocidad y la fuerza en el manuscrito intitulado por los Hall “Laws of motion”:

Hay una extensión uniforme, el espacio, o una expansión continua en todas las direcciones sin límite, en la cual están todos los cuerpos, cada uno en diversas partes de ella. Las diversas partes del espacio poseídas y adecuadamente ocupadas por ellos son sus lugares. Y su paso de un lugar o parte del espacio a otro, a través del espacio intermedio, es su movimiento. Dicho movimiento se realiza con más o menos velocidad según desarrolle a través de más o menos espacio en tiempos iguales o a través de espacios iguales en más o menos tiempo. Pero el movimiento mismo y la fuerza para perseverar en el movimiento es más o menos según como el hecho de que el tamaño de los cuerpos en su velocidad sea mayor o menor. Y dicha fuerza es equivalente al movimiento que es capaz de generar o destruir (157).

A partir de las definiciones anteriores, que constituyen el marco de referencia, Newton formula regularidades con sentido causal que explicarían diversos fenómenos y que denomina reglas (rules): cómo dos movimientos progresivos se convierten en uno; cómo dos movimientos regulares circulares se transforman en uno; en qué casos un cuerpo circulando preserva su mismo estado y en cuáles no. Una vez concluidas sus “reglas de reflexión” (es decir, las reglas sobre cómo los cuerpos se comportarían en el caso de que colisionaran), Newton escribe: “Algunas observaciones sobre el movimiento. Sólo aquellos cuerpos que sean absolutamente duros se reflejan exactamente según estas reglas (*are exactly reflected according to these rules*)” (162). Sin embargo, reconoce que los cuerpos que nos rodean (*amongst us*) tienen diferentes grados de dureza que implican una diferencia con los resultados previstos en las reglas. En sus cuatro observaciones posteriores, Newton utiliza el concepto de regla de manera reconociblemente cartesiana (163-164), pero lejos aún del carácter geométrico que tendrán en sus *Principia*.

La formulación madura de las leyes de la naturaleza de Newton –sus tres leyes del movimiento y su ley de la gravitación universal– aparece en su filosofía natural matemática apoyándose en los recursos mencionados. A la luz de lo expuesto en el primer apartado y teniendo en cuenta los usos tempranos del concepto, mostraré que las principales características del concepto en Newton son: (i) el carácter regular y matematizado de un fenómeno observable en el que está de base la relación entre geometría y mecánica; (ii) el carácter axiomático de las leyes, entendidas como principios de la demostración obtenidos por el análisis y su función como principios de la filosofía, en cuanto causas establecidas, es decir, en cuanto leyes del movimiento; en este sentido son principios causales en la explicación filosófica y no meras descripciones matematizadas de regularidades; (iii) la consecuente reformulación de la causalidad en las leyes que pueden referirse a hechos observados sin necesidad de que las

leyes sean causales, es decir, sin necesidad de que las leyes deriven su necesidad de principios metafísicos precedentes.

5.1. Las leyes como regularidades matematizadas

Este aspecto se puede apreciar en el título que escoge Newton para sus leyes y en el que he insistido en este texto: axiomas o leyes del movimiento. La arquitectura geométrica de los *Principia* (y de la *Opticks*) se abre con una serie de definiciones cuyo propósito es caracterizar las entidades a las cuales se puede recurrir en la demostración posterior. Estas definiciones no son metafísicas sino más bien filosófico-naturales en el sentido de Newton: son términos cuya significación se ha elucidado y establecido experimentalmente (es decir, por medio del análisis); de ahí que cada una esté acompañada de ilustraciones experimentales que permiten esclarecer su sentido. Una vez establecidas las definiciones, Newton formula sus leyes del movimiento:

Ley 1. Todo cuerpo persevera en su estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme, a no ser en tanto que sea impelido a cambiar en su estado por fuerzas impresas (...)

Ley 2. El cambio de movimiento es proporcional a la fuerza motriz impresa y sucede en línea recta según aquella fuerza que se imprime (...)

Ley 3. A toda acción sucede siempre una reacción igual y contraria: o sea, las acciones mutuas de dos cuerpos siempre son iguales y dirigidas en direcciones opuestas (54-55).

En los manuscritos inmediatamente anteriores a los *Principia*, estas mismas leyes se habían denominado hipótesis. En la última versión antes de los *Principia*, Newton las reagrupa bajo el encabezado de *leges*. Tal como puede apreciarse en las formulaciones, las tres leyes establecen regularidades generales que son potencialmente observables: la inercia, la proporcionalidad de movimiento y fuerza, así como la acción y la reacción. Se trata, sin embargo, de generalizaciones que, de acuerdo con Newton, se han obtenido mediante el análisis, es decir, mediante la experimentación. Aunque Newton no lo afirme, de la caracterización del análisis de la primera parte podemos suponer que al menos en su justificación, estas leyes son formulaciones generales apoyadas por experimentos o “deducidas de los fenómenos”. Esta lectura se ve respaldada por el hecho ya indicado de que las leyes se ilustran, una vez enunciadas, con evidencia experimental: en la primera, Newton menciona los proyectiles que preservan su movimiento hasta que la resistencia del aire y la gravedad

los hacen descender o una rueda que gira y se detiene por la resistencia del aire o los planetas y cometas que mantienen su movimiento por tener “menos resistencia”; en la tercera, Newton refiere el caso de presionar una piedra con un dedo: tanto el dedo presiona la piedra como a su vez este es presionado por aquella o el caso de un caballo que tira de una piedra.

De lo anterior se puede entender cómo estas leyes se refieren a regularidades observables que se han formalizado de modo geométrico, es decir, se han hecho matemáticamente significativas mediante la formulación de proporciones o medición en los elementos que intervienen en la regularidad: la perseverancia del movimiento o del reposo es proporcional a la fuerza impresa que intenta modificar el estado del cuerpo; el cambio de movimiento es proporcional a la fuerza (“si alguna fuerza genera algún movimiento, el doble de la fuerza generará el doble del movimiento”); a la acción le corresponde una reacción “igual y opuesta”, es decir, de la misma magnitud y en dirección contraria. La matematización de las regularidades en términos de las proporciones hace de las leyes enunciados de los cuales se puedan derivar afirmaciones menos generales, pero más complejas, esto es, enunciados en los que por ejemplo intervengan las tres leyes de manera simultánea. Esta característica se refiere sobre todo a su carácter axiomático o funcional en la estructura demostrativa.

Para Newton, estas leyes son axiomas de la ciencia del movimiento, no axiomas solo de la matemática que puedan ocasionalmente servir a la filosofía natural. A diferencia del muy difundido “estilo de Newton” de I. B. Cohen, en el que Newton construye modelos matemáticos que de modo progresivo se hacen complejos para acercarse a la realidad y luego serían eventualmente seleccionados y utilizados para explicar el mundo, por la fundación de la geometría en la mecánica, las leyes no solo son axiomas sino, como Newton mismo lo afirma, leyes del movimiento y, por tanto, principios de la filosofía.

5.2. Las leyes como principios de la filosofía

Las leyes en cuanto axiomas son principios de la demostración geométrica y en cuanto leyes del movimiento, principios de la filosofía. Esto se ha esclarecido en el hecho de que para Newton, siguiendo la vía del análisis, se investiguen las causas de los efectos en cuestión y, una vez establecidas según los criterios que validan el procedimiento, se puedan pronunciar como generales y utilizarse como principios de la filosofía. Por principios, en este contexto, se entiende la utilización de las leyes para la explicación (“derivación”) filosófico-natural de otros fenómenos.

En un manuscrito planeado para la *Opticks* de 1704, Newton presenta este carácter de las leyes del siguiente modo:

Todos los fenómenos de la naturaleza podrían deducirse sólo de tres o cuatro suposiciones generales. Habría gran razón en tomar esas suposiciones como verdaderas: pero si para explicar cada Fenómeno nuevo se hace una nueva Hipótesis; si se supone que las partículas del Aire son de tal figura, tamaño y forma, aquellas del Agua de tal otra, aquellas del Vinagre de tal otra, aquellas de la sal de mar de tal otra, aquellas del nitro de tal otra, aquellas del Vitriolo del tal otra, aquellas del Mercurio de tal otra, aquellas de la llama de tal otra, aquellas de los efluvios Magnéticos de tal otra. Si se supone que la luz consiste en tal movimiento de presión o fuerza y que sus diversos colores están hechos de tales y tales variaciones del movimiento y así de las otras cosas: esta Filosofía no será más que un sistema de Hipótesis. Y qué certeza puede haber en una Filosofía que consiste en tantas Hipótesis como Fenómenos hay por explicar. Explicar toda la naturaleza es una tarea demasiado difícil para un hombre cualquiera o incluso para una edad cualquiera. Es mucho mejor hacer un poco con certeza y dejar el resto para otros que vengan después que explicar todas las cosas por conjetura sin asegurarse de ninguna cosa. Y no hay otra manera de hacer algo con certeza que extraer conclusiones a partir de experimentos y fenómenos hasta llegar a Principios generales y, entonces, a partir de esos Principios, dar una explicación de la Naturaleza. Lo que es cierto en filosofía se debe a este método y nada puede hacerse sin él. Mencionaré algunos ejemplos (Orozco 128-129).

Los ejemplos que Newton menciona son Dios¹⁹, la impenetrabilidad de la materia, la fuerza gravitacional y el carácter particulado de la materia, i.e., el hecho de que todos los cuerpos sean “agregados de partículas reunidas con muchos intersticios o poros entre ellas” (130). Ahora bien, la utilización más clara de una ley matemática como principio sucede con la ley de gravitación universal que, tal como Newton mismo afirma, se obtiene del movimiento de los planetas pero una vez establecida como principio sirve para explicar “todos los movimientos de los cuerpos celestes y del mar” (764). Esto sucede en el libro tercero de los *Principia*, una vez se ha formulado la ley de la gravitación universal, después de la proposición 10.

El carácter causal de las leyes, que permite su utilización como principios de la filosofía, se deriva del hecho de que se asumen como tales una vez concluida la vía analítica y, en consecuencia, dependen de la evidencia experimental de

19 Para Newton, Dios es principio de la filosofía en cuanto causa última y su existencia y providencias pueden mostrarse mediante la constitución de los fenómenos naturales (i.e., su diseño). Este tema lo he tratado en detalle en el artículo publicado en 2013.

la que se han obtenido. Esto contrasta con las “lois de la nature” de Descartes, cuya causalidad reposa en el hecho de que se deriven de los atributos de Dios y, en particular, de su inmutabilidad. En términos de Henry (2004), por el recurso a una metafísica que hace que las regularidades sean causales. No obstante, este carácter causal, proveniente de la experimentación en Newton, tendrá consecuencias no desdeñables y harán que su concepto de leyes de la naturaleza repose también, en últimas, en una metafísica de la naturaleza y, en particular, en su teología voluntarista.

6. LEYES DE LA NATURALEZA Y CAUSALIDAD: LOS HECHOS Y LAS CUALIDADES OCULTAS

En el tratamiento de la causalidad en relación con las leyes de la naturaleza se puede apreciar qué tanto ha reformado Newton el concepto en relación con Descartes. Aunque Newton también trate las leyes como regularidades matematizables, para este han de obtenerse, como he dicho, experimentalmente y su formalización descansa en últimas en la concepción de la geometría como postulación de problemas y soluciones de figuras y líneas trazadas por la mecánica. Ahora bien, debido a que la causalidad de las leyes no se deriva deductivamente de principios metafísicos, sino que se obtiene a partir de los fenómenos, esto termina implicando que los principios de Newton son, a los ojos de los continentales, “suposiciones arbitrarias”. Así lo afirma la primera reseña que se hace de Newton en el *Journal de Sçavans*, publicada el 2 de agosto de 1688:

Confiesa la misma cosa al comienzo del Libro Tercero [que ha considerado los principios de la demostración como géometra] donde, no obstante, intenta explicar el Sistema del Mundo. Pero esto no se hace sino por hipótesis que en su mayoría son arbitrarias y que, en consecuencia, no pueden servir de fundamento sino a un tratado de Mecánica pura. Esto aparece de manera evidente por el solo ejemplo del flujo y del reflujo del mar. Basa la explicación de la desigualdad de las mareas sobre el principio de que todos los planetas gravitan recíprocamente unos sobre los otros; de donde deduce que al estar opuestos y unidos la Luna y el Sol, las fuerzas de sus gravedades se unen sobre la Tierra y que al estar unidas producen un flujo y un reflujo más grande que el que producirían estando separados los cuadrados de estas fuerzas, y que el Sol eleva el agua mientras que la Luna la empuja hacia abajo, por esto es necesario que el flujo y el reflujo sea menor; lo que es indudable en la suposición. Pero como esta suposición es arbitraria, por no haber sido probada, la demostración que depende de ella no es sino mecánica (Orozco 132).

Nótese en primer lugar el uso que se hace del término “Mecánica pura”, es decir, el tratamiento abstracto de los fenómenos del movimiento desprovisto de significación filosófico-natural. El hecho de que la gravitación no se haya obtenido por un procedimiento adecuado (deductivo) implica que se trata de una mera hipótesis y no de un principio. Desde el punto de vista de la filosofía natural cartesiana, es absurdo que un principio pueda obtenerse de la experiencia y, en consecuencia, no es más que una “suposición arbitraria”, es decir, una hipótesis interesante, pero hipótesis al fin y al cabo, que en el mejor de los casos lograría salvar los fenómenos.

De manera aún más específica, Leibniz reprocha a Newton en este mismo orden de ideas que haya reintroducido las cualidades ocultas de los escolásticos que las nuevas filosofías habían logrado expulsar, al postular como principio de la filosofía a la gravedad, cuya causa es desconocida²⁰. La respuesta de Newton, tanto en la *Opticks* como en los *Principia*, nos permite esclarecer cómo justifica el carácter causal de sus leyes en el marco de la tradición de las cualidades ocultas de la filosofía natural inglesa. En la *Opticks*, una vez postulada la naturaleza particular de la materia, afirma:

Y me parece más remoto que estas partículas no solo tengan una *vis inertiae*, acompañada de tales leyes pasivas del movimiento (*passive Laws of Motion*) que resultan naturalmente de dicha fuerza, sino también que son movidas por ciertos principios activos, tales como el de la gravedad (...) Estos principios los considero, no como cualidades ocultas, supuestamente resultantes de las formas específicas de las cosas, sino como leyes de la naturaleza (*Laws of Nature*), por las cuales las cosas mismas se han formado; y su verdad nos aparece por los fenómenos, aunque sus causas no se hayan aún descubierto (401).

El pasaje vincula a Newton, con claridad, a la tradición de las cualidades ocultas que ha expuesto Henry al contraponer unas leyes pasivas del movimiento –es decir, unas regularidades matematizables que se siguen de la fuerza de inercia, entendida como capacidad de resistir– y unas leyes activas o principios del movimiento, que explican la acción de los principios activos, aun cuando la causa de estos principios sea desconocida. Es decir, como las leyes de la naturaleza se obtienen a partir de los fenómenos, los criterios que las validan no son, de ninguna manera, deductivos. El *Scholium Generale*, en el pasaje probablemente más citado de la obra de Newton, ofrece otros elementos:

20 Este aspecto de la polémica con Leibniz ha sido ampliamente tratado en los estudios sobre Newton, al igual que los demás, tales como la polémica con Clarke o la disputa por la prioridad del cálculo. Al respecto es útil considerar Guicciardini, Cohen y Hall.

Hasta aquí he explicado los fenómenos de los cielos y de nuestro mar por la fuerza de la gravedad, pero aún no he asignado causa a la gravedad (...). Y suficiente es que la gravedad en realidad exista y actúe según las leyes que hemos expuesto y que sea suficiente para explicar el movimiento de los cuerpos celestes y de nuestro mar (764).

Este pasaje muestra que el carácter causal de las leyes no se deriva de una metafísica de la naturaleza que las valide a *priori*, sino que, al obtenerse experimentalmente, pueden considerarse causales si se ha demostrado (i) que las causas que se han hecho responsables de los fenómenos en realidad existen, (ii) que esta causa actúe según las leyes expuestas y (iii) que sea suficiente para explicar otros fenómenos (es decir, sea principio). Así las cosas, las leyes de la naturaleza son causales en relación con los fenómenos que pretenden (y deben poder) explicar, aun cuando no se conozca la causa de la causa postulada y, por tanto, no tengan fundamentación ulterior (conocida). En otras palabras, gracias al procedimiento analítico, las leyes en realidad coinciden con “los principios de las formaciones de las cosas”, como afirma en la *Opticks*. Precisamente es en este sentido que son causales.

Un elemento que constantemente se pierde de vista en este punto es que la gravitación, en cuanto principio del movimiento, constituye un eslabón en la cadena de causas que, para Newton, concluye en el “mecánico más perfecto”, es decir, en Dios quien, como ya vimos, se postula como principio de la filosofía y, en consecuencia, su existencia y atributos pueden inferirse a partir de los fenómenos²¹:

Vemos los efectos de una deidad en la creación y de ahí deducimos la causa; y por tanto, la prueba de una deidad y de cuáles sean sus propiedades pertenece a la filosofía experimental. Es el oficio de esta filosofía argumentar de los efectos hasta sus causas, hasta que lleguemos a la causa primera (citado en Orozco 2013 88).

Recapitulando esta sección, se puede afirmar que, para Newton, las leyes de la naturaleza son, al igual que para Descartes, afirmaciones matematizables de regularidad observables que de manera causal explican fenómenos de la naturaleza. Aunque la definición genérica parece coincidir, el esclarecimiento de los conceptos que he ofrecido de la filosofía natural matemática hace que los significados sean casi opuestos en sus procesos de obtención, validación y, en consecuencia, en la función que desempeñan en sus filosofías naturales. En este punto podrá objetar el lector que no me he ocupado del uso que hace

21 He tratado este tema en detalle en el artículo “De la existencia a la providencia”, publicado en 2013.

Newton del concepto de leyes de la naturaleza cuando lo aplica, por ejemplo, a las leyes de Kepler y que posteriormente clasifica como fenómenos. Considero que no hay novedad en este uso específico y, por eso, lo he dejado por fuera del análisis, centrándome en los usos del concepto que son novedosos en Newton, es decir, en la reformulación del concepto cartesiano de “lois de la nature” en su filosofía natural con principios matemáticos.

7. CONCLUSIÓN

El recorrido anterior se ha concentrado en esclarecer el uso del concepto de leyes de la naturaleza en Newton a partir de la concepción de su filosofía natural con principios matemáticos. Este análisis ha permitido apreciar la manera en que Newton se apropia críticamente de diversas tradiciones y delinea un concepto de leyes de la naturaleza diferente de los anteriores y que, sabemos, constituirá uno de los principales referentes en los procesos de consolidación de la ciencia moderna. Esto se puede evidenciar, por ejemplo, en el epígrafe de De Morgan, en el cual las leyes de la naturaleza se convierten en el epíteto del filósofo natural. En la construcción del concepto por parte de Newton, se puede apreciar la peculiaridad de la transformación de las tradiciones que le preceden pero, a la vez, las complejidades y limitaciones de su proyecto.

Las leyes de la naturaleza, para Newton, constituyen uno de los elementos centrales de su filosofía natural matemática, pues son puntos de llegada de la investigación analítica y puntos de partida de la demostración sintética. Entendidas como principios filosóficos y axiomáticos, las leyes de la naturaleza son regularidades matematizadas causales conocidas *a posteriori*, gracias a la vinculación de la geometría con la mecánica y a la interpretación que hace Newton de los métodos de la geometría en cuanto experimentos, conclusiones y principios. Así las cosas, aun cuando la causalidad en el mundo fuera establecida de antemano por Dios en la creación (*Opticks*, 400), su conocimiento en la forma de leyes de la naturaleza solo es posible *a posteriori*.

Si bien el análisis se ha centrado en los aspectos filosófico-naturales y matemáticos del concepto de ley natural, este también aparece y se apoya en la teología natural y en la teología bíblica de Newton, es decir, en su concepción de Dios y la providencia a partir de una metafísica de la naturaleza y de su interpretación de los textos bíblicos y la historia de los pueblos antiguos. Sin embargo, debido a que el concepto de ley se ha tratado con cierto detalle desde estas perspectivas, se ha tenido como referente pero no se ha incluido aquí. Aunque en Newton la teología desempeña un papel central, no por eso hay que desconocer los cambios que realizó en otros ámbitos que tal vez, y como

respuesta a las historiografías tradicionales, se consideran ya del todo explorados. No obstante, como he mostrado, la investigación sobre el concepto de leyes de la naturaleza, aún en ciernes, es una buena muestra de los muchos caminos que aún quedan por recorrer en los estudios sobre la revolución científica y los orígenes de la ciencia moderna en el siglo XVII.

TRABAJOS CITADOS

- Alexander, H. G. *The Leibniz-Clarke Correspondence Together with Extracts from Newton's Principia and Opticks*. Manchester: Manchester University Press, 1956.
- Bacon, Francis, Graham Rees y Maria Wakely. *The Instauration Magna: Part 2*. Oxford: Clarendon Press, 2004.
- Brewster, David. *The Life of Sir Isaac Newton*. London: J. Murray, 1831.
- Cohen, I. B. *The Newtonian Revolution: With Illustrations of the Transformation of Scientific Ideas*. Cambridge: Cambridge University Press, 1980.
- Daston, Lorraine & Michael Stolleis. *Natural Law and Laws of Nature in Early Modern Europe: Jurisprudence, Theology, Moral and Natural Philosophy*. Farnham, England: Ashgate Pub. Co., 2008.
- Descartes, René, *Charles Adam y Paul Tannery*. Œuvres de Descartes. Paris: J. Vrin, 1964.
- Descartes, René, David E. Smith & Marcia L. Latham. *The Geometry of René Descartes: [with a Facsimile of the First Edition]*. New York: Dover Publications, 1954.
- De Morgan, Augustus. "Review of Sir David Brewster's Life of Newton". *The North British Review* (1855): 307-38.
- Domski, Mary. "Putting the Pieces Back Together Again: Reading Newton's *Principia* through Newton's *Methodos*". *Hopos: The Journal of the International Society for the History of Philosophy of Science* 3.2 (2013): 318-33.
- Ducheyne, Steffen. *The Main Business of Natural Philosophy: Isaac Newton's Natural-Philosophical Methodology*. Dordrecht: Springer, 2012.
- Euclides. *Elementos: Libros X-XIII*. Madrid: Gredos, 1996.
- Force, James E. & Richard H. Popkin. *Essays on the Context, Nature, and Influence of Isaac Newton's Theology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990.

- Funkenstein, Amos. *Theology and the Scientific Imagination from the Middle Ages to the Seventeenth Century*. Princeton, N.J: Princeton University Press, 1986.
- Guerlac, Henry. "Newton and the Method of Analysis". *Dictionary of the History of Ideas*. Ed. Philip P. Wiener. New York: Scribner, 3 (1973): 378-91.
- Guicciardini, Niccolò. *Isaac Newton on Mathematical Certainty and Method*. The MIT Press, 2009.
- Hall, Alfred Rupert. *Philosophers at War: The Quarrel between Newton and Leibniz*. Cambridge: Cambridge University Press, 1980.
- Hall, Alfred Rupert & Marie B. Hall. *Unpublished Scientific Papers of Isaac Newton: A Selection from the Portsmouth Collection in the University Library, Cambridge*. Cambridge: University Press, 1962.
- Harrison, Peter. "The Development of the Concept of Laws of Nature". *Creation: Law and Probability*. Ed. Fraser Watts. Minneapolis: Fortress Press, 2008. 13-36.
- _____. "Was Newton a Voluntarist?" *Newton and Newtonianism*. Ed. James E. Force y Sara Hutton. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004. 39-63.
- Henry, John. "Voluntarist Theology at the Origins of Modern Science: A Response to Peter Harrison". *History of Science* xlvii (2009): 79-113.
- _____. "The Fragmentation of Renaissance Occultism and the Decline of Magic". *History of Science* xlvi (2008): 1-48.
- _____. "Metaphysics and the Origins of Modern Science: Descartes and the Importance of Laws of Nature". *Early Science and Medicine* 9.2 (2004): 73-114.
- _____. "Occult Qualities and the Experimental Philosophy: Active Principles in pre-Newtonian Theory of Matter". *History of Science* xxiv (1986): 335-81.
- Herivel, John. *The Background to Newton's Principia: A Study of Newton's Dynamical Researches in the Years 1664-84*. Oxford: Clarendon Press, 1965.
- Higgitt, Rebekah. *Recreating Newton: Newtonian Biography and the Making of Nineteenth-Century History of Science*. London: Pickering & Chatto, 2007.
- Hobbes, Thomas & Howard Warrender. *De Cive: The Latin Version Entitled in the First Edition Elementorum Philosophiæ Sectio Tertia De Cive, and in Later Editions Elementa Philosophica De Cive*. Oxford: Clarendon Press, 1983.

- Hooke, Robert & R. T. Gunther. *Micrographia, Or, Some Physiological Descriptions of Minute Bodies Made by Magnifying Glasses: With Observations and Inquiries Thereupon*. New York: Dover Publications, 1961.
- Jacob, Margaret C. *The Newtonians and the English Revolution, 1689-1720*. Ithaca, N.Y: Cornell University Press, 1976.
- Jesseph, Douglas M. *Squaring the Circle: The War between Hobbes and Wallis*. Chicago, IL: University of Chicago Press, 1999.
- Mahoney, Michael. "The Mathematical Realm of Nature". *The Cambridge History of Seventeenth-century Philosophy*. Ed Michael Ayers y Daniel Garber. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 702-55.
- Mancosu, Paolo. *Philosophy of Mathematics and Mathematical Practice in the Seventeenth Century*. New York: Oxford University Press, 1996.
- Manzo, Silvia. *Entre el atomismo y la alquimia. La teoría de la materia de Francis Bacon*. Buenos Aires: Biblos, 2006.
- _____. "Leyes de la naturaleza y ciencia del siglo XVII". *Ciencia, matemática y realidad. Estudios de historia de la ciencia*. Ed. Pablo Melogno. Montevideo: Universidad de La República (en prensa).
- Molina, Sebastián. "La metodología de Newton y la demostración de la realidad de la fuerza". *Estudios de Filosofía* 50 (2014): 131-54.
- Newton, Isaac. *Opticks: Or, a Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections & Colours of Light*. Based on the 4th ed. London, 1730. New York: Dover Publications, 1952.
- _____. "An Hypothesis Explaining the Properties of Light". *The History of The Royal Society*. Ed. Thomas Birch. Vol. 3. London: A. Millar in the Strand, 1757. 247-305.
- Newton, Isaac, Alexandre Koyré e I. B. Cohen. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1972.
- Newton, Isaac y Alan E. Shapiro. *Optical Papers. The Optical Lectures 1670-1672*. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.
- Newton, Isaac y D. T. Whiteside. *The Mathematical Papers of Isaac Newton*. Cambridge: Cambridge University Press, 1967.
- Oackley, Francis. "Christian theology and the Newtonian science: The Rise of the Concept of the Laws of Nature". *Church History* 30 (1961): 433-57.

- Orozco-Echeverri, S. H. "De la existencia a la providencia: el argumento del diseño en Isaac Newton". *Ciencia y religión. Reflexiones en torno a una racionalidad incluyente*. Eds. L. M. Duque y L. M. Estrada. Cali: Universidad del Valle, 2013. 87-110.
- _____. *Isaac Newton y la reconstitución del palimpsesto divino*. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia, 2009.
- Pappus. *Mathematicæ Collectiones à Federico Commandino Urbinate in Latinum Conversæ, et Commentariis Illustratæ*. Pesaro, Italia: Girolamo Concordia, 1588.
- Pérez-Ramos, Antonio. *Francis Bacon's Idea of Science and the Maker's Knowledge Tradition*. Oxford, England: Clarendon Press, 1988.
- Pycior, Helena M. *Symbols, Impossible Numbers, and Geometric Entanglements: British Algebra Through the Commentaries on Newton's Universal Arithmetick*. Cambridge, U.K: Cambridge University Press, 1997.
- Rossi, Paolo. *Francis Bacon: from Magic to Science*. Chicago: University of Chicago Press, 1968.
- Roux, Sophie. "Les lois de la nature à l'âge classique: la question terminologique". *Revue de synthèse* 4.2-3-4 (2001): 531-76.
- Ruby, Jane E. "The Origins of Scientific 'Law' ". *Journal of the History of Ideas* 47.3 (1986): 341-59.
- Shapiro, Alan E. *Fits, Passions, and Paroxysms: Physics, Method, and Chemistry and Newton's Theories of Colored Bodies and Fits of Easy Reflection*. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- Snobelen, Stephen. "To Discourse of God: Isaac Newton's Heterodox Theology and his Natural Philosophy". *Science and dissent in England, 1688-1945*. Ed. Paul B. Wood. Aldershot, Hampshire: Ashgate, 2004. 39-65.
- Steinle, Friedrich. "The Amalgamation of a Concept. *Laws of Nature in the New Sciences*". *Laws of nature. Essays on the Philosophical, Scientific, and Historical Dimensions*. Ed. Friedel Weinert. Berlin: De Gruyter, 1995. 316-68.
- Watkins, Eric. *The Divine Order, the Human Order, and the Order of Nature: Historical Perspectives*. Oxford: Oxford University Press, 2013.
- Westfall, Richard S. *Never at Rest: A Biography of Isaac Newton*. Cambridge: Cambridge University Press, 1980.