UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE FILOSOFÍA

“CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD”: ANÁLISIS ONTOLÓGICO Y METODOLÓGICO DE LOS SISTEMAS COMPLEJOS EN FÍSICA

Tesis

que para obtener el título de:

LICENCIADO EN FILOSOFÍA

Presenta:

CARLOS GONZÁLEZ COLÍN

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ALFONSO ARROYO SANTOS

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y mi hermano, a quienes va dedicado con cariño todo mi esfuerzo

A Isabella Valera, por la reciprocidad.

A Walden Palafox, por su amistad y su poesía.

Al Dr. Cristian Gutiérrez, por su apoyo, sus enseñanzas en lógica y su gran corazón.

A todos mis profesores del Colegio de Filosofía. A quienes debo los dolores de cabeza que permitieron la apertura a nuevos registros de percepción.

Al Dr. Alfonso Arroyo-Santos por su apoyo, sus clases y su guía para elaborar mi tesis.

A los miembros del jurado: Dra. Fernanda Samaniego, Dr. Denis Boyer, Dr. Cristian Gutiérrez y Dr. Miguel Zapata; por su apoyo y por los comentarios que permitieron mejorar mi trabajo.

A Toscana, por su anonimato y su extrema seriedad para tratar con temas de física.

A Leticia Colín Olmos, por su grandeza espiritual.

Al Mtro. Carlos González Rojas, por su sabiduría.

A Hugo César, por ser el único genio que conocerá el siglo XXI.

INDICE

INTRODUCCIÓN

Este ensayo está dedicado a la reflexión filosófica sobre un concepto que ha tomado una gran relevancia en diferentes ámbitos académicos: la complejidad. En primera instancia, este es un concepto que surge a raíz de las innovaciones metodológicas que se desarrollaron a finales del siglo XIX y principios del XX, tales como la mecánica estadística de Boltzmann y la implementación de la computadora en la década de los cincuentas. Lo cual trajo consigo un cambio completo de la perspectiva científica, en la que la naturaleza aparece como algo esencialmente inestable y, no obstante, ordenada según principios matemáticos. Fue gracias a esto que en la segunda mitad del siglo XX surge un campo de investigación interdisciplinario dedicado a estudiar la dinámica involucrada en cierto tipo de procesos, tales como los que se llevan a cabo en una sociedad humana o en el mercado financiero. A este campo de estudio se le denomina *ciencias de la complejidad* y ha tomado un impulso considerable en nuestro tiempo.

Muchos investigadores han querido ver en la complejidad un concepto científico, definido cuantitativamente bajo diferentes acepciones. Esto ha producido un cierto desconcierto y ambigüedad de lo que son dichas ciencias, debido precisamente a la diversidad de acepciones que rodean al término. Es por esto que al intentar definir lo que complejidad significa en el cuerpo de estas ciencias se ha vuelto, en muchos casos, tarea de la filosofía. Sin embargo, debemos considerar que, en tanto cantidad, la complejidad tiene acepciones muy precisas. Ya que es posible definirla de acuerdo a diferentes parámetros de medida, tales como ¿qué tan difícil es describir un proceso? O ¿cuántos recursos materiales y energéticos están involucrados en dichos procesos? Desde esta perspectiva, un sistema complejo, como lo podría ser una sociedad humana, es complejo en tanto su descripción involucra una gran cantidad de elementos -personas, sus posibles relaciones y estructuras a diferentes escalas -estratos sociales, aspectos económicos, culturales y políticos, etc.

Sin embargo considero que, a nivel filosófico, dicho concepto no ha sido tratado con el cuidado necesario para extraer de él consecuencias que pudieran repercutir en la labor científica de nuestro siglo. Pues encuentro en él una *potencia* y una invitación para expandir los aspectos ontológico y metodológico que rigen las investigaciones científicas, basadas principalmente en la fe que la razón tiene por el lenguaje matemático.

Para poder entender dicha potencia que encuentro en cierta definición filosófica de la complejidad, será preciso mostrar con detalle de dónde surge y por qué motivos se volvió un punto de quiebre en la perspectiva científica del siglo XX. Para esto, propongo hacer un recorrido extenso del modo en que se fue edificando el pensamiento científico, partiendo desde lo más remoto para encontrar el motivo principal que determino al lenguaje matemático como herramienta fundamental para estudiar la naturaleza. Así, el primer capitulo tendrá por objetivo responder las siguientes preguntas: ¿por qué las matemáticas adquieren una gran relevancia para el estudio de la naturaleza a finales del siglo XVII? O ¿por qué a raíz de las propuestas racionalistas de Galileo y Descartes se dejan de lado una ontología y una metodología desarrolladas por la *filosofía natural*? Una filosofía olvidada en la que la naturaleza no era precisamente matemática, pero que, no obstante, respondía a principios lógicos universales. La conclusión de este capitulo hará ver que la idea galileana de que la naturaleza está escrita en lenguaje matemático, responde a una concepción mecanicista, en la que cada fenómeno empírico podía ser representado como una *máquina* simple, cuyos mecanismos y operaciones estaban regulados por principios lógico-matemáticos. Lo cual permitirá por vez primera la predicción exacta de cualquier comportamiento futuro. Además de que, a partir de esto, se va configurando una postura reduccionista según la cual es posible explicar y predecir una gran cantidad de fenómenos naturales a partir de un conjunto reducido de leyes o principios generales. Ambos aspectos serán determinantes para la formulación de la primera teoría física, la mecánica newtoniana. Una teoría con la que a partir de tres axiomas será posible predecir y explicar tanto el movimiento de los planteas como todo tipo de movimiento en el plano terrestre.

El segundo capitulo está dedicado a mostrar que dicha capacidad de explicar y predecir un gran número de fenómenos naturales a partir de tres axiomas está fundamentada en un simplicidad ontológica[1] y metodológica. Ya que, debido a la concepción mecanicista formulada a finales del siglo XVII, todo fenómeno se reducía a un *sistema* simple, constituido por muy pocos elementos. Mostraré, además, que la simplicidad de la física clásica, aquella que va del siglo XVII al siglo XIX, es producto de las propiedades de estos sistemas simples, tales como la linealidad, el determinismo, la reversibilidad, su estabilidad y su perfecto orden. Lo cual dará por resultado que estas investigaciones en física, las cuales abarcan más de tres siglos, estuvieron fuertemente influenciadas por una ontología simple, según la cual todo fenómeno *es* una máquina simple y perfectamente ordenada compuesta por muy pocos elementos. Así como también por una metodología mecanicista, según la cual toda máquina, debido a sus propiedades, puede ser estudiada *por partes* sin alterar minimamente su comportamiento. Ambos aspectos en fuerte relación con el lenguaje matemático. Pues al ser este el que otorgaba la capacidad predictiva y explicativa, evidenció a cada momento que la naturaleza era simple y perfectamente ordenada.

Como veremos, esta ontología simple y su metodología mecanicista perduraron durante más de tres siglos. No fue sino hasta finales del siglo XIX que la perfecta armonía y estabilidad de la naturaleza sería puesta en cuestión por el matemático francés Henri Poincaré. Fue gracias a una *intuición* que Poincaré pudo marcar los límites de la simplicidad metodológica de la física clásica. Mostrando que cierto razonamiento matemático evidenciaba una naturaleza completamente

1 Hablar de ontología en un ámbito científico puede resultar un tanto desconcertante, ya que físicos como Galileo y Newton no tienen como principal propósito el establecimiento de una ontología. Sin embargo, resulta muy claro que al afirmar que la naturaleza *es* una máquina que responde a principios lógico-matemáticos, la cual se comporta de tal o cual modo, se está configurando una visión del mundo. En este sentido, la física a partir del siglo XVII irá configurando una ontología muy particular que, como veremos a lo largo de este ensayo, está estrechamente ligada a la metodología que se aplica para estudiar la naturaleza.

inestable, caótica y, por consecuencia, muy difícil de predecir. Sin embargo, debido a las limitaciones metodológicas de la física del siglo XIX, esta idea de la naturaleza tardaría tiempo en ser asimilada. Será hasta la segunda mitad del siglo XX que sus ideas serán completamente asimiladas, gracias a la implementación de la estadística y la computadora para el manejo de una gran cantidad de información. A raíz de esto, en física se desarrollan una gran cantidad de teorías matemáticas, entre las que estudiaré la teoría KAM de las turbulencias, el caos determinista de Edward Lorenz, las estructuras disipativas de Ilya Prigogine y el fenómeno crítico. Esto con la intención de mostrar cómo es que a raíz de la intuición de Poincaré se desarrollan herramientas matemáticas y tecnológicas que permitirán mostrar que, a pesar de que la naturaleza sea esencialmente inestable, existen un orden determinado -matemático- dentro de un completo desorden molecular. Razón por la cual se irá configurando una ontología distinta, donde el orden de la naturaleza extrae fuerzas de su esencia inestable. Es en este punto donde la física supera la simplicidad ontológica, pues gracias a esto la naturaleza dejará de ser la máquina simple y perfectamente ordenada de los siglos pasados, para convertirse en una naturaleza mucho más elaborada e inestable que, en cierto punto de su proceso, muestra un comportamiento ordenado que sólo es posible por su propiedad esencial: la inestabilidad. A este punto, donde acontece el orden que extrae sus fuerzas del caos, se le llama criticalidad. Razón por la cual dicha ontología recibirá el nombre de *ontología de la criticalidad.* Por otra parte, el aspecto metodológico, aunque también da un giro de ciento ochenta grados por razón de la estadística y la implementación de la computadora, se mantendrá con cierto grado de simplicidad. Debido a que con la estadística es posible formular modelos matemáticos simples, reduciendo la gran cantidad de interacciones entre la gran cantidad de elementos que componen el sistema a una cantidad promedio de los mismos. Todo lo anterior aparece en el cuerpo del tercer capitulo, lo cual llevará a concluir que hay diferencias muy marcadas entre la física clásica y la física del siglo XX. Tanto en un aspecto ontológico como en uno metodológico.

A raíz de esta ontología y metodología desarrolladas en el cuerpo de la física del siglo XX, se edifica un campo de estudio interdisciplinario que se conoce como *ciencias de la complejidad.* Por lo que el último capitulo está dedicado a mostrar qué son estas ciencias y el modo en que la noción de complejidad se relaciona con la labor de la física de nuestro siglo. Para esto, primero mostraré que estas ciencias tiene por objeto de estudio *sistemas complejos.* Los cuales comparten características muy similares a las los sistemas con los que trabaja la física. Esto nos llevará a concluir que hay una diferencia fundamental entre estos dos tipos de sistemas., con el fin de proponer una definición de *sistema complejo* que nos ayude a clarificar qué sentido podría cobrar la noción de complejidad a) en el campo de las ciencias de la complejidad y b) en el campo desarrollado por la física del siglo XX. Veremos que en el campo de las ciencias de la complejidad, la noción de complejidad toma muchas acepciones debido a que es un concepto científico definido a partir de procesos matemáticos. Por otra parte, con respecto a su definición en el ámbito de la física, veremos que, como tal, la noción de complejidad puede resultar un tanto ajena. Debido a que la física no tiene como propósito el estudio de sistemas complejos, sino de sistemas físicos no lineales. No obstante, a partir de la diferenciación expuesta en la primera parte de este capitulo, será posible encontrar una noción filosófica de complejidad que se enlaza directamente con el concepto de criticalidad desarrollado en el capitulo anterior. Donde «complejidad» no hará referencia precisamente a un orden determinado matemáticamente, así como tampoco de manera precisa a la propiedad inestable de la naturaleza. Sino a un punto intermedio entre el orden y el caos. El cual, ante los ojos del lenguaje matemático, aparece completamente indeterminado, desconocido. Como un límite que se plantea a las matemáticas en tanto método para explicar el comportamiento errático y caótico de la naturaleza.

Es por esta razón que la complejidad, visto desde un punto de vista filosófico, podría marcar una potencia o una invitación a expandir la visión científica con respecto al uso de las matemáticas para explicar el comportamiento de la naturaleza. Pues aunque es cierto que desde el siglo XX el completo determinismo que permitían la simplicidad de la física fue remplazado por la probabilidad matemática, y que dicha probabilidad parece *suficiente* en nuestro tiempo para explicar con cierta precisión el comportamiento de la naturaleza. La complejidad como *lo indeterminado* es algo que escapa por completo a la explicación racional y matemática. Debido a esto, la complejidad, a nivel filosófico, puede ser la nueva intuición que permita dar un paso más allá del estrecho racionalismo científico que ha perdurado durante más de cuatro siglos. Permitiendo la búsqueda de metodologías alternativas a la matemática para dar cuenta de la esencial inestabilidad-ordenada que subyace a la naturaleza que nos rodea.

I. LA PRIMERA FÍSICA: FILOSOFÍA NATURAL

El presente capitulo tiene como objetivo principal mostrar la relevancia del pensamiento científico de la física del siglo XVII, que a nivel histórico es la primer ciencia que implementa el lenguaje matemático para indagar los principios que rigen a todo fenómeno natural. Para esto, partiré de su contraste, el pensamiento filosófico de la naturaleza o filosofía natural, la cual implementó durante más de quince siglos una metodología basada en el análisis lógico del lenguaje para explicar los fenómenos naturales. Esto resulta importante para reconocer el papel que juega la física como modelo explicativo a nivel histórico. El interés por comenzar este estudio en la filosofía natural griega surge a raíz de un problema al que cualquier estudioso de la historia de la ciencia se va a enfrentar, y es que nunca queda muy claro por qué las explicaciones matemáticas de la naturaleza cobran una gran importancia durante más de tres siglos en las investigaciones científicas. Por tanto, uno de mis objetivos es mostrar porqué las matemáticas cobran un gran impulso en el siglo XVII, razón por la cual se deja en segundo plano al análisis lógico del lenguaje como herramienta para entender los fenómenos naturales. Además, la presente discusión que se enfoca en ciertos aspectos ontológicos y metodológicos pretende aportar un par de premisas importantes para el desarrollo de la conclusión general de este trabajo. Primero, evidenciar desde un punto vista histórico que la propuesta teórica de Newton tiene su fundamento en las propuestas metodológicas anteriores, lo cual será importante para evaluar en el capitulo siguiente cierta *simplicidad metodológica* que se atribuye comúnmente a este modo de hacer ciencia. Y por último, mostrar qué se ha entendido por física a partir del siglo XVII.

1. LA FILOSOFÍA NATURAL PRESOCRÁTICA

Ya hacia finales del siglo V a.c se consideraba a la filosofía como una actividad dirigida al estudio de la naturaleza. Donde «naturaleza» correspondía con la totalidad de los objetos materiales que estaban sujetos al cambio. Esta definición, la cual ha sido extraída de un fragmento de la *Física* de Aristóteles[2], evidencia que el cambio efectuado en los objetos materiales ha sido uno de los intereses centrales para el pensamiento filosófico-racional de occidente sobre la naturaleza. Tales de Mileto, junto con Anaximandro y Anaxímenes, representan el comienzo de este pensamiento al que también podríamos denominar pre-científico. Pues al estar cada uno de ellos particularmente interesados en los procesos de cambio, fueron los primeros en proponer la idea de que a tales procesos debían subyacer algo de carácter permanente y universal. Es por esta razón que usualmente las cosmologías, o filosofías, presocráticas se relacionan con el intento de mostrar la existencia de un elemento primitivo que explicase las transformaciones de los objetos materiales en el tiempo. Ya fuera el agua propuesta por Tales o el apeiron de Anaximandro, estos principios universales fueron fruto de este modo de pensar la naturaleza.

Laks (2010) argumenta que «las primeras expresiones de la racionalidad filosófica apuntan a abarcar un contenido definido [...] por el sesgo de un tipo de argumentación especifica». Este contenido es precisamente la naturaleza, la totalidad de los objetos materiales que están sujetos al cambio, mientras que el tipo de argumentación al que Laks refiere es de carácter racional especulativa. En primera instancia, debe tomarse en cuenta que no había entre estos filósofos naturales una distinción clara entre concepto y objeto, es decir, en este periodo aún no encontramos un cuestionamiento sobre el uso de palabras para referir a tal o cual objeto natural, lo cual hacía que su estudio sobre el cambio fuera de carácter puramente materialista. Esto no quiere decir que dichos filósofos limitaran sus

2 Algunas cosas son por naturaleza, otras por causas. Por naturaleza, los animales y sus partes, las plantas y los cuerpos simples como la tierra, el fuego, el aire y el agua -pues decimos que estas y otras cosas semejantes son por naturaleza. Todas estas cosas parecen diferenciarse de las que no están constituidas por naturaleza, porque cada una de ellas tiene en sí misma un principio de movimiento y de reposo (Aristóteles, 2007, 97).

investigaciones a los datos de los sentidos, pues fue necesaria la intervención del pensamiento para la formulación de principios unificadores o elementos primitivos que ellos asociaban con elementos naturales tales como el agua, el aire o el fuego. Lo que se quiere expresar con dicho materialismo es que en esta filosofía se encontraba un *predominio de lo empírico frente a la especulación de la razón*.

Dicho materialismo no sólo influyó para que estos filósofos de la naturaleza delimitaran sus investigaciones a los objetos físicos, sino también en el modo en que explicaban el cambio de dichos objetos. Como menciona Laks (2010), este racionalismo filosófico apunta a abarcar el cambio de los objetos materiales a partir de una argumentación racional especulativa. Esto quiere decir que tanto Tales, como Anaxímenes y Anaximandro, llegaron a sus respectivas conclusiones proponiendo argumentos empírico-racionales, en los cuales se relacionaba un elemento primitivo, producto de la abstracción del pensamiento, con su percepción sensible del cambio efectuado en los objetos materiales. Ahora bien, con lo anterior quiero expresar dos cosas: 1) que dicho materialismo corresponde con *la perspectiva* que guiaba el estudio de la naturaleza. Pues este conjunto de filósofos basaba sus investigaciones en observaciones empíricas, para lo cual no hacia falta la formulación de representaciones ideales que funcionaran como sustitución del plano material. Algo que ya encontramos en Platón y Aristóteles, donde se realizan las primeras distinciones entre concepto y objeto. 2) Los medios por los que intentaban dar una explicación, es decir, su metodología, fueron los argumentos empírico-racionales. Sin embargo, la formulación de elementos primitivos como principios universales y la formulación de dichos argumentos estaba completamente determinada por el trato directo con la naturaleza. Gracias a lo cual podemos entender por qué la razón estaba a merced de la observación empírica, pues todo argumento empírico-racional partía necesariamente de una perspectiva puramente materialista. Es por esto que en la filosofía presocrática encontramos un predominio de lo empírico frente a lo racional. Lo anterior hace posible decir que el carácter pre-cientifico que podríamos atribuir a la filosofía natural presocrática no sólo se caracteriza por la idea de que a los procesos de cambio debían subyacer elementos primitivos, sino también por estar estrechamente ligada a una argumentación empírico-racional.

2. LA DOCTRINA DEL MOVIMIENTO DE ARISTÓTELES

No fue sino hasta la *Física* de Aristóteles que encontramos los primeros indicios de lo que será en el siglo XVII una teoría física: una ontología declarada, una definición del movimiento y un conjunto de leyes que intentaban explicarlo. No obstante, debe aclararse que, aunque en su doctrina del movimiento se presenten algunos aspectos compartidos con las teorías físicas posteriores, su *Física* no es rigurosamente un *tratado sistemático sobre la naturaleza*, sino una serie de lecciones que giran en torno al movimiento y otros temas, tales como el infinito o la noción del continuo que provocarían polémica a finales del siglo XIX.

Aristóteles estuvo tan interesado como sus antepasados en encontrar los principios que explicasen el cambio efectuado en los objetos materiales. Interés que no surge *ex nihilo*, sino a partir de la investigación misma tanto de la filosofía presocrática como de la platónica. La metodología de la que se valió para sus indagaciones sobre el movimiento divergía en muchos aspectos con la de sus antepasados. Primero, sus conclusiones más generales fueron principalmente resultado de una *aporética*, en la que se analizaban las aporías del pensamiento filosófico pasado para encontrar modos de explicación distintos que dieran fin a las mismas. Segundo, el análisis del lenguaje fue determinante para rebatir algunas de las tesis presocráticas a partir de un procedimiento dialéctico que, en muchos casos, consistía en una reducción al absurdo. Esto nos imposibilita a decir que «la pre-ciencia» de Aristóteles desarrollada en la *Física* sea del mismo carácter que la filosofía de sus predecesores, pues a diferencia de estos últimos, Aristóteles no toma como fundamento para sus investigaciones los objetos físicos para la construcción de argumentos empírico-racionales, sino el análisis del lenguaje que se utiliza para hablar de ellos. Esta afirmación debe ser tomada con sumo cuidado, pues, aunque la dialéctica y el análisis del lenguaje fueran predominantes en las investigaciones aristotélicas sobre el movimiento, también encontramos argumentos de carácter deductivo en los que sí se hace referencia a los objetos empíricos mismo[3].

A pesar de las diferencias, tanto la filosofía natural de los presocráticos como la doctrina del movimiento de Aristóteles fueron reconocidas durante mucho tiempo por su capacidad de dar una explicación a un gran número de fenómenos naturales mediante una argumentación empírico-racional. La cual toma como punto de partida la observación directa de la naturaleza con el fin de elaborar principios universales, los cuales serán demostrados a partir de una argumentación regida por la lógica del lenguaje. A esta filosofía natural, y en especial la aristotélica, se debe la teoría geocéntrica y muchos estudios relacionados con los procesos biológicos involucrados en plantas y animales, así como teorías que ya apuntaban a explicar el flujo sanguíneo en el cuerpo humano. Todo esto a partir de argumentos empírico-racionales en los que había un marcado predominio de lo empírico sobre lo racional. Después de la gran influencia de este pensamiento materialista fundado por la filosofía natural griega, el conocimiento sobre la naturaleza que durante más de diez siglos se consideraría riguroso, estaría determinado por generalizaciones lógicas e intuitivas desarrolladas a partir de la experiencia directa con la realidad.

3. EL MECANICISMO RENACENTISTA

Pero fue en el Renacimiento donde dicho materialismo de la filosofía natural griega tomó un impulso que desembocaría en una revolución intelectual, que no sólo se limitó al ámbito de la investigación sobre la naturaleza, sino también al de la matemática y la ingeniería. La construcción de máquinas autómatas durante este periodo fue un factor determinante que permitiría un nuevo enfoque de estudio en

3 Para un desarrollo detallado de esta discusión véase Biarritz (1944). Introducción. En Aristóteles (2007) *Física*. Madrid: Gredos

las ciencias naturales. Aunado esto con el aún viviente materialismo griego, pensadores como Da Vinci y Copernico tenían una gran esperanza en el pensamiento empírico-racional para desentrañar los secretos escondidos en la naturaleza. Prueba de ello se encuentra en la célebre opinión de Leonardo, donde el error y la oscuridad que se encuentra en diversas concepciones de la edad media se atribuyen a una falta de consideración empírica:

> A mi me parece que son vanas y llenas de errores esas ciencias que no nacen de la experiencia, madre de toda certeza, y que no se acaban por una experiencia definida.[4]

Esto no sólo manifiesta un desprecio hacia toda investigación que carezca de un fundamento empírico, sino también algo que será muy importante para el desarrollo de la ciencia moderna: la necesidad de certeza en las investigaciones naturales.

Rogelio Laguna (2016) argumenta que «la actitud filosófica respecto a las máquinas y, mucho más importante, el interés por investigar los principios -naturales- por los que funcionaban empezaron a modificarse sobre todo a finales de la Edad Media y se transformaron con mayor fuerza en el Renacimiento». Fue gracias a la reflexión profunda de una analogía que los pensadores renacentistas dieron una gran importancia a la relación entre máquinas y animales, máquinas y procesos kinéticos, máquinas y naturaleza. Esto produjo un enfoque que se diferenciaba metodológica y ontológicamente de la filosofía natural griega. La concepción aristotélica de la *phýsis*, donde naturaleza es siempre naturaleza de las cosas, se convierte en naturaleza de las máquinas. Pues ahora la fuerza (*phýsis*) que hace posible el movimiento de las cosas ya no se explica a partir de generalizaciones lógico-intuitivas, como categorías filosóficas o las famosas cuatro causas. Sino a partir de mecanismos constituidos por engranes y palancas. Es así como en el renacimiento surge la idea de que la naturaleza funciona como una gran

4 Da Vinci, L. (1965) *Aforismos.* Madrid: Espasa Calpe

máquina, cuyo funcionamiento podría ser explicado con exactitud debido a que estaba determinado por principios que podían ser conocidos de manera clara y precisa. Concepción que se conoce como mecanicismo.

Gracias a esto no resultaría aventurado afirmar que la necesidad de certeza, aquella que se manifestó con gran fuerza en las ciencias naturales a partir del siglo XVII, es producto del pensamiento mecanicista que nació a mediados del siglo XV. Pues gracias al estudio de mecanismos fue posible generar un conocimiento seguro y evidente de las fuerzas que regían los procesos de cambio en la naturaleza. Sin embargo, aunque se puede hablar de certeza en la antigüedad, principalmente en el área de las matemáticas, debe tenerse en cuenta que este tipo de reflexiones tienen una función instrumental muy especifica para la representación de problemas técnicos. El punto crucial para entender la diferencia entre la certeza antigua y la renacentista es que esta última está relacionada con un conocimiento exacto de los principios que producen el movimiento, lo cual, posteriormente, proveerá a la física moderna la capacidad de predecir los fenómenos de la naturaleza. Mientras que, por otra parte, las matemáticas desarrolladas por Pitágoras o Arquímides tenían una función meramente explicativa, mas no predictiva. Este punto será abordado más adelante.

A pesar de que el pensamiento filosófico de las máquinas proveyera un enfoque de estudio novedoso en comparación con la filosofía natural griega, habían un aspecto compartido entre ambas que pronto sería puesto entre signos de interrogación. Como se ha explicado anteriormente, tanto en la filosofía natural griega como en la renacentista había una tendencia claramente materialista en la que se encuentra un predominio de la experiencia frente al pensamiento puramente especulativo en las investigaciones sobre la naturaleza. La diferencia entre ambas radica en el hecho de que la filosofía natural griega se valía de generalizaciones lógico-intuitivas, basadas principalmente en la relación directa con la realidad, la argumentación empírico-racional y el análisis del lenguaje, para dar explicación al cambio de los objetos materiales. Mientras que en el renacimiento se hacía uso de un mecanicismo en el que los principios que regían el movimiento de las cosas podían ser conocidos a partir del estudio de las relaciones entre los componentes de lo que sería una *máquina natural*. El mecanicismo renacentista heredó un aspecto filosófico importante al siglo XVII, el cual germinó en los trabajos de dos pensadores que cambiarían el rumbo de la filosofía natural: Galileo y Descartes.

4. EL MÉTODO DE GALILEO

Galileo fue el primero en sacar provecho a la concepción mecanicista al ser quien propuso un método experimental para el estudio del movimiento, donde los fenómenos comienzan a estudiarse bajo condiciones simplificadas y controladas. Lo que buscaba con esto era poder hacer una verificación rigurosamente planeada y repetible de las teorías que apuntaban a explicar el movimiento, lo cual, según argumenta Ocampo (2014), ya importaba a los renacentistas. Sin embargo, y en esto radica la diferencia, a la par del método experimental, Galileo propondría un método matemático que le permitió formular un conocimiento metódico, cuantificable y demostrable a partir de principios lógico-matemáticos.

Como se mencionó previamente, la matemática antigua era una herramienta utilizada para la representación de problemas técnicos. Ya sea para la construcción de pirámides en Egipto o para determinar si la corona del tirano de Siracusa estaba o no hecha de auténtico oro. Y no sólo eso, pues la reflexión matemática también permitió la especialización técnica que hizo posible la construcción del famoso tornillo de Arquímides y, ya en el siglo XV, la construcción de máquinas autómatas. Esto nos lleva a plantear la siguiente pregunta ¿en qué consiste propiamente la diferencia entre el uso que da Galileo a las matemáticas y el que se dio antes de él? Al responder esta pregunta se espera poder explicar con más claridad en qué consiste el conocimiento metódico, cuantificable y demostrable que fue posible gracias al método matemático-experimental que propuso Galileo. Amén de comenzar a indagar en la importancia que cobrará la explicación matemática en el ámbito de la física. Para responder a esta pregunta debemos entender primero en qué consiste el método de Galileo.

Podemos plantear este método siguiendo la explicación analítica que propone Burtt (1960). En un primer momento hay una confrontación entre el investigador y los hechos empíricos. Un segundo momento consiste en plantear condiciones simplificadas y de control que permitan examinar con claridad el hecho en cuestión. Para esto se aísla el hecho de toda condición que pueda ser irrelevante para su explicación. Por ejemplo, para el estudio del movimiento de un cuerpo sobre un plano inclinado Galileo prescindía de la fricción y otras variables que para él no eran determinantes en dicho estudio. Ahora, esto último se hacía con el fin de intuir los *elementos sencillos y absolutos* con base en los cuales se pudiera dar una *forma matemática* al hecho. Dichos elementos se convierten en abstracciones lógicas que entran en relación con otras. En el caso del plano inclinado estas corresponderían con masa, velocidad, aceleración, tiempo o distancia. Es así como se pueden plantear formas matemáticas que permitan la descripción del hecho empírico en cuestión para resolverlo en términos cuantitativos, es decir, en términos de cantidades numéricas. Una vez que se ha construido la forma matemática se procede, en un tercer momento, a demostrar su validez lógica de manera deductiva. Si el sistema es adecuado en términos lógicos y matemáticos, lo cual quiere decir que no sea contradictorio o irrelevante, se procede a la comprobación de su efectividad con el experimento.

Burtt engloba los métodos matemático y el experimental en uno solo: el método de Galileo. No obstante, considero importante tener en mente que hay una diferencia entre método experimental y método matemático, esto con la intención de resaltar la relevancia histórica que se atribuye comúnmente al pensamiento de Galileo. Porque si atribuimos una completa novedad al método como un todo, caeríamos en un error, pues tanto el método experimental como el matemático ya habían sido aplicados con anterioridad por los filósofos griegos y renacentistas.

Como se verá a continuación, el aspecto novedoso del trabajo de Galileo se encuentra en otra parte.

Dentro del método de Galileo hay, pues, dos partes: una que corresponde a un procedimiento lógico-matemático -método matemático- y otra que corresponde a la comprobación de su efectividad sometiendo el resultado a la experiencia -método experimental. Ahora bien, el primer momento de este método no representa nada nuevo para la filosofía natural, pues dicha confrontación entre investigador y naturaleza la encontramos tanto en la Grecia antigua como en el Renacimiento. La diferencia aquí radica en que a partir de Galileo la *intuición* que permite captar los aspectos importantes involucrados en un fenómeno deja de ser materialista, esto es, los objetos de estudio ya no refieren a objetos materiales. Pues la intuición ahora se plantea en términos matemáticos. Aunque muchos autores refieran a este proceso de abstracción como intuición matemática, opinión que ya vemos presente en el *Discurso del método* de Descartes, considero que es más apropiado llamarla intuición lógico-matemática, más que lógica o matemática por separado. Porque, efectivamente, los *elementos* sencillos y absolutos son producto de una abstracción lógico-formal, pero para la investigación que propone Galileo sería inútil usar unicamente las relaciones abstractas que se dan entre formas lógicas. Pues, como menciona Burtt, las formas que surgen a raíz de dicha *intuición* se resuelven en términos cuantitativos debido a que en la experimentación se les atribuye a dichas formas una cantidad numérica, la cual es resultado de someter a medición cuantitativa el hecho empírico en cuestión.

La intuición lógico-matemática, por tanto, sería aquella que permite intuir los *elementos* sencillos y absolutos con base en los cuales se pueda dar una forma matemática a un hecho. Dicha intuición marca una gran diferencia con el pensamiento de Aristóteles, pues gracias a esta el movimiento ya no será explicado a partir de lo que *se dice* intuitivamente de él para definirlo como «la actualidad de lo potencial en cuanto tal». Con Galileo el movimiento de un cuerpo se explica a partir de la relación entre elementos sencillos y absolutos como velocidad, distancia y tiempo, mismos que dejan de tener un sentido especulativo para adquirir un sentido cuantitativo, es decir, de cantidades numéricas. Ahora bien, Burtt explica que una vez que se han intuido dichos elementos es posible construir la *forma matemática* de un hecho. El problema aquí es que la expresión «forma matemática» resulta ambigua, pues tanto puede corresponder con alguna proposición algebraica como con una simple representación geométrica de un hecho empírico. Observemos, por ejemplo, que en *El ensayador* es muy frecuente el uso de representaciones geométricas para el paralaje, mientras que en sus estudios de mecánica, además de dichas representaciones, también encontramos relaciones entre dos o tres variables -o elementos sencillos y absolutos- que se hallan en concordancia con dichas representaciones, es decir, expresiones algebraicas. Pues se sabe que al trabajar con el movimiento de un cuerpo sobre el plano inclinado Galileo experimentó con muchos ángulos de inclinación para determinar la relación entre distancia, tiempo y velocidad, experimentos que lo llevaron a expresarla algebraicamente como «$s=At^2$»[5]. Por esta razón considero que sería más conveniente hablar de expresiones algebraicas en lugar de formas matemáticas, pues la noción «expresión algebraica» refiere a algo mucho más concreto, además de que está estrechamente relacionada con la representación geométrica de un hecho empírico.

Una vez que se obtiene una expresión algebraica a partir de la intuición lógico-matemática, el siguiente paso, según Burtt, es la demostración de su validez lógica. Esto quiere decir que la expresión algebraica debe ser consistente a partir de los principios lógicos de identidad, no contradicción y el tercero excluido. De ser así, entonces se demuestra ahora su validez explicativa a partir de experimentos. La validez explicativa puede entenderse como una relación efectiva y no trivial entre la expresión algebraica y el hecho empírico. Se ha explicado que la expresión algebraica es producto de la intuición lógico-matemática. Ahora, para saber si esta *explica* o no el hecho en cuestión, debemos atribuirle cantidades numéricas que

5 Para una explicación más clara y detallada de la relación entre experimentación y la formulación de expresiones algebraicas en el método de Galileo véase el apartado *Bolas e inclinaciones* en Lederman, L., Teresi, D. (2004). *La partícula divina.* México: Booket

necesariamente serán resultado de una medición. Si al resolver la expresión algebraica los resultados corresponden con el comportamiento del hecho en cuestión, entonces esta será útil para explicarlo. Y es así como se demuestra su validez explicativa.

Ahora, gracias a la explicación de la intuición lógico-matemática aplicada por Galileo es posible resaltar la primera razón por la cual las explicaciones matemáticas comienzan a tener un gran valor en las ciencias naturales. Pues la abstracción matemática permite la formulación de expresiones algebraicas que pueden aplicarse a una gran cantidad de *posibilidades empíricas*. Veamos que la expresión $s=At^2$ surge a partir de experimentar con una variedad considerable de ángulos de inclinación para determinar la relación entre distancia, tiempo y velocidad. Si en cada *posibilidad empírica* tenemos valores determinados para cada una de las variables, podemos explicar con precisión el comportamiento de cualquier cuerpo, por ejemplo, su deslizamiento sobre el plano inclinado. Ahora, observemos que éste bien podría ser el mismo procedimiento que llevó a Arquímides a plantear la razón entre masa y volumen para determinar la densidad de la corona de Hieron II, pues masa, volumen y densidad son, sin duda, abstracciones que sólo son posibles por la intuición matemática. Esto claramente nos impediría atribuir cierta novedad al trabajo de Galileo. Sin embargo, lo novedoso, aunque no esté propiamente en el método, sí está en su aplicación para explicar *el movimiento* de los objetos materiales. Así, en primera instancia, la importancia que usualmente se atribuye a Galileo no está en la formulación de un método matemático y experimental, pues en este sentido no podríamos encontrar diferencia alguna con sus antepasados, ya que fueron aplicados mucho tiempo antes. Sino en su aplicación al estudio del movimiento, aplicación que no encontramos en la filosofía natural presocrática ni en la renacentista propiamente. Mientras que el gran valor que comienza a adquirir aquí la explicación matemática se debe a su aplicación para dar cuenta no sólo del movimiento que se presenta inmediatamente a los sentidos, sino también para dar cuenta de *posibilidades empíricas* ideales que harán posible la *predicción de fenómenos empíricos*.

La aplicación que hizo Galileo de este método para el estudio del movimiento trajo consecuencias que marcarían el estudio posterior de la naturaleza. Primero, los fenómenos relacionados con el movimiento comienzan a estudiarse de forma matemática y ya no a partir del lenguaje mismo que se usa para hablar de ellos. Lo cual implica el uso de una intuición especifica que provee al investigador de *elementos sencillos y absolutos.* Y no sólo eso, pues también comenzaron a utilizarse medidas sistemáticas para descubrir las regularidades de los fenómenos cuantitativamente. Segundo, fue gracias a esta aplicación que las teorías heliocéntricas de Aristarco de Samos y Nicolas Copernico comienzan a tener una gran relevancia para los pensadores del siglo XVII, dando como resultado las primeras *teorías matemáticas de la filosofía natural* -principalmente las desarrolladas por Kepler y Newton. Tercero, debido a la importancia que Galileo atribuía a las matemáticas, la perspectiva materialista anterior queda remitida a un segundo plano, pues debido a la capacidad predictiva que tenían ciertas expresiones algebraicas, se comenzó a dar primacía al aspecto racional frente a lo empírico. En orden a lo cual, la naturaleza aparece ante los ojos de este siglo como una máquina, un sistema sencillo y ordenado que obedece a leyes inmutables, donde cada acción es regular e inevitable. Al contrario de la filosofía presocrática, dichas leyes ya no son los principios primitivos de Tales o Anaximandro, sino expresiones algebraicas que describen y predicen varios aspectos de un mismo fenómeno. Fue también gracias a esto que muchos de los preceptos plasmados en la doctrina del movimiento de Aristóteles fueron seriamente cuestionados, haciendo que las explicaciones pasaran de ser generalizaciones lógico-intuitivas a ser lógico-matemáticas. Es por estas razones que el conocimiento que permitió la aplicación de la matemática y el experimento al movimiento en el siglo XVII es de carácter metódico, cuantificable y demostrable a partir de principios lógico-matemáticos. Lo cual marca una gran diferencia al conocimiento anterior determinado por generalizaciones lógicas e intuitivas desarrolladas a partir de la experiencia directa con la realidad.

5. EL MÉTODO CARTESIANO

Cinco años más tarde de que Galileo publicara los *Diálogos sobre los dos máximos sistemas del mundo,* Rene Descartes daría *forma* a varias ideas de su contemporáneo, principalmente las relacionadas con la aplicación del método matemático-experimental al estudio del movimiento. Sin embargo, los intereses de ambos, aunque muy parecidos, fueron tratados de formas un tanto distintas. Mientras que Galileo estaba especialmente interesado en la aplicación de un método matemático-experimental para el estudio del movimiento, Descartes quería encontrar un método adecuado que le permitiera demostrar *las verdades* en un orden racional y sistemático. Lo cual le condujo al planteamiento de un conjunto de reglas que darían dirección al pensamiento para llegar a la verdad de una manera puramente racional. No obstante, antes de hablar propiamente de dichas reglas será preciso entender la razón por la cual Descartes estaba tan interesado en un método semejante.

En su *Discurso del método* Descartes postula tres aspectos metodológicos de «las ciencias pasadas» que resultan problemáticos para aprender la verdad. El primero corresponde con los silogismos de la lógica aristotélica y la mayor parte de sus instrucciones, las cuales «más sirven para explicar a otros las cosas ya sabidas [...] que para aprenderlas». Con esto no sólo refiere a lógica de Aristóteles que encontramos en su *Organon* y en su doctrina del movimiento, sino también a la utilidad que se hizo de estos silogismos en gran parte de la Edad Media por los escolásticos. Así, cuando afirma que estos «más sirven para explicar a otros las cosas ya sabidas [...] que para aprenderlas» Descartes quiere hacer énfasis en el hecho de que la lógica ha sido utilizada con fines meramente didácticos, esto es, para explicar a otros las cosas que ya se conocen. Pero en el fondo de su sentencia, apuntaba también a criticar la validez de los argumentos escolásticos que estaban sustentados en la autoridad de Aristóteles, pues para él, la apelación a la autoridad no podía producir conocimiento alguno, sino unicamente la pura repetición de ideas sin que se formasen juicios sobre ellas. Por esta razón, Descartes no estuvo interesado en una lógica didáctica que fuera útil para enseñar a otros lo ya conocido, sino en una lógica que enseñe a dirigir la razón para evitar que la validez de las explicaciones esté fundada en una autoridad y, más aún, para descubrir aquellas verdades que ignoramos (Descartes, 1989, 39).

Por otra parte, a los aspectos metodológicos dos y tres, que corresponden con el análisis de los antiguos y el álgebra de los modernos respectivamente, se les acusa de referir a cosas demasiado abstractas que no parecen tener aplicación alguna para el estudio de la naturaleza. Pues, como se ha visto previamente, el análisis de los antiguos estaba estrechamente ligado al estudio del *lo que se dice* de dicha naturaleza, esto es, estaba limitado a un análisis lógico del lenguaje del que se derivaban generalizaciones lógicas. Por esta razón, Descartes afirma que dicho análisis trabajaba con cosas tan abstractas que no permitía ejercitar el entendimiento para conocer las verdades ocultas sin antes «cansar grandemente la imaginación» (Descartes, *ibid.*). Lo cual se conecta directamente con el tercer aspecto problemático, pues, según Descartes, el álgebra de los modernos abusó de ciertas reglas y cifras demasiado abstractas que hacían del álgebra un arte confuso y oscuro. Así, pues, considero que los problemas que encuentra Descartes en la metodología de las «ciencias pasadas» puede resumirse en dos puntos: 1) un uso didáctico de la lógica que resultaba útil para enseñar a otros lo ya conocido, pero que no podía producir conocimiento nuevo y 2) el análisis y el álgebra de la que se valían trabajaba con objetos tan abstractos que no parecían tener aplicación alguna al estudio de la naturaleza.

Ahora, lógica, análisis y álgebra fueron determinantes para el propósito de Descartes. Pues el estudio de dichas *artes,* en conjunto con la matemática, le permitieron valorar los pros y los contras de su uso en la investigación de la naturaleza para proponer un método que reuniera unicamente las ventajas de cada una de estas. Mismas que aparecen plasmadas en las cuatro reglas del *Discurso del método.* La primera de estas aconseja «no admitir como verdadera cosa alguna, como no supiese con evidencia que lo es». Con la cual, como hemos visto en los silogismos de la lógica aristotélica, se opondría principalmente a la validez de toda explicación que esté fundamentada en una autoridad. La segunda regla dice: «dividir cada una de las dificultades que examinaré, en cuantas partes fuere posible y en cuantas requiriese su mejor solución». Esto se conoce con el nombre de método de análisis, gracias al cual es posible la *intuición* de *naturalezas simples* -el movimiento o la extensión, por ejemplo- que serían los elementos últimos a los que puede llegar cualquier proceso de análisis manteniéndose en el plano de las ideas claras y distintas. Dar un paso más allá de este plano, implicaría para Descartes incurrir en ideas confusas. Gracias a esto puede entenderse el reproche que hace al análisis de los antiguos y al álgebra de los modernos, pues para Descartes ambos caían en un exceso que los llevaba a trabajar con cosas tan abstractas que no parecían tener una aplicación, amen de hacer del álgebra un arte oscuro y confuso. Ahora, una vez que se han intuido las naturalezas simples procede la tercera regla que dicta conducir ordenadamente los pensamientos, empezando por las naturalezas simples para ir ascendiendo gradualmente hasta el conocimiento de lo más compuesto. Proceder que se conoce como método de síntesis. Por último, debemos hacer un recuento integral y una revisión general de las tres reglas precedentes para estar seguros de no omitir nada (Descartes, *ibid.*)

Observemos que el método que propone Descartes difiere considerablemente del método matemático-experimental que aplicó Galileo tiempo antes al estudio de la naturaleza. Pues aunque los intereses de ambos estaban particularmente influenciados por un conocimiento certero de la naturaleza, tenían aspiraciones diferentes. Primero, Galileo estaba especialmente interesado en la aplicación de un método matemático-experimental para el estudio del movimiento. Pero de acuerdo con la propuesta metodológica de Descartes, esta apunta no sólo a su aplicación en la investigación del movimiento, sino también para dirigir nuestra razón tanto en la matemática, la lógica, el álgebra como a las ciencias naturales en general. Esto se debe a la idea cartesiana de que el conjunto de todas las ciencias corresponden con la sabiduría humana misma. Esto es, para Descartes resultaba difícil concebir que la filosofía natural de los griegos, la geometría de Euclides o las matemáticas desarrolladas por Arquímides no formaran parte de lo mismo. Pues, aunque cada una de estas tratara con cosas distintas, ya sea silogismos, figuras o números, estas siempre forman parte de un mismo conocimiento cierto y evidente. Por esta razón, Descartes formuló una idea que sería determinante para el siglo XVII, la idea de que no hay más que una sola ciencia que permita el conocimiento cierto y evidente. Idea que se conoce como reduccionismo, la cual pretende englobar el estudio general de la naturaleza a una sola ciencia compuesta por un conjunto reducido de reglas. Su argumento quedaría como sigue:

> Todas las ciencias son idénticas a la sabiduría humana, que es siempre una y la misma, aunque se aplique a objetos diferentes. Así, hay sólo una clase de conocimiento, el conocimiento cierto y evidente. Y, en definitiva, no hay más que una ciencia, aunque posea ramas interconectadas. De ahí que pueda haber solamente un método científico[6].

Como explica Copleston (1982) esto marco un hito en términos metodológicos, pues, con su método unificador, Descartes se opuso a la idea aristotélica de que los diferentes objetos formales de las diferentes ciencias exigen métodos distintos. Y no sólo eso, pues en conjunto con Galileo, mostraron que para obtener un conocimiento metódico-seguro, cuantificable y demostrable a partir de principios lógico matemáticos, era necesario recurrir a la razón más que a la experiencia

6 Fragmento extraído de Copleston, F. (1982) *Historia de la filosofía. De Descartes a Leibniz*. Barcelona: Ariel. p. 78

sensible. No obstante, Descartes realiza un paso decisivo y radical al afirmar que sólo es posible conocer las verdades de la naturaleza a partir del uso puro de la razón. Aunque esto no implica que tuviera un desacuerdo con la parte experimental de la física de Galileo, pues a pesar de que le daba un gran valor a lógica para descubrir verdades desconocidas, también atribuyó una importancia a la experiencia y el experimento, pues es sabido que realizó muchas disecciones y experimentos de física (Copleston, 1982, 80). Además, su método no sólo habla ya de un reduccionismo, sino también sobre un aspecto metodológico importante para la física posterior. Me refiero al *método por separación* que usualmente se relaciona con la frase «el todo es igual a la suma de sus partes». Afirmación que se extrae del método analítico-sintético que se expuso anteriormente, donde se comienza por intuir los elementos simples de alguna *dificultad,* ya sea una cuestión matemática o física, para ascender gradualmente, por inferencia deductiva, hasta el conocimiento de los más compuestos.

Tenemos, por tanto, que el método de Descartes surge a partir de la identificación de tres problemas metodológicas relacionados con las ciencias pasadas. Estos son los silogismos de la lógica aristotélica, el análisis de los antiguos y el álgebra de los modernos; cuyos problemas fueron reducidos a dos puntos: 1) un uso didáctico de la lógica que resultaba útil para enseñar a otros lo ya conocido, pero que no podía producir conocimiento nuevo y 2) el análisis y el álgebra de la que se valían trabajaba con objetos tan abstractos que no parecían tener aplicación alguna al estudio de la naturaleza. A lo que Descartes propone una lógica que enseñe a dirigir la razón a partir de un análisis que permita captar las naturalezas simples de alguna dificultad, las cuales deben permanecer en el plano de las ideas claras y distintas. Ahora, considero que esto aportaría un aspecto más para entender el gran valor que se da a la explicación matemática en el siglo XVII, pues gracias a la aplicación de un método matemático-experimental impulsada por Galileo y Descartes, la validez de las explicaciones ya no estaría fundamentada en ninguna autoridad, sino en el puro razonamiento lógico-matemático que para

Descartes implica un conocimiento seguro y evidente. Además de que al considerar los límites en el proceso de análisis, evitaríamos caer en objetos tan abstractos que no pudieran tener alguna aplicación para el estudio de la naturaleza. No obstante, el método cartesiano desemboca en un reduccionismo que apunta a abarcar la explicación de todo lo concerniente a la naturaleza bajo un mismo conjunto de reglas. Además de aportar un aspecto metodológico importante que serviría para analizar los fenómenos como un todo que podría descomponerse en partes y, posteriormente, armado gradualmente con el fin de obtener un conocimiento integro de los principios que determinan su comportamiento.

6. LA MATEMÁTICA COMO HERRAMIENTA FUNDAMENTAL PARA EL ESTUDIO DE LA NATURALEZA

De todo lo anterior podemos extraer las siguientes conclusiones. «Las ciencias pasadas» -que para Descartes corresponden con la filosofía natural griega y la metafísica escolástica- genera un conocimiento que está determinado por generalizaciones lógicas e intuitivas desarrolladas a partir de la experiencia directa con la realidad. Esto a partir de un tipo de intuición que se denominó materialista, en la que había un predominio de lo empírico frente a lo especulativo de la razón. En contraste, a principios del siglo XVII Galileo propone la aplicación de un método matemático-experimental para el estudio de la naturaleza, lo cual le permitió formar un conocimiento cuantificable y demostrable a partir de principios lógico-matemáticos, donde encontramos la primera razón por la cual la explicación matemática cobra una relevancia en el estudio de la naturaleza. El trabajo de Galileo influyó de manera directa en Descartes, quien postularía un método que prescindiese de los aspectos problemáticos de «las ciencias pasadas», apoyándose unicamente de sus ventajas. Esto lo llevó a formular cuatro reglas que permitirían no sólo el conocimiento de las verdades del movimiento, sino también de las verdades de la lógica, el álgebra, las matemáticas y la naturaleza en general. Es así como el aspecto materialista de la metodología antigua queda en segundo plano, pues ahora con las propuestas de Galileo y Descartes *el predominio de lo empírico frente a lo racional se vuelve predominio de lo racional frente a lo empírico.*

Por otra parte, en el método matemático aplicado por Galileo y en el método de análisis propuesto por Descartes encontramos una intuición matemática que permite abstraer los *elementos simples* de un fenómeno. Esto marca una diferencia importante en relación a la filosofía naturalista griega, pues ahora la naturaleza comienza a estudiarse como un máquina *simple y ordenada*, cuyo comportamiento puede ser explicado a partir de la relación lógica entre dichos elementos. *La simplicidad* con la que se estudian los fenómenos a partir de la aplicación del método matemático es, además, un aspecto determinante en la física de los siglos XVII, XVIII y XIX. Pues de aquí también se deriva la idea de que sea posible explicar un gran número de fenómenos a partir de un conjunto reducido de leyes: el *reduccionismo.* Luego, también se argumentó que en el método de análisis-síntesis que propone Descartes se encuentra la base de una premisa metodológica esencial para la física posterior, es decir, «el todo es igual a la suma de sus partes». Gracias a esta los fenómenos se estudian como máquinas que son analizadas para entender la razón que produce su comportamiento. Esto permite la formación de leyes o el establecimiento de patrones que sean de ayuda para conocer el futuro de un proceso natural. Lo cual implica, a su vez, un determinismo, es decir, un modo especifico de concebir la relación entre el comportamiento de un fenómeno natural y las leyes a las que puede estar sometido.

Gracias a esto podemos afirmar que la gran importancia que cobran las explicaciones matemáticas de la naturaleza en el siglo XVII se debe al menos a dos puntos: 1) la intuición matemática para el estudio de la naturaleza permitió la formación de expresiones algebraicas, las cuales hicieron posible la predicción de fenómenos empíricos. 2) gracias a la aplicación de un método matemático-experimental, la validez de las explicaciones ya no estaba fundamentada en ninguna autoridad, sino en el puro razonamiento lógico-matemático que para Descartes implica un conocimiento seguro y evidente.

7. LA INFLUENCIA DE LA FILOSOFÍA NATURAL EN EL SIGLO XVII

Así, la importancia de lo racional frente a lo empírico, la simplicidad con la que se estudia la naturaleza con ayuda de un *método por separación* que responde a una concepción mecanicista, la aplicación de un método matemático para el estudio del movimiento y el reduccionismo serán los elementos clave que permitirán dar el paso decisivo de la filosofía natural al racionalismo científico. Históricamente, tras la publicación de *Los principios matemáticos de la filosofía natural,* se instaura la primera teoría general de la física, la mecánica newtoniana, donde los fenómenos naturales se estudian propiamente bajo las premisas de la geometría euclidiana y las matemáticas. Esta teoría general se caracteriza por su capacidad de explicar un gran número de fenómenos que van desde el movimiento de un cuerpo en caída libre hasta el comportamiento de los planetas que constituyen el sistema solar. Y no sólo eso, pues cuando se implementa dicha teoría a la práctica, nos encontramos con el hecho de que es posible predecir fenómenos tales como los eclipses, la posición espacial de un planeta en determinado tiempo o su comportamiento dentro del sistema solar. Sin duda fue gracias a estos dos aspectos heredados por la filosofía anterior, la explicación matemática y la predicción de fenómenos naturales, que el método implementado por Newton se estableció como el modelo a seguir de las ciencias posteriores, conformando así el reinado racionalista del método matemático-experimental que perdura hasta nuestros días.

La mecánica proporcionó el primer tratado sistemático de la naturaleza donde encontramos un conjunto de definiciones y tres axiomas o leyes generales que permiten la explicación y predicción de una gran cantidad de fenómenos naturales. Que si bien, esta mecánica surge de la necesidad de explicar el movimiento planetario, las tres leyes que ahí se exponen son igualmente aplicables a fenómenos ópticos y acústicos. Además, su metodología intrínseca hará posible la formulación de la termodinámica, así como las mecánicas de Lagrange, Hamilton y Boltzmann en el siglo XIX. Resulta impresionante que no fuera sino hasta finales del mismo siglo donde el determinismo de estas teorías comenzará a ser cuestionado a partir de los trabajos de Poincaré, momento en el que el comportamiento indeterminado del caos comienza a tener una relevancia para el ámbito de la física.

Con todo lo anterior se ha querido aportar ciertos puntos que serán importantes para el siguiente capitulo, donde se abordará de manera directa la metodología de la física clásica, la cual tiene su principio en la mecánica de Newton. Primero, a partir del análisis metodológico de «las ciencias pasadas» se ve claramente por qué las explicaciones matemáticas de la naturaleza cobrarán una gran importancia durante más de tres siglos en las investigaciones científicas, aspecto que se da por hecho en muchos trabajos donde se aborda el tema de la física clásica. Segundo, evidenciar desde un punto vista histórico que la propuesta teórica de Newton tiene su fundamento en las propuestas metodológicas anteriores, lo cual considero importante para evaluar en el capitulo siguiente la simplicidad metodológica que se atribuye comúnmente a este modo de hacer ciencia. Y por último, en este capitulo también se ha querido mostrar lo que a continuación se va a entender por física, es decir, no solamente un modo de estudiar los procesos de cambio que se efectúan en la naturaleza, sino también una metodología y una ontología específicas que se relacionan con un reduccionismo, un mecanicismo, un determinismo y una simplificación metodológica. Es importante tener en cuenta esto para la conclusión general de mi investigación, ya que serán puntos centrales en la crítica que varios filósofos y científicos de los siglos XIX y XX realizaron a este modo de hacer ciencia.

II. LA SIMPLICIDAD DE LA FÍSICA CLÁSICA

La física en tanto ciencia puede ser definida de muchas maneras, pero abarcando sus aspectos más generales podemos definirla como aquella ciencia cuyo objetivo principal es la formulación de teorías matemáticas que permitan el estudio y la explicación de fenómenos naturales. Además es una ciencia que se fundamenta tanto en los hechos empíricos -mediante el experimento- como en mediciones que otorgan un significado cuantitativo a sus expresiones matemáticas -elementos sencillos y absolutos. La física como disciplina científica nace en 1687 con la publicación de las tres leyes del movimiento de newton. De aquí en adelante, el enfoque matemático-experimental pasará a formar parte esencial en la investigación de la naturaleza por los siguientes tres siglos. A esta ciencia se le conoce como física clásica. El problema al que me enfrento a continuación será el de mostrar en qué consiste cierta *simplicidad* de la física clásica que varios científicos y filósofos a finales del siglo XIX se han empeñado en criticar. En primera instancia, esto resulta importante porque a la fecha no resulta claro a qué refieren con esto. Mucho se ha escrito sobre el tema, pero considero que algunos modos en los que se ha tratado resultan superficiales y no aclaran mucho sobre este punto que parece crucial para evidenciar el significado de lo complejo en el ámbito de la física.

Ahora, para entender el punto de dicha crítica, haré alusión a la célebre opinión de Warren Wiever (1948):

> Speaking roughly, it may be said that the seventeenth, eighteenth, and nineteenth centuries formed the period in which physical science learned variables, which brought us the telephone and the radio, the automobile and the airplane [...]

Con esto, Wiever ha querido expresar que los problemas teóricos que se plantean en la física de dichos siglos se involucran a lo mucho tres variables, lo cual les otorga el nombre de «problemas de simplicidad». Esto se debe a la aplicación de un «método científico» con el cual es posible explicar los fenómenos naturales de una manera simplificada y ordenada. A la par de Wiever, surgen opiniones semejantes en las que la simplicidad se atribuye a cierto tipo de *reduccionismo* que se expone a menudo con la frase «el todo es igual a la suma de sus partes» (Mitchell, 2009). Los científicos de la complejidad están empeñados en mostrar que los procesos biológicos, la organización de una sociedad o el surgimiento inesperado de una crisis económica no pueden ser explicados bajo la simplicidad reduccionista del método de la física, sino que es necesario un nuevo enfoque que, apoyado en este, permita el estudio adecuado de todos estos fenómenos en los que la complejidad está involucrada.

Es por esta razón que para poder entender lo complejo resulta necesario explicar claramente su complemento: la simplicidad de la física. Pues, como se verá a continuación, la cantidad de variables y el reduccionismo son unicamente dos aspectos asociados a dicha simplicidad. Para lograr mi propósito he decido comenzar por el análisis del carácter general de las teorías para extraer de ahí un aspecto ontológico y dos aspectos metodológicos. El primero corresponde a una visión mecanicista de la naturaleza, mientras que los dos últimos están involucrados en la sistematización de fenómenos naturales y la modelización matemática de sistemas físicos.

1. LAS TEORÍAS DE LA FÍSICA

La física clásica engloba un conjunto reducido de teorías generales que intentan explicar un gran número de fenómenos naturales. Se ha comentado en el capitulo anterior que la mecánica de Newton es la primera de estas, la cual fue formulada principalmente para dar cuenta del movimiento planetario. Ahora, a partir de las tres leyes del movimiento y el cálculo diferencial se pueden derivar un sinfín de ecuaciones matemáticas que permiten no sólo explicar y predecir el movimiento de la Tierra en torno al Sol, sino también fenómenos como la reflexión de la luz, el fenómeno de la resonancia sonora o el comportamiento de un fluido. Debido a la generalidad con la que son expuestas dichas leyes fue posible la formulación de teorías como la óptica, la acústica o la dinámica de fluidos. Todo esto a partir de un número reducido de leyes que permiten la explicación de un gran número de fenómenos naturales. A continuación se muestra cómo es esto posible.

Gran parte de la filosofía de la física desarrollada a principios del siglo XX está de acuerdo en afirmar que toda teoría física está compuesta por 1) un conjunto de definiciones en las que se especifica el modo en cómo se van a utilizar los conceptos básicos de la teoría. En el caso de la mecánica newtoniana, por ejemplo, las definiciones más importantes son el tiempo y el espacio absolutos. Además, se muestra que los conceptos de materia o movimiento serán medidas que surgen necesariamente de la relación entre otras variables. 2) Un conjunto de axiomas o leyes de carácter general que definen implícitamente una serie de nociones que en otros aspectos quedan sin especificar por los postulados de la teoría (Nagel, 2006). Las leyes que se postulan en cada teoría pretenden ser escasas. Por ejemplo, en la mecánica de Newton hay unicamente tres. Dicha pretensión apunta a abarcar una gran cantidad de fenómenos, gracias a la cual se pueden formular ecuaciones matemáticas aplicables a cada uno de estos. 3) Diversas ecuaciones o modelos matemáticos que permiten la explicación y predicción de los mismo. Los aspectos que considero importantes para entender la simplicidad metodológica de la física son los dos últimos, a saber, la aplicación de leyes para el estudio de la naturaleza y los modelos matemáticos que se derivan de estas últimas. La diferencia entre ambos puede verse claramente si entendemos que las leyes forman la parte general de la teoría, mientras que los modelos constituyen la parte especifica. Ahora bien, lo que voy a destacar es que en la naturaleza de las leyes hay cierto tipo de reduccionismo, con el cual se pretende explicar una gran cantidad de fenómenos a partir de un conjunto reducido de leyes. Este reduccionismo se diferencia grandemente de otro que suele identificarse con la frase «el todo es igual que la suma de sus partes» -el cual se abordará más adelante, pues mientras que este último nos habla de una regla para estudiar el todo o un fenómeno, el reduccionismo implicado en las leyes dice que todo puede ser explicado a partir de un número reducido de leyes. Como se ha visto anteriormente, esto se encontraría en estrecha relación con el reduccionismo de Descartes, mostrando que todos los fenómenos de la naturaleza pueden ser explicados a partir de un conjunto simple de reglas. Este será, pues, el *primer aspecto simple de la física*, a saber, que las teorías físicas que intentan dar cuenta de los fenómenos se constituyen a partir de pocas leyes, debido a que su generalidad permite que sean igualmente aplicables tanto en el campo de la mecánica como en la óptica, la acústica o la dinámica.

Por otra parte, las leyes de una teoría no son suficientes para explicar los fenómenos. Sería erróneo decir que con las leyes mismas sea posible dar cuenta de los fenómenos, explicarlos y predecirlos, pues estas son tan generales que no es posible aplicarlas de manera directa con nuestra percepción del mundo (Bunge, 1987). Es por esto que gracias al cálculo diferencial desarrollado por Newton y Leibniz es posible formular modelos matemáticos derivables del conjunto de leyes contenidas en una teoría. Pongo en la atención el hecho de que en física el término «modelo» a menudo suele ser intercambiable por la noción de «sistema». Un intercambiabilidad que debe ser aclarada para evitar confusiones posteriores. Pues bien, tanto modelo como sistema son términos que refieren a cosas muy diferentes según el contexto. Por ejemplo, en la teoría de la dinámica la noción de modelo puede referir tanto a una ecuación diferencial como a la representación gráfica que permite experimentar idealmente con algún fenómeno natural, es decir, refiere tanto a formulas de carácter matemático como a representaciones geométricas. Pero, por otra parte, la noción de sistema en esta misma teoría también puede referir a formulas matemáticas, sólo que, por lo general, su aplicación no se limita a una sola, sino a un conjunto de las mismas para hablar, por ejemplo, de sistemas de ecuaciones. En mecánica la noción de sistema se refiere a menudo a una situación hipotética que es útil para describir un fenómeno de manera sencilla y clara, tomando unicamente en cuenta los factores esenciales con el fin de dar una solución matemática a la situación hipotética planteada. Así, para poder plantear el famoso problema de los dos cuerpos, los físicos hablan de *el sistema* Tierra-Luna o *el sistema S*ol-Tierra.

Podríamos pasar por alto esta intercambiabilidad si nuestro propósito es obtener un resultado práctico y concreto, es decir, si lo importante de nuestra explicación no radica en entender qué se está entendiendo por modelo o sistema. Sin embargo, en mi investigación será importante hacer una distinción entre modelo y sistema para entender, por un lado, la simplicidad matemática de las ecuaciones diferenciales o modelos y, por otro, la simplicidad con la que se *representa* un fenómeno natural.

Así, pues, mi propuesta es que la noción de sistema refiera unicamente a una reconstrucción ideal de un fenómeno empírico, a la cual llamaré *sistematización de fenómenos naturales.* Dicha sistematización es el primer aspecto metodológico de la física, debido a que representa una de las herramientas fundamentales para explicar y predecir el comportamiento de un fenómeno empírico. Dicho aspecto se constituye por lo siguiente: 1) la observación empírica de un fenómeno natural y 2) la reconstrucción ideal de dicho fenómeno, la cual puede ser gráfica, ya sea geométrica o un simple dibujo en la imaginación. De tal modo que si se quiere estudiar el movimiento del la Luna en torno a la Tierra, deberá observarse dicho fenómeno para, posteriormente, formular un sistema que nos ayude a entenderlo de manera simple mediante su representación geométrica. En este sentido, para estudiar el movimiento de la Luna en torno a la Tierra es posible formular un sistema simple que llamaremos sistema Tierra-Luna. Un sistema que se plantea de manera gráfica, en la cual deben plasmarse los elementos básicos para entender el comportamiento en cuestión. Por ejemplo, para el estudio del movimiento de dos cuerpos celestes cualesquiera es muy útil una representación en términos geométricos (Véase Fig. 1).

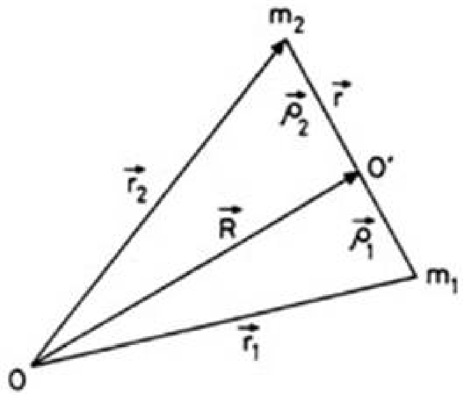

Figura 1. Sistematización del movimiento de dos cuerpos celestes cuando la única fuerza que interactua entre ellos es la gravedad.

A esto se le conoce en mecánica como «el problema de los dos cuerpos» y consiste en explicar la interacción entre dos cuerpos celestes cualesquiera -la Luna y la Tierra para esta caso- considerando que la única fuerza existente entre ambos cuerpos es la gravedad. Gracias a esta representación podemos observar que los elementos básicos para entender dicho fenómeno empírico son los puntos materiales m_1 y m_2, sus posiciones r_1 y r_2 con respecto al origen O, el vector R que marca la posición de m_1 con respecto a m_2 y la fuerza de gravedad que ambos ejercen sobre el otro. Así, con un sistema físico como este no solo estaríamos expresando la reconstrucción ideal de un fenómeno que engloba estos dos objetos, sino también los elementos básicos para entender su comportamiento[7].

Ahora, el segundo aspecto metodológico que se liga necesariamente con el primero es la *modelización de sistemas físicos*. Pues en física todo modelo matemático toma como punto de partida el estudio de un sistema físico, ya que

7 Esta propuesta se apoya en la postura de Bertuglia y Vaio (2005), para quienes la noción de sistema refiere a una representación sencilla de un fenómeno natural.

estos se formulan a partir de la observación *sistemática* y organizada de los fenómenos naturales. Para ilustrar esto, recordemos el experimento de Galileo mostrado en el capitulo anterior, donde se expuso que al trabajar con el movimiento de un cuerpo sobre el plano inclinado -sistema- Galileo experimentó con muchos ángulos de inclinación para determinar la relación entre distancia, tiempo y velocidad, experimentos que lo llevaron a expresarla matemáticamente como $s=At^2$. Es de esta forma como trabaja el físico teórico-experimental desde el siglo XVII, ya sea a partir de un trato directo con sistemas físicos como Galileo, o a partir de observaciones hechas previamente como el trabajo de Kepler. Lo que debemos tener en cuenta es que la ecuación $s=At^2$ es un modelo matemático en el sentido de que es producto de organizar, analizar e interpretar una gran cantidad de información que arroja la observación de un sistema físico. Es por esto que los modelos son útiles para explicar y predecir el comportamiento de un sistema en términos matemáticos. Razón por la cual lo postulo como el segundo aspecto metodológico de la física. Mientras que el primero corresponde con la sistematización de fenómenos naturales.

Esta distinción entre sistema y modelo trae una consecuencia importante, pues con esto estaríamos diciendo que el físico en realidad no trabaja directamente con fenómenos naturales, sino con sistemas físicos, con reconstrucciones ideales que engloban los elementos básicos involucrados en los diversos comportamientos de fenómenos naturales. Sin embargo, no estoy queriendo decir que tan sólo se pueda hacer física desde el gabinete, ideando sistemas físicos para darles una explicación matemática. Sino que *la sistematización* de fenómenos naturales y la *modelización matemática* de sistemas físicos son dos aspectos metodológicos sumamente diferentes involucrados en el quehacer de la física. Es decir, son las dos herramientas de las que se vale el físico para explicar y predecir un fenómeno natural. Es por esta razón que he propuesto la no intercambiabilidad entre las nociones de sistema y modelo, mostrando que el sistema corresponde con la reconstrucción ideal de un fenómeno empírico, mientras que el modelo es producto de organizar, analizar e interpretar una gran cantidad de información que arroja la observación de un sistema físico. Como se verá a continuación esto será importante para dar cuenta de la simplicidad involucrada en la física clásica.

2. LA SIMPLICIDAD DE LOS SISTEMAS FÍSICOS

Podemos decir que la física clásica se compromete con una ontología simple debido a la metodología que implementa para su trabajo. Es decir, ante nuestra percepción, su forma de ver la naturaleza parece simple de acuerdo a las herramientas que utiliza para estudiarla. Lo cual no implica necesariamente que ante los ojos de Galileo, Descartes, Newton o Laplace los fenómenos aparecieran tan simples como lo expresaron en sus tratados, pues aunque el cálculo diferencial y la geometría euclidiana fueron las herramientas que permitieron a los físicos de este tiempo representar de manera simple la naturaleza, había sistemas en los que encontramos cierto grado de complejidad. A continuación se exponen los aspectos más importantes por los cuales los sistemas de la física son catalogados como simples.

2.1 DETERMINISMO

Primero, la mecánica newtoniana, así como las formulaciones posteriores realizadas por Lagrange y Hamilton, están comúnmente asociadas al término «sistema determinista». Esto se debe a que su forma de reconstruir los fenómenos trae dentro de si la presuposición de que podemos conocer con precisión sus estados futuros y pasados a partir de entender los principios que determinan su movimiento. Por ejemplo, en el caso del problema de los dos cuerpos mencionado anteriormente, al conocer el valor constante de las masas, su posición inicial P_0 en el plano de referencia para un tiempo T_0 y la cantidad de fuerza que determina su movimiento, podemos conocer con exactitud $P_1, P_2, \dots P_n$ para cualquier $T_1, T_2, \dots T_n$. Es decir, podremos describir con exactitud el comportamiento del sistema, aún si cambiamos los valores de cada variable. Esto puede explicarse formalmente del siguiente modo. Supongamos que hay un sistema *S* cuyos elementos tienen el conjunto de propiedades *K*. Si *S* se encuentra con su conjunto de propiedades *K* en un tiempo t_0 y los valores de *K* corresponden con K_{n0}, entonces cuando *S cambie* a t_1 marcado por el intervalo de tiempo $(t_0\text{-}t_1)$, los valores de *K* corresponderán con K_{n1} y así para cualquier intervalo de tiempo (Nagel, 2006). En este sentido, que un sistema sea determinista quiere decir básicamente que basta con conocer el estado inicial de sus componentes para saber con exactitud cuál será su estado futuro o pasado.

Esto es algo que todos los físicos de los siglos pasados conocen muy bien, el punto aquí es ¿por qué deberíamos atribuir simplicidad a estos sistemas por ser deterministas? Bien, en primera instancia porque su representación involucra muy pocos aspectos del fenómeno en cuestión. Es cierto que para estudiar el sistema Tierra-Luna basta con considerar las masas, la distancia entre ellas y la fuerza que interactúa entre ellas. No obstante, podríamos decir que esto arrojaría una explicación aproximada del fenómeno si consideramos que en realidad la Tierra y la Luna no están solos en el universo, sino que su comportamiento también está determinado por la fuerza gravitatoria del resto de los planetas, aspectos que para estudiar el sistema Tierra-Luna se consideran despreciables debido a que no afecta considerablemente su comportamiento. Pero este despreciamiento queda justificado cuando el sistema en cuestión resulta adecuado para explicar y predecir el movimiento de la Luna en torno a la Tierra.

Ahora, otra razón por la cual podemos atribuir simplicidad al sistema es que sus estados se especifican unicamente a partir de dos variables, que serían tiempo y espacio. Mismas que pueden variar *controladamente* sin afectar la capacidad predictiva del sistema. Esto no sólo se manifiesta en el sistema Tierra-Luna, en física es algo que encontramos constantemente el los sistemas-péndulo simple y, más allá de la mecánica, en los sistemas-fluido. Pues aunque al principio los físicos no encontraron adecuado la sistematización determinista de un fenómeno para estudiar el movimiento de líquidos, posteriormente se opto por introducir parámetros, como la densidad de un líquido en un punto, para ser interpretadas como valores promedio de las variables de estado mecánicas -tiempo y posición (Nagel, 2006). Por tanto, podemos atribuir simplicidad a los sistemas de la física en tanto su representación involucra muy pocos aspectos del fenómeno en cuestión y en tanto sus posibles estados se especifican unicamente a partir de dos o, en algunos casos, tres variables. Una simplicidad que bajo estas condiciones da por resultado un sistema determinista, pues debido a que esta compuesto por muy pocos elementos y a que es posible especificar sus estados con un par de variables, es posible determinar su comportamiento pasado y futuro a partir de una expresión matemática simple.

2.2. EQUILIBRIO Y REVERSIBILIDAD

El hecho de que los sistemas deterministas de la física estén aislados de las condiciones despreciables del ambiente en el que se desenvuelven, implica que su comportamiento está completamente controlado por el investigador, al grado de que pueda llegar a conocer sus estados futuros y pasados. Ahora, esto evidencia dos propiedades más que se enlazan directamente con el determinismo: las propiedades de equilibrio y reversibilidad. La primera consiste en que los sistemas, al estar aislados del ambiente que los rodea, no pueden alterar su comportamiento en el tiempo, permaneciendo en un estado de completo equilibrio. Volviendo al problema de los dos cuerpos, si otorgarnos valores determinados a las variables y *hacemos funcionar el sistema* veremos que su comportamiento es regular y estable para cada momento, lo cual quiere decir que las trayectorias que dibujarían los dos cuerpos sobre el plano no cambiará con el tiempo. Como hemos explicado anteriormente, esto permite conocer con exactitud la posición futura de cualquiera de los dos cuerpos y no sólo eso, pues si paramos el proceso del sistema y le asignamos valores negativos para ver cómo se comportó en el pasado, tendremos una descripción igualmente clara del mismo proceso. Esto es lo que implica la reversibilidad de un sistema determinista, a saber, que gracias a que es estable, sus comportamiento pasado podrá ser igualmente conocido que su comportamiento futuro, permitiendo una explicación *completa* del sistema en cuestión. Ahora, la simplicidad que encuentro tanto en el equilibrio como en la reversibilidad de un sistema determinista es que estos permiten la descripción exacta y completa de cualquier sistema. Esta descripción es simple porque no necesitamos explicar más que un movimiento regular y reversible, prescindiendo de todo aquello que pudiera alterar la estabilidad dinámica de cualquier sistema.

2.3. LINEALIDAD

La linealidad de los sistemas físicos es una característica que se ha implementado comúnmente en la literatura científica para contraponerla al carácter no lineal de ciertos sistemas dinámicos que comienzan a estudiarse a finales del siglo XIX. Esta característica está intrinsicamente enraizada a la concepción determinista y, más aún, al concepto de causalidad, pues a menudo se describe como la proporción entre la cantidad de fuerza o energía que influye sobre un sistema y su comportamiento, esto es, una proporción entre efecto y causa. Tomemos como ejemplo el sistema-péndulo simple, un sistema sencillo y aislado compuesto por un cuerpo sostenido por un hilo que, gracias a la influencia de un agente externo, comienza a oscilar de un lado a otro (Fig. 2).

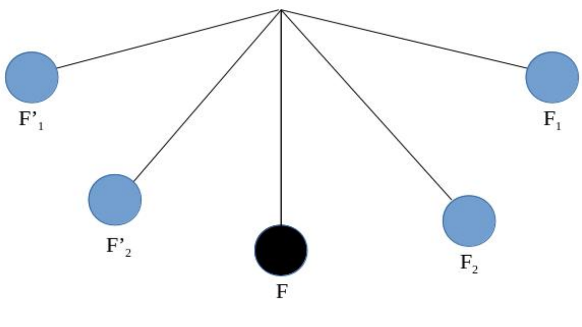

Figura 2. Representación del comportamiento de un péndulo simple cuando sus posiciones iniciales son F_1, F_2. Donde F es su estado de mayor equilibrio

Al soltar el cuerpo desde la posición F_1, este pasara por la siguientes posiciones y se detendrá en F'_1. Después, observaremos al cuerpo oscilar entre estas mismas posiciones durante un periodo indefinido de tiempo debido a que no estamos considerando la fricción que el cuerpo pudiera tener con el aire. Ahora, si soltamos el cuerpo desde la posición F_2 , será imposible que este alcance la posición F'_1, pues la fuerza implicada en el sistema sólo permite que el cuerpo llegue a la posición F'_2. Precisamente esto sería la linealidad de un sistema, a saber, una propiedad según la cual el comportamiento de todo sistema es proporcional a la fuerza -sea interna o externa- que se aplica sobre este.

Ahora, observemos que este sería también un sistema determinista, pues podemos conocer cada una de sus posiciones futuras al conocer su posición inicial. Además, es un sistema perfectamente aislado de la influencia de cualquier otro factor que pudiera alterar el comportamiento determinado. Como hemos visto, el determinismo y el aislamiento implican que el sistema se encuentra en un estado de equilibrio dinámico. Además, si pudiéramos regresa el tiempo, podríamos observar sin ningún problema cada uno de sus estados pasados. Por otra parte, hemos usado este sistema para mostrar la linealidad, la cual sería aquella propiedad de todo sistema cuyo comportamiento sea proporcional a las fuerzas que interactúan con él.

Esta es al menos una manera de entender la linealidad, pero considero que con esto se ha expuesto el aspecto esencial que será determinante para entender su contraparte en el capitulo siguiente -la no linealidad-. Además, debemos tener en cuenta que en física no sólo se habla de sistemas lineales, sino también de ecuaciones diferenciales lineales, lo cual se verá en el apartado siguiente cuando hablemos de la simplicidad relacionada con los modelos matemáticos de la física clásica.

3. LA METODOLOGÍA MECANICISTA

Para terminar con la exposición de la simplicidad involucrada en la sistematización de fenómenos naturales que se lleva a cabo en el ámbito de la física, a continuación vamos a tratar el aspecto que más se ha criticado a su metodología: el reduccionismo. Se mencionó al principio que había un tipo especial de reduccionismo relacionado con la aplicación de un conjunto reducido de leyes para explicar una gran cantidad de fenómenos naturales, concepción que encontramos en la idea cartesiana de que es suficiente un método para el estudio de toda la naturaleza debido a que para él la sabiduría humana es sólo una. Esto fue heredado a Newton, lo cual encarnó en su pretensión de formular un teoría que sirviera para explicar tanto los procesos del universo como los de la Tierra. No obstante, Mitchell (2009) argumenta que encontramos en el mismo Descartes otro tipo de reduccionismo, aquel que se relaciona con la frase «el todo es igual a la suma de sus partes». Este último es el que a continuación se va a tratar, pero antes resulta necesaria una aclaración. Debido a que este reduccionismo es un aspecto metodológico importante relacionado con los sistemas de la física, he decidido adoptar la postura de Martínez (2009) donde la frase «el todo es igual a la suma de sus partes» no corresponde propiamente con algún tipo de reduccionismo, sino más bien con la noción de «mecanicismo fenoménico» que, en favor de la simplicidad, he decido llamar mecanicismo. Esta es una aclaración pertinente no sólo para el presente escrito, sino también para cualquiera que quiera diferenciar entre los muchos sentidos de reduccionismo y lo que se expresa con dicha frase. Pues es cierto que hay un reduccionismo en Descartes, a saber, la idea de que todo fenómeno natural puede ser explicado a partir de una sola ciencia constituida por un conjunto reducido de reglas. Pero, como se ve, esto no tiene nada que ver con el mecanicismo que se deriva de la propuesta metodológica cartesiana donde se aplica un método de análisis -descomposición de partes- y otro de síntesis -composición de las partes. Por esta razón, de aquí en adelante la palabra reduccionismo referirá a la aplicación de un conjunto reducido de leyes para explicar una gran cantidad de fenómenos naturales, es decir, a un aspecto relacionado con la simplicidad de las teorías físicas que tiempo después recibirá el nombre de *universalidad*. Mientras que la palabra mecanicismo englobará los métodos de análisis y síntesis cartesianos que fueron determinantes para la sistematización de fenómenos, el cual es un aspecto metodológico importante de la física clásica que se relaciona usualmente con la frase «el todo es igual a la suma de sus partes».

Los sistemas físicos que hemos expuesto a lo largo de este capitulo también son simples en el sentido de que gracias a su formulación, son susceptibles de ser analizados y sintetizados. Si seguimos en esto a Descartes, el método de análisis sería útil para la *intuición* de *naturalezas simples*, las cuales serían los elementos últimos a los que puede llegar cualquier proceso de análisis manteniéndose en el plano de las ideas claras y distintas. Estas naturalezas simples pueden corresponder con el movimiento, la masa o la fuerza para la mecánica, o, en el caso de la termodinámica, con calor, energía o entropía. Ahora, el siguiente paso corresponde con el método de síntesis que consiste en conducir ordenadamente nuestros pensamientos, empezando por las naturalezas simples para ir ascendiendo gradualmente hasta el conocimiento de lo más compuesto. Y aquí Descartes añade algo más «incluso suponiendo un orden entre los que no se preceden naturalmente» (Descartes, 1983, 40). Pienso que con esto Descartes quiso decir algo que no queda explicito en sus cuatro reglas, a saber, que entre el proceso de análisis y síntesis es necesario entender las relaciones que se dan entre cada una de las partes, conocer cuál determina a quién o cómo es que se influencian mutuamente para obtener un todo bien ordenado.

Mi propuesta en este punto es que tanto el método de análisis como el de síntesis, o mecanicismo, son el pilar de la sistematización, es decir, conforman las reglas que dirigen el proceso de sistematización que es fundamental para la física clásica. Pues, como se ha visto a lo largo de este capitulo, en todo sistema correspondiente a este periodo podemos observar claramente un conjunto de elementos básicos -naturalezas simples, puestos en relación de tal modo que, al verlos en conjunto, constituyan un todo simple y ordenado. Así, a lo que la frase «el todo es igual a la suma de sus partes» estaría refiriendo propiamente es a este mecanicismo con el que trabaja la física clásica, el cual es simple en tanto está compuesto unicamente por dos reglas y en tanto permite la formulación de sistemas aislados de cualquier condición que pudiera alterar su orden. Esto implica, a su vez, un sistema en equilibrio, reversible, lineal y, por lo tanto, determinista. Lo que quedaría por aclarar es si este mecanicismo se aplica directamente al mundo o si sólo se aplica al estudio de sistemas. Pues bien, las investigaciones en física clásica no pueden llevarse a cabo tan sólo formulando sistemas de manera a priori, ni suponiendo que los sistemas físicos estén dados de antemano por la razón, pues sería completamente absurdo. Porque tanto el estudio de las teorías como de los sistemas que se proponen para explicar la naturaleza evidencian que es fundamental la observación empírica del mundo. No obstante, las definiciones, leyes y modelos con los que la física estudia la naturaleza no son de carácter empírico, sino matemático. Esto permite suponer que hay algo entre el plano concreto de lo empírico y el plano abstracto de las matemáticas que hace posible el estudio científico de la naturaleza. El análisis que hemos hecho anteriormente muestra que los sistemas no son propiamente matemáticos ni tampoco propiamente empíricos, sino reconstrucciones ideales que son aplicados para el estudio simplificado de la naturaleza. Lo cual permite afirmar que, de alguna forma, la percepción del físico no es ni completamente empírica ni completamente matemática, sino sistemática. Esto quiere decir que en física clásica se parte necesariamente de sistematizar la naturaleza para estudiarla, haciendo que todo aquello que pudiera recibir el nombre de «fenómeno empírico» sea, en realidad, un sistema. Así, los fenómenos empíricos y los sistemas que se forman a parir de estos son propensos a ser estudiados con una metodología mecanicista. En el primer caso dicha metodología se aplica para la formulación de sistemas, como el de los dos cuerpos o el péndulo simple. Mientras que en el segundo caso se aplica para evaluar si el sistema, en tanto reconstrucción ideal del fenómeno, es adecuada en términos lógicos y matemáticos. Lo cual no sólo permitirá evaluar su validez lógica, sino también para encontrar las regularidades del sistema que permitan la formulación de modelos matemáticos. Por lo tanto, el mecanicismo se aplica directamente al mundo para la formulación de sistemas y también para el estudio de los mismos.

No obstante, lo que Mitchell y otros científicos de la complejidad critican a este método mecanicista no es tanto su aplicación para el estudio de sistemas, sino su aplicación para el estudio de la naturaleza. Es decir, están en desacuerdo con el hecho de que para estudiar un fenómeno que, en esencia, es complejo -muy elaborado, *aparentemente* desordenado, con muchos elementos- sea suficiente: 1) desarmarlo para afirmar que esta compuesto de muy pocos elementos, prescindiendo de los factores que *aparentemente* no son determinantes, 2) entender sus escasas relaciones internas para 3) armarlo como un todo simple y ordenado. Pues para ellos, los fenómenos complejos están compuestos por muchos elementos que no sólo interactúan entre si, sino también con su entorno. Además, siguiendo la intuición de la Gestalt alemana, piensan que la gran cantidad de relaciones internas y externas que determinan su comportamiento representan un añadido a la totalidad, lo cual representan con la frase «el todo es *más* que la suma de sus partes». Tomar en consideración esto, les permite la formulación de sistemas para nada simples ni ordenados, sino sistemas complejos y desordenados -lo cual veremos con detalle en los siguientes capítulos. Esto permite decir que su crítica, la cual apunta hacia el mecanicismo de la física clásica, consiste en la incapacidad de este para tratar con fenómenos que implican muchos elementos y muchas relaciones que, además, muestran un comportamiento *aparentemente* desordenado. Es decir, apuntan a criticar un aspecto metodológico que consiste principalmente en extraer muy pocas *naturalezas simples* de un fenómeno para elaborar a parir de ello, un sistema simple y ordenado. Y en esto consiste propiamente la simplicidad del mecanicismo. No tanto porque sea un método compuesto por dos reglas simples, sino porque produce sistemas con muy pocos elementos -máximo tres o cuatro-, lo cual hace que sean simples, ordenados, deterministas, etc.

En resumen, la física clásica engloba un conjunto de teorías matemáticas que se aplican para el estudio de la naturaleza. De las cuales unicamente se han mencionado la mecánica clásica y de fluidos, la hidrodinámica, la termodinámica, la óptica y la acústica. Estas teorías están compuestas por un conjunto de definiciones, un conjunto de leyes y varios modelos matemáticos que se aplican a casos muy concretos. Luego, se mostró que hay una diferencia importante entre las nociones de sistema y modelo. La primera refiere a una reconstrucción ideal de un fenómeno empírico, mientras que la segunda refiere al producto de organizar, analizar e interpretar una gran cantidad de información que arroja la observación de un sistema físico. Comenzamos por analizar la simplicidad involucrada en los sistemas que plantea la física clásica, la cual está relacionada con los conceptos de determinismo, reversibilidad, linealidad, orden y equilibrio. Después, mostramos que también hay cierta simplicidad a nivel de la teoría por implicar un tipo de reduccionismo, según el cual es posible explicar un gran número de fenómenos naturales a partir de un número reducido de leyes. Por último, hablamos de la simplicidad en el método mecanicista donde «el todo es igual a la suma de sus partes». Hasta aquí se ha mostrado que la simplicidad que podemos atribuir a la física se encuentra en tres aspectos: 1) el reduccionismo de la teoría. 2) El determinismo, la reversibilidad, la linealidad, el orden y el equilibrio de los sistemas. 3) la metodología mecanicista. Esta última es de suma importancia, pues es la base del proceso de sistematización que lleva a cabo la física clásica. Por lo cual estaría estrechamente ligado con el punto 2). En lo siguiente, se exponen los aspectos simples involucrados con el segundo proceso metodológico de toda teoría física: la modelización matemática.

Las naturalezas simples de Descartes son, en primera instancia, extraídas de la experiencia directa con el mundo empírico a partir de su sistematización, es decir, a partir de que se realizan reconstrucciones ideales del mundo. Pues tanto los conceptos fundamentales y las leyes de la mecánica clásica, así como los de la termodinámica y muchas de las teorías físicas de los siglos XVII, XVIII y XIX, fueron en primera instancia resultado de la experimentación y la observación sistemática de la naturaleza. Ahora, esto resulta importante para diferenciar entre la sistematización y la modelización, pues la sistematización no está ligada necesariamente con la reflexión matemática. Es posible demostrar dicha afirmación a partir de la historia de la termodinámica, ya que, como es sabido, sus tres leyes básicas, así como muchos de sus conceptos fundamentales -entropía, calor, energía- fueron en un primer momento conceptos puramente empíricos. En un sentido muy especifico esto quiere decir que tanto sus leyes como gran parte de sus conceptos fueron producto de una intuición empírica que en un primer momento carecían de cualquier explicación matemática. Los intentos por trasladarlos al plano de las matemáticas, y en especial al de la mecánica, se dieron tiempo después de que Carnot y Clausius propusieran las dos leyes, esto es, a finales del XIX y principios del XX con la mecánica estadística de Boltzmann. Sin embargo, con esto no debe pensarse que la diferencia entre ambos radique unicamente entre lo empírico y lo matemático, pues hemos explicado anteriormente que los modelos son producto de organizar, analizar e interpretar una gran cantidad de información que arroja la observación de un sistema. A continuación se muestran dos aspectos que estarían relacionados con cierta simplicidad en los modelos matemáticos. Estos son la linealidad y su solución analítica.

4.1. LA LINEALIDAD Y LA SOLUCIÓN ANALÍTICA DE LO MODELOS

Recordemos que la linealidad de los sistemas está estrechamente ligada a los conceptos determinismo y causalidad, donde linealidad corresponde con la proporción entre el efecto -el comportamiento del sistema- y la causa -alguna fuerza que influya sobre el sistema. Ahora bien, muchos de los sistemas con los que trabaja la física clásica son de carácter lineal: el sistema tierra-luna, el sistema péndulo, el sistema de algún fluido, el sistema del plano inclinado o la caída libre de un cuerpo, etc. Todos y cada uno de estos entran bajo el concepto de determinismo, pues al estar perfectamente aislados de cualquier influencia externa, se encuentran en un estado de perfecto equilibrio que nos permite estudiarlo de manera controlada. Así, al conocer los valores iniciales del sistema, su determinismo nos permite *determinar* cada uno de sus posiciones futuras y pasadas. En física todos estos sistemas pueden describirse de manera simple, tal como lo hicimos en el apartado anterior sobre linealidad de los sistemas. No obstante, la física también necesita poder explicar por qué el movimiento de un péndulo se vuelve *extraño* cuando lo soltamos de posiciones por arriba de F_1, Fx, por ejemplo. Es decir, cuando el ángulo que se forma entre F y Fx es mayor de treinta grados (Bertuglia y Vaio, 2005). Es por esto que para estudiar los distintos comportamientos de un péndulo -los cuales podrían varían en razón del peso, la longitud del hilo sujetador o el ángulo- o cualquier sistema, en física se aplica la modelización matemática.

Para comenzar, aclararé que todo modelo en la física clásica es una ecuación diferencial. La simplicidad de los sistemas permite la formulación de ecuaciones diferenciales muy sencillas, compuestas en su mayoría por dos funciones, sus derivadas, y un par de variables. Por ejemplo, la segunda ley de la mecánica newtoniana es una ecuación diferencial muy útil para trabajar con estos sistemas. No obstante, debido a que la ley es muy general, no es posible aplicarla de manera directa a la descripción de sistemas. Para lograr esto deben realizarse las transformaciones necesarias para extraer de la ley un modelo particular que nos permita explicar cualquier sistema. En el caso del péndulo simple este modelo recibe el nombre de oscilador armónico simple. Haciendo, pues, los pasos necesarios obtendremos una ecuación diferencial. Lo cierto es que debido a que podemos descomponer cualquier sistema en partes y conocer con precisión las relaciones que determinan su comportamiento, muchos de los modelos que se formulan en física son de carácter lineal. Ahora, esta linealidad se diferencia grandemente de la linealidad de los sistemas, pues no podemos decir simplemente que son lineales porque hay proporción entre el efecto y la causa, ya que estamos hablando de ecuaciones matemáticas. El concepto de linealidad en modelos implica que una de las funciones que componen la ecuación diferencial debe ser lineal con respecto a alguna de sus variables. Ahora, una función lineal es toda aquella función que nos permite dibujar sobre el plano cartesiano una linea recta. Tomemos por caso la función $f(x) = mx + b$. Sea, pues, $m = 2$ y $b = 3$. Lo cual nos dará por resultado un gráfica muy clara (Fig. 3).

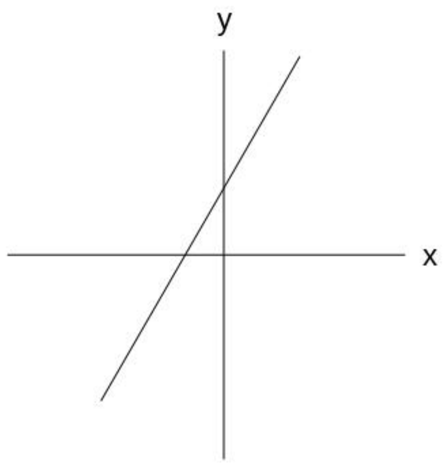

Figura 3. Representación en el plano cartesiano de la función $f(x) = mx+b$ para los valores $m=2$ y $b=3$

Es por esto que la linealidad de un modelo matemático se asocia comúnmente con una linea recta sorbe el plano cartesiano. Sin embargo, al nivel teórico de las matemáticas la linealidad implica muchas otras características, como el hecho de que cualquier ecuación diferencial de este tipo pueda tener una solución a partir de una combinación entre otras ecuaciones semejantes o por el hecho de que toda función lineal deba cumplir el principio de superposición, entre muchas otras cosas. Pero tratar con detenimiento estos puntos, desviará el objetivo principal del argumento. Lo único que importa tener en cuenta es que la simplicidad de los sistemas físicos permite la formulación de modelos de carácter lineal compuestos por dos o tres variables. Con esto podemos ver que la simplicidad a la que refiere Weaver cuando dice «the seventeenth, eighteenth, and nineteenth centuries formed the period in which physical science learned variables», es una simplicidad en los modelos matemáticos de la física. Por esto les otorga el nombre de «problemas de simplicidad», pues están compuestos por un máximo de cuatro variables. Sin embargo, a lo largo de este capitulo hemos visto que la simplicidad de la física no se debe unicamente a que trata dichos problemas, sino también por un modo particular de estudiar los fenómenos a partir de un método mecanicista. Gracias a este se formulan sistemas que, al ser deterministas, lineales y demás, permiten una formulación matemática muy simple, compuestas unicamente por un par de funciones y un par de variables.

Lo que debe tomarse en cuenta de la linealidad de los modelos, es justamente la linea recta que podemos dibujar sobre el plano. Pues durante la segunda mitad del siglo XX, científicos como Edward Lorenz e Ilya Prigogine obtuvieron modelos que no dibujaban una linea recta, sino formas mucho más elaboradas. En este punto de la historia las ecuaciones se vuelven no lineales, es decir, ecuaciones compuestas por funciones no lineales que dibujarán el caos de sistemas no deterministas, fuera de equilibrio, no lineales, irreversibles y desordenados. Se podría pensar que, en efecto, la contraposición entre dichos conceptos implica que la visión científica del siglo XX se contrapone a la visión científica de los siglos XVII, XVIII y XIX. Sin embargo, como veremos más adelante, en realidad son visiones distintas que se complementan mutuamente, pues a partir de la irrupción del caos muchos científicos comienzan a estudiar a profundidad la mecánica clásica y muchas de las teorías físicas pasadas para dilucidar el intermitente rostro de la naturaleza que vacila entre el orden y el desorden.

Ahora bien, la simplicidad que podemos atribuir a los modelos matemáticos se encuentra en el hecho de que están compuestos por un par de variables y un par de funciones. Amén de la linealidad que nos permite representar el proceso de un sistema a partir de una linea recta. Lo cual permitía que cualquier físico instruido en el cálculo diferencial pudiera dar una solución analítica al modelo. Esto no quiere decir otra cosa que solucionar el modelo *manualmente.* Por ejemplo, para transformar la segunda ley de Newton en un modelo que explique el periodo de un péndulo simple, no hace falta más que recurrir a la trigonometría y realizar un conjunto reducido de pasos. Lo mismo en el caso del problema de los dos cuerpos. Estos tienen una solución simple gracias a que los sistemas están compuestos por muy pocos elementos. Pero ¿qué pasaría si no enfrentamos con un sistema constituido por dos billones de elementos? ¿Cómo sería posible formular un modelo matemático donde se tomen en cuenta cada uno de estos? La respuesta del siglo XIX fue la estadística. Pero a pesar de que esta teoría hace posible englobar una gran cantidad de elementos en modelos relativamente simples, el problema al que se enfrentaron fue que ni un conjunto de diez matemáticos sería suficiente para encontrar la solución a cierto tipo de problemas. Como veremos en el capitulo siguiente, las soluciones para cierto tipo de problemas que engloban un elevado número de variables necesitan la implementación de computadoras. Lo cual marcará una gran diferencia a nivel metodológico con respecto a la física clásica.

En resumen, el carácter lineal de los modelos es producto del carácter simple de los sistemas. Lo cual hace posible representar un proceso a partir de una lineal recta. Sin embargo, lo de linea recta debe tomarse en sentido figurado, pues en realidad con muchos de los sistemas permiten dibujar elipses, círculos o lineas onduladas, entre muchas otras. Pero en esencia, son formas muy simples que no se comparan con las formas que permite un modelo no lineal. Ahora, la simplicidad del modelo se atribuye a que están compuestos por un par de funciones y un par de variables, además de la linealidad. Esta simplicidad permite que los modelos puedan ser solucionados analíticamente, lo cual quiere decir que es posible solucionarlos con lápiz y papel. La simplicidad de esta solución es muy clara, pues basta con recurrir al cálculo diferencial y a al conocimiento necesario para transformar leyes generales en modelos que expliquen en términos matemáticos el proceso de un sistema especifico.

5. CONCLUSIÓN

La física clásica es la ciencia de los siglos XVII, XVIII y XIX que se encarga de estudiar la naturaleza a partir de un conjunto de teorías matemáticas. Dentro de cada una encontramos un conjunto de definiciones, un conjunto reducido de leyes y varios modelos que se aplican al estudio de sistemas físicos. Por una parte, encontramos que la simplicidad de la física en general podemos atribuirla a una metodología mecanicista con la cual es posible la formulación de sistemas. Estos son simples, a su vez, por contener un número reducido de elementos y por ser deterministas, ordenados y en equilibrio dinámico, reversibles y lineales. Para poder describirlos matemáticamente resulta necesario la formulación de modelos que también son simples de acuerdo a su carácter lineal y a que pueden ser solucionados analíticamente. Además de esto, también mostramos cierta simplicidad en el carácter reduccionista de las teorías, debido a que estas pretenden explicar una gran cantidad de fenómenos naturales a partir de un conjunto reducido de leyes. Por lo tanto, podemos afirmar que la simplicidad de la física clásica se debe a dos aspectos metodológicos principalmente: la sistematización de fenómenos naturales y la modelización matemática de sistemas. Ahora, la sistematización muestra, además, que podemos atribuir a esta ciencia una ontología *simple* debido a que para ella los fenómenos de la naturaleza corresponden estrictamente con sistemas simples. Así, podemos resumir el carácter simple de la física clásica en un aspecto ontológico y dos aspectos metodológicos generales:

1) El estudio de la naturaleza por parte de la física clásica responde a una *ontología simple* debido a que para ella los fenómenos de la naturaleza corresponden estrictamente con sistemas simples.
2) La sistematización de fenómenos naturales responde a un método mecanicista según el cual es posible formular sistemas simples que son, a su vez, deterministas, ordenados y en equilibrio dinámico, reversibles y lineales.
3) La modelización matemática de sistemas físicos permite la formulación de ecuaciones diferenciales lineales que hacen posible dar una explicación matemática a los sistemas con los que trabaja la física.

Estos tres puntos serán determinantes para mostrar en lo siguientes capítulos los aspectos ontológico y metodológicos de la física de los siglos XIX y XX, la cual se diferencia principalmente en estos tres aspectos.

III. «LA NUEVA FÍSICA» DEL SIGLO XX

Como se ha visto en el capitulo precedente, la física clásica presupone una ontología simple y una metodología mecanicista. Dos aspectos importantes de la ciencia que perduraron durante más de tres siglos. No obstante, como ya habían atisbado Newton y los precursores de la mecánica clásica, las ecuaciones lineales que se derivan de los tres axiomas de esta teoría tienen ciertos límites intrínsecos para lidiar con problemas más elaborados, en los que aparece la interacción entre un gran número de elementos. El primer objetivo de este capitulo será mostrar cómo es que a raíz de una intuición el matemático francés Henri Poincaré remarca la naturaleza de estos límites, estableciendo con esto las condiciones para el desarrollo de lo que se conocerá en el siglo XX como «la nueva física». A partir de esto surgen propuestas metodológicas importantes que permitirán superar dichas limitaciones, permitiendo a los físicos trabajar con otro tipo de sistemas que se denominan no lineales. Así, el segundo objetivo será mostrar las principales características de estos sistemas y mostrar el modo en que se diferencian de aquellos con los que trabajó la física por más de tres siglos. Por último, mostraré de manera general cómo es que a partir de estos sistemas se establece un metodología que presupone una ontología, las cuales se diferencian en ciertos aspectos de la ontología simple que presupone el mecanicismo de la física clásica.

1. REALIMENTACIÓN E INESTABILIDAD. LA ESENCIA DE LA NO LINEALIDAD

La simplicidad de la física clásica está determinada principalmente por dos elementos: la presuposición de una ontología simple y una metodología mecanicista. Ambas relacionadas con una percepción en la que la naturaleza aparece como una gran máquina perfectamente ordenada y estable que responde a principios matemáticos también simples. La simplicidad ontológica y metodológica perduró durante más de tres siglos, mostrando que la mayor parte de los fenómenos naturales podían ser explicados a partir de un conjunto reducido de leyes. Recordemos que a esta simplicidad de los sistemas subyacen ciertas características como lo son la linealidad, el determinismo, la reversibilidad, el equilibrio y una estabilidad constante. Características que pueden surgir en un sistema perfectamente aislado de cualquier factor que no afecte considerablemente su comportamiento. El caso del problema de los dos cuerpos fue muy útil para aclarar este punto. Si tenemos un sistema compuesto por dos cuerpos cuyo movimiento está determinado por una única fuerza, en principio deberíamos poder afirmar que estamos hablando de un sistema ideal que no corresponde con la realidad. Pues si suponemos que estos dos cuerpos son la Tierra y la Luna, de ningún modo podemos afirmar la existencia de una única fuerza que determina su comportamiento, pues claramente están rodeados de planetas que ejercen una influencia gravitatoria externa sobre cada uno de ellos. No obstante, debido a que esta influencia externa es muy débil, la física propone tratar a ambos cuerpos de manera aislada, despreciando toda influencia de baja amplitud. Y fue precisamente gracias a este aislamiento que Newton pudo formular una ley exacta que conocemos como la ley de la gravitación universal, según la cual la fuerza con la que se atraen ambos cuerpos es *proporcional* al producto de sus masas e *inversamente proporcional* al cuadrado de la distancia que los separa. Una ley que llamamos simple porque involucra unicamente una fuerza, la masa de dos cuerpos y la posición de cada uno de estos con respecto a un origen bien definido en el plano de referencia. Ahora, lo que interesa resaltar de esto es que la simplicidad de la ley se aplica a sistemas simples -con muy pocos elementos- y lineales. Con la proporción que se establece en la ley de la gravitación universal estas dos características se hacen aún más evidentes. Por una parte, la linealidad del sistema implica que para un par de masas dadas y la distancia entre dos puntos en el plano de referencia, *siempre* tendremos una fuerza determinada y proporcional al comportamiento de ambos cuerpos. Lo cual quiere decir que para ciertos valores iniciales, *siempre* tendremos un comportamiento periódico bien determinado por la ley y, por tanto, un sistema perfectamente determinista.

Pero ¿qué pasa si agregamos otro cuerpo al sistema? ¿Es posible aislar los tres cuerpos para producir un sistema lineal y determinista? En primera instancia, este sistema de tres cuerpos no puede explicarse con exactitud a partir de la segunda ley de Newton. Sin embargo, con ayuda de ciertas técnicas matemáticas, en el siglo XIX los matemáticos Euler y Lagrange propusieron sistemas lineales y deterministas de tres cuerpos que podían ser descritos de manera *aproximada.* Empero, sus soluciones, aunque lineales y deterministas, no tenían la certeza completa que otorgaba la segunda ley de Newton en el caso de dos cuerpos, esto debido a dichas aproximaciones (Briggs, J., Peat, F., 1991). La inclusión de un tercer cuerpo volvía todo muy complicado, pues la fuerza del tercer cuerpo no resultaba fácil de integrar a las ecuaciones de Newton. Tratar con tres cuerpos resulto un problema que, no obstante, obtuvo soluciones aproximadas a partir de la mecánica clásica con Euler y Lagrange. Pero si esto es complicado debido a que involucra procedimientos muy elaborados para su integración, imaginemos la dificultad para describir las trayectorias de los nueve planetas en el sistema solar. O más aún, para describir las órbitas de *n* número de cuerpos celestes.

Como se comentó en el capitulo anterior, las teorías físicas de los siglos XVIII y XIX fueron influenciadas fuertemente por los *Principios matemáticos de la filosofía natural* de Newton. Un sistema matemático impulsado por un mecanicismo y una ontología simple que lo llevaba a postular todos sus problemas en términos de unas cuantas variables, considerando sistemas con un par de elementos cuya interacción lineal hacía patente un determinismo. Por esta razón, uno de los límites de la física clásica se evidencia cuando formulamos problemas que involucran más de dos variables y más de un par de elementos. Pues definitivamente, tanto la mecánica como sus derivaciones teóricas, que en conjunto forman el cuerpo de la física clásica, son insuficientes para dar un resultado exacto o absoluto a problemas que involucran *n* número de elementos cuando $n > 3$.

Aunque esto fue un límite claro para Newton al declarar que su teoría matemática era incapaz de dar una solución a problemas con *n* número cuerpos[8], la física clásica siempre contó con *aproximaciones,* gracias a las cuales un sistema pudiera conservar su linealidad y determinismo. Por ejemplo, es posible calcular la influencia gravitatoria que un sistema de dos cuerpos [*x*, y] ejerce sobre un tercer cuerpo [z], sumando la influencia del sistema [*x*-*z*] al sistema [*x*, y] en una serie de *aproximaciones* sucesivas[9]. Con esto, los físicos de los siglos XVIII y XIX garantizaban el determinismo, aunque de manera aproximada, a partir del establecimiento de un un sistema lineal que suponían perfectamente estable. Pensaban que estas series de aproximaciones que se veían reflejadas en valores cada vez más pequeños, tarde que temprano los llevarían a la solución correcta, aunque no pudieran asegurar cuándo ni por qué sería esta la correcta (Briggs, J., Peat, F., 1991).

La búsqueda de soluciones aproximadas para problemas que involucraban más de tres elementos era el modo en que la física clásica se aferraba a la idea de que la naturaleza es una máquina simple eternamente ordenada y estable. Sin embargo, en 1889 Henri Poincaré mostró que esto no es del todo cierto. Al trabajar con un sistema compuesto por tres cuerpos cuyas velocidades eran uniformes y constantes en órbitas circulares, pudo mostrar que sin tratar el problema en términos lineales -mediante aproximaciones, la interacción entre las fuerzas producía una especie de *realimentación* que volvía inestables las órbitas de cada uno de los cuerpos, haciendo que la más mínima perturbación gravitatoria pudiera desembocar en un colapso completo del sistema (Bromberg, S., Pérez-Chavela, E., 2014)[10]. Con esto, Poincaré se aventuró a afirmar que el sistema solar era

8 Vease el apartado *El problema de los dos cuerpos* en Newton, I. (1987). *Principios matemáticos de la filosofía natural.* Madrid: Tecnos

9 Para una explicación más detallada sobre el método por aproximación para tratar el problema de tres cuerpos, vease: Briggs, J., Peat, F. D., (1991). *Espejo y reflejo: del caos al orden. Guía ilustrada de la teoría del caos y la ciencia de la totalidad.* Ciudad de México: Gedisa. p. 28

10 Este articulo escrito por Bromberg y Perez-Chavela es sumamente útil para entender la relevancia del aporte de Poincaré. Ya que exponen paso por paso el desarrollo de dicha intuición -lo que ellos llaman «error»-, implementando tanto una terminología técnica como argumentos que no apelan directamente al lenguaje matemático.

completamente inestable y que la más mínima perturbación gravitatoria podía producir un desastre cósmico que lo llevaría a su extinción. Todo esto debido a la irrupción de dicha *realimentación*, la cual expresa el surgimiento de *nuevos valores* que funcionan como *nuevos efectos* para cada periodo del sistema.

Veamos cuáles son las consecuencias de esta realimentación tomando por caso dos circuitos eléctricos[11]. Primero, sea *S un sistema sin realimentación* compuesto por un circuito eléctrico en el que una señal de entrada x_1 se duplica en una señal de salida y_1. De tal forma que para cada valor de x obtendremos otro valor para y. Para describir el comportamiento del sistema en términos cuantitativos durante cinco periodos, bastará con implementar una función lineal compuesta por una variable independiente y otra dependiente. De tal modo que para cada periodo tengamos los siguientes resultados:

$x_1 = 2 \qquad y_1 = 4$

$x_2 = 3 \qquad y_2 = 6$

$x_3 = 4 \qquad y_3 = 8$

$x_4 = 5 \qquad y_4 = 10$

$x_5 = 6 \qquad y_5 = 12$

Ahora bien, sea *T* un *sistema con realimentación* con las mismas características de *S*, con la única diferencia de que la señal de salida «*y*» se *reintroduce* al sistema en conjunto con la señal de entrada «*x*», dando por resultado un *señal total de entrada* «*xy*». De tal modo que si $x_1 = 2$, entonces $y_1 = 4$ y, por tanto, $xy_1 = (3)\ (4)$. Donde 3 representa el nuevo valor de entrada x_2. Luego si $xy_1 = 12$, entonces $y_2 = 24$ y, por tanto, $xy_2 = (4)\ (24)$. Donde 4 representa el nuevo valor de entrada x_3. Luego si $xy_2 = 96$, entonces $y_3 = 192$ y, por tanto, $xy_4 = (5)\ (192)$. Donde 5 representa el nuevo valor de entrada de x_4. Y así sucesivamente. Observemos que para que la realimentación en el sistema sea posible resulta

11 Para la noción de realimentación en circuitos eléctricos véase: Quesada, A. M., *Realimentación y osciladores*. España: FUOC.

necesaria la iteración constante de una operación, la cual en nuestro ejemplo se representa por la reintroducción que es producto de x e y. Algo semejante a una auto-afección constante del sistema. Pues bien, pensemos ahora que entre los tres cuerpos en el problema de Poincaré forman un sólo sistema *T* con realimentación. Esto nos hará ver que la descripción de sus órbitas no será lineal, o mejor dicho, circular y periódica, sino inestable y aperiódica. Pues la ecuación que podría describir esta realimentación es no lineal, es decir, una ecuación que a la larga nos arrojará valores desproporcionales a nuestro valor de entrada. Ya que en el proceso lineal donde no hay realimentación, los valores para la variable dependiente serán 4, 6, 8, 10, 12... Mientras que en el sistema con realimentación, para los mismos valores de entrada tendremos 4, 24, 192, 1920, 23040 ….

Así, la primera consecuencia de la propuesta de Poincaré es que un sistema con realimentación no podrá ser lineal. Observemos nuevamente que en un circuito donde hay realimentación el efecto [2, 3, 4, 5, 6, …] no es proporcional a la causa [4, 24, 192, 1920, 23040, …]. Todo sistema en el que no haya una proporción entre el efecto y la causa se denomina no lineal. En primera instancia, la diferencia básica entre los sistemas lineales y los no lineales es que en el primero no hay una operación iterativa, mientras que en el segundo si la hay. Esta operación iterativa corresponde precisamente a la realimentación que introduce Poincaré en su trabajo de 1889 con respecto al problema de tres cuerpos[12]. Con esto, Poincaré no sólo resaltaría la importancia de la realimentación que se lleva a cabo en un sistema con más de dos elementos, sino que también mostró que el carácter no lineal que adquirían ciertos sistemas producía una completa inestabilidad en el sistema, la cual volvía muy difícil la predicción de sus estados futuros. Esto debido a que la realimentación produce *nuevos valores* que funcionan como *nuevos efectos* para cada periodo del sistema. Razón por la cual no puede conocerse con exactitud cuáles serán esos valores en el futuro y de qué modo afectarán al comportamiento general del sistema. La introducción de la realimentación a un sistema en apariencia

12 Poincaré, H. (1889). Sur le probleme des trois corps et les equations de la dynamique. Disponible en http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.2/241/241_Article.pdf?sequence=7&isAllowed=y

lineal, estable y determinista, lo volvió no lineal, inestable y muy difícil de predecir. Es por esto que la segunda ley de Newton que expresa las relaciones de proporción entre elementos es insuficiente para dar cuenta del problema de los tres cuerpos, pues la realimentación es algo que no había sido considerado en las leyes de la mecánica y, más aún, en las leyes de la física clásica. Ya que la realimentación establece una *no proporción* entre el efecto y la causa, es decir, un carácter no lineal en el sistema. Mientras que las leyes de Newton fueron postuladas para sistemas perfectamente aislados en los que hay una interacción lineal.

La simplicidad de la física clásica estaba estrechamente sustentada por la estabilidad que garantizaba el carácter lineal y determinista de los sistemas. Para dar una solución a sus problemas era suficiente formular modelos simples en los que se tomaran en cuenta unicamente dos variables. Sin embargo, la realimentación, en efecto, añade *algo más* al sistema. Un factor que a la larga produciría inestabilidad en el mismo, la cual hará muy difícil la predicción. En este punto de la historia de la física, el mecanicismo que imperó durante más de tres siglos resultó insuficiente. A partir de la intuición desarrollada por Poincaré, considerar que el todo -un sistema físico- fuera igual a la suma de sus partes se volvía insostenible. Pues la realimentación hacía considerar que en el todo estaba involucrado *algo más* que la suma de sus partes, esto es, algo más que la simple relación proporcional entre efecto y causa. Para estudiar la inestabilidad de estos sistemas no era posible implementar un mecanicismo, ya que esta metodología estaba principalmente dirigida al establecimiento de sistemas eternamente estables y reversibles en el tiempo. Sin embargo, lo que surgió a raíz de esto fue una nueva forma de ver la naturaleza. Ya no como la máquina perfectamente ordenada e inmutable que podía ser completamente descrita en términos matemáticos, sino como un todo que a raíz de una operación iterativa podía desembocar en un estado de inestabilidad, lo cual dificultaba el trabajo de la predicción.

Gracias a esto podemos afirmar que el límite al que se enfrenta el mecanicismo en el siglo XIX es la imposibilidad de lidiar con sistemas compuestos por muchas partes. Tomar en consideración más de tres elementos simultáneamente en un problema dificultaba su solución. Pues la capacidad explicativa y predictiva de las leyes, así como los modelos matemáticos de la física clásica, estaban asegurados por la simplicidad de los sistemas: dos elementos y un par de variables, no más. Si recordamos que la realimentación implica la producción de nuevos valores para cada periodo de tiempo, podemos entender más claramente por qué el mecanicismo es insuficiente para tratar con este tipo de problemas no lineales. Pues, en cierto sentido, los valores que van surgiendo a raíz de la interacción se añaden al comportamiento total del sistema, como en el caso del circuito con realimentación. Con esto, Poincaré estaría mostrando que a partir de un sistema perfectamente determinado – un sistema de tres cuerpos cuyas velocidades son uniformes y constantes en órbitas circulares- es posible observar un estado de inestabilidad que a la larga sera muy difícil de predecir. Lo cual rompe en primera instancia con uno de los fundamentos de la física clásica: el determinismo. Esto debido a que aún si conocemos los valores iniciales del sistema, predecir cada uno de sus estados futuros con precisión se vuelve una tarea difícil y, como veremos a continuación, realmente imposible.

2. EL DESARROLLO DE LA NUEVA FÍSICA

Hemos visto cómo es que el mecanicismo de la física clásica resulta insuficiente para lidiar con problemas que involucran *n* número de elementos. Además de que se ve impedida a explicar con exactitud la interacción mutua entre cada uno de estos -realimentación. Estas limitaciones están dadas por la falta de herramientas metodológicas que no serán desarrolladas propiamente hasta la década de los cincuenta, donde las ideas de Poincaré toman un impulso que daría cuerpo y forma a la física de sistemas caóticos. No obstante, antes de llegar a este punto, debemos hablar brevemente de una herramienta metodológica que será fundamental para la conformación de esta nueva física.

A mediados del siglo XIX surge una teoría importante de la física clásica: la termodinámica. Con ella comienzan a estudiarse las relaciones que la materia tiene con la energía. Gracias a los trabajos de Sadi Carnot en 1824[13] con respecto a la eficiencia energética de máquinas térmicas surge la primera ley de la termodinámica, donde se establece que la energía total de un sistema físico aislado se conserva con el tiempo. Con base en esto, Clausius formula la segunda ley, en la cual se establece que la cantidad de entropía[14] de un sistema físico aislado tiende a incrementarse con el tiempo. El primer problema al que se enfrentó la termodinámica es que era una teoría principalmente fenomenológica, todos sus postulados estaban fundamentados en inducciones empíricas. Esto a la luz de las exigencias rigurosas de la física clásica resulto un problema importante, pues para alcanzar el grado de teoría física, la termodinámica necesitaba un fundamento matemático. Clausius y Joules proporcionaron la base para el desarrollo de dicho fundamento. Pero fue con Ludwig Boltzmann que la termodinámica comenzaría a formar parte de las teorías físico-matemáticas. Su trabajo estuvo enfocado en dar una explicación mecánica de la entropía. Para superar dicha limitación, Boltzmann se valió de una hipótesis que fue severamente cuestionada por sus contemporáneos. Pues, para enlazar la descripción fenomenológica del aumento de entropía con los principios de la mecánica, se vio en la necesidad de aplicar las leyes de la mecánica a *corpúsculos* que hipotéticamente constituían cada uno de los sistemas térmicos. Sin embargo, se enfrentaría con la misma limitación que Newton y Poincaré al trabajar con problemas que involucran *n* cantidad de cuerpos, pues recordemos que estas leyes sólo son aplicables a sistemas simples constituidos por un par de elementos y un par de variables. Debido a que su hipótesis implicaba que los sistemas térmicos estaban constituidos por un elevado número de estos corpúsculos, Boltzmann desarrolló una herramienta que recibió el nombre de

13 Carnot, S. (1987). *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas adecuadas para desarrollar esta potencia y otras notas de carácter científico*. Madrid: Alianza

14 La noción de entropía propuesta por Clausius puede entenderse sencillamente como la propiedad de todo sistema térmico aislado que dice: todo sistema tiende a alcanzar con el tiempo y de manera inevitable un estado de máximo equilibrio térmico.

mecánica estadística. Gracias a esta disciplina fue posible por vez primera predecir propiedades macroscópicas de un sistema formado por una gran cantidad de corpúsculos, a partir de un estudio estadístico de su comportamiento.

No obstante, las tesis de la mecánica estadística fueron sumamente controversiales por dos razones. Primero, el uso de la hipótesis atómica. La física hasta este punto sólo estaba interesada en los fenómenos *reales*, es decir, en los fenómenos macroscópicos que pueden ser observados de manera directa. Los corpúsculos que propuso Boltzmann era de carácter metafísico y no había razones considerables para aceptarla, a pesar de que explicara con cierto grado de precisión las propiedades macroscópicas de los sistemas físicos. Segundo, la noción de probabilidad. La física hasta este momento estaba acostumbrada a resultados concretos y absolutos, productos de la interacción lineal y el determinismo de los sistemas. Sin embargo, con la probabilidad, dos hechos podrían ser igualmente posibles, lo cual irrumpía evidentemente en la lógica binaria de la física clásica donde o es posible conocer con exactitud el comportamiento de un sistema o no es posible en absoluto. Gracias la implementación de la hipótesis atómica y la noción de probabilidad, Boltzmann pudo mostrar que la segunda ley del aumento de la entropía es cierta sólo en un sentido estadístico, más no absoluto (Guzmán y Cervera, 2006). Esto quiere decir que todo sistema físico aislado se dirige *casi siempre* a un estado de equilibrio, pero esto se establece no porque podamos demostrarlo en términos absolutos, sino por el hecho de que este es el estado *más probable* al que cualquier sistema térmico aislado se dirige. Con la introducción de la mecánica estadística, la física tendría que olvidarse de valores absolutos si quería entender el comportamiento de sistemas compuestos por *n* número de cuerpos. Lo cual quiere decir que para este tipo de sistemas en los que interaccionan un gran número de elementos tendría que prescindirse por completo de un resultado único, exacto y absoluto.

Ahora bien, la mecánica estadística fue una herramienta fundamental para la asimilación de las ideas de Poincaré. Pues gracias a esta es posible entender la interacción mutua entre muchos elementos que conforman un sólo sistema físico, que en el caso de Poincaré dicha interacción corresponde con la realimentación. Los resultados más contundentes los encontramos en el año 1954 con la teoría de las turbulencias de Kolmogorov, mejor conocida como KAM (Kolmogorov-Arnold-Moser). Esta teoría es la primera que logra dar una explicación satisfactoria al fenómeno de la turbulencia, mostrando matemáticamente que la modificación repentina en la trayectoria que marca la evolución de un sistema -una linea en el plano de referencia, está determinada por pequeñas perturbaciones. Ahora bien, para entender cómo se relaciona la turbulencia con la realimentación del sistema de Poincaré es preciso mostrar brevemente en qué consiste este fenómeno. Para esto tomemos por ejemplo un recipiente con agua que se pone a hervir. Pues bien, sin trasferencia de calor, el sistema es perfectamente estable, ya que se encuentra en equilibrio térmico. No obstante, a medida que el gradiente de temperatura aumenta, el agua comienza a tener un leve burbujeo. Llegando al punto de ebullición, observamos un fenómeno de convección, es decir, un movimiento ascendente del líquido caliente de la base hacia la superficie y otro movimiento descendente del líquido frio de la superficie a la base del recipiente. El burbujeo que produce la convección en la superficie es un aspecto peculiar de la turbulencia. Ahora, Kolmogorov se percató de que en este fenómeno había un tipo de realimentación, el cual estaba compuesto por vórtices cuya fuerza estaba determinada por otros más pequeños que se encontraban al interior del mismo, las cuales corresponden con la pequeña perturbación en la trayectoria evolutiva del sistema (Briggs, J., Peat, F., 1991). Gracias a la implementación de la estadística, fue posible mostrar por vez primera cómo es que opera matemáticamente la realimentación de Poincaré. Con esto podemos ver de manera simple que los planteamientos de Kolmogorov estaban en gran parte fundamentados en las ideas de Poincaré. Ahora bien, la pregunta importante que salta aquí es ¿por qué las ideas de Poincaré se asimilan con mayor profundidad hasta la década de los cincuentas? Pues bien, además de que en esta década la mecánica estadística de Boltzmann comienza a ser aceptada e implementada por la comunidad científica, fue también que surgieron las primeros computadoras de alta velocidad. Kolmogorov, al igual que otros, comienzan a implementar en su método de investigación el uso de computadoras, tanto para resolver las difíciles ecuaciones no lineales que implicaba el manejo de la realimentación y una gran cantidad de elementos, como para graficar los resultados. Esto no sólo terminaría por romper con la idea de que un enfoque lineal y un método mecanicista sería útil para trabajar con sistemas no lineales mediante aproximaciones, sino que además, esto dio paso a la invención de uno de los conceptos científicos más controversiales del siglo XX: *el caos determinista.*

2.1 LORENZ Y EL CAOS DETERMINISTA

Influenciado por los trabajos de Kolmogorov y Poincaré, el matemático estadounidense Edward Lorenz terminó por completar el cuerpo de la nueva física. En 1963, trabajando con el fenómeno de convección en la atmósfera terrestre, propuso una serie de tres ecuaciones no lineales constituidas por operaciones iterativas, las cuales representan la realimentación de un sistema. Para resolverlas, se sirvió de un ordenador, el cual mostró un conjunto de resultados desproporcionales a los valores que Lorenz había introducido previamente, similares a los que obtuvimos en la realimentación de un circuito eléctrico. Sin embargo, al rehacer los cálculos se pudo percatar de que al alterar minimamente el valor inicial de sus parámetros, se obtendrían resultados completamente diferentes. Con lo cual se percataría de que estos sistemas presentaban una propiedad conocida como sensibilidad a las condiciones iniciales. Veamos cómo es esto posible a partir de un ejemplo menos laborioso, como lo es el mapeo logístico. Un modelo demográfico muy sencillo con el que podemos llegar a conocer el crecimiento de una población. La siguiente ecuación es una formulación posible de este mapeo y plantea que la población de un año duplica a la del año anterior:

$$X_{n+1} = 2X_n$$

Donde X_{n+1} corresponde con la población inicial y $2X_n$ con el doble de la población inicial. Ahora, supongamos que el promedio de la población inicial es un número decimal, por ejemplo, $X_1 = 0.707070$. Así, para cada valor de X_2 -que representa el incremento de la población a lo largo del tiempo- debemos quitar el número entero que precede a los decimales. Así, al iterar por vez primera la ecuación tendremos que si $X_1 = 0.707070$, entonces $X_2 = 1,41414$. Si quitamos el número entero, quedaría $X_2 = 0,41414$. De este modo, si iteramos la ecuación durante diez veces, los resultados serán los siguientes: [0,82828; 0,65656; 0.31312; 0,62624; 0,25248; 0,50496; 0,00992; 0,01984; 0,03968; 0,07936; …]. Los valores que muestra la iteración del modelo representan los diferentes estados del sistema durante un periodo 10. Lo cual estaría evidenciando que este tipo de sistemas no lineales se comportan de manera aperiódica e inestable, debido a que pasan de un estado a otro completamente diferente en cuestión de segundos. Razón por la cual se vuelve muy complicada la predicción de cada uno de sus estados para periodos más largos. Ahora, veamos qué sucedería si en lugar de $X_1 = 0.707070$, cambiamos minimamente el valor, de tal modo que con $X_1 = 0.707170$ obtendríamos los siguientes resultados: [0,41434; 0,82868; 0,65736; 0,31472; 0,62944; 0,25888; 0,51776; 0,03552; 0,07104; …]. Veamos la comparación entre ambos valores y el resultado:

X_1 = 0.707070	X_2 =	X_1 = 0.707170	X_2 =
	0,41414		0,41434;
	0,82828;		0,82868;
	0,65656;		0,65736;
	0.31312;		0,31472;
	0,62624;		0,62944;
	0,25248;		0,25888;
	0,50496;		0,51776;
	0,00992;		0,03552;
	0,01984;		0,07104;
	0,03968;		0,14208;
	0,07936;		0,28416
	0,15872;		0,56832

Lo que muestran estos resultados es que un modelo no lineal en el que se ve implicada una operación iterativa, es sumamente sensible a las condiciones iniciales. Lo cual quiere decir que aún si hay un cambio decimal en los parámetros del modelo, tendremos resultados completamente distintos después de determinado tiempo. Los resultados de arriba muestran que no hay una gran diferencia en las primeros valores, pero a partir del octavo periodo, la diferencia comienza a ser considerable. Llegando al duodécimo periodo, el resultado es completamente diferente. Lo que Lorenz pudo mostrar con esto fue que no sólo su serie de tres ecuaciones no lineales presentaban una gran *sensibilidad a las condiciones iniciales,* sino que en realidad la esencia de todo sistema no lineal que presentara algún tipo de realimentación en su proceso desembocaría en un estado de inestabilidad y caos. Gracias a esto, Lorenz pudo aclarar el hecho de que la realimentación de un sistema conduce al caos[15].

15 Este ejemplo está inspirado en la explicación que Briggs y Peat elaboran en Briggs, J., Peat, F. D., (1991). *Espejo y reflejo: del caos al orden. Guía ilustrada de la teoría del caos y la ciencia de la totalidad.* Ciudad de México: Gedisa.

Veamos que se está jugando algo muy importante en este punto. Lo que Poincaré, Kolmogorov y Lorenz están estudiando son sistemas no lineales que involucran una realimentación y una gran cantidad de elementos, ya sea la convección que produce un tornado o la turbulencia que se presenta en el agua cuando está en su punto de ebullición. Estos sistemas muestran un comportamiento *aparentemente* desordenado y azaroso que es muy difícil de predecir. Sin embargo, debido a la implementación de computadoras y la estadística, fue posible formular y resolver modelos matemáticos útiles para describir estos fenómenos *aparentemente* desordenados, gracias a los cuales lo *aparente desordenado* se vuelve *ordenado* según principios lógicos y matemáticos. Estamos en el cruce de los dos elementos metodológicos de la física: la sistematización y la modelización. Por una parte, gracias a la sistematización los fenómenos de la naturaleza aparecen de un modo caótico, desordenado, azaroso y muy elaborado debido a que estos involucran una realimentación. Y por otra parte, gracias a la modelización matemática de dichos sistemas observamos que ese comportamiento *sensible* responde a una cosa completamente determinada, como lo son las ecuaciones de Lorenz.

A menudo la palabra caos suele relacionarse con el desorden o la desorganización aparente de ciertos sistemas físicos, pero esto es una aseveración falsa. Lo que estaríamos mostrando con este *cruce* entre lo aparentemente desordenado y lo completamente determinado, es que el caos tal y como se aplica en los años posteriores a los trabajos de Lorenz, es un concepto matemático. Lo cual lleva a decir, en primera instancia, que el caos no implican necesariamente un completo desorden. Pues es cierto que estos sistemas, a los que convendría llamar en este caso no lineales, son inestables y muy poco predecibles. No obstante, la mayoría de estos se encuentran regidos por principios matemáticos, lo cual quiere decir que hay ciertas reglas inherentes al sistema que determinan su comportamiento. Y es debido a esto que el caos matemático se postula como *caos determinista.*

El aporte principal del trabajo de Lorenz consistió en mostrar que la realimentación de un sistema conduce al caos. No obstante, esto debe tomarse con sumo cuidado, pues recordemos que la realimentación es esencial al carácter no lineal de los sistemas. Lo cual podría llevarnos a afirmar que la no linealidad conduce necesariamente al caos, lo cual es otra aseveración falsa. Lorenz mostró que su sistema de ecuaciones, completamente determinista, *podía* producir un comportamiento extraño ligado de manera casi intrínseca a la inestabilidad del sistema; pero *unicamente* para ciertos valores asignados a los tres parámetros de su sistema. Esta idea se ilustra con la noción de *atractor extraño* (Fig. 1), el cual expresa que dados los valores estadísticos para cada parámetro, el sistema comenzaría a oscilar irregularmente -en un estado de inestabilidad, pero siempre sobre una región determinada en el espacio fase:

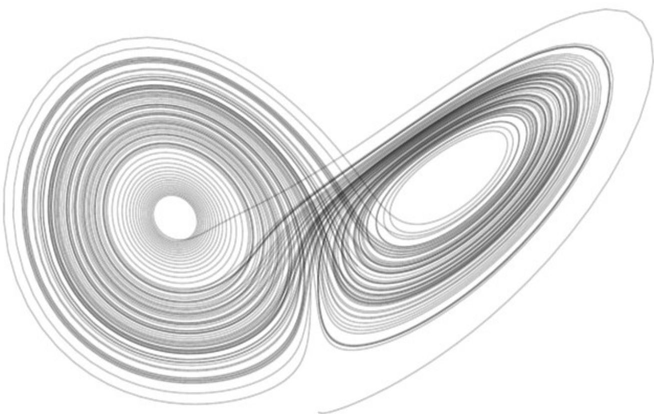

Figura 1. El atractor de extraño de Lorenz formado a partir de los valores r =28, σ =10 y b=8/3.

Esta gráfica se obtiene cuando asignamos valores determinados a los parámetros r = 28, σ = 10 y b = 8/3 (Strogatz, 1994, 317). Los cuales se extraen del famoso modelo de tres ecuaciones propuesto por Lorenz:

$$\dot{x} = \sigma (y - x) \qquad (1)$$

$$\dot{y} = rx - y - xz \qquad (2)$$

$$\dot{z} = xy - bz \qquad (3)$$

σ, r y b son los parámetros de los que hablé anteriormente. La realimentación del sistema -su no linealidad- está dada unicamente por los términos *xz* y *xy* en las ecuaciones (2) y (3) respectivamente. Además, debe recalcarse que hay una importante simetría, lo cual quiere decir que es un sistema reversible en el tiempo. Pues si intercambiamos (x, y) por (-x, -y), el modelo se mantiene igual (Strogatz, 1994, 311). En este sentido, el sistema de Lorenz mantiene una relación importante con las ecuaciones de la física clásica, pues a pesar de que manifieste un comportamiento inestable y caótico, es posible observar el mismo comportamiento para valores negativos. Volveremos a esto más adelante. Sin embargo, cuando el parámetro b=99.96, el sistema exhibe órbitas periódicas, esto es, un estado de estabilidad[16]. Con esto estaríamos mostrando en primera instancia que la no linealidad del sistema no lleva necesariamente al caos, sino que para ciertos valores, el sistema puede manifestar un comportamiento completamente periódico y estable. Además de que para otros valores [r = 28, σ = 10 y b = 8/3] se produce un estado de inestabilidad que, no obstante, da paso a la formación de una estructura ordenada que se conoce como atractor extraño. Así, un mismo sistema, como lo puede ser la atmósfera terrestre o el sistema solar, no es necesariamente caótico por su no linealidad. Sólo cuando el sistema adquiere determinados valores es como puede llegar a caer en un estado de inestabilidad. Un estado que, además, da paso a la formación de un comportamiento ordenado.

2.2 ORDEN DENTRO DEL CAOS. ESTRUCTURAS DISIPATIVAS, CAOS DETERMINISTA Y FENÓMENOS CRÍTICOS

Si desviamos un poco la mirada de la propuesta de Lorenz y dirigimos nuestra atención a la termodinámica del siglo XX, nos encontraremos con la misma conclusión de que un sistema muestra un comportamiento caótico ordenado en un

16 Para esto remito al lector a la siguiente fuente: Strogatz, S. H. (1994). *Nonlinear dynamics and chaos.* New York: Perseus Books. pp. 311 – 335. Donde podrá encontrar un análisis formal minucioso de las tres ecuaciones de Lorenz. Además de sus propiedades y sus consecuencias en la teoría de la dinámica no lineal.

punto determinado. En 1967 Ilya Prigogine introduce el término de estructuras disipativas, con el cual intentaría definir la formación de estructuras coherentes que son resultado de una auto-organización cuando un sistema está alejado del equilibrio térmico. El ejemplo más utilizado para ilustrar la aparición de estas estructuras es la convección de Bénard, el cual consiste en lo siguiente. Tomemos por caso un sistema térmico abierto -que comparte materia y energía con el entorno- constituido por una capa horizontal de fluido, la cual está delimitada por una superficie superior y otra inferior. Ahora, todo sistema se encuentra en estado de equilibrio térmico cuando no hay intercambio de calor o de energía entre este y su entorno. En este caso, el líquido está en estado de equilibrio térmico cuando iguala las condiciones de su entorno, pues es un sistema abierto. Al calentar la superficie inferior paulatinamente, las moléculas del líquido comenzarán a moverse de un lado a otro cada vez más rápido, produciendo un movimiento de convección. Lo cual implica que nuestro sistema presenta ahora un intercambio energético con el entorno y, por tanto, pasa a un estado de desequilibrio térmico. Bénard se percató de que en cierto punto de desequilibrio térmico, al cual llamaremos P_1, la interacción colectiva de las moléculas del líquido daban paso a la formación de estructuras hexagonales. No obstante, pudo percatarse también de que estas desaparecían casi al mismo tiempo que se volvían visibles debido a un cambio en las condiciones del entorno. Cuando intentó restablecer las condiciones, Bénard obtuvo un resultado parcialmente diferente, pues ahora las estructuras presentaban una estructura cuadrangular[17]. El mérito de Prigogine con respecto a este tipo de fenómenos fue haber mostrado que la intermitencia de las estructuras estaba dada por una extrema sensibilidad a las condiciones del entorno. Pues explicó que al llegar al punto P_1, en el sistema aparece un bifurcación. Lo cual quiere decir que llegado a dicho punto, las estructuras que se forman en la superficie superior *pueden* tomar una u otra forma, según una amplia gama de posibilidades (García, M., Fairen, V. 1980). Por otra parte, la elección de la forma es una cuestión de

17 Para una explicación técnica y detallada sobre la convección de Bénard, véase Maza, D. M. (1995). *Transición al caos en convección de Bénard-Marangoni con pequeña relación de aspecto.* Pamplona: Universidad de Navarra.

grados. Estas estructuras reciben el adjetivo «disipativo» porque la interacción entre el sistema y su entorno está marcada por un proceso de absorción y otro de disipación. El primero consiste en absorber los factores necesarios -ya sea energía o materia- para que el sistema se mantenga en el estado de desequilibrio P_1. El proceso de disipación consiste básicamente en eliminar ciertos factores que permiten que el sistema no sobrepase las condiciones del mismo estado. Por esta razón, según la cantidad de absorción y la cantidad de disipación, será como el sistema mismo podrá *elegir* entre una u otra forma. La relevancia teórica del descubrimiento de Prigogine se encuentra precisamente en el hecho de afirmar que el sistema puede elegir, pues estas estructuras son producto de una auto-organización que sólo se lleva a cabo en un estado de desequilibrio térmico (Prigogine, I. 1983). Así, con el concepto de estructura disipativa, Prigogine estaría expresando que la relación entre estructura ordenada y disipación aplicada a sistemas fuera de equilibrio, evidencia que el desorden se vuelve una fuente importante para dar paso al orden (García, M., Fairen, V. 1980).

Hasta aquí tenemos similitudes muy marcadas entre el caos determinista y las estructuras disipativas. Primero, ambos aparecen en sistemas compuestos por una gran cantidad de elementos, ya sea la gran cantidad de corpúsculos en la atmósfera terrestre o en un líquido. Segundo, la fuerte interacción entre estos da paso a una realimentación, propiedad característica de los sistemas no lineales. Tercero, para poder explicar la interacción entre los muchos elementos que componen el sistema es necesario recurrir a cálculos estadísticos, por lo cual es imposible prever con exactitud los estados futuros de un sistema. Pues cuando acontece el caos, surge una fuerte realimentación al interior del sistema, lo cual hace pasar al sistema de un estado a otro de manera rápida debido a la interacción no lineal que se lleva a cabo entre los muchos elementos que lo componen. Es por esta razón que el físico no puede prever con exactitud si dentro de una semana habrá sol o lluvia en la ciudad, o si la estructura que aparecerá en un líquido en desequilibrio térmico será un hexágono, un cuadrado o alguna otra forma. Luego, por razón de la interacción no lineal entre los elementos del sistema, este se vuelve extremadamente sensible a las condiciones de su entorno. Lo cual quiere decir que si alteramos minimamente algún parámetro, entonces obtendremos resultados completamente distintos. Y por último, la no linealidad del sistema garantiza en cierta medida la inestabilidad, pero no es una condición necesaria para la formación de un caos ordenado -atractor extraño o estructura disipativa. Pues a pesar de su interacción no lineal, el sistema puede presentar estabilidad: ciertos valores para los parámetros del sistema de Lorenz, o la regresión paulatina al estado de equilibrio cuando dejamos de suministrar calor a un líquido. En ambos casos, el orden está determinado por un estado inestable del sistema, sin embargo, la formación de estructuras disipativas y del atractor extraño sólo se hacen patentes en cierto punto, al cual se le denomina comúnmente *punto crítico*. Además, es justo en este punto donde resulta imposible la predicción exacta del comportamiento que presenta un sistema no lineal. Pues el sistema se vuelve completamente inestable, pasando de un estado a otro en cuestión de segundos. No obstante, hemos visto que tanto en el caos determinista como en las estructuras disipativas la inestabilidad del sistema es una fuente principal de orden: el atractor extraño en el caso de Lorenz y la auto-organización de las estructuras disipativas.

La inestabilidad y el estado de caos es una característica general de los sistemas no lineales. Y al considerar que la no linealidad no implica necesariamente la aparición del orden, podremos decir que dicho comportamiento ordenado se halla en el sistema *potencialmente*, es decir, a la espera de recibir ciertos valores que lo posicionan en un estado de criticalidad. Lo que me interesa mostrar con todo esto es cómo a raíz de este punto crítico, los sistemas inestables e indeterminados pueden llegar a un punto intermedio entre el orden y el caos. Es decir, a un estado donde la interacción no lineal entre la gran cantidad de elementos que componen un sistema produce un comportamiento ordenado. Esto puede observarse tanto en el caos determinista como en las estructuras disipativas. Recordemos que el caos es un concepto que define la inestabilidad de un sistema a partir de su carácter no lineal, determinado por un conjunto de tres ecuaciones. Ahora, el concepto de caos puede aplicarse de manera coloquial a fenómenos turbulentos o muy desordenados, tales como el burbujeo del agua cuando está en su punto de ebullición, una tormenta eléctrica o un tornado. Sin embargo, el concepto que he desarrollado a lo largo de estas páginas es de índole matemático y estaría expresando la inestabilidad para ciertos sistemas no lineales, la cual, a su vez, está determinada precisamente por una ecuación matemática. A este caos se le denomina *caos determinista* y es unicamente bajo este concepto que podríamos hablar de un orden dentro del caos. Pues precisamente es gracias a una ecuación no lineal -el modelo de Lorenz- que un sistema muestra un comportamiento ordenado que está condicionado por su estado de inestabilidad. Debido a esto, el caos y la aparición del orden queda *determinado* por la ecuación sin que esto implique que podamos *determinar* con exactitud cualquier estado futuro del sistema, tal como pretendía el determinismo de la física clásica. Pues hemos visto que para este tipo de sistemas que involucran *n* número de elementos, su inestabilidad no puede ser explicada con exactitud debido a la fuerte interacción no lineal entre sus elementos. Por otra parte, también he mostrado que en el caso de los sistemas físicos fuera del equilibrio se forman estructuras coherentes y auto-organizadas que son producto de la inestabilidad del sistema. Donde el caos interno del sistema que se manifiesta por la interación no lineal entre sus miles de elementos es una condición para el orden.

Si nos extendemos aún más por el campo de la física del siglo XX, podemos encontrar ejemplos similares, como es el caso de un *fenómeno crítico* que se manifiesta en un líquido. Sabemos que el punto de ebullición del agua depende principalmente de dos factores: la temperatura y la presión. A una presión atmosférica al nivel del mar, el punto de ebullición del agua se establece en 100° C. Lo cual quiere decir que para estos dos valores, el agua experimenta un cambio de fase, de líquido a gas. En estas condiciones podemos diferenciar claramente el estado líquido y gaseoso por la diferencia de densidad. No obstante, si aumentamos la presión de tal modo que sea necesaria una temperatura de 374° C para llegar al punto de ebullición, será imposible diferenciar el líquido del vapor debido a que en este punto -llamado punto crítico- se iguala la densidad de ambos. El comportamiento del sistema en dicho punto crítico se conoce como fenómeno crítico y fue estudiado sin mucho éxito por la física del siglo XIX[18]. Durante este periodo no fue posible establecer una ecuación matemática para dicho fenómeno debido a que conlleva un comportamiento en extremo caótico, producto de la interacción no lineal entre las miles de partículas que componen el líquido. No fue sino hasta 1971 que el matemático Kenneth Wilson pudo dar una explicación matemática de este fenómeno, valiéndose de una técnica matemática que se conoce como grupo de renormalización[19]. Gracias a esto pudo mostrar que un sistema que alcanza un estado de completo desorden e inestabilidad en cierto punto, obedece a reglas muy simples. Lo cual quiere decir que algo que a primera vista parece muy elaborado y desordenado responde a principios matemáticos bien conocidos por el físico. Ahora, lo que me interesa rescatar de esto son dos cosas. Primero, que el comportamiento inestable y desordenado del sistema obedece a reglas muy simples. Las cuales quedarían expresadas en primera instancia mediante el grupo de renormalización. Y segundo, que este tipo de fenómenos acontece unicamente para ciertos valores en los parámetros del sistema -temperatura y presión, donde la relación entre el fenómeno crítico observable y la función que los explican en términos matemáticos recaen sobre el concepto de *punto crítico.*

3. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS NO LINEALES

Las ecuaciones de Lorenz, la aparición de estructuras disipativas en sistemas alejados del equilibrio y el fenómeno crítico son solo algunos ejemplos. La física del siglo XX, que a menudo recibe el título de «la nueva física», centra su estudio

18 Para una explicación detallada del fenómeno crítico vease: Alastair, B., Wallace, D. (1990). Critical point phenomena: universal physics at large lenght scales. En Davies, P. (editor). *The new Physics*. New York: Cambridge University Press.

19 Wilson aborda las particularidades del grupo de renormalización en diferentes escritos. Recomiendo consutar para esto dos de ellos: Wilson, K. (1974). *The renormalization group and the ε expansion*. Amsterdam: North-Holland Publishing Company. Y Wilson, K. (1982). *The renormalization group and critical phenomena.* New York: Cornell University.

en problemas para nada simples que involucran sistemas con una gran cantidad de elementos, en los cuales puede llegar a acontecer un comportamiento ordenado fuertemente ligado a un estado de inestabilidad cuando se alcanzan ciertos valores en los parámetros, esto es, cuando el sistema se encuentra en un punto crítico. Por esta razón, tanto el atractor extraño como la estructura disipativa y el fenómeno crítico son comportamientos claramente condicionados por la criticalidad. Ahora, no resulta gratuito el interés de la física por estudiar este tipo de sistemas, pues a raíz del desarrollo de técnicas matemáticas como la estadística, el grupo de renormalización y la implementación de la computadora fue posible mostrar que el caos y la indeterminación obedece a principios matemáticos bastante simples. Además de que en este punto de la historia de la física, el caos aparecía como una propiedad *universal* de los sistemas físicos. Esta idea fue producto de una apelación intrínseca a la idea de que todos los sistemas que llevan en su descripción la aparición de un punto crítico exhiben similaridades bastante marcadas (Bruce y Wallace, 1990).

La primera similaridad que podemos mencionar es la gran cantidad de elementos que componen el sistema, los cuales están principalmente determinados por una interacción no lineal. Donde «interacción no lineal entre elementos» refiere a un proceso de *realimentación* en el cual un sistema produce *nuevos valores* para cada periodo de tiempo. Es por esta razón que dicha interacción desemboca en un *estado* inestable y caótico que marca la posibilidad de un *comportamiento* ordenado. En el caso de las estructuras disipativas, la interacción no lineal entre los elementos de un sistema surge de manera *visible* cuando el sistema está fuera del equilibrio térmico, lo cual produce un comportamiento ordenado que se observa en las estructuras hexagonales para el caso de la convección de Bénard. En el caos determinista de Lorenz la inestabilidad es consecuencia de las dos *no linealidades* que componen el modelo[20]. No obstante, es también por esto que se produce un comportamiento ordenado denominado *atractor extraño.* Así, la siguiente

20 Para esto remito al lector a la p. 69 del presente escrito , donde mencione algunas de las propiedades de las tres ecuaciones de Lorenz.

propiedad sería que el comportamiento ordenado está ligado a la inestabilidad del sistema, la cual es producto de la interacción no lineal entre una gran cantidad de elementos. No obstante, esta interacción queda *determinada* por un conjunto de ecuaciones matemáticas, las cuales expresan en cierto modo que el comportamiento ordenado del sistema -que es producto de la inestabilidad- no está determinado *necesariamente* por dicha interacción no lineal, sino que está condicionado principalmente por la criticalidad. De esta forma, la interacción no lineal quedaría como una *condición suficiente* para el comportamiento ordenado de los sistemas, mientras que la criticalidad se establece como *condición necesaria* para el mismo caso. Esto se debe a que la noción de criticalidad como concepto matemático presupone la no linealidad del sistema, es decir, la aparición de un posible *estado* de inestabilidad. Pero el caso contrario no se da de manera necesaria, pues hemos visto que las ecuaciones no lineales de Lorenz no presuponen necesariamente la criticalidad por el hecho de que, para ciertos, valores el modelo exhibe un *estado* periódico y estable. En este sentido, la noción de criticalidad englobaría un *comportamiento ordenado ligado al estado de inestabilidad del sistema.*

Por otra parte, los sistemas no lineales son extremadamente sensibles a las condiciones iniciales. En el caso de las estructuras disipativas y el fenómeno crítico esto se evidencia con el hecho de que un cambio mínimo en los parámetros del sistema es suficiente para que desaparezca la auto-organización. Mientras que en el mapeo logístico y el modelo de Lorenz dicha sensibilidad refiere a algo muy similar, a saber, que el menor cambio en las condiciones iniciales trae por consecuencia un comportamiento completamente diferente. Además, la extrema sensibilidad a las condiciones iniciales expresa también el hecho de que *a largo plazo* la predicción de un sistema no lineal se vuelve imposible. Esto se debe a que entre cada periodo de tiempo, el sistema puede pasar de un estado a otro completamente diferente en cuestión de segundos. Tal como lo muestran los casos que tratamos previamente. Resumamos, pues, las características compartidas de estos sistemas en los siguientes puntos:

1) Estos sistemas están compuestos por una gran cantidad de elementos.
2) Son sistemas no lineales en tanto involucran una realimentación, según la cual el sistema puede producir *valores nuevos* para cada periodo de tiempo y, por tanto, conducirlo a un estado de inestabilidad.
3) Son sistemas extremadamente sensibles a las condiciones iniciales.
4) Estos sistemas manifiestan un comportamiento ordenado, el cual es producto de someter al sistema a condiciones críticas.

4. LA RELACIÓN ENTRE SISTEMAS LINEALES Y SISTEMAS NO LINEALES

Con esto podemos percatarnos de que cada una de estas características se oponen a puntos bien específicos de la física clásica. En primera instancia tenemos la cantidad de elementos involucrados en los sistemas. Como vimos anteriormente, este fue el primer límite que evidenció Poincaré con respecto a la simplicidad de la física clásica. Mostrando que para tratar con problemas que involucran *n* número de elementos, las leyes y, por consecuencia, las ecuaciones de la mecánica newtoniana resultan insuficientes para darles una solución. Aunado esto con las limitaciones que experimentó en un primer momento la termodinámica de Carnot y Clausius, Boltzmann desarrolló la herramienta importante para lidiar con ambas limitaciones. Por una parte, la estadística fue capaz de explicar la interacción de *n* número de elementos involucrados en un sistema. Y por otra, gracias a esta herramienta es posible explicar en términos de la mecánica el segundo principio de la termodinámica. Esto último, aunque no fue un trabajo completamente exitoso por parte Boltzmann, sirvió de base para las investigaciones posteriores. Así, debido a los trabajos de Poincaré y Boltzmann, la simplicidad de la física clásica recibe el primer ataque por el lado del determinismo. Pues la realimentación en el sistema de tres cuerpos tratado por Poincaré evidencia en primera instancia la imposibilidad para predecir con exactitud cada uno de sus estados futuros. Mientras que la mecánica estadística permite predecir los estados de un sistema no lineal, pero ya no en términos absolutos, sino en términos de probabilidades.

Así, la intuición de Poincaré en el campo de la mecánica celeste -realimentación- y la mecánica estadística son los principales responsables de la física del siglo XX, en la cual vemos un auge en el estudio de sistemas no lineales. En este sentido la nueva física se opone también a su antecesora, pues ya no se estudian unicamente sistemas lineales y deterministas en los que resulta posible determinar con exactitud el pasado y futuro del sistema, debido a que existía una clara relación de proporcionalidad entre efecto y causa. Sino también sistemas en los que resulta imposible la predicción debido a la extrema sensibilidad a las condiciones iniciales, la cual está determinada por el carácter no lineal de los mismos. Ahora, la causa que provoca la no linealidad será precisamente la inestabilidad. Otro punto en el que se diferencia de la física clásica. Pues recordemos que a causa de la linealidad teníamos por consecuencia sistema periódicos, estables y reversibles en el tiempo. Por otra parte, la cuestión de la irreversibilidad en contraste con la reversibilidad de los sistemas simples es un punto controversial. Pues a pesar de que el segundo principio de la termodinámica plantea la idea de sistemas irreversibles y que el estudio de estructuras disipativas, así como de manera general el estudio de sistemas abiertos que se encuentran lejos del equilibrio térmico, lleven a considerar *la flecha del tiempo*[21], seguimos encontrando en la física del siglo XX sistemas reversibles, tales como el que se deriva del modelo de Lorenz o el fenómeno crítico. Con respecto a ello no podemos postular una diferencia tan marcada como lo es en el caso de las contraposiciones linealidad-no linealidad, determinismo-indeterminismo, absolutos-probabilidades.

21 Este es un concepto que se utiliza a menudo para referir a una consecuencia importante de la entropía, a saber, el hecho de que la evolución de un sistema térmico se dirige necesaria e inevitablemente hacia un estado de máximo equilibrio. Es decir, que la evolución de todo sistema avanza en una sola dirección. De tal forma que el sentido inverso en este caso sería falso. Por ejemplo, es muy común la idea de tomar por caso la evolución del universo. Cuando en pleno siglo XIX Clauius establece esta ley, comienzan a hacerse especulaciones de que el universo, en tanto sistema térmico aislado, se acerca paulatinamente a un estado de máximo equilibrio, en el cual absolutamente todo lo que lo conforma quedaría estático y estable. Gracias a la flecha del tiempo que establece la ley de la entropía, fue posible pensar en una «muerte del universo». Un universo sin movimiento y sin cambio que ha alcanzado su nivel de equilibrio máximo, el estado final, por decirlo así, para lo cual no hay *marcha atrás*.

Dicho esto, me gustaría pasar ahora a las similitudes que nos permitirán evaluar de manera integral la «novedad» de la física del siglo XX. En primer lugar, todas las teorías físicas del siglo XX, permanecen arraigadas a un pensamiento reduccionista, según el cual es posible explicar un gran número de sistemas físicos a partir de un par de leyes. Pues la estadística persiste en la aplicación de las tres leyes del movimiento newtoniano, así como la termodinámica del no equilibrio persiste en los principios fundamentales de la termodinámica decimonónica. Sin embargo, hay una distinción importante en este punto, y es precisamente que la implementación de las nociones de átomo y probabilidad, así como el uso de la computadora en la investigación científica, permitieron expandir la aplicación de dichas leyes a sistemas con *n* número de elementos. Esta es una característica notoria de la novedad en la física del siglo XX, especialmente en cuestiones metodológicas. Pues es también gracias a esto que los sistemas dejan de ser simples, mostrando de manera definitiva los límites de la metodología mecanicista. Dicho límites se vuelven claros por los conceptos de no linealidad, indeterminación, inestabilidad e irreversibilidad. Ahora bien, una consecuencia importante de esto es que la simplicidad de la metodología mecanicista que se representa por el famoso enunciado «el todo es igual a la suma de sus partes» es remplazado por el enunciado «el todo *es más* que la suma de sus partes». Esto precisamente por el hecho de que la realimentación que determina la no linealidad de los sistemas, expresa la aparición de *nuevos valores* para cada periodo de tiempo. Lo cual está representado, a su vez, por el carácter iterativo de las ecuaciones no lineales que mostramos tanto en el mapeo logístico como en el circuito eléctrico realimentativo. Estos *nuevos valores* se agregan a la totalidad del sistema, dando por resultado un todo en el que las *posibles* relaciones entre los elementos son también elementos del sistema. Por esta razón, el proceder de la física del siglo XX estará basada principalmente en una *metodología holista,* la cual permite la formulación de sistemas no lineales, no deterministas[22], inestables e irreversibles.

Por otra parte, hay una simplicidad intrínseca en estos sistemas no lineales que a primera vista son muy elaborados. Pues a pesar de que estén constituidos por un elevado número de elementos y de que su interacción en un punto crítico desencadene un comportamiento ordenado ligado a un estado de inestabilidad, los modelos que se aplican para describirlos en términos matemáticos están compuestos por muy pocas variables. El caso del modelo de Lorenz resulta muy ilustrativo. Además, si atendemos al grupo de renormalización de Wilson que permite explicar el fenómeno crítico, la teoría KAM de la turbulencia, los modelos de Prigogine para las estructuras disipativas o el mapeo logístico, encontraremos ecuaciones matemáticas simples que describen este tipo de comportamientos aparentemente muy elaborados. La diferencia que podríamos marcar en este punto a nivel formal es que las ecuaciones simples de la física del siglo XX tienen un componente iterativo que representa la realimentación del sistema, la cual da por resultado los valores desproporcionales que vimos en los ejemplos anteriores. Mientras que en las ecuaciones simples lineales siempre encontramos una proporción entre efecto y causa, como en el caso de la segunda ley de Newton. Así, aunque hay una gran similitud en cuanto al uso de ecuaciones simples tanto en la física clásica como en la del siglo XX, hay diferencias importantes. Pues además, los problemas que surgen a finales del siglo XIX permiten marcar un limite muy claro a la linealización de sistemas, ya que a raíz de estos se evidencia la imposibilidad de dar solución a problemas que involucran *n* número de cuerpos, amén de que resulta insuficiente para explicar la realimentación de un sistema.

22 Es menester hacer una reiteración en este punto. Pues parece haber una contradicción en la argumentación, ya que anteriormente hablamos de un sistema no lineal que es determinista, a saber, el caos determinista de Lorenz. Sin embargo, recordemos que este es determinista en tanto el comportamiento inestable está *determinado* por un conjunto de tres ecuaciones no lineales. Pero hay una connotación distinta del determinismo que he venido a trabajando desde el capitulo anterior, a saber, aquella que dice que conociendo el valor inicial del sistema es posible conocer con exactitud cada uno de sus estados pasados y futuros. Algo que no sucede con el caos determinista, ya que al ser no lineal, también es sumamente sensible a las condiciones iniciales. Una propiedad que a la larga vuelve realmente imposible conocer con exactitud el estado futuro del sistema. Es en este sentido que los sistemas no lineales son no deterministas.

Ahora, la razón por la que toma una gran importancia el uso de ecuaciones no lineales durante el siglo XX es que se desarrollan nuevas herramientas teóricas y tecnológicas para dar una solución satisfactoria a este tipo de problemas. La computadora, el grupo de renormalización y el estudio cuantitativo de ecuaciones diferenciales propuesta por Poincaré son solo algunos ejemplos. Amén de la estadística de Boltzmann que hizo posible la solución de problemas que involucraban un gran número de elementos ínter-relacionados.

Otro aspecto relacionado con la simplicidad de los modelos de la física del siglo XX es la estadística. Ya que en tanto herramienta hace posible *reducir* el gran número de interrelaciones a estados promedio del sistema, lo cual permite la construcción de ecuaciones muy simples. Para ilustrar esto, supongamos que queremos saber cómo varía la cantidad de habitantes durante cinco años, tomando en cuenta cuántos nacen y cuántos mueren durante este tiempo. A primera vista esto parece un problema muy complicado debido a que nuestra variable «cantidad de habitantes» implica *n* número de elementos, además de que se involucra un factor de variabilidad con respecto al nacimiento y la muerte de los mismos. Sin embargo, gracias a la estadística es posible reducir nuestra variable a un solo valor promedio y nuestro factor de variabilidad a una función. De esta forma es posible construir un modelo matemático sencillo que nos permita dar una solución al problema. Para esto contamos con una ecuación muy sencilla que lleva el nombre de *Mapeo logístico:*

$$x_{n+1} = rx_n\,(1 - x_n)$$

Donde x_n es la razón entre la población inicial y el máximo de población total que puede ser representada con valores entre 0 y 1. Mientras que la otra variable r representa en nuestro caso la diferencia entre la tasa de natalidad y la tasa de mortalidad. De esta forma podemos estudiar la variación de población a lo largo de 5, 12 o 17 años, por ejemplo, tomando en cuenta cuántas personas nacen y cuantas mueren. Con esto se estaría mostrando cómo es que la estadística es una herramienta importante para la física del siglo XX, la cual permite explicar de manera muy simple un fenómeno bastante complicado a partir de cierta *reducción*, gracias a la cual una gran cantidad de elementos queda representado por un valor promedio. Algo que encontramos también en las ecuaciones de Lorenz.

Ahora bien, la primera y segunda propiedades de los sistemas no lineales muestran que la física del siglo XX trabaja con sistemas compuestos por una gran cantidad de elementos, donde las interacciones no lineales entre los mismos quedan marcadas como elementos que se suman al sistema. En este sentido, los sistemas no lineales se oponen a la simplicidad de los sistemas lineales, los cuales están compuestos unicamente por un par de elementos. Esto permite afirmar que los sistemas no lineales son, por oposición a los lineales, más compuestos, muy elaborados o complicados. Mostrando así una clara oposición entre simple y *complicado*. Esta oposición se vuelve aún más clara con la tercera propiedad de la extrema sensibilidad a las condiciones iniciales. Pues es debido a esta que la predicción de los estados futuros del sistema se vuelve poco probable y en muchos casos imposible. Esto resulta una clara oposición por el hecho de que los sistemas simples de la física clásica son lineales y deterministas, propiedades que permiten conocer con exactitud no sólo el pasado, sino el futuro de los estados de un sistema. La característica de los sistemas no lineales que quedaría por contrastar es la de que estos manifiestan un comportamiento ordenado, el cual es producto de someter al sistema a condiciones críticas. Este es un punto muy sutil y sumamente importante, el cual considero clave para entender la novedad de la física del siglo XX.

Cuando hablamos de la aparición de orden en sistemas físicos, nos referimos en primera instancia a la aparición de un comportamiento perfectamente organizado. Por ejemplo, los sistemas lineales de la física clásica aparecen con un orden muy especial, debido a la idea de que todos y cada uno de los fenómenos de la naturaleza responde a principios matemáticos. Además de que pueden representarse sencillamente a partir de la geometría euclidiana. En este sentido, la noción de orden en la física clásica estaría determinada por el carácter matemático de los principios que rigen determinado comportamiento y por la geometría que, en esencia, presupone formas perfectamente organizadas -planos de referencia, lineas, puntos, etc. Sin embargo, el orden de estos sistemas simples esta estrechamente condicionado por una estabilidad constante. Esto se manifiesta en un comportamiento invariable en el tiempo para sistemas ideales -como en el caso del oscilador armónico simple- y un comportamiento periódico variable, pero determinable con exactitud, para sistemas físicos -como el péndulo físico donde se consideran factores no ideales como la fricción del aire. Por otra parte, lo que acontece con la implementación de la propiedad de realimentación en los sistemas físicos es un tipo de orden distinto al que se establece en la física clásica. Pues a raíz de las herramientas matemáticas y tecnológicas, amen de los trabajos teóricos de un conjunto distinguido de físicos en los siglos XIX y XX, será posible entender que dentro de la naturaleza existe un orden que proviene de la inestabilidad, lo cual se conoce en física como el orden dentro del caos. Recordemos que el modelo de Lorenz muestra que la realimentación produce la inestabilidad de un sistema físico, la atmósfera terrestre en este caso. Y cuando se somete este fenómeno inestable a una explicación en términos matemáticos, tenemos por resultado que hay un cierto orden en dicho comportamiento caótico aparente -el atractor extraño. En este sentido, las matemáticas siguen tomando un papel muy importante en la determinación de lo que es o no ordenado. La diferencia en este punto con respecto al orden de la física clásica radica en el hecho de que el orden dentro del caos que se estudia en el siglo XX está condicionado por ciertos valores en los parámetros del modelo, condición que se conoce como criticalidad.

Con todo esto podemos plantear ahora la diferencia de esta cuarta característica con respecto al carácter simple de la física. Recordemos que el orden de los sistemas simples de la física clásica está condicionado por una estabilidad que, a su vez, está determinada por su carácter lineal, a saber, el hecho de que existe una relación de proporción entre efecto y causa. Pensar en orden fuera de estos términos en la época de Newton sería imposible, pues estaríamos hablando de algo completamente distinto para esta concepción: desorden, inestabilidad. La concepción mecanicista de los siglos XVII, XVIII y XIX atribuía el desorden y lo inestable a un desconocimiento o ignorancia de los factores que determinan el *funcionamiento real* de un sistema físico. Ya que para ellos la naturaleza era una gran máquina simple y ordenada, cuyo funcionamiento dependía de principios matemáticos que podían ser claramente conocidos. Sin embargo, con base en los desarrollos teóricos y metodológicos del siglo XX, fue posible aclarar que el desorden y la inestabilidad de un sistema no es producto del desconocimiento de *cómo funciona en realidad la naturaleza.* Sino que la creencia en que el desorden estaba dado por la ignorancia se debía a una ontología simple, la cual hacía pensar en la naturaleza como algo completamente ordenado y estable. Poincaré fue el primero en cuestionar esta ontología y su metodología mecanicista, mostrando que las limitaciones de la mecánica newtoniana para lidiar con problemas que involucran *n* número de cuerpos son producto del enfoque estrictamente simple y lineal que la caracteriza. No será sino hasta la década de los cincuentas que esta perspectiva *holista*, en la que el todo es más que la suma de sus partes, desarrollará con propiedad una ontología distinta, un modo distinto de concebir la naturaleza. Donde a partir de la implementación de la estadística y la computadora para el manejo de ecuaciones no lineales se hará evidente que el orden de la naturaleza no es producto necesario de su perfección estable, sino producto de una amplia gama de factores relacionados con su comportamiento esencialmente inestable. Es por esta razón que el acontecimiento de la criticalidad en sistemas físicos da paso a una ontología y una metodología distinta. Primero, una metodología holista gracias a la cual es posible la explicación matemática de sistemas no lineales compuestos por una gran cantidad de elementos, donde las interacciones no lineales entre los mismos -realimentación- son, a su vez, elementos del sistema. Una metodología que se distingue de la mecanicista por la implementación de la computadora y la introducción de probabilidad principalmente. Segundo, una ontología en la que la naturaleza no aparece tan simple como una máquina perfectamente estable y ordenada. Sino una ontología donde la naturaleza es inestable y complicada pero que, no obstante, *en algún punto* muestra un comportamiento perfectamente organizado. Es por esto que dicha ontología puede recibir el nombre de *ontología de la criticalidad.* Un concepto útil para expresar que en el siglo XX se sigue pensando en una naturaleza ordenada, con la diferencia de que este orden está condicionado por la inestabilidad que produce el carácter no lineal de los sistemas que se estudian.

5. CONCLUSIÓN

He mostrado cómo a partir de una intuición desarrollada por el matemático francés Henri Poincaré y el desarrollo de la mecánica estadística por parte de Boltzmann, surge un nuevo modo de estudiar la naturaleza que se caracteriza principalmente por un enfoque no lineal. A raíz de esto, la física del siglo XX otorga una gran importancia al uso de sistemas no lineales, los cuales pueden definirse como aquellos sistemas compuestos por un elevado número de elementos que interaccionan de manera no lineal, generando a partir de esto una realimentación que lleva al sistema a un estado de inestabilidad. Debido a esto, y a que son sistemas extremadamente sensibles a las condiciones iniciales, la predicción de sus estados futuros sólo es posible en términos estadísticos. Estas propiedades permiten que en *algún punto* los sistemas exhiban un comportamiento ordenado ligado a un estado de inestabilidad. Ahora, fue a partir de estas cuatro características que mostramos el modo en qué la física del siglo XX se diferencia de la física clásica. Primero, hay un cambio metodológico marcado principalmente por la implementación de la computadora y la noción de probabilidad, lo cual hace posible el establecimiento de una metodología holista en la que «el todo es más que la suma de sus partes». Con base en esto, los sistemas no lineales que explican la inestabilidad muestran que la naturaleza no es necesariamente ordenada, sino caótica y desordenada. No obstante, la aplicación del lenguaje matemático para explicar esta propiedad da por resultado que, de hecho, la naturaleza sigue portando un orden muy especial, un orden que surge del caos. Razón por la cual la ontología de la nueva física es esencialmente *crítica,* es decir, una ontología que remarca que el orden de la naturaleza está estrechamente ligada a su *propiedad esencial* que es la inestabilidad.

Esta ontología de la criticalidad y su metodología holista desarrolladas en el ámbito de la física serán determinantes para la constitución de una *nuevo modo de hacer ciencia* que surge en la segunda mitad del siglo XX y que se relaciona comúnmente con el título de c*iencias de la complejidad.* Un conjunto de ciencias que, a pesar de que se alimentan de muchos de los conceptos de la nueva física, se opone fuertemente a la idea de que sólo sea posible entender la naturaleza en términos de la física matemática.

IV. CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD: ASPECTOS ONTOLÓGICO Y METODOLÓGICO DE LOS SISTEMAS COMPLEJOS EN LA FÍSICA DEL SIGLO XX

En el capitulo anterior se ha explicado cómo a raíz de una intuición sobre la esencial inestabilidad de la naturaleza, se desarrolló un conjunto de herramientas matemáticas y tecnológicas para entender que el desorden de un sistema físico no es producto de nuestra incapacidad para entender con claridad los principios matemáticos que lo determinan. Sino que el desorden y la inestabilidad son, en realidad, propiedades intrínsecas de la naturaleza. Una naturaleza que a los ojos del siglo XX sigue teniendo un orden muy claro, pero que se observa unicamente cuando aplicamos ecuaciones matemáticas. Sin embargo, este es un orden que se diferencia grandemente del orden que mantenían los sistemas durante el periodo de la física clásica, ya que no provine de la linealidad y estabilidad de los sistemas, sino de una interacción no lineal y una realimentación que conducen al sistema a una estado de completa inestabilidad. Así, el aspecto ontológico importante para la nueva física será la criticalidad, es decir, el hecho de que para ciertos valores en los parámetros de un sistema es posible llegar a observar un comportamiento ordenado, el cual está ligado de manera necesaria a un estado de completa inestabilidad. Los casos que tomamos para ilustrar este aspecto fueron el «orden dentro del caos» del atractor extraño de Lorenz, la auto-organización de las estructuras disipativas que se produce en un estado fuera de equilibrio térmico y el fenómeno crítico.

Ahora bien, los conceptos de «orden dentro del caos», auto-organización, criticalidad y no linealidad que desarrollamos con respecto a sistemas físicos no lineales, serán utilizados en la segunda mitad del siglo XX para constituir el cuerpo de un modo de hacer ciencia que se conoce como *ciencias de la complejidad*. Un conjunto de ciencias que, en principio, se oponen al reduccionismo de la física, pero que en realidad se nutre de muchas otros aspectos. Para mostrar con claridad esta «absorción y disipación» entre teorías científicas, el primer objetivo será exponer las ideas filosóficas que nutren el trabajo de estas ciencias que estudian lo complejo. El segundo objetivo será esbozar las posibles respuestas a la pregunta ¿qué es la complejidad? En primera instancia veremos que, en tanto concepto científico[23] no hay una definición única de complejidad, ya que estamos hablando de un conjunto de ciencias interdisciplinarias, en el que cada una hace un uso propio y muy especifico de dicho término. Por último, a partir de la clarificación de los dos primeros objetivos, será posible ver que la física del siglo XX camina por la misma senda que las ciencias de la complejidad. De este modo, si es que ambas estudian lo mismo, aunque de modos distintos, debemos suponer que hay una similitud que permita explicar qué podría significar «complejidad» en el ámbito de la física. Esta similitud es la criticalidad, la cual, como veremos, se enlaza de manera casi directa con uno de los conceptos fundamentales de la complejidad: la emergencia o propiedades emergentes. Concluiremos que la complejidad, *como concepto filosófico*, refiere en primera instancia a un conjunto de propiedades de los *sistemas complejos*. Y segundo, el hecho de que en estos existe un relación muy estrecha entre el orden y el caos. Relación que representa el punto medio donde se estudia lo complejo de la naturaleza.

1. CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD

Aunque en pleno siglo XXI las ciencias de la complejidad tengan una popularidad considerablemente alta en muchos ámbitos académicos como la economía, la sociología, la química, la física o la filosofía, en realidad no representan nada

23 La noción de «concepto científico», así como la de «concepto filosófico» será muy importante para entender la conclusión de todo mi trabajo. Como se ha visto en el capitulo II, una teoría física está compuesta por un conjunto de leyes, un conjunto de conceptos definidos como *cantidades* y un conjunto de modelos matemáticos. Así, cuando hable de concepto científico, me estaré refiriendo a un concepto que está definido a partir de un conjunto de operaciones matemáticas, lo cual da por resultado una cantidad. Por otra parte, un concepto filosófico en este contexto será todo aquel que se define a partir de una metodología especifica y una ontología. Por ejemplo, para definir el concepto de «nueva física» en el capitulo anterior como aquella física que trabaja con sistemas físicos no lineales, puntos críticos, probabilidades, etc., fue necesario entender qué metodología y qué presuposición ontológica funcionan como sustrato de este nuevo modo de hacer ciencia. Lo cual permitió definir este concepto en términos filosóficos.

nuevo. La complejidad comienza a ser objeto de estudio para institutos de investigación en diversas universidades a partir de la segunda mitad del siglo XX. En 1978 se inaugura el Centro de Estudios para la Dinámica No-lineal en el instituto de La Jolla, donde se estudian principalmente sistemas de ecuaciones provenientes de la física-matemática como el caos determinista de E. Lorenz y las ideas de I. Prigogine con respecto a sistemas fuera de equilibrio térmico. Años después, en 1984, se funda el famoso Instituto Santa Fe, donde las investigaciones concernientes a la complejidad adoptan una postura estrictamente interdisciplinaria. En México se encuentra el Departamento de Sistemas Complejos (1990), el cual se restringe al ámbito de la física, y el recién edificado Instituto C3 (2008) que le sigue los pasos al Santa Fe en muchos aspectos. No obstante, en cada uno de estos institutos se tienen ideas distintas de lo que son las ciencias de la complejidad. Para Melanie Mitchell, divulgadora e investigadora del Instituto Santa Fe, las ciencias de la complejidad no representan una teoría unificada, sino un conjunto de teorías que tienen como objetivo estudiar el comportamiento de «sistemas complejos» desde un punto de vista interdisciplinario (Mitchell, 2009). Por otra parte, para Rafael Pérez y Pascual, investigador del Departamento de Sistemas Complejos de la UNAM, «ciencias de la complejidad» es un término ambiguo que refiere a un conjunto de teorías, las cuales, desde diversas metodologías, estudian el comportamiento de sistemas complejos. Otra postura es la de Rolando García, para quien no hay ciencias de la complejidad como tal, sino teoría de sistemas complejos (García, 2006).

Esto nos pone ante una situación difícil: no sabemos con exactitud qué son las ciencias de la complejidad y, sin embargo, en nuestros días hay una infinidad de artículos e investigaciones científicas que giran en torno a esto. A lo mucho podríamos estar seguros de que en ciencias de la complejidad se trabaja con sistemas complejos, pero ¿qué es esto? ¿Cuáles son las teorías involucradas y cuál su metodología? ¿Es un solo molde metodológico o varios? Hay muchas preguntas que podemos plantear al paradigma científico de la complejidad y, al parecer, pocas respuestas satisfactorias. Es por esta razón que una aclaración resulta necesaria. Para poder dilucidar este punto, primero debemos entender qué son los sistemas complejos, objeto de estudio de estas ciencias. Luego, mostrar qué teorías científicas están involucradas en el estudio de estos para entender qué tipo de metodología se aplican en cada caso y cómo. Una vez hecho esto, se espera tener una concepción mucho más clara de lo que son estas ciencias que estudian lo complejo.

1.1. EL OBJETO DE ESTUDIO: SISTEMAS COMPLEJOS

El objeto de estudio de las ciencias de la complejidad son los sistemas complejos. En *Complexity: a guided tour*, Waldrop (2009) ofrece varios ejemplos: colonias de hormigas, el cerebro humano, una sociedad o el mercado de valores. Desde esta postura, lo que hace que estos sistemas sean complejos son las propiedades de emergencia, la emisión y procesamiento de información y la adaptación al entorno. Veamos en qué consisten estas propiedades:

a) Comportamiento emergente

Los sistemas complejos se caracterizan por poseer un gran número de elementos individuales ínter-relacionados. La idea que subyace a la interrelación de elementos individuales es que cualquier elemento dentro del sistema juega un papel determinista doble: es determinado por los demás elementos y determina, a su vez, a los demás. Esto implica que no hay un elemento especial que tenga el control central del comportamiento total del sistema. Además, estas interrelaciones están marcadas por un principio matemático simple de carácter no lineal. El cual dicta que esta interacción produce en los sistemas un estado constante de *inestabilidad.* Sin embargo, es a partir de esta inestabilidad producida por las interacciones internas que en el sistema *emerge* un comportamiento colectivo y auto-organizado.

Esto es para Melanie Mitchel la emergencia, a saber, el comportamiento colectivo y auto-organizado que muestra un sistema cuando está en un estado de desequilibrio. El cual, además, está determinado por principios matemáticos simples. Pongamos un ejemplo. Una colonia de hormigas es un sistema compuesto por una gran cantidad de elementos ínter-relacionados a partir de una comunicación basada en hormonas. Cuando somos niños, es usual que al encontrarnos frente a un hormiguero queramos alterar de cierta forma el sistema para observar cómo se comporta. Si arrojamos un poco de agua al hormiguero, observaremos que en principio el comportamiento de las hormigas es completamente desordenado. Pero después de un tiempo podremos percatarnos de que a raíz de ese estimulo, las hormigas comenzarán a actuar colectivamente para dar una solución al problema. Dándonos por resultado la sensación de que estas tiene la capacidad de organizarse. Esta cualidad del sistema no sólo permite dar una solución al problema producido por la malicia de un niño, sino que también gracias a esto las hormigas pueden llevar a cabo las tareas de recolección de alimentos, la reproducción o la construcción de un hormiguero. Tareas que sólo pueden llevarse a cabo por un trabajo en equipo. La emergencia en este caso también estaría representando el hecho que una hormiga reina solitaria llegue a vivir alrededor de tres días, mientras que viviendo en comunidad su vida puede llegar a alcanzar los quince años.

Así, lo que se llama emergencia o comportamiento emergente es resultado de la interacción entre una gran cantidad de elementos. La cual no está determinada por un control central, sino por la relación entre cada uno de estos. Esta propiedad está fuertemente ligada a la capacidad que un sistema tiene para organizarse. Lo cual implica que la emergencia también está determinada por un comportamiento colectivo, donde cada elemento del sistema es parte esencial del proceso.

b) La emisión y procesamiento de información

Todos estos sistemas producen y reciben información con respecto al entorno que les rodea. De aquí se extrae una de las propiedades más importantes de los sistemas complejos según Melanie Mitchell: su capacidad para interactuar no sólo internamente, sino exteriormente. Es por esta propiedad que los sistemas complejos también suelen recibir el nombre de sistemas abiertos, pues, a diferencia de los sistemas tratados en física clásica donde se estudian bajo una perspectiva claramente cerrada, aquí se toma en consideración tanto las características del entorno en el que se desarrollan como la influencia que este ejerce sobre el sistema. Y no sólo eso, pues tales sistemas tiene la capacidad de emitir señales de información, lo cual quiere decir que pueden transformar el entorno mismo.

c) Adaptación al entorno

Al tener la capacidad de procesar y registrar información proveniente del exterior, los sistemas complejos también tienen la capacidad de adaptarse, ya sea mediante la transformación de su entorno, el aprendizaje o la evolución. Esta característica es común a todos los sistemas complejos, tales como la colonia de hormigas, la sociedad o el cerebro humano. Pues en principio, observamos que cada uno de estos tiende a realizar acciones que le permitan habitar el entorno que les rodea.

Es a partir de estas características comunes que Melanie Mitchell propone la siguiente definición de sistema complejo:

> «a system in which large newtworks of components with no central control and simple rules of operation give rise to complex collective behavior, sophisticated information processing, and adaptation via learning or evolution» (Mitchell, 2009, 13).

La diferencia más notoria que podríamos marcar con respecto a los sistemas de la física del siglo XX no es en un sentido formal. Ya que los sistemas físicos no lineales con los que trabaja están compuestos por un número elevado de elementos que no necesitan precisamente de un control central para que acontezca un comportamiento auto-organizado -como en el caso del atractor extraño o las estructuras disipativas. Además de que estos también son sistemas abiertos que intercambian energía y materia, lo cual es necesario para dicha auto-organización. La diferencia primordial en este caso podría ser el tipo de fenómenos con los que trata cada una de estas perspectivas. Por el lado de la complejidad, los ejemplos de sistemas complejos refieren a comunidades de hormigas, el cerebro humano y mercados financieros. Mientras que la física se centra en sistemas físicos no lineales, como lo son todos aquellos donde se toma en consideración unicamente la relación entre materia y energía: la atmósfera terrestre, la convección y fenómeno crítico que se lleva a cabo en un líquido o el movimiento de los planetas. Sin embargo, esto no debería llevarnos a concluir de inmediato que están tratando con cosas completamente distintas. Por el hecho de que tanto en una comunidad de hormigas como en el cerebro humano podríamos encontrar intercambios de materia y energía con la acepción que la física da a estos términos. Razón por la cual, la conclusión para este punto tendría que ser la siguiente afirmación provisional: la diferencia entre sistemas físicos no lineales y sistemas complejos se encuentra principalmente en la diferencia del referente[24]. Mantengamos en mente esta conclusión y veamos lo que otros dicen sobre las propiedades de los sistemas complejos.

En *A new kind of science,* Stephen Wolfram parece estar completamente de acuerdo con el hecho de que al comportamiento emergente de distintos sistemas

24 En física, así como en en ciencias de la complejidad, se utilizan dos herramientas fundamentales para estudiar un fenómeno natural. 1) Un sistema y 2) modelos o ecuaciones matemáticas. En este sentido, el sistema *refiere* a un fenómeno natural: una colonia de hormigas, la atmósfera terrestre, etc. Los cuales se estudian con modelos - el mapeo logístico o el modelo tridimensional de Lorenz. Por eso hay una diferencia de referente. Pues mientras los sistemas complejos refieren a cierto tipo de fenómenos: colonias de hormigas, sociedades humanas, el cerebro, etc; los sistemas físicos no lineales refieren a cosas un tanto distintas, pero de ninguna forma a lo mismo. Esto se verá más claro en el transcurrir de la exposición.

subyacen reglas simples. Desde su punto de vista un sistema complejo es un programa computacional determinado por ciertas reglas operacionales denominado *simple program*. Sus experimentos consisten en sincronizar distintos *simple programs* para evaluar sus comportamientos a lo largo del tiempo. Para tal propósito, elabora cada uno de estos con un conjunto de reglas simples que al ser ejecutadas comienzan a interactuar entre ellas. Un ejemplo que sirve para ilustrar esto es el *autómata celular*. Este es una idealización matemática que consiste en un enrejado compuesto por varias celdas del mismo tamaño, donde cada rejilla representa un conjunto finito de valores. Algo muy similar al tablero cuadriculado de ajedrez. Ahora, dichos valores cambian en función de un pequeño conjunto de reglas muy simples, las cuales, para cada periodo de tiempo, alteran el valor de cada celda -o conjunto de valores- de acuerdo a los valores de las celdas circundantes. Es decir, la evolución de cada celda *por separado* está determinado, a su vez, por cada una de las celdas vecinas, y estas, a su vez, por sus vecinas y así sucesivamente (Wolfram, 1983). Ahora, queremos saber cómo se comportará un enrejado compuesto por un conjunto finito de celdas. Para ilustrar esto, primero debemos asignar a cada celda un valor de manera completamente arbitraria, el cual puede ser 0 o 1. Para representar de manera gŕafica estos valores, diremos que el valor 0 estará representado por una celda negra y el valor 1 con una celda blanca. Por último, asignemos una regla que determine su ínter-acción. Para nuestro caso, será la siguiente:

$$a_i^{(t+1)} = a_{i-1}^{(t)} + a_{i+1}^{(t)} \qquad (1)$$

Al hacer operar nuestro enrejado a partir de dicha regla, observaremos cómo paulatinamente las celdas van formando un tipo de estructura, en la cual podemos ver una clara organización (Fig. 1)[25].

25 La ilustración ha sido tomada de Wolfram, S. (1983). *Cellular automata*. Los Alamos Science, Vol. 9, p. 5. La traducción y modificación del texto explicativo ha sido hecho por mi.

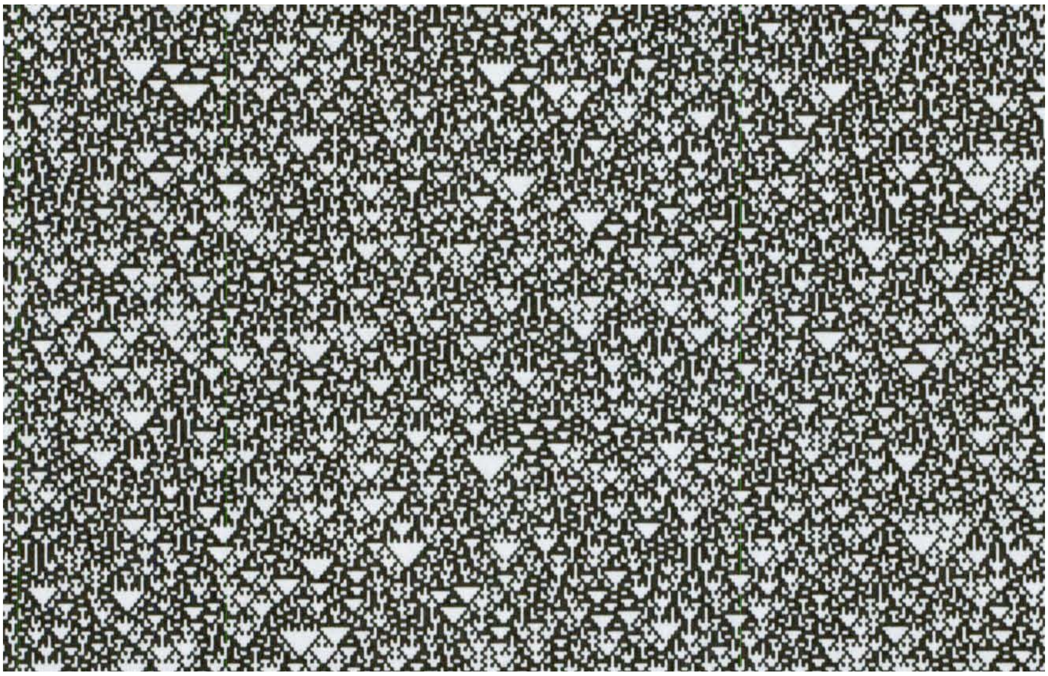

Figura 1. Evolución del autómata celular definido por la ecuación (1), a partir de un estado inicial aleatorio donde cada celda toma el valor 0 o 1 con idénticas e independientes probabilidades. Esto muestra cómo es que a pesar de que el autómata celular parte de un estado inicial aleatorio puede llegar a producir una estructura simple y ordenada.

Lo que observó Wolfram a partir de estos experimentos fue que a pesar de que una amplia gama de programas contengan tan solo un conjunto reducido de reglas simples, el resultado puede desencadenar comportamientos aparentemente aleatorios, desorganizados o muy elaborados debido a la interacción entre las reglas que conforman el sistema. Esto le permite concluir que a los sistemas complejos, aquellos que muestran un comportamiento aparentemente aleatorio y desordenado o muy elaborado, subyacen reglas simples. Según Wolfram, la relación entre el carácter simple de las reglas y el comportamiento complejo de los sistemas muestra que «the phenomenon of complexity is quite universal» (Wolfram, 1959, 298). Lo cual equivaldría a decir que todo comportamiento complejo de un sistema puede ser explicado a partir de reglas simples. Y más aún, «[…] not only across simple programs, but also to systems in nature» (Wolfram, *Ibid*). Más adelante en su investigación, Wolfram muestra que con un par de reglas podemos explicar el crecimiento de cristales y plantas, despreciando la totalidad de sus componentes reduciéndolos a valores aproximados con ayuda de la estadística.

Las conclusiones de Wolfram apoyan hasta cierto punto la postura de Melanie Mitchell con respecto a la simplicidad de las reglas que determinan el comportamiento de un sistema complejo, pues para el autor de *A new kind of science* dicho comportamiento no es necesariamente complejo por poseer un alto número de elementos ínter-relacionados. Lo que le da el carácter de complejo es la relación entre la aleatoriedad, el desorden o lo muy elaborado del sistema y un conjunto reducido de reglas simples que determinan este comportamiento. Mientras que para Melanie Mitchell el carácter de lo complejo proviene de las interrelaciones que se efectúan entre los muchos componentes individuales de un sistema, el cual no obedece a un control central y que, además, está regido por leyes relativamente simples.

Por lo tanto, vemos que entre estos dos autores hay discrepancia en cuanto a la caracterización de la complejidad. Por una parte, Melanie dice que es producto de las interrelaciones que acaecen entre los muchos elementos individuales del sistema -principalmente gracias al comportamiento colectivo o emergente que esto produce. Mientras que Wolfram muestra que la complejidad está determinada por la relación entre el comportamiento aparentemente aleatorio, desordenado o muy elaborado y la simplicidad de las reglas que lo producen. Wolfram evidencia que es posible despreciar el alto número de elementos individuales cuando se *formula* el sistema complejo. Por lo que parece en este caso que la propiedad de tener un alto número de elementos no resulta esencial en la caracterización de este tipo de sistemas. La discrepancia aquí aparece nuevamente por el referente. Lo cual nos lleva a plantear la siguiente pregunta ¿un sistema complejo es el fenómeno compuesto por muchos elementos en el que acontece un comportamiento emergente o un sistema formal que se elabora a raíz de dicho fenómeno? Waldrop plantea que el comportamiento emergente está determinado por reglas muy simples, lo cual equivale a afirmar que, en cierto sentido, el comportamiento emergente está en estrecha relación con los principios matemáticos que lo describen. De este modo, si la propiedad de emergencia define lo que es un sistema complejo, entonces podríamos decir que Mitchell estaría de acuerdo con el hecho de este es un sistema en el cual se reducen los muchos elementos que componen al objeto empírico -los individuos de una sociedad, la infinidad de conexiones en el sistema nervioso- a un conjunto reducido de variables que dan por resultado una ecuación bastante sencilla. Por esta razón, cuando en ciencias de la complejidad se estudia la variación de habitantes en una comunidad en función del nacimiento y la muerte de los mismos, se aplica el modelo que conocemos como mapeo logístico. El cual *representa* un comportamiento específico de dicho fenómeno observable. De acuerdo con esto, podemos afirmar que, en efecto, un sistema complejo es la representación de un fenómeno observable, el cual se caracteriza por una gran cantidad de elementos ínter-relacionados que dan paso a un comportamiento emergente. Un comportamiento que, no obstante, también puede ser *representado* por un modelo matemático muy sencillo. Con esto, estamos marcando la distinción entre el objeto de estudio y la herramienta con la que se estudia, a saber, la diferencia entre el fenómeno natural y el sistema complejo que representa su comportamiento. Esto resulta una distinción importante, pues en muchos casos la noción de sistema complejo refiere a un modelo matemático sencillo. Al grado en que, por ejemplo, se diga del mapeo logístico que es un sistema complejo, siendo que este es un modelo matemático sencillo que *representa* el comportamiento determinado de un gran número de elementos. Por esta razón, cuando Wolfram afirma que podemos prescindir de los miles de elementos involucrados en la cristalización o en el crecimiento de una planta, está pensando unicamente en que dicho comportamiento complejo puede ser descrito con leyes muy simples. Una conclusión que él sustenta, además, en su experimentación con los *simple programs:* sistemas complejos en tanto a partir de leyes muy sencillas producen un comportamiento complejo.

Así, podemos ver que existe un acuerdo muy claro entre ambos, a saber, que el comportamiento complejo de un sistema es producto de reglas simples. Además, he mostrado que el referente de la noción de sistema complejo es, en efecto, un comportamiento determinado de un fenómeno observable. El cual se diferencia del sistema que lo representa y del modelo que es útil para explicar en términos matemáticos su comportamiento. Hasta este punto no hay una gran diferencia entre el trabajo de las ciencia de la complejidad y el trabajo de la física. Pues desde la perspectiva de la complejidad, los sistemas compuestos por *n* número de cuerpos en los que acontece un comportamiento colectivo y auto-organizado, son representados y estudiados a partir de ecuaciones matemáticas muy simples. Las cuales son de carácter no lineal. Reitero, la única diferencia entre sistemas físicos no lineales y sistemas complejos hasta este momento sigue siendo el referente.

Otra concepción mucho más radical es la de Peter Grassberger, para quien la naturaleza es esencialmente compleja. En *Randomness, information and complexity*, Grassberger (2012) refiere la noción de sistema complejo a las conexiones neuronales o al fenómeno de la transición vítrea. Las características comunes más importantes de estos son las siguientes:

a) Estos sistemas están compuestos por estructuras, las cuales corresponden a las interrelaciones que se dan entre los muchos elementos que lo constituyen. Para Grassberger un recipiente con gas no es más complejo que el cerebro humano por poseer un mayor número de moléculas que las neuronas del sistema nervioso central. Es cierto que tales sistemas usualmente están compuestos por un alto número de elementos, pero, como observa el autor, esto no tendría que ser una propiedad esencial de los sistemas. Ya que hay ejemplos, como el *cellular automata,* que evidencian un alto grado de complejidad a partir de la interacción entre pocos elementos. Por tanto, lo importante no es que tengan un número elevado de elementos, sino el hecho de que exista entre ellos fuertes interrelaciones que determinen el comportamiento total del sistema. Las cuales quedan representadas como estructuras.

b) Un mismo sistema complejo contiene más de una estructura cuando se estudia a diferentes escalas. Las escalas más comunes son la macroscópica, mesoscópica y microscópica. Por ejemplo, el tejido muscular tiene ciertas propiedades macroscópicas como la contracción o la elasticidad, las cuales dependen de la interacción entre las miles de células que lo componen. Pero al observar el mismo tejido a una escala microscópica, aparece un comportamiento distinto donde dichas células no sólo interactúan entre sí para formar el tejido, sino que muestran otro tipo de procesos como la reproducción o la transducción. Todos los procesos involucrados, tanto a nivel macroscópico como microscópico, representan las diferentes escalas que puede tener un sistema complejo. Tales procesos ocurren simultáneamente gracias a su ínter-conexión, lo cual produce lo que llamamos comportamiento complejo. A la propiedad de estar compuesto por varias estructuras Grassberger le llama jerarquía, y se considera muy a menudo como fuente principal de la complejidad.

c) Más importante aún que las ínter-relaciones del sistema es la estrecha relación entre este y el entorno que le rodea. Con esto Grassberger no está pensando unicamente la relación sistema-ambiente, es decir, la relación entre el sistema complejo mismo y el entorno donde se desenvuelve; sino también la relación entre los elementos individuales y las diversas estructuras que los componen. Esta propiedad representa para el autor la otra fuente principal de la complejidad: la retroalimentación, la cual puede surgir a partir de las dos relaciones antes mencionadas.

La caracterización de Grassberger nos lleva a afirmar que lo realmente esencial de un sistema complejo no es que tenga un elevado número de elementos, sino la existencia de interrelaciones entre estos. Además, dichos elementos no son solamente individuos (las hormigas de una colonia o las neuronas del sistema nervioso), sino también estructuras. Y es a partir de la interacción de estos elementos que surgen las dos fuentes principales de lo complejo: la existencia de jerarquías y la retroalimentación. Lo cual quiere decir que si un sistema posee jerarquías y muestra un proceso de retroalimentación, esto bastará para considerarlo complejo.

Ahora bien, cuando el autor afirma que el elevado número de elementos no es una propiedad esencial de los sistemas complejos, tenemos el mismo problema con el referente. Cuando afirma esto, Grassberger está pensando en los *simple programs* de Wolfram, más precisamente en el *autómata celular (*Fig. 1). Un sistema que en primera instancia no representa de manera directa un fenómeno natural, sino un *sistema ideal* que es resultado de la experimentación con cierto conjunto de reglas lógicas. Ahora, es cierto que este sistema simple evidencia un *alto grado de complejidad* a partir de un conjunto reducido de reglas. Donde *grado de complejidad* refiere al hecho de que el sistema procesa una gran cantidad de información debido a la retroalimentación que se lleva a cabo entre las celdas que componen el enrejado. Esta característica del autómata celular permitiría en principio denominarlo sistema complejo de acuerdo a los criterios del autor. Sin embargo, afirmar que esto es un sistema complejo equivaldría a decir que modelos ideales como el mapeo logístico o el modelo de Lorenz son sistemas complejos. Pues dichos modelos están compuestos por pocos elementos -variables estadísticas- y reglas bastante simples que se representan por las funciones de la ecuación matemática. Además, en el capitulo anterior se ha explicado que debido a la gran cantidad de datos o información que manejan dichas ecuaciones -la cual se reduce a un valor estadístico- se necesita la implementación de la computadora, ya que, en efecto, estas ecuaciones también estarían evidenciando un alto grado de complejidad por la mismas razones que el ejemplo que propone Grassberger. Por lo tanto, afirmar que el autómata celular es un sistema complejo equivale a decir que una ecuación matemática es un sistema de este tipo. Lo cual, como hemos visto, sería un error. Pues estaríamos confundiendo el objeto de estudio y la herramienta que se utiliza para explicarlo. El problema que encuentro en la postura de Grassberger es que no se percata de que el autómata celular, a diferencia de las conexiones neuronales o el fenómeno de la transición vítrea, juega un papel doble desde su conformación, a saber, como objeto y herramienta de si mismo. Ya que su comportamiento está ligado a las reglas mismas que lo explican. Pero en ciencias de la complejidad se elaboran modelos matemáticos simples para explicar sistemas complejos. Los cuales están compuestos por una gran cantidad de elementos ínter-relacionados. Por esta razón, las propuesta de Grassberger con respecto al hecho de que el elevado número de elementos no es una propiedad esencial de los sistemas complejos está basada en una confusión del referente. Pues el autómata celular no es propiamente un sistema complejo, sino un *sistema ideal o modelo simple* que evidencia un alto grado de complejidad a partir de la interacción entre pocos elementos. Mientras que un sistema complejo está compuesto por una gran cantidad de elementos, los cuales se representan con variables estadísticas en el modelo matemático simple que explica su comportamiento. Pues los modelos ideales son sólo un aspecto metodológico para estas ciencias de la complejidad, no su objeto de estudio.

Por otra parte, lo que Grassberger llama estructuras son precisamente las relaciones internas que se forman en el sistema a raíz de su constante interacción. Ahora, la idea de retroalimentación y jerarquías entre estructuras es muy importante. Pues esta dice que cada estructura, al estar en constante conexión con cada una de aquellas que componen el sistema, no pueden entenderse si no se estudia al mismo tiempo la influencia del resto. Es decir, si tenemos un sistema compuesto por tres estructuras situadas a diferentes escalas, entonces tendremos que estudiar la retroalimentación que se lleva a cabo en todo el sistema para poder entender cada una de estas. Lo cual, en primera instancia, obligaría al científico de la complejidad a estudiar la totalidad del sistema simultáneamente. Imposibilitándolo a estudiar el sistema *separadamente*. Ahora, la retroalimentación es algo que no se toma en completa consideración por la física del siglo XX. Pues aunque se hable de *realimentación* en diferentes escalas -en el fenómeno de la turbulencia por ejemplo, los físicos consideran que es posible estudiar las propiedades microscópicas separadamente de las macroscópicas. Razón por la cual es posible aplicar las leyes de la mecánica clásica tanto a fenómenos a nivel macroscópico, como a nivel microscópico con la estadística de Boltzmann. Para mostrar más claramente esto, recurramos a dos ejemplos, uno para la física del siglo XX y otro para el caso de las ciencias de la complejidad. Primero, el fenómeno de la turbulencia surge cuando hay convección y realimentación en el sistema. Lo cual se ilustra con los pequeños vórtices que están dentro un mismo vórtice más grande. Ahora bien, con una ecuación matemática extraída del estudio microscópico del sistema es posible dar una explicación matemática del fenómeno macroscópico, tal como lo hizo Boltzmann en sus trabajos sobre la entropía. Sin embargo, esto no ocurre cuando estudiamos el comportamiento de un sistema complejo. Por ejemplo, una sociedad de humanos. Ya que de ser así, en primera instancia, podríamos explicar una revuelta social a partir de las leyes que rigen el comportamiento microscópico de un conjunto de individuos que queman una iglesia. Aún si suponemos que nuestros corpúsculos son personas y que nuestro sistema macroscópico es la sociedad, sería imposible aplicar las leyes de la mecánica para explicar el comportamiento de un conjunto de personas iracundas que se dirigen a quemar el palacio municipal de una ciudad. Este último ejemplo resulta muy desproporcional al anterior, pues parece que la lógica del argumento es distinta. Sin embargo, con la idea de que a los sistemas complejos subyacen un conjunto de estructuras a diferentes escalas, Grassberger está haciendo alusión a que estos sistemas, en primera instancia, no refieren estrictamente a un sistema físico no lineal, sino a otro tipo de sistemas que salen fuera del objeto de estudio de la física, tales como una sociedad o una colonia de hormigas. Pues a diferencia de un sistema físico, un sistema complejo implica más estructuras, como lo podrían ser metafóricamente en este caso lo cultural, lo económico o lo político. Con esto, las ciencias de la complejidad estarían mostrando que no es posible explicar un sistema complejo a partir de una sola ley ni de un par de leyes. Pues hay ciertas leyes que determinan el cuerpo de un ser humano, pero la relación de este con sus semejantes trae por consecuencia un gran número de *leyes* que determinan su comportamiento en sociedad. Un conjunto para la interrelación cultural, otro para lo económico y otro para lo político, etc. Además, la retroalimentación que existe entre estas estructuras hace ver que no se puede estudiar lo económico sin lo político y lo cultural, y viceversa. En este caso las tres estructuras podrían ser determinantes entre sí para dar cuenta de por qué en un país hay más feminicidios por día que en otros durante un año. O para explicar por qué dos países conspiran para destruir una ciudad.

Es por esta razón que Grassberger da una gran importancia tanto a las propiedades de jerarquía y retroalimentación, a tal grado de decir que estas sean las fuentes esenciales de la complejidad. Y en efecto, gracias a esto podemos rastrear una gran diferencia con respecto a los sistemas físicos no lineales. Recordemos que nuestra conclusión provisional mencionada tiempo antes fue que la diferencia entre sistemas físicos no lineales y sistemas complejos se encontraba principalmente en la diferencia del referente. Esta era provisional porque en principio parecía posible entender al cerebro humano o una sociedad de humanos como sistemas en los que hay un intercambio de materia y energía. Por lo cual no era posible postular una diferencia determinante con respecto a los sistemas físicos no lineales. Sin embargo, con la propiedad de jerarquización y retroalimentación, vemos la imposibilidad de reducir todas las posibles relaciones de un sistema complejo a una ley simple de la física. Pues cada estructura del sistema tiene sus propias leyes, las cuales surgen unicamente cuando tomamos en consideración la retroalimentación, es decir, todas y cada una de las posibles relaciones entre las estructuras que conforman la totalidad del sistema.

2. DEFINICIÓN DE SISTEMA COMPLEJO

De este modo parece evidente que las nociones de sistema complejo y sistema físico no lineal refieren a cosas completamente distintas. Por una parte, un sistema complejo está constituido por una gran cantidad de elementos, los cuales tienen una relación de carácter no lineal que los situá en estado de constante desequilibrio. No obstante, a partir de las propiedades de jerarquización y retroalimentación, es posible llegar a observar por momentos un comportamiento organizado, al cual se le denomina emergencia o comportamiento emergente. Los ejemplos abundan para este caso. El sistema nervioso central, a una escala macroscópica, está constituido por cierto número de elementos: cerebro, mesencéfalo, puente de Varolio, bulbo raquídeo, cerebelo y médula espinal. El cual puede dividirse por estructuras: cerebro-cerebelo, tallo encefálico y médula espinal. Cada una de estas con sus respectivos micro-sistemas compuestos por micro-organismos -neuronas. Un sistema que, no obstante, en su totalidad forma parte de un sistema más abarcante, como lo es el cuerpo humano. Compuesto por cierta cantidad de elementos. Pero el cuerpo humano, a su vez, forma parte de un sistema más abarcante, como lo es una comunidad. Pero una comunidad… El pensamiento complejo nos haría llegar con este proceder a considerar la relación entre el cerebro y la organización del universo, debido a que para su concepción filosófica todo depende de todo, literalmente. Una posibilidad que se marca por el hecho de que estos sistemas complejos están determinados por la relación con el entorno, es decir, son sistemas abiertos. No obstante, debemos recordar que la pretensión de la complejidad es de carácter científico, más no filosófico. Por lo cual estos científicos se ven constantemente en la necesidad de limitar las posibilidades de relación. Si planteamos un sistema que involucre las relaciones entre un sistema nervioso central, un cuerpo humano y el entorno que lo rodea, tendremos un sistema bien delimitado en el cual podremos observar un *comportamiento emergente.* Por ejemplo, el pensamiento o las emociones humanas. Las cuales son producto de la retroalimentación que efectuá el sistema -cuerpo humano- a diferentes escalas. Desde esta perspectiva sería difícil afirmar que el sistema nervioso esté completamente estable, debido a que su relación con el cuerpo trae por consecuencia una gran cantidad de variaciones que impiden determinar con exactitud los estados futuros de un ser humano. Pues ¿cómo saber con exactitud qué pensamientos tendremos el día de mañana o qué emociones experimentaremos siquiera en unas horas? En este sentido, somos sistemas completamente inestables, susceptibles a un cambio constante e imprevisible por afecciones de magnitud menor, como el aleteo de una mariposa. Sistemas que, no obstante, manifiestan un comportamiento auto-organizado y emergente, debido a la fuerte interacción entre los elementos y las estructuras que nos constituyen. Lo mismo sucede con otros ejemplos, como NASDAQ o NYSE, las principales bolsas de valores a nivel mundial. Pues ¿quién hubiera pensado que algo tan aparentemente inofensivo como un conjunto de prestamos facilitados por los bancos norteamericanos daría por resultado una crisis económica que afectaría a un número considerable de países en 2008? Es difícil nombrar culpables en este caso, pues no podríamos decir que fue completa irresponsabilidad de los banqueros, así como tampoco una completa irresponsabilidad por parte de sus usuarios o de un sistema neoliberal. Por esta razón, el comportamiento emergente, que en este caso se manifiesta en un crisis económica, no está regulado por un control central, sino por la gran cantidad de elementos y estructuras que conforman el sistema. Con lo cual estaríamos ilustrando otra propiedad de los sistemas complejos, a saber, una explicación que no se basa en una centralización de la consecuencia, sino una explicación que la descentraliza.

Antes de mostrar las diferencias entre sistemas complejos y sistemas físicos no lineales es menester tener muy claro cuál será la definición para llevar acabo dicha evaluación. Por una parte, Waldrop define a un sistema complejo como todo aquel sistema en el cual estén involucradas largas cadenas de componentes. Los cuales muestran un comportamiento que, al ser colectivo, no está determinado por un elemento central. Dicha colectividad desemboca en un comportamiento complejo, auto-organizado, en el cual también se involucran un procesamiento sofisticado de información y otro de adaptación al entorno. Además de que Waldrop y Wolfram comparten la idea de que este comportamiento complejo está determinado por reglas muy simples. Por otra parte, con Grassberger hemos visto que estos sistemas también están constituidos por estructuras que establecen una jerarquía. Una jerarquía que, como un todo, sólo es posible debido a una retroalimentación. De esta forma, Grassberger postula a ambas propiedades como fuentes esenciales para la complejidad. Ahora bien, a lo largo del argumento encontramos divergencias en las tres posturas. En primera instancia, la referencia de la noción de sistema complejo. Pues tanto para Wolfram como para Grassberger un sistema tal puede referir a un modelo ideal. Razón por la cual en sus definiciones se podía prescindir de la gran cantidad de elementos que componen al sistema, mostrando que un sistema complejo puede llegar a tener muy pocos elementos. Lo cual, como expliqué anteriormente, no sería adecuado en tanto confunden la herramienta con el objeto de estudio. Sin embargo, también encontramos convergencias, como lo son la retroalimentación, la auto-organización, la aparición de un comportamiento emergente y colectivo. Así como la complejidad que es producto de la gran cantidad de información que procesa el sistema, la cual condiciona de manera definitiva su comportamiento emergente. Mi propuesta es tomar las convergencias entre estas tres diferentes posturas para mostrar que no son perspectivas completamente divergentes, sino complementarias. Ya que gracias a esto es posible formular una definición más clara para la noción de sistema complejo. La cual sería la siguiente:

> Un sistema complejo es un sistema que manifiesta un comportamiento emergente auto-organizado, el cual está condicionado por una relación simbiótica[26] entre dos tipos de retroalimentación: 1) una retroalimentación interna que se lleva a cabo entre las diversas estructuras y la gran cantidad de elementos que componen al sistema, 2) una retroalimentación externa que se lleva a cabo entre el sistema y su entorno. Donde dicha relación simbiótica involucra una gran cantidad de *información* que impide, en principio, explicar a partir de un conjunto reducido de leyes *la totalidad* del sistema.

Esta definición puede parecer no adecuada por el último aspecto, donde se establece que debido a dicha relación simbiótica resulta imposible, en principio, explicar a partir de un conjunto reducido de leyes *la totalidad* del sistema. Ya que estaría contradiciendo en apariencia las propuestas de Wolfram y Mitchel con respecto a la simplicidad de las reglas que explican el comportamiento emergente. Sin embargo, aquí es menester una aclaración muy importante. Las reglas simples a las que refieren dicho autores están en relación con un comportamiento bien delimitado de un sistema. Por que si bien, el mapeo logistico es un modelo matemático simple que permite dar una explicación a la variación de habitantes tomando en cuenta el nacimiento y la muerte de cada individuo, no es un modelo que sea útil para tratar otros comportamientos del mismo sistema -sociedad humana. Es decir, no es útil para explicar por qué hay más tráfico en una ciudad cuando hay lluvia, ni cómo es que un comunidad llega a tomar la decisión de quemar una iglesia. Nuevamente parece un argumento engañoso, pues podríamos argumentar que el mapeo logístico explica un solo sistema, a saber, el sistema compuesto por una cantidad de habitantes que varia en función de su nacimiento y

26 Simbiosis o relación simbiótica es un termino usado en biología para referir a la asociación de individuos de diferentes especies en la que ambos asociados sacan provecho de la vida en común. He usado este término con la intensión de dar a entender que entre los dos tipos de retroalimentación -interna y externa- se da una asociación de este tipo.

muerte. Y que por esta razón no es posible aplicarlo para explicar por qué hay más tráfico vehicular cuando llueve en un ciudad. Ya que estamos tratando con sistemas distintos. En lo cual estoy completamente de acuerdo. Sin embargo, para cada sistema se aplican *leyes* bien diferentes, las cuales varían en función del sistema mismo. Pues hay ciertas leyes para el mercado financiero, ciertas leyes para el comportamiento cultural de una población, ciertas leyes para la emigración de una especie, etc. Con este argumento podemos entender mejor aún la diferencia importante que marca este modo de hacer ciencia con respecto a la física del siglo XX. Ya que estas ciencias son principalmente interdisciplinarias, es decir, optan por estudiar un mismo sistema no sólo desde la física, sino desde la sociología, la matemática, la biología, la filosofía, etc. Razón por la cual se oponen rotundamente al reduccionismo de la física, el cual pretende poder explicar cualquier fenómeno a partir del conjunto reducido de sus leyes. Como veremos a continuación, esta discusión permitirá esbozar qué es eso que se llama complejidad y cómo este concepto se aplica al trabajo de la física en nuestro siglo.

3. LO COMPLEJO COMO CONCEPTO CIENTÍFICO

Como se mencionó al principio, el ámbito de las ciencias de complejidad nace dentro de un ambiente académico. El instituto con más relevancia a nivel mundial en nuestros días es el Instituto Santa Fe, el cual alberga una gran cantidad de investigaciones y puntos de vista diferentes sobre lo que son dichas ciencias. No obstante, Mitchell llega a afirmar que el principal objetivo de este instituto es el siguiente: «pursue research on a large number of highly complex and interactive systems which can be properly studied only in an interdisciplinary environment» (Mitchell, 2009, X). Veamos qué quiere expresar con esta idea de que el estudio de sistemas complejos unicamente puede ser estudiado desde un ambiente interdisciplinario.

Lo que Mitchell llama ciencias de la complejidad son en realidad un conjunto de teorías científicas que tienen como objetivo principal el estudio de sistemas complejos. Las teorías científicas que dan soporte a estas ciencias son principalmente la dinámica no lineal -proveniente de la física, la teoría matemática de la comunicación, la biología y la matemática aplicada (Mitchell, 2009). Lo cual no quiere decir que para Mitchell, la teoría de la dinámica no lineal o la biología por sí mismas conformen una ciencia de la complejidad. Su pretensión es que si utilizamos a la par algunos de los términos y métodos provenientes de la biología, la teoría matemática de la información y las matemáticas aplicadas podemos constituir el cuerpo teórico y metodológico interdisciplinario que de por resultado una ciencia de la complejidad que llamamos neurociencias. No se debe caer en el error de pensar que para hacer ciencia de la complejidad desde esta perspectiva debamos proceder creado nuevas ciencias como la neurociencia o la cibernética de Wiener[27]. Si somos biólogos, matemáticos o físicos, basta con integrar términos o métodos provenientes de disciplinas ajenas a la nuestra para comenzar a estudiar lo complejo desde una perspectiva interdisciplinaria. Por ejemplo, en un articulo publicado en 2014 titulado *Can Government Be Self-Organized? A Mathematical Model of the Collective Social Organization of Ancient Teotihuacan*[28], un conjunto de investigadores del instituto C3 propone estudiar la organización política de Teotihuacán en tanto sistema complejo. Su propuesta muestra que es posible relacionar el trabajo de investigación disciplinario en arqueología a modelos matemáticos, sin que esto implique una reducción de las teorías arqueológicas sobre la organización política de Teotihuacán a modelos sencillos que sólo puedan ser útiles para su demostración en términos matemáticos. Algo que encontramos muy frecuentemente en la matemática, en tanto disciplina no aplicada. Podemos ver

27 En la actualidad la cibernética de Wiener no se considera ciencia por muchas razones que no serán tratadas en este trabajo. A pesar de esto, Wiener formuló algunas de las bases metodológicas interdisciplinarias que posteriormente pasarían a formar parte de las ciencia de la complejidad. Curiosamente esto ocurrió años antes de los avances más relevantes en el ámbito de la física del siglo XX, ya que *The human use of human beings* se publica en 1950; mientras que los trabajos de Kolmogorov, Lorenz, Prigogine y Wilson se publican respectivamente en los años 1954, 1963, 1967 y 1971. Para profundizar en este detalle que, a nivel histórico y filosófico resulta intrigante, puede consultarse la versión en castellano de la obra de Wiener en Wiener, N. (1985). *Cibernética o el control y comunicación en animales y máquinas*. Barcelona: Tusquets

28 Froese, T., Gershenson, C., Manzanilla, L. (2014). *Can Government Be Self-Organized? A Mathematical Model of the Collective Social Organization of Ancient Teotihuacan.* PLoS, Vol. 10

que la interdisciplinariedad en este caso no consiste en formar una sola disciplina a partir de otras, sino en valerse de términos y métodos provenientes de distintas disciplinas para estudiar el comportamiento de un sistema complejo, la organización política de Teotihuacán en este caso. Lo mismo pasa al observar otro tipo de investigaciones como las de Wolfram, donde para el estudio de organismos vivos no se limita unicamente a la biología o la química, sino que también hace uso de lenguajes de programación para derivar las reglas que determinan su comportamiento.

Por esta razón, Mitchell y otros autores como Rolando García (2000) o Murray Gell-Mann (2003), están de acuerdo en afirmar que uno de los aspectos metodológicos más importantes de estas ciencias es la interdisciplinariedad que se aplica en el estudio de sistemas complejos. Además de que, debido a la gran cantidad de información que involucran estos sistemas, se vuelve necesaria la implementación de la computadora para obtener los resultados de las ecuaciones no lineales que explicarían su comportamiento, además de que gracias a esto es posible graficar e ilustrar de manera virtual el probable comportamiento futuro de un sistema determinado.

No obstante, y a pesar de la claridad que se ha visto en las distintas posturas, parece haber un problema muy marcado en cuanto a la definición de lo que son las ciencias de la complejidad. Principalmente por el hecho de que no es posible determinar con exactitud y rigor una definición única de dicha noción. Waldrop define a estas ciencias del modo siguiente: «several different sciences of complexity with different notions of what complexity means» (Mitchell, 2009, 48). Como hemos visto anteriormente, una ciencia de la complejidad no es necesariamente un disciplina como lo es la física o las matemáticas por separado. Sino que pueden ser entendidas como el trabajo interdisciplinario que permiten la formulación de un modelo matemático sencillo para explicar el comportamiento de un sistema complejo bien delimitado. No obstante, como explique en el apartado anterior, un mismo sistema general, como lo es una sociedad humana, es propensa a ser estudiada por una infinidad de sistemas en los cuales se tome en consideración un comportamiento complejo bien delimitado, como en el caso de la variabilidad de habitantes en función de su nacimiento y muerte. El problema que surge aquí es, por tanto, que de acuerdo a la definición que propone Mitchell con respecto a lo que son estas ciencias, tendremos una noción de complejidad distinta para cada caso.

En un articulo muy famoso, Seth Lloyd (2001) se propone a enumera una gran cantidad de acepciones cuantitativas del término complejidad. Las cuales se agrupan en función de tres aspectos diferentes. En el primero se relaciona la noción de complejidad a la dificultad para describir un sistema. En este sentido, si la dificultad para describir la interacción entre los elementos que componen el sistema es muy grande, entonces podríamos denominarlo sistema complejo. Los rubros con los que se evaluá dicha dificultad se pueden reducir a dos: la cantidad de información y su dimensión fractal. De acuerdo con estos dos parámetros, la definición que dimos anteriormente de sistema complejo expresaría que la complejidad es producto de la gran cantidad de información involucrada, debido a la diversidad de estructuras y el elevado número de elementos que lo componen.

El segundo aspecto relaciona la complejidad con la dificultad para crear un sistema complejo. Con esto, Lloyd no está pensando precisamente en la creación de un *simple program*, sino en la cantidad de recursos necesarios para que un sistema determinado pueda manifestar un comportamiento emergente. En este sentido, pone por ejemplos de medida el tiempo, la energía y dolares. Así, un sistema puede presentar un comportamiento emergente solo para cierta cantidad de recursos, los cuales pueden estar marcados por la medida del tiempo, la energía o el dinero. Podríamos medir esto con preguntas cómo ¿cuán rápido un sistema completamente desorganizado puede formar estructuras organizadas? O ¿cuánta información o energía -según sea el caso- es necesaria para que un sistema tal alcance la auto-organización?

El tercer aspecto relaciona la complejidad con grados de organización, los cuales pueden ser determinados por dos cantidades: 1) la dificultad para describir la organización de una estructura y 2) la cantidad de información compartida entre las partes de un sistema para llevar a cabo la organización de sus estructuras. Hay una similitud muy marcada entre este y el segundo aspecto, pues ambos refieren la dificultad a la cantidad de recursos -temporal, energético, monetario- para llevar a cabo cierto tipo de comportamiento colectivo y emergente.

Las diferencias que marca Seth Lloyd entre estos tres aspectos se debe principalmente a procesos matemáticos para determinar la complejidad. En total, enumera un conjunto de 43 posibles formas de calcularla. De las cuales no hablaré aquí debido a que excedería el propósito de mi investigación[29]. Lo que importa tener en cuenta de esto es la diversidad de acepciones cuantitativas -científicas- que pueden llegar a tomar el mismo concepto.

A partir de esto se vuelve muy difícil determinar una acepción única para la noción de complejidad en tanto concepto científico. Y, por tanto, para definir con precisión lo que es un sistema complejo en los mismos términos. Ya que una forma en la que podríamos determinarla sería englobando cada uno de los tres aspectos que plantea Lloyd en uno no sólo. Además de tener en cuenta muchos otros que no aparecen en dicho articulo, ya que la lista que propone no es exhaustiva. No obstante, considero que la búsqueda de una acepción científica única para dicho término es un trabajo completamente innecesario, ya que precisamente es la diversidad de acepciones de este tipo lo que permite llevar a cabo el trabajo científico interdisciplinario de las ciencias de la complejidad. Lo que considero necesario es una aclaración de la acepción filosófica de dicho concepto ya que con respecto a esto no se tiene algo muy claro. Mi propuesta es que a raíz de lo que se ha expuesto en este capitulo y en el precedente, es posible formular una noción filosófica de complejidad con base en el concepto de *criticalidad*. Con la cual

29 Para profundizar en este tema remito al lector al siguiente articulo: Lloyd, S. (2001). *Measures of complexity: a nonexhaustive list*. IEEE Control Systems, Volume 21, 8 -9. Disponible en: http://web.mit.edu/esd.83/www/notebook/Complexity.PDF

estaríamos explicando de manera mucho más clara por qué se habla de complejidad en física si esta última responde a un trabajo estrictamente disciplinario.

4. LO COMPLEJO COMO CONCEPTO FILOSÓFICO. RELACIÓN ENTRE COMPLEJIDAD Y CRITICALIDAD

Al final de la lista que ofrece Seth Lloyd, aparece un conjunto pequeño de acepciones no cuantitativas de la complejidad, una de las cuales considero importante para rastrear la acepción filosófica de dicho término. Me refiero al término *the edge of chaos.*[30] La traducción literal de esta palabra es «al borde del caos», la cual estaría expresando que en todo sistema donde aparezca un comportamiento emergente auto-organizado -un sistema complejo- estará al borde del caos. La idea que expresa esta acepción es que la complejidad puede ser entendida como algo que se sitúa entre el orden y el caos. Dos estados que, en principio, están completamente determinados. Por ejemplo, el pensamiento es un comportamiento ordenado, así como también lo es la escritura. Lo cual es consecuencia de un desorden o estado constante de inestabilidad que se da en las interacciones de las miles de neuronas que componen nuestro sistema nervioso. Sin embargo, en dicha acepción la complejidad aparece como algo completamente indeterminado. Es decir, como ese factor que solo nos hace pensar que el orden de un comportamiento emergente está fuertemente enlazado con el constante estado de inestabilidad. Algo muy similar a lo que pasa con las estructuras disipativas, el caos de Lorenz, la turbulencia o el fenómeno crítico. Comportamientos condicionados por la criticalidad.

30 Una acepción que muchos divulgadores de las ciencias de la complejidad utilizan para explicar de manera clara la complejidad, a saber, como algo que está al borde del caos. Véase: Mitchell, M. (1993). *Complexity: the emerging science at the edge of order and chaos*. New York: Touchstone; Meckler, G., Cocho, G. (1998). Al borde del milenio: caos, crisis, complejidad. En De la Peña, L. (coord.). *Ciencias de la materia. Génesis y evolución de sus conceptos fundamentales.* Ciudad de México: FCE; Maldonado, C., Gómez, N. (2010). *El mundo de las ciencias de la complejidad: un estado del arte*. Bogotá: Universidad del Rosario; Lloyd, S. (2001). *Measures of complexity: a nonexhaustive list*. IEEE Control Systems, Volume 21, 8 -9; Coveney, P. (1992). *La flecha del tiempo: la organización del desorden*. Barcelona: Plaza & Janes.

Es debido a esta similitud que la complejidad también puede ser vista desde la ontología que se desarrolló en la física del siglo XX. Pues constantemente nos enfrentamos a sistemas determinados por reglas muy simples que, no obstante, producen un estado constante de inestabilidad, el cual da paso a la formación de organización. Es decir, sistemas inestables que no terminan por dar el paso decisivo hacia el caos. Pues el lenguaje matemático nos hace ver que aún en el desorden hay un orden bien determinado en su naturaleza, ya sea por medio de ecuaciones o por la observación directa de su comportamiento. Sistemas que están precisamente al borde del caos.

Pero aquí encuentro un problema. El lenguaje matemático en la física del siglo XX y en la física que se practica en nuestro tiempo unicamente nos hace decir que hay un orden fuertemente ligado a la inestabilidad constante de los sistemas. Sistemas que, a pesar de ser una reconstrucción de un fenómeno natural observable, tienden a una tremenda simplificación. Es decir, estos sistemas no pueden abarcar la totalidad de un comportamiento por más especifico que este pueda ser. El ejemplo más claro es el modelo de Lorenz. Como es sabido, Lorenz parte del estudio de la convección atmosférica, basándose en las ecuaciones que propusieron Claude Navier y Gabriel Stokes a finales del siglo XIX. En principio, el trabajo de estos dos físicos consistió en simplificar la convección de un liquido a un sistema sencillo que les permitiera trabajar el fenómeno en términos matemáticos. Lo cual dio por resultado tres conjuntos bastante grandes de ecuaciones matemáticas que se conocen como ecuaciones de Navier-Stokes[31]. A partir de esto, Lorenz decide simplificar aún más las ecuaciones, haciendo que el sistema se vuelva más abstracto

31 Este es un ejemplo que debe ser comparado con los resultados de Lorenz. Considero que esto es útil para entender el nivel de abstracción que alcanzó el modelo tridimensional de Lorenz.
Ecuaciones de Navier-Stokes para estudiar el comportamiento de un fluido viscoso.

$$\rho\left(\frac{\delta v_x}{\delta t}+v_x\frac{\delta v_x}{\delta x}+v_y\frac{\delta v_x}{\delta y}+v_z\frac{\delta v_x}{\delta z}\right)=\mu\left[\frac{\delta^2 v_x}{\delta x^2}+\frac{\delta^2 v_x}{\delta y^2}+\frac{\delta^2 v_x}{\delta z^2}\right]-\frac{\delta P}{\delta x}+\rho g_x$$

$$\rho\left(\frac{\delta v_y}{\delta t}+v_x\frac{\delta v_y}{\delta x}+v_y\frac{\delta v_y}{\delta y}+v_z\frac{\delta v_y}{\delta z}\right)=\mu\left[\frac{\delta^2 v_y}{\delta x^2}+\frac{\delta^2 v_y}{\delta y^2}+\frac{\delta^2 v_y}{\delta z^2}\right]-\frac{\delta P}{\delta y}+\rho g_y$$

$$\rho\left(\frac{\delta v_z}{\delta t}+v_x\frac{\delta v_z}{\delta x}+v_y\frac{\delta v_z}{\delta y}+v_z\frac{\delta v_z}{\delta z}\right)=\mu\left[\frac{\delta^2 v_z}{\delta x^2}+\frac{\delta^2 v_z}{\delta y^2}+\frac{\delta^2 v_z}{\delta z^2}\right]-\frac{\delta P}{\delta z}+\rho g_z$$

y que las conexiones que pudieron tener las ecuaciones de Navier-Stokes con la convección se perdieran casi por completo. Esto le dio a Lorenz un conjunto bastante simple de tres ecuaciones, las cuales, debido a su extrema simplificación, ya no eran útiles para referir a dicho fenómeno de la atmósfera terrestre.

Desde perspectiva, es decir, desde la *sistematización* simplificada que hemos visto desde el siglo XVII y que se extendió a la física del siglo XX y a las ciencias de la complejidad, parece que se ha venido formado una ilusión con respecto a la capacidad que tiene el lenguaje matemático para explicar la basta naturaleza. Pues, como se ha visto, el sistema es una herramienta que, sí, en principio permitió a la física del siglo XVII predecir una gran cantidad de fenómenos, lo cual además trajo la mayor parte de innovaciones técnicas y tecnológicas que tenemos hoy en día. Pero que posteriormente dejo de ser útil para predecir *con exactitud* el comportamiento de la naturaleza. Haciendo pensar que el error estaba en los límites de la mecánica newtoniana, los cuales fueron superados a partir de la estadística y la implementación de la computadora. Esto dio paso a la configuración de una nueva naturaleza, a saber, una naturaleza esencialmente desordenada, pero que, al ser vista con los ojos de la matemática y el método científico, seguía respondiendo al orden lógico de la razón. Una naturaleza que hoy en día se considera esencialmente compleja.

La pregunta clave aquí es ¿hasta qué punto las herramientas de la física y las herramientas de las ciencias de la complejidad nos permiten determinar lo que pasa en dicha naturaleza compleja? En cierto sentido, los modelos matemáticos de ambos bandos sólo nos permiten decir que en dicho punto acontecen bifurcaciones, emergencia, según las cuales el sistema puede tomar una u otra organización, uno u otro tipo de orden. Lo que pasaría después no podemos saberlo con certeza, no podemos determinarlo completamente con las matemáticas. Ya que el sistema pasa de un estado a otro en cuestión de segundos. Razón por la cual no podemos predecir con exactitud qué pasará con el clima de mañana, ni la estructura que aparecerá en la convección de Bénard. Esta indeterminación en la determinación que estarían afirmando nuestros modelos es la complejidad, el momento en el que el sistema se situá al borde del caos. Mostrando un comportamiento ordenado que puede cambiar en cualquier momento. Lo más contundente de esta conclusión es el hecho de que gracias a la propiedad compleja de los sistemas, nos enfrentamos a una naturaleza que tiene cierta capacidad para auto-organizarse. Pues con la aparición de la complejidad en el ámbito de la física, será posible afirmar por primera vez que el físico no se enfrenta a una naturaleza pasiva, la cual espera, inmutable, a que el hombre descifre sus más hondos secretos a partir del lenguaje matemático. Sino con una naturaleza activa, cambiate a cada momento, dinámica. Con esto no sólo se evidenciarían los límites de la física clásica, sino los limites de la matemática como herramienta para conocer el mundo. Pues la irrupción de la complejidad muestra que a pesar de poder determinar lo que pasa dentro de un sistema físico no lineal con cálculos matemáticos, siempre habrá algo en la naturaleza que rehuya a ser aprendido por la racionalidad del hombre: lo indeterminado, la complejidad.

Por esta razón, la complejidad a nivel filosófico podría ser definida como aquello que no puede ser completamente determinado por un pensamiento racional fundamentado en el uso de las matemáticas. Pues aunque podemos determinarla como una cantidad, en el caso del concepto científico, siempre habrá algo que escape a la razón. Pues debemos entender que la determinación de la medida se hace a raíz de valores estadísticos. Y sí, podemos pensar que por ahora esto ha permitido el desarrollo tecnológico que hace posible comunicarnos de un lado a otro del mundo sin mucho esfuerzo, con ayuda de una computadora o cualquier otro dispositivo facultado para esto. No obstante, pensar en lo complejo en tanto indeterminado, no implica un olvido de lo racional. Sino una posibilidad para expandir las posibilidades. Considero a este concepto filosófico el equivalente de la intuición de Poincaré con respecto a la mecánica celeste, a saber, como algo que pensado fuera de los límites ontológicos y metodológicos de una determinada ciencia o conjunto de teorías, pueda permitir el acaecimiento de nuevas formas de ver el mundo y nuevas maneras de relacionarnos con él.

Quisiera terminar mi ensayo con una metáfora formulada por el matemático y filósofo austriaco Ludwig Wittgenstein en sus conferencias sobre ética, donde precisamente aborda el tema de lo indeterminado. «La ética, si es algo, es sobrenatural y nuestras palabras sólo expresan hechos; así como una tasa de té contiene sólo una tasa llena de agua [inclusive si] yo vertiera en ella un galón». Lo cierto es que eso que llamamos naturaleza es un concepto con el cual referimos a algo completamente indeterminado. Pues suponiendo que hay algo fuera de nosotros -naturaleza, sería algo que no podemos delimitar completamente con un sistema ideal sin prescindir de todo aquello que está en juego. Las matemáticas son un lenguaje que permiten aproximarnos a decir que dentro de la naturaleza hay algo que no puede ser completamente aprehendido por estas. En este sentido, la ciencia se enfrenta a un problema filosófico muy grande, el cual, sin duda, podemos expresar en términos cuantitativos: complejidad.

CONCLUSIÓN

Este trabajo ha tenido como uno de sus objetivos principales mostrar 1) la evolución del modo en cómo el pensamiento científico concibe la naturaleza -distintos aspectos ontológicos- y 2) los modos de los que se ha valido para darle un sentido -distintos aspectos metodológicos. Para esto partí desde la filosofía natural presocrática, mostrado que para estos filósofos la naturaleza era algo que respondía a principios generales que eran producto de la razón. Para ellos, la razón era la herramienta para estudiar la naturaleza, algo que, sin embargo, debía estar subyugado necesariamente al comportamiento observable de la misma. Lo cual estaría representando un aspecto metodológico importante de la filosofía presocrática, a saber, la ponderación de lo empírico frente a lo racional. Aspecto heredado por la *Física* de Aristóteles, pues aunque su estudio sobre los fenómenos naturales estaba fundado principalmente en el análisis lógico del lenguaje, siempre encontramos rastros de materia en sus investigaciones.

Fue en el siglo XVII donde encontramos un cambio sustancial en el modo de concebir la naturaleza, influenciado principalmente por la concepción mecanicista del mundo desarrollada en la última etapa del Renacimiento. Ante los ojos de los filósofos de este tiempo, la naturaleza es una maquina perfectamente ordenada, cuyos mecanismos sólo pueden ser aprendidos por el lenguaje matemático. Es con Galileo y Descartes que la matemática comienza a ser la herramienta fundamental para explicar el comportamiento de la naturaleza. Apoyándose en una argumentación basada en la exactitud que trae la aplicación de dicho lenguaje para explicar y predecir el comportamiento pasado y futuro de un gran número de fenómenos naturales. Dando por resultado un giro de a la perspectiva materialista de la filosofía natural griega, pues el método matemático-experimental de Galileo y el método analítico-sintético de Descartes daban una importancia a la razón sobre el aspecto sensible.

A finales de este mismo siglo, en el año de 1687, aparece la primera teoría física publicada en *Los principios matemáticos de la filosofía natural* de Newton. En la cual será posible explicar y predecir una gran cantidad de fenómenos naturales a partir de un conjunto de tres axiomas generales. Esto trajo por consecuencia que el estudio de la naturaleza estuviera basado en dos herramientas principales: 1) L*a sistematización de fenómenos naturales* que consiste en simplificar el comportamiento observable de un fenómeno para representarlo en términos geométricos. Gracias a lo cual era posible extraer las *naturalezas simples* de un determinado fenómeno para construir un sistema compuesto por muy pocos elementos. 2) *La modelización de sistemas físicos*, la cual permitía formular modelos matemáticos para determinar el comportamiento pasado y futuro de un sistema físico. A partir de estos dos aspectos fue posible mostrar la simplicidad metodológica de la física. Primero, por la formulación de sistemas simples cuyas propiedades son la linealidad, el determinismo, la estabilidad y la reversibilidad en el tiempo. Y segundo, por la formulación de modelos lineales que, al estar en fuerte conexión con la simplicidad de los sistemas, estaban constituidos por un par de variables. Razón por la cual, además, podían ser resueltos analíticamente. Esto hizo ver que el trabajo de la física clásica de los siglos XVII, XVIII y XIX, aquella que tomaba como base definitiva la mecánica newtoniana, estaba basado en una *metodología mecanicista* en la que la naturaleza podía ser desmembrada en partes para su estudio. Además de que esto implicaba una *ontología simple*, según la cual la naturaleza es un gran sistema simple y ordenado que responde a principios matemáticos que pueden ser bien conocidos.

A finales del siglo XIX surge una intuición importante en el ámbito de la mecánica celeste desarrollada por el matemático francés Henri Poincaré. Y con ella la primera sospecha de que la naturaleza no es tan ordenada y estable como lo había pensado la física clásica. A partir de estudiar «el problema de 3 cuerpos», Poincaré se percata de que la dificultad para tratar con sistemas en los que se involucra *n* número de cuerpos -cuando $n > 3$- se encuentra en las herramientas matemáticas aplicadas por Newton, las cuales fueron pensadas unicamente para sistemas simples compuestos por un par de elementos. Ya que el método cuantitativo para lidiar con las ecuaciones diferenciales aplicado por Poincaré a dicho problema, así como la introducción de la *realimentación*, le permitió mostrar que con el paso del tiempo un sistema físico, como lo podría ser el sistema solar, podía caer en un colapso inevitable debido a la fuerte inestabilidad que se va produciendo paulatinamente por razón de la realimentación. Fue hasta la década de los cincuentas, con el surgimiento de la computadora y la estadística de Boltzmann, que las ideas de Poincaré comenzaron a tomar una fuerte impulso. Principalmente por la teoría KAM de las turbulencias y el caos determinista de Lorenz. Lorenz fue el primero en mostrar cómo es que la no linealidad de un sistema producía un estado constante de inestabilidad, dando por consecuencia el caos, el completo desorden del sistema. Con lo cual mostró que la realimentación de Poincaré tenía un claro principio matemático: la no linealidad. Otro aporte importante de Lorenz fue haber mostrado que a partir del lenguaje matemático era posible determinar el caos aparente de la atmósfera terrestre a partir de leyes muy simples, lo cual permitió, a su vez, mostrar que a la par del estado de inestabilidad de un sistema se producía un orden que conocemos como *atractor extraño.* Aunado esto con las investigaciones de Prigogine en torno a sistemas fuera del equilibrio térmico y el grupo de renormalización de Kenneth Wilson, fue posible evidenciar que la física del siglo XX responde a métodos un tanto similares a los aplicados por la física clásica. Ya que sigue teniendo como base la *sistematización* y la *modelización.* La diferencia que impide marcar una completa similitud es que la naturaleza a los ojos de estos físicos esta compuesta por una gran cantidad de elementos -corpúsculos, los cuales, al trabajar de manera colectiva, dan paso en un punto muy especifico a comportamientos organizados que están fuertemente ligados a un estado de completa inestabilidad. Es con esto que la naturaleza pasa de ser completamente ordenada y estable a ser completamente desordenada e inestable. Pero, no obstante, ordenada según principios matemáticos muy simples. La palabra que describe a la perfección esta naturaleza es la criticalidad, ya que expresa el surgimiento de orden sólo en determinado punto. Un orden que esta completamente ligado a la esencial inestabilidad de la naturaleza. Razón por la cual el estudio de «la nueva física» estaba anclado a una ontología de la criticalidad y a una metodología en la que todo fenómeno siempre implicaba algo más que la suma de sus partes.

Todo esto fundó las bases para entender de manera mucho más clara los orígenes de la complejidad. Ya que estas ciencias que estudian lo complejo tomaron gran parte de su terminología y concepción filosófica de la ontología y la metodología que se formuló en la física del siglo XX. Es justo aquí donde se vuelve visible el ultimo objetivo principal de mi ensayo, a saber, el sentido que la palabra complejidad tiene en el ámbito de la física. Para esto, primero fue necesario mostrar lo que complejidad significa en el ámbito de la complejidad. La conclusión de esta indagación arrojo una premisa importante, a saber, que la noción científica de complejidad toma una gran cantidad de acepciones cuantitativas debido a que se estudia desde un ámbito puramente interdisciplinario. Pero que dentro del campo de estudio se maneja una acepción filosófica que, claramente, no está sujeta a operaciones matemáticas. Esta fue la noción «at the edge of chaos». Gracias a esto fue posible evidenciar que la complejidad, en tanto acepción filosófica, estaría refiriendo a ese punto medio entre el orden y el caos. Razón por la cual lo sistemas complejos, así como los sistemas físicos no lineales, manifiestan *comportamientos ordenados y auto-organizados que están fuertemente ligados a un estado de inestabilidad.* Fue aquí donde se encontró la intersección de dos lineas que comúnmente se nos representa como paralelas. Pues la complejidad de las ciencias que estudian lo complejo y la criticalidad de la nueva física tienen como rasgo común este punto medio donde se manifiesta un orden ligado a un desorden.

Por último, mostré cómo es que esta acepción filosófica de complejidad en el ámbito de la física evidencia que desde el siglo XVII se ha insistido en usar el lenguaje matemático para entender el comportamiento de la naturaleza. Pero que a raíz de la emergencia de una naturaleza compleja, dicho lenguaje, así como los métodos de la física que usualmente se reúnen en el término método científico, puede representar un problema de carácter filosófico que nos haga reflexionar sobre la posición privilegiada de las matemáticas para el estudio de la naturaleza que, con seguridad, lleva vigente más de cuatro siglos.

BIBLIOGRAFÍA

Alastair, B., Wallace, D. (1990). Critical point phenomena: universal physics at large lenght scales. En Davies, P. (editor). *The new Physics*. New York: Cambridge University Press.

Anderson, P. W. (1995). *Physics: The opening to complexity*. Proc. Natl. Acad. Sci., Vol. 92, 6653-6654.

Aristóteles (2007). *Física*. Madrid: Gredos.

Badii, R. (1999). *Complexity. Hierarchical structures and scaling*. New York: Cambridge University Press.

Bak, P. (1996). *How nature works: the science of self-organized criticality.* New York: Copernicus.

Bertuglia, C. S., Vaio, F. (2005). *Nonlinearity, chaos and complexity.* New York: Oxford University Press.

Blanché, R. (1975). *Método experimental y la filosofía de la física.* México: FCE.

Bohm, D. (1959). *Causalidad y azar en la física moderna*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Briggs, J., Peat, F. D., (1991). *Espejo y reflejo: del caos al orden. Guía ilustrada de la teoría del caos y la ciencia de la totalidad.* Ciudad de México: Gedisa.

Bromberg, S., Pérez-Chavela, E. (2014). *El error que cambio la mecánica celeste. Las vicisitudes de Poincaré*. Micelánea Matemática, No. 58, 137-152.

Broer, H. W., (2003). *KAM theory: the legacy of Kolmogorov's 1954 paper*. Groningen: Department of Mathematics and computing Science.

Bunge, M. (1987). *Filosofía de la física*. España: Ariel.

Burtt, E. A. (1960). *Los fundamentos metafísicos de la ciencia moderna. Ensayo histórico y crítico.* Buenos Aires: Sudamérica.

Capek, M. (1965). *El impacto filosófico de la física contemporánea.* Madrid: Tecnos.

Carnot, S. (1987). *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas adecuadas para desarrollar esta potencia y otras notas de carácter científico*. Madrid: Alianza.

Carrillo, C (2012) Presentación. En *Matemáticas: la gramática de la naturaleza.* México: FCE.

Copleston, F. (1982). *Historia de la filosofía: De Descartes a Leibniz*. Barcelona: Ariel.

Coveney, P. (1992). *La flecha del tiempo: la organización del desorden*. Barcelona: Plaza & Janes.

Da Vinci, L. (1965) *Aforismos.* Madrid: Espasa Calpe

Descartes, R. (1989). *Discurso del método; Meditaciones metafísicas.* Ciudad de México: Espasa-Calpe.

Ellis, G. (2005). *Physics, complexity and causality.* Nature, Vol 435.

Estrada, A. (2012). *Sistemas complejos: entrevista con el Dr. Gustavo Martinez Mekler.* Revista Digital Universitaria, Vol. 13, No.4. Disponible en http://www.revista.unam.mx/vol.13/num4/art44/index.html

Frank, P. (1956). *Fundamentos de la física.* Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Froese, T., Gershenson, C., Manzanilla, L. (2014). *Can Government Be Self-Organized? A Mathematical Model of the Collective Social Organization of Ancient Teotihuacan.* PLoS, Vol. 10.

Figueroa, N. J. (2008). *Los sistemas complejos: una perspectiva contemporánea.* Revista del Centro de Investigación. Universidad La Salle, No. 30, Vol. 8, 5 – 13.

Galilei, G. (1981). El *ensayador.* Buenos Aires: Aguilar.

García, M., Fairen, V. (1980). *Estructuras disipativas. Algunas nociones básicas.* El basilisco, No. 10.

García, R. (2006). *Sistemas complejos: conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria.* Barcelona: Gedisa.

Gell-Mann, M. (2003). *El quark y el jaguar. Aventuras en lo simple y lo complejo.* Barcelona: Tusquets.

Gleick, J. (1987). *Chaos: making a new science*. New York: Penguin Books.

Grassberger, P. (2012). *Randomness, information and complexity*. Proceedings of the 5th Mexican School on Statistical Physics. México.

Guzmán, R., Cervera, J. A., (2006). *La mecánica estadística: sus origenes y sus paradojas a la luz de los escritos de Paul y Tatiana Ehrenfest*. ILUIL, vol 29, 331-356.

Hayek, N. (2001). *El caos, el orden y Poincaré. Educación matemática.* Vol. 13, No. 3, 115-120.

Hilborn, R. C. (1994). *Chaos and nonlinear dynamics.* New York: Oxford University Press.

Laks, A. (2010). *Introducción a la filosofía «presocrática»*. Madrid: Gredos.

Lederman, L., Teresi, D. (2016). *La partícula divina: si el universo es la respuesta, ¿cuál es la pregunta?* Ciudad de México: Booket.

Lloyd, S. (2001). *Measures of complexity: a nonexhaustive list*. IEEE Control Systems, Volume 21, 8 -9. Disponible en http://web.mit.edu/esd.83/www/notebook/Complexity.PDF

Londoño, M. F. (2003). *Introducción a la mecánica*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

Lorenz, E. (1963). *Deterministic nonperiodic Flow*. Journal of the atmospheric Science, Vol. 20, 131 – 141.

Luengo-González, E. (2008). La simplicidad del método científico y la complejidad de lo real. En Lanz, R., Reynoso, R. (coords.). *Ni una sola ciencia, ni una sola* *técnica, debate abierto sobre misión ciencia*, tomo III. Caracas: Ministerio de Ciencia y Tecnología de Venezuela.

Maldonado, C., Gómez, N. (2010). *El mundo de las ciencias de la complejidad: un estado del arte*. Bogotá: Universidad del Rosario.

Maza, D. M. (1995). *Transición al caos en convección de Bénard-Marangoni con pequeña relación de aspecto.* Pamplona: Universidad de Navarra.

Meckler, G., Cocho, G. (1998). Al borde del milenio: caos, crisis, complejidad. En De la Peña, L. (coord.). *Ciencias de la materia. Génesis y evolución de sus conceptos fundamentales.* Ciudad de México: FCE.

Mitchell, M. (1993). *Complexity: the emerging science at the edge of order and chaos*. New York: Touchstone.

Mitchell, M. (2009). *Complexity: a guided tour.* New York: Oxfrod.

Nagel, E. (2006). *La estructura de la ciencia: problemas de la lógica de la investigación científica*. Bercelona: Paidós.

Newton, I. (1987). *Principios matemáticos de la filosofía natural*. Madrid: Tecnos

Noreña, F. (1995). *Física de emergencia*. México: Pangea.

Ocampo, R. J. (). *Galileo y el surgimiento de la ciencia moderna: la geometría de la naturaleza y la idea del divino arquitecto*. Cali: Universidad Autónoma de Occidente.

Poincaré, H. (1889). Sur le probleme des trois corps et les equations de la dynamique. Disponible en http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.2/241/241_Article.pdf?sequence=7&isAllowed=y

Prigogine, I. (1983). *¿Tan sólo una ilusión?*. Barcelona: Tusquets.

Prigogine, I. (1987). *Exploring complexity.* European Journal of Operational Research, No. 30, 97-103.

Prigogine, I. (1999). *Las leyes del caos.* Barcelona: Crítica.

Prigogine, I., Stengers, I. (1984). *Order out of chaos: man's new dialogue with nature*. USA: Bantam Book.

Quesada, A. M., *Realimentación y osciladores*. España: FUOC.

Ramilingam, B., Jones, H., Reba, T., Young, J. (2008). *Exploring the science of complexity: Ideas and implications for development and humanitarian efforts*. London: Overseas Development Institute.

Riofrío, W. (2005). *¿Complejidad o simplicidad?: en busca de la unidad de la ciencia*. A Parte Réi, No. 16, 1 – 19.

Sametband, M. J. (1999). *Entre el orden y el caos. La complejidad*. Ciudad de México: FCE.

Sancho, J. M. (2004). *Introducción a los fenómenos críticos y al grupo de renormalización*. Barcelona: Universidad de Barcelona.

Sanjuán, M. A. (2007). *La física al encuentro de la complejidad.* ARBOR Ciencia, Pensamiento y cultura, 889-898.

Simard, E. (1961). *Naturaleza y alcance del método científico*. Madrid: Gredos.

Solé, R. (2011). *Phase transitions*. New Jersey: Princeton University Press.

Soria, J. L. (1992). *Teoría de fenómenos críticos y transiciones de fase desde un punto de vista riguroso.* Revista Mexicana de Física, No. 4, 643-663.

Stevens, M. (2009). *Complexity Theory*. Oxford Handbook of the Philosophy of Science.

Strogatz, S. H. (1994). *Nonlinear dynamics and chaos.* New York: Perseus Books.

Taborsky, P. (2014). *Is complexity a scientific Concept?* Studies in History and Philosophy of Science, No. 47, 51 – 59.

Tarride, M. (1995). *Complejidad y sistemas complejo*. Historia, Ciencias, Saúde – Manguinhos II, No. 1, 44-66.

Taylor, J. R. (2003). *Mecánica clásica*. Barcelona: Reverté.

Weaver, W. (1948). *Science and complexity*. New York: American Scientisr, 36: 536.

Wilson, K. (1974). *The renormalization group and the ε expansion*. Amsterdam: North-Holland Publishing Company.

Wilson, K. (1982). *The renormalization group and critical phenomena.* New York: Cornell University.

Wimsatt, W. C. (1972). *Complexity and organization*. Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association, Vol. 1972, 67 – 86. Disponible en http://www.jstor.org/stable/3698961

Wittgesntein, L. (1989). *Conferencia sobre ética.* Barcelona: Paidos.

Wolfram, S. (1959). *A new kind of science*. Canada: Wolfram Media, Inc.

Wolfram, S. (1983). *Cellular automata*. Los Alamos Science, Vol. 9, 2 - 21